

短波红外探测器的发展与应用 (特邀)

马 旭^{1,2}, 李云雪^{1,2}, 黄润宇^{1,2}, 叶海峰^{1,2}, 侯泽鹏^{1,2}, 史衍丽^{1,2*}

(1. 云南大学 物理与天文学院, 云南 昆明 650091;
2. 云南大学 云南省量子信息重点实验室, 云南 昆明 650091)

摘 要: 短波红外波段作为“大气透过窗口”之一,探测器工作在该波段能获得目标更多的辐射能量。另外,短波红外对近室温目标的探测成像类似于可见光的反射式成像,一方面拥有中长波红外探测缺少细节分辨能力,另一方面具有穿透烟雾进行成像等可见光探测不具备的能力。随着短波红外探测器在军事、民用领域的广泛应用,对短波红外探测器的性能、成本提出了更高的要求,InGaAs 探测器由于高达约 70%~90% 的量子效率、室温下约 $8000\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 的高迁移率,以及高灵敏度、高速响应、低成本的应用优势,是目前短波红外探测器的最佳选择。为了进一步扩展波长、提高分辨率、降低成本,发展了基于 II 类超晶格、胶体量子点、硅基材料等新材料和新工艺的短波红外探测器。文中对美国、法国、以色列、中国等国内外短波红外探测器的发展现状进行了归纳整理,对有关短波红外探测器的新材料和新工艺进行了报道,最后探讨分析了短波红外探测器的未来发展趋势。

关键词: 短波红外; 红外探测器; InGaAs; 胶体量子点; II 类超晶格; 硅基短波红外探测器
中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210897

Development and application of short wavelength infrared detectors (*Invited*)

Ma Xu^{1,2}, Li Yunxue^{1,2}, Huang Runyu^{1,2}, Ye Haifeng^{1,2}, Hou Zepeng^{1,2}, Shi Yanli^{1,2*}

(1. School of Physics and Astronomy, Yunnan University, Kunming 650091, China;
2. Key Lab of Quantum Information of Yunnan Province, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: Short wavelength infrared band (SWIR) as one of the "atmospheric windows", the detectors working in this wavelength range can receive more radiation energy from the target and gain higher sensitivity. In addition, SWIR detecting and imaging is based on the reflection imaging from the target similar to visible light, consequently it is typical of the distinct details resolution ability that medium and long wavelength infrared imaging lacks. With the wide application of SWIR detectors in military and civil area, higher requirements are put forward on the both performance and cost of SWIR detectors. InGaAs detectors is one of best choice as SWIR detectors since it has high sensitivity, high-speed response and low cost due to its quantum efficiency up to 70%-90% and high mobility close to $8000\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ at room temperature. However, in order to further expand the wavelength, improve the imaging resolution, and reduce the cost, SWIR detectors based on new materials and new mechanism such as type-II superlattices, colloidal quantum dots and Si-based materials have been developed. This paper firstly summarized the advancement of InGaAs SWIR detectors from the main foreign and domestic

收稿日期:2021-11-25; 修订日期:2022-01-11

基金项目:云南省重大科技专项 (2018 ZI002)

作者简介:马旭,男,硕士生,主要从事半导体光电器件物理与器件方面的研究。

通讯作者:史衍丽,女,研究员,博士生导师,主要从事半导体光电器件物理与器件方面的研究。

research institutions including Sensors Unlimited Incorporation (SUI), FLIR, Teledyne Technologies, Teledyne Princeton Instruments of the United States, Sofradir and New Imaging Technologies (NIT) of France, Semiconductor Device (SCD) of Israel, Xenics of Belgium, etc. Then the new materials and new technology of SWIR detectors were introduced. Finally, the further development tendency of SWIR detectors was proposed.

Key words: SWIR; infrared detector; InGaAs; colloidal quantum dots; type-II superlattices; Si-based SWIR

0 引言

红外线指波长在 0.78~1000 μm 的电磁波, 大气中对红外辐射吸收较少的三个波段称为“大气窗口”, 军事应用上称为短波红外、中波红外和长波红外^[1]。短波红外 (SWIR) 波长在 1~3 μm, 主要利用日光、月

光、星光等反射成像, 与可见光成像原理类似, 在分辨率和细节上与黑白可见光图像相当, 这使得目标易于识别, 并在微光夜视、精确制导、空间遥感、近红外光谱分析、工业控制、生物医疗和航天航空等领域^[2-5]获得广泛的应用。表 1 所示为短波红外的成像特点及应用领域^[6]。

表 1 SWIR 的成像特点及应用领域
Tab.1 Imaging characteristics and application fields of SWIR

Imaging characteristics	Application fields
Based on room temperature target reflection imaging, clear details	Night vision imaging application
Fingerprint characteristics for substance identification	Spectral imaging
Eye safety laser 155X nm detection and positioning	Optical fiber detection, satellite internet
Thermal radiation imaging of high temperature targets	Missile plume detection
Strong ability to wear fog, haze, sand, smoke and glass	Imaging detection under harsh conditions
Camouflage recognition, wig, fake beard recognition	Anti-terrorism application
The water has strong absorption of short waves, and the water target has a large contrast	Maritime border security, early warning
Operation at or near room temperature, small size, light weight, low energy consumption	Apply to the cell-phone's imaging

目前用于制造短波红外探测器的材料主要有 HgCdTe、InGaAs、PbS、PtSi 等, 随着 InGaAs 材料生长和芯片制作工艺的不断成熟, 相较于其他材料, 采用 InGaAs 材料制备的探测器芯片具有灵敏度高、可室温操作、体积小等优点, 在短波红外探测器的选择中脱颖而出。经过近 40 多年的发展, 百万像素高性能、高密度 InGaAs 大面阵焦平面阵列技术在欧美先进国家以及日本已实现产业化, 最小像元中心距达到 5 μm; 国内目前的 InGaAs 产品规格主要是 15 μm 中心距 640×512, 10 μm、15 μm 中心距 1 280×1024 正在陆续推出。为了进一步减小像元中心距, 提高分辨率和阵列规格, 美国、中国和加拿大的相关研究机构正在研究中心距 5 μm 以下、百万像素或以上的胶体量子点 (Colloidal Quantum Dot, CQD) 短波红外探测器技术; 为了充分利用现有的大面积硅 (Si) 基集成电路技术, 提高集成度, 发展了直接集成在 12 in(1 in=2.54 cm)

Si 读出电路上的 GeSi SWIR 探测器技术; 为了进一步扩展波长, 利用二类超晶格材料响应波长的可调谐性, 推出了截止波长 2.0 μm 以上的二类超晶格 (T2SLs) 短波红外探测器。文中对以上短波红外探测器的发展技术进行了归纳总结, 探讨分析了今后短波红外探测器的发展方向。

1 国外短波红外探测器的发展现状

1.1 美国

美国 Sensors Unlimited Incorporation(SUI) 在全球 SWIR 市场具有领先地位, 陆续推出了功能强大的面阵、线阵扫描 SWIR 产品。该公司的技术路线为 InGaAs 线阵一般采用正照明, 读出电路 (ROIC) 与每个像素间采用引线键合方式实现电学连接; 二维面阵采用背照明, InGaAs 阵列与 ROIC 之间则采用 In 柱倒装焊方式连接^[7]。技术优势为高量子效率和高灵敏

度,响应波长包括标准的 0.9~1.7 μm ,并向可见光方向拓展至 0.5 μm ,其中在 0.95 μm 处的量子效率可达 90%,图 1 为 SUI 产品量子效率图^[8]。美国 FLIR 公司报道了 A6260 系列短波红外热像仪^[9],配备 640×512 规格的 InGaAs 探测器,最大帧频为 180 Hz,适合抓拍高速场景,可测量 400 $^{\circ}\text{C}$ 以上的温度,适合于烤箱、熔炉等需要高温测量的应用;后续推出的 Tau SWIR 热像仪^[10],利用相关双采样技术 (CDS) 有效降低噪声,结构紧凑,易于集成。Teledyne Princeton Instruments 公司的 NIRvana:LN 相机,拥有同类相机中最低的暗电流噪声,为 10 $\text{e}^-/\text{pixel}/\text{s}$ @-190 $^{\circ}\text{C}$,积分时间可达一个小时,非常适合天文观测^[11];同时,NIRvana 系列还可以用于量子点荧光实验、纳米管成像。麻省理工学院的 Bawendi 实验室^[12],在 2017 年利用 NIRvana 640,实现了清晰的小鼠体内成像;2021 年,Jana Zaumseil

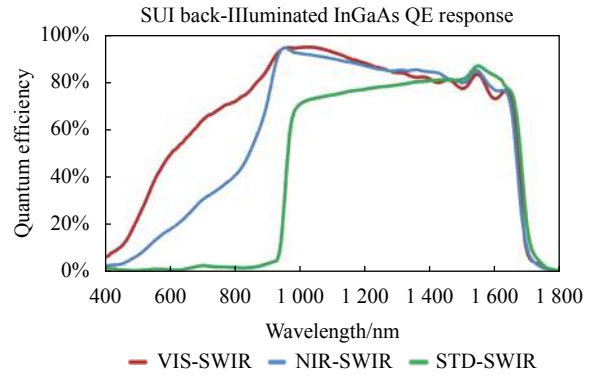


图 1 SUI 产品量子效率图

Fig.1 Quantum efficiency of the SUI product

教授的团队^[13],使用 NIRvana 640 成功对单壁碳纳米管进行成像。表 2 给出了 SUI 公司面阵和线阵器件的典型性能指标,同时汇总了美国部分 SWIR 公司的最新发展情况。

表 2 美国部分 SWIR 公司的最新发展情况

Tab.2 The latest development of SWIR companies in the US

Corporate name	Format	Spectral range/ μm	Pitch/ μm	Performance
SUI				The plane array frame frequency is 60 Hz Quantum efficiency (QE) $\geq 65\%$ Pixel operability $\geq 99\%$ The detectivity in 60 Hz mode is $2.8 \times 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ ROIC noise is 25 e^- Dynamic range is 1850:1
	640×512	0.7-1.7	12.5	
	1280×1024	0.5-1.7	12.5	
	1024×1	0.8-1.7	25	Linear array (2048×1) maximum frame frequency is 12 kHz QE>70% Pixel operability is 99% Dynamic range (Low gain mode) >2 100:1
Teledyne Princeton Instruments	640×512	0.9-1.7	20	NIRvana HS: QE>80% (1-1.6 μm) Frame frequency is 250 Hz Dark current is 500 $\text{e}^-/\text{pixel} \cdot \text{s}^{-1}$ @ -55 $^{\circ}\text{C}$ ROIC noise<60 e^-
	1024×1	0.8-1.7 0-2.2	25	Linear array QE>85% ROIC noise is 400 e^- Minimum dark current is 5.7 $\text{ke}^-/\text{pixel} \cdot \text{s}^{-1}$
Princeton Infrared Technologies	1280×1024	0.4-1.7	12	QE>75% (1-1.6 μm) ROIC noise<45 e^- Maximum frame frequency is 100 Hz Dynamic range $\geq 3\ 000:1$
	1024×1	0.4-1.7	12.5	Linear array ROIC noise<75 e^- Dynamic range>6 000:1
FILR	640×512	0.9-1.7 0.6-1.7	15	QE>60% Maximum frame frequency is 180 Hz Pixel operability is 99.8%
	1920×1080	0.9-1.7	10	ROIC noise<30 e^- (High gain mode) Frame frequency is 16 outputs $\geq 120 \text{ Hz}$
Teledyne Technologies	512×1 1024×1	0.95-1.7	25 12.5	Frame frequency is 49 kHz QE (typical) is 66% Dark current<5 pA

1.2 法国

作为红外探测器全球领先的制造商—Sofradir, 自 2006 年开始研究高品质的 InGaAs 材料, 于 2007 年推出 CACTUS 320 InGaAs 阵列, 像素规格为 320×256, 像元中心距为 30 μm, 采用电容反馈跨阻放大器 (CTIA) 结构的商业 ROIC, 以及半导体制冷器 (Thermo Electric Cooler, TEC) 进行温度冷却。于 2012 年开始生产 CACTUS 640 组件, 该组件具有 25 μm 中心距的 640×512 InGaAs 阵列^[14]。CACTUS 320 和 CACTUS 640 组件专为 0.9~1.7 μm(可拓展到可见光波段)的夜天光低通量辐射探测设计。

由于 CACTUS 系列组件的成功应用, Sofradir 获得了法国国防部的支持, 开发像元中心距 15 μm 的 640×512 InGaAs 组件, 并于 2013 年底开始生产 SNAKE-SW 系列^[15]产品, 响应波段覆盖 0.9~1.7 μm 波段, 阵列规格为 640×512, 像元尺寸为 15 μm, 最大帧频为 300 Hz, 量子效率为 70%, ROIC 噪声为 30 e⁻, 在 0.2 V 偏压下

暗电流为 30 fA, 阵列可操作性为 99.9%, 未校正的不均匀性为 4%, 使用 TEC 制冷器。2014 年 10 月, Sofradir 公司推出了像元中心距 15 μm 的 1024×1024 可见光-短波红外 NGP 探测器^[16-17], 响应波长为 0.35~2.5 μm, 材料为 HgCdTe, 采用抗反射涂层后, 峰值量子效率高达 98%, NGP 探测器被选择用于 Sentinel-5 任务, 计划于 2021 年搭载 MetOp-SG 卫星升空, 用于从极地轨道上对地球大气层进行监测。Sofradir 于 2017 年 6 月 15 日宣布, 正在开发第一款 2048×2048、15 μm 中心距的短波红外探测器^[18], 并在量子效率、暗电流、积分时间和噪声方面进一步提高和优化, 更好地应用于天文观测。

法国 New Imaging Technologies (NIT) 对 SWIR 技术进行了大量的研发投入, 采用对数读出的方式, 推出了动态范围高达 120 dB 的 InGaAs 探测器, 覆盖 0.9~1.7 μm 波段, 表 3 为 NIT SWIR 产品的主要性能指标^[19]。

表 3 NIT SWIR 产品的研发情况

Tab.3 The development of NIT SWIR products

Product name	Format	Pitch/μm	Performance
WiDy SWIR 320	320×256	25	Frame frequency is 200 Hz
			QE is 70%
			Dynamic range is 120 dB
WiDy SenS 640	640×512	15	Frame frequency is 230 Hz
			QE>70%
			Maximum dynamic range is 120 dB
SenS 1280	1280×1024	10	Frame frequency is 60 Hz
			QE>85%
			Maximum dynamic range is 61 dB
			Dark current is 50 ke ⁻ ·pixel ⁻¹ ·s ⁻¹ ROIC noise<30 e ⁻
HiPe SenS 640	640×512	15	Frame frequency is 230 Hz
			QE is 90%
			Dark current<1.5 ke ⁻ ·pixel ⁻¹ ·s ⁻¹ @20 °C
			ROIC noise<30 e ⁻
LiSa SWIR 2048	2048×1	7.5	Frame frequency is 60 kHz
			QE>85%
			Minimum ROIC noise is 250 e ⁻

1.3 以色列

以色列 Semi Conductor Devices (SCD) 公司是一家处于国际领先地位的红外探测器供应商。SCD 凭借 40 多年的研发和生产经验, 掌握了半导体芯片制造工艺技术, 液相外延 (Liquid Phase Epitaxy, LPE) 和

分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 薄膜生长技术, 超大规模集成电路设计技术, 杜瓦瓶真空设计及装配技术, 辐照建模及测试技术^[20], 可提供基于 InSb、MCT(Mercury Cadmium Telluride)、InGaAs、T2SLs 等材料的探测器, 其产品覆盖整个红外波段。SCD 在

SWIR 领域内也取得了瞩目的成绩, Cardinal 产品系列响应波长为 0.6~1.7 μm , InGaAs 焦平面阵列含像元中心距 15 μm (640×512)、像元中心距 10 μm (1 280×1 024) 两种规格, 帧频高达 350 Hz (640×512 规格) 和 150 Hz (1 280×1 024), 采用高信噪比的全数字化 ROIC (基于 0.18 μm CMOS 工艺), 表 4 为 Cardinal 系列的性能情况^[21-22]。

表 4 Cardinal 系列的性能情况

Tab.4 The performance of Cardinal series

Product name	Cardinal 640	Cardinal 1 280
Format	640×512	1 280×1 024
Pitch/ μm	15	10
QE	>80%	>80%
Dark current/density @280 K	<1.5 nA/cm ²	<1 fA
Frame frequency/Hz	350	150
Pixel operability	≥99.5%	>99.5%

1.4 比利时

2000 年 Xenics 在比利时成立, 是欧洲 SWIR 市场的领军者。该公司利用 InGaAs 探测技术制造出 XS-1.7-640/XS-1.7-320 系列红外探测器, 其响应波段为 0.9~1.7 μm , 探测器阵列 640×512, 像元中心距为 20 μm /30 μm , 有效像元>99%, 帧频为 20~90 Hz。2013 年欧

洲空间局发射的 Proda-V 卫星上使用的是由 Xenics 公司提供的 Xlin-1.7-3000 型 InGaAs 行扫描型探测器, 由三个独立的具有 1 024 个像元的 InGaAs 子阵列构成, 像元中心距为 25 μm , 光谱响应范围 0.9~1.7 μm , 可以提供宽度为 2 200 km、中心分辨率为 100 m 的地球环境信息, 便于人们掌握关于地球上农作物与植被的变化情况, 以及其他保护生物圈的重要参数信息^[23]。

Xenics 公司持续进行 SWIR 技术创新。2016 年以来推出了一系列高性价比、高灵敏度、低暗电流、可用于长积分时间的 SWIR 产品, 适合于控制成本的批量市场应用, 如激光光斑分析、色选、回收市场及半导体检测市场, 对短波红外夜视安防等应用也是较好的选择。其中, Bobcat 带门控系列相机针对积分时间短的短波红外研发、激光门控成像、热物体或快速移动物体的成像 (如灯泡或涡轮叶片检查)、测量系统需要同步脉冲激光的场景应用等; Manx R 系列帧频高达 256 kHz, 超过全球任何其他 SWIR 线扫描家族的相机。Xenics 公司也报道了基于 T2SLs 的拓展短波红外 (Extended SWIR) 产品, 阵列规模为 32×256, 响应波长为 1~2.35 μm , 像元尺寸为 30 μm , 帧频为 344 Hz, 动态范围为 70 dB, 读出噪声为 150 e⁻, 可操作性>99%。表 5 为 Xenics 推出的 InGaAs 短波红外产品的性能参数^[24]。

表 5 Xenics SWIR 产品

Tab.5 Xenics SWIR products

Product name	Format	Spectral range/ μm	Pitch/ μm	Performance
Bobcat-320-Gated	320×256	0.9-1.7	20	Frame frequency is 400 Hz, QE is 80%
				Dynamic range is 61 dB, ROIC noise is 60 e ⁻
				Dark current is 190 ke ⁻ ·pixel ⁻¹ ·s ⁻¹ @200 mV, 288 K
Bobcat-640	640×512	0.5-1.7	20	Frame frequency is 100 Hz, QE is 80%
				Dynamic range is 60 dB, ROIC noise is 120 e ⁻
				Dark current<100 ke ⁻ ·pixel ⁻¹ ·s ⁻¹ @150 mV, 288 K
Xeva-320	320×256	0.5-1.7	30	Frame frequency is 344 Hz, QE is 80%
				Dynamic range is 70 dB, ROIC noise is 150 e ⁻
				Dark current<10 ke ⁻ ·pixel ⁻¹ ·s ⁻¹ @223 K
Cheetah-640	640×512	0.5-1.7	20	Frame frequency is 1 730 Hz, QE is 80%
				Dynamic range is 60 dB, ROIC noise is 120 e ⁻
				Dark current<100 ke ⁻ ·pixel ⁻¹ ·s ⁻¹ @150 mV, 288 K
Manx R	2 048×1	0.9-1.7	12.5	Frame frequency is 256 kHz, QE is 80%
				Dynamic range is 69 dB, ROIC noise is 350 e ⁻
				Dark current<1.6 Me ⁻ ·pixel ⁻¹ ·s ⁻¹ @100 mV, 293 K

1.5 日本

传统的 SWIR 探测器使用钢柱倒装互联技术连接 InGaAs 光电二极管和 Si 读出电路, 如图 2(a) 所示, 探测器像素之间必需保证一定的间距, 以避免钢柱之间的连接和短路, 存在缩小像素间距的制造难度。日本索尼公司研发的 SWIR 技术, InGaAs 层和 Si 层通过铜-铜互联^[25], 如图 2(b) 所示, 这种方式让探测

器尺寸更紧凑、也更牢固, 像素之间的中心距达到 $5\text{ }\mu\text{m}$; 目前推出的两个产品型号有效像素为 656×520 、 1296×1032 , 最大帧频分别为 250 Hz 和 130 Hz , 在 $0.4\sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$ 波段的量子效率 $>60\%$, 峰值量子效率接近 99% , 如图 3 所示。索尼公司的 SWIR 产品分辨率高、响应速度快, 但器件灵敏度和噪声未见报道。

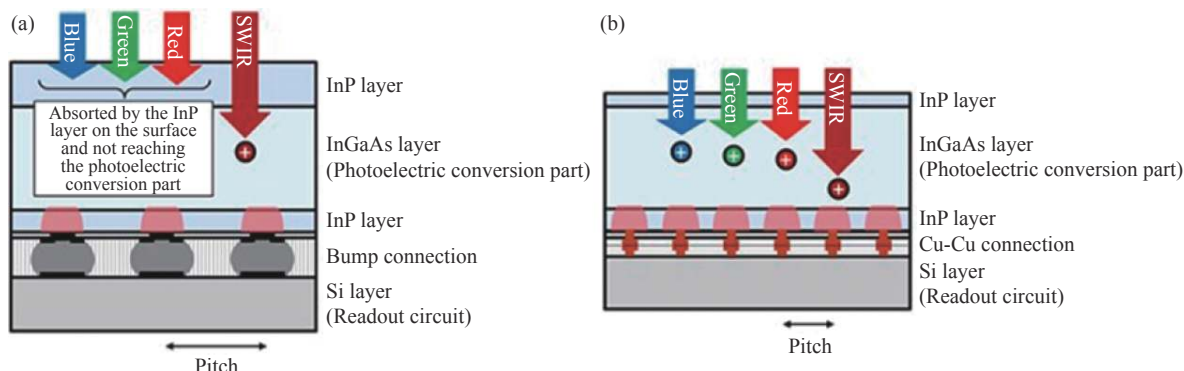


图 2 传统的钢柱倒装互联技术 (a) 与索尼的铜铜互联技术 (b)

Fig.2 Traditional flip chip bonding technology via indium (a) and SONY's copper-copper connection technology (b)

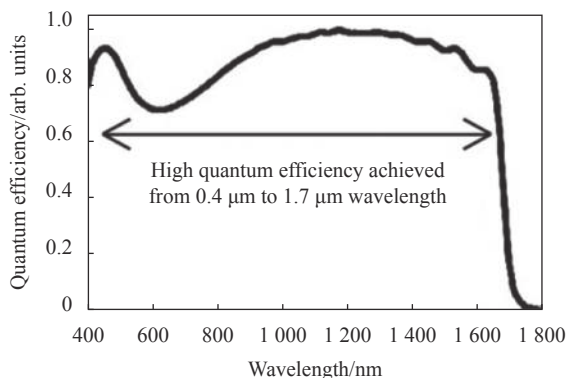


图 3 索尼产品的量子效率图

Fig.3 Quantum efficiency of SONY products

日本滨松集团^[26]也在生产 SWIR 产品, 其线阵为 1024×1 、 512×1 等规格, 覆盖 $0.95\sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$ 波段, 像元中心距为 $12.5\text{ }\mu\text{m}$, 帧频可达 40 kHz 。面阵规格为 640×512 , 覆盖 $0.9\sim 1.5\text{ }\mu\text{m}$ 波段, 像元中心距为 $20\text{ }\mu\text{m}$, 帧频为 7.2 f/s , 量子效率为 60% , $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下暗电流为 $130\text{ e}^{-}\cdot\text{pixel}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 读出噪声为 500 e^{-} 。

2 国内短波红外探测器的发展现状

在国内, 许多科研单位和企业一直着眼于短波红

外探测器的研究, 并获得了长足的发展和应用。目前, 国内 640×512 规格 InGaAs 短波红外探测器制造技术已趋于成熟稳定, 其产品性能指标逼近国际领先水平, 同时全国产化的 1280×1024 、 2560×2048 规格探测器也在陆续推出。以中国科学院上海技术物理研究所为代表的短波红外探测器研制单位围绕航天遥感工程、激光光斑监测、工业应用等需求, 以扩大面阵规模、提高像元密度、优化探测器性能为方向, 实现了从单元、线列到多种规格大面阵的跨代发展, 器件响应光谱从常规波段分别向可见光波段 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 、长波 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 拓展, 像元间距从 $30\text{ }\mu\text{m}$ 发展到 $10\text{ }\mu\text{m}$, 器件暗电流水平不断降低, 探测器性能指标不断提高^[27]。在新型多功能 InGaAs 探测器方面, 发展了一种宽谱段响应的 InGaAs 探测器, 通过片上集成微纳陷光结构, 实现了可见波段拓展和较高的量子效率; 发展了片上集成亚波长金属光栅的 InGaAs 偏振探测器, 消光比大于 $20:1$ ^[28]。表 6 为目前已见报道的国内部分科研单位、企业进行 InGaAs 短波红外探测器研发生产的情况。

表 6 国内部分科研单位短波红外探测器的研发情况

Tab.6 The research and development of short wavelength infrared detectors in some domestic research institutes

Research unit	Format	Spectral range/ μm	Performance
Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences	1 280 $\times$ 1 024	0.9-1.7	Blind pixel rate<1% Response non-uniformity is 6.4% Dark current density>5 nA/cm ² @300 K Peak detectivity>5 $\times$ 10 ¹² cm $\cdot$ Hz ^{1/2} ·W ⁻¹ @300 K
	1 024 $\times$ 32	0.9-2.2	Blind pixel rate is 0.44%, Response non-uniformity is 5.7%, QE is 81.7% (1.6 μm) Peak detectivity is 2.5 $\times$ 10 ¹² cm $\cdot$ Hz ^{1/2} ·W ⁻¹ @200 K
	1 024 $\times$ 512	0.95-2.5	Peak detectivity is 8 $\times$ 10 ¹¹ cm $\cdot$ Hz ^{1/2} ·W ⁻¹ @200 K Response non-uniformity is 6% Frame frequency>250 Hz
	2 560 $\times$ 2 048	0.9-1.7	Blind pixel rate is 0.26% Response non-uniformity is 3.81% Peak detectivity is 1.11 $\times$ 10 ¹³ cm $\cdot$ Hz ^{1/2} ·W ⁻¹
Guohui Optoelectronics	640 $\times$ 512	0.9-1.7	Pixel pitch is 15 μm , QE $\geq$ 65% Detectivity $\geq$ 5 $\times$ 10 ¹² cm $\cdot$ Hz ^{1/2} ·W ⁻¹ ROIC noise is 50 e ⁻ (High gain mode) Dynamic range is 120 dB (Logarithmic mode) Response non-uniformity<3% Pixel operability>99.5% Minimum frame frequency is 340 Hz
	1 280 $\times$ 1 024	0.9-1.7	Pixel pitch is 15 μm Dark current density is 2.25 nA/cm ² @25 $^{\circ}\text{C}$ Detectivity is 1.1 $\times$ 10 ¹³ cm $\cdot$ Hz ^{1/2} ·W ⁻¹ ROIC noise is 48 e ⁻ QE is 88%@1.55 μm Pixel operability>99% ^[29]
The 44 th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation	320 $\times$ 240	1.0-1.7	Peak detectivity is 6.7 $\times$ 10 ¹² cm $\cdot$ Hz ^{1/2} ·W ⁻¹ QE>65%
	256 $\times$ 1	0.9-1.7	Peak detectivity is 1.2 $\times$ 10 ¹² cm $\cdot$ Hz ^{1/2} ·W ⁻¹ Response non-uniformity is 3.87%
		0.9-2.4	Peak detectivity is 3.25 $\times$ 10 ¹⁰ cm $\cdot$ Hz ^{1/2} ·W ⁻¹ Response non-uniformity is 11%

3 新材料、新机理 SWIR 探测器

InGaAs 短波红外焦平面探测器的发展已进入瓶颈期,采用钢柱互连的技术,短时间内进一步降低成本、提高分辨率存在困难。随着性能优良的新材料不断涌现,寻找成本更低的替代材料,提升制作工艺,成为 SWIR 探测器发展的关键。

3.1 CQD SWIR 探测器

胶体量子点 (CQD) 是一种零维纳米材料,由于量子限制效应,其光学吸收光谱可以通过控制物理尺寸来调节;CQD SWIR 探测器不需要复杂的外延技术,通过旋涂法等溶液加工技术,室温下便可在 CMOS 读出电路上生长 CQD,生产效率远高于其他 SWIR 探测器。

目前在 SWIR 波段,主要是采用 PbX (X=S, Se) CQD 进行探测。2015 年,RTI International (RTI)^[30] 公司开

发了基于 PbS CQD 的 SWIR 探测器,二极管结构如图 4 所示,该器件的核心是利用 PbS-C60 异质结,提供有效的电荷分离和载流子提取。测试器件的线列大小为 320 $\times$ 1,在 -10 mV 偏压下,室温暗电流密度为 6.8 nA/cm²,在 0.8 μm 处量子效率为 23%。2017 年

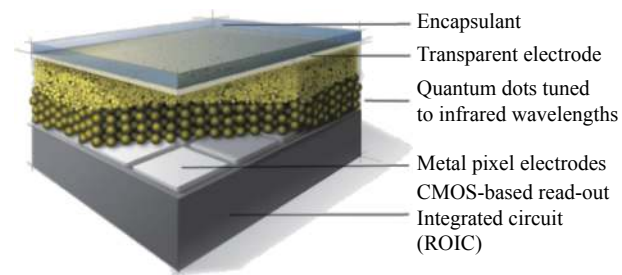


图 4 RTI 二极管的结构图

Fig.4 Structure of RTI diode

L.Barrow 等^[31]利用 PbS CQD 设计出阵列大小为 1280×960 , 像元中心距为 $1.5 \mu\text{m}$ 的 SWIR 探测器, 暗电流 4.27 nA/cm^2 , 读出噪声为 19 e^- , 在 $0.94 \mu\text{m}$ 处的外量子效率 (External Quantum Efficiency, EQE) 为 31%。

2018 年, RTI 成立 SWIR Vision Systems 公司, 推出了首个商业化 CQD SWIR 产品—Acuros CQD SWIR 相机^[32], 像素规格有 640×512 、 1280×1024 、 1920×1080 , 响应波长为 $0.4 \sim 1.7 \mu\text{m}/0.35 \sim 2 \mu\text{m}$, 像元间距为 $15 \mu\text{m}$, 最大帧频可达 270 Hz , 像素可操作性为 99.5%, 动态范围为 70 dB ($0.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$), 量子效率 $< 30\%$ ($0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$), 成像效果如图 5 所示。

Acuros CQD SWIR camera images

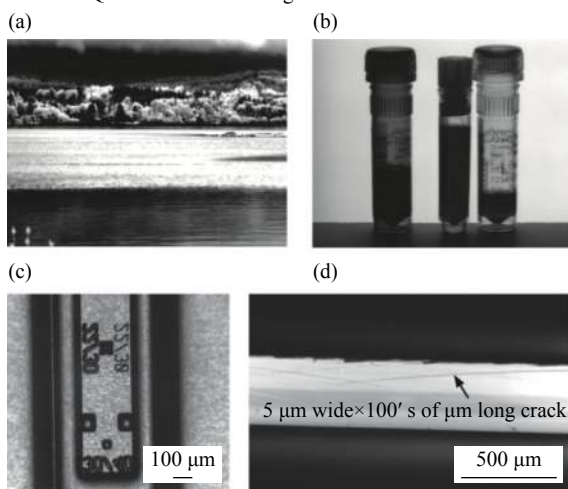


图 5 (a) 海上降雨成像; (b) 药瓶标签成像; (c) 晶片对准标记; (d) 半导体裂缝检测

Fig.5 (a) Sea rainfall imaging; (b) Drug bottle label imaging; (c) Chip alignment marking; (d) Semiconductor crack detection

比利时微电子研究中心 (Interuniversity Microelectronics Centre, IMEC), 2020 年推出了 $1.82 \mu\text{m}$ 小像元中心距的高分辨率 SWIR 探测器^[33]。IMEC 通过将 CQD 薄膜光电探测器与 Si-CMOS 读出电路单片集成, 采用 130 nm CMOS 技术, 探测器采用薄吸收层, 通过调整 PbS CQD 的尺寸大小, 峰值波长可达 $2 \mu\text{m}$ 以上, 在峰值 SWIR 波长处, EQE 为 18%, 并可进一步提升到 50%。

2021 年 3 月, 加拿大多伦多大学 Edward H. Sargent 等^[34]设计了一种新的合成路径制备 SWIR CQD, 使用 PbS 量子点材料, 通过多次钝化, 获得了稳定的高质量薄膜, 在 $1.55 \mu\text{m}$ 处的 EQE 高达 80%, 响应率为 $1 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$, 探测率为 $8 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。目前, PbS CQD 的 EQE 最高可达 80%, 但是报道的暗电流非常高或者没有报道, 需要在不增加暗电流的同时提高 EQE。2021 年 6 月, IMEC 的 V. Pejović 等^[35]利用 PbS CQD 与 CMOS ROIC 集成, 并采用 3 T 像素读出结构代替 InGaAs 探测器常用的 CTIA 结构, 如图 6 所示。设计出了阵列大小为 768×512 , 像元间距为 $5 \mu\text{m}$ 的 SWIR 探测器, 在 $1.45 \mu\text{m}$ 处的 EQE 为 40%, 暗电流密度为 $3.3 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, 读出噪声为 25 e^- 。HgY (Y=S、Te、Se) CQD 常用于中波红外 (MWIR) 波段, 利用 CQD 的禁带宽度可调性, 通过改变 HgY CQD 的尺寸大小, 也可实现 SWIR 波段的响应。2021 年, 北京理工大学唐鑫等^[36]采用背靠背的方式, 垂直堆叠两个不同尺寸的 HgTe CQDs 光电二极管, 以 100 kHz 的频率在 SWIR ($< 2.5 \mu\text{m}$) 和 MWIR ($3 \sim 5 \mu\text{m}$) 之间快速切换, 低温下探测率 $> 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

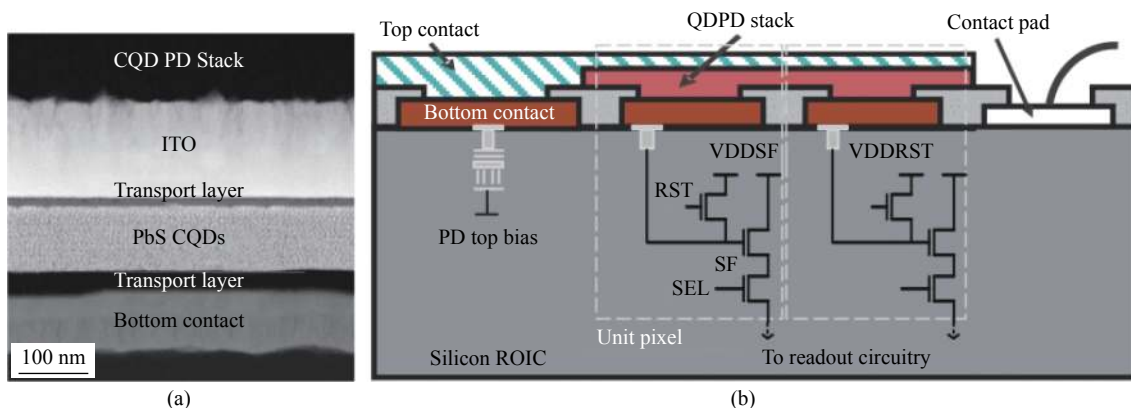


图 6 (a) CQD 结构的 TEM 成像; (b) ROIC 的集成

Fig.6 (a) TEM imaging of CQD structure; (b) ROIC integration

3.2 T2SLs SWIR 探测器

由于 InGaAs 晶格常数需要与 InP 衬底匹配, 导致大多数 SWIR 探测器截止波长 $< 1.7 \mu\text{m}$ 。随着各类需求的与日俱增, 将截止波长拓展至 $2.5 \mu\text{m}$ 成为目前的关注热点之一。利用 InAs/GaSb II 类超晶格 (T2SLs) 带隙可调的特性, 通过改变 InAs 和 GaSb 层的厚度, InAs/GaSb T2SLs 材料具有非常宽的光吸收响应范围 ($3\sim 30 \mu\text{m}$)。目前, T2SLs SWIR 探测器在材料和器件结构设计、材料外延生长技术、焦平面器件制备和读出电路设计技术等方面取得了令人瞩目的进展, 被认为是一种用于制造高性能红外光电探测器的优选材料。

自 1977 年 Sai-halasaz 等^[37] 首先提出可以采用 InGaAs/GaAsSb 超晶格材料进行 SWIR 探测, II 类超晶格 (T2SLs) 探测器开始了快速发展。2013 年西北工业大学 M.Razeghi 等^[38] 采用背靠背的 PNP 结构, 制备出基于 InAs/GaSb/AlSb II 类超晶格的 320×256 SWIR/MWIR 双波段探测器。2015 年, 西北工业大学^[39] 采用分子束外延技术在 GaSb (100) 衬底上生长出了高表面质量的 InAs/GaSb 超晶格 SWIR 材料, 在 300 K 时截止波长为 $3.05 \mu\text{m}$, 通过阳极氟化和硫化锌复合钝化方法, 在 -0.5 V 偏压下, 暗电流密度低至 $3.14\times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, 器件性能优良。

2017 年, 中国科学院半导体研究所牛智川研究团队^[40] 报道了基于 InAs/GaSb 320×256 T2SLs 双波段探测器, 器件采用 NPN 结构, 以 GaSb 为衬底, 图 7 为 SWIR 和 MWIR 波段的热成像和响应度图。77 K 温度下器件的截止波长分别为 $2.9 \mu\text{m}$ 和 $5.1 \mu\text{m}$, 在无偏压、无抗反射涂层的条件下, 在 $1.7 \mu\text{m}$ 处的峰值量子效率为 37%; 在 130 mV 偏压下, 在 $3.2 \mu\text{m}$ 处的峰值量子效率为 28%。在 $2.5 \mu\text{m}$ 、 $3.2 \mu\text{m}$ 处的探测率分别 $1.51\times 10^{12} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ 、 $6.11\times 10^{11} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ 。短波波段和中波波段的噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 平均值分别为 107 mK、487 mK。以色列耶路撒冷希伯来大学的 Y.Uliel 等^[41] 报道了基于 InGaAs/GaSb T2SLs 的 SWIR 探测器, 截止波长为 $2.4 \mu\text{m}$, 采用台面型 PIN 光电二极管结构, 在 300 K 和 230 K 温度下的暗电流密度分别为 1.5 mA/cm^2 和 $32 \mu\text{A/cm}^2$, 通过选择性扩散工艺, 暗电流分别降低到 1.2 mA/cm^2 和 $12 \mu\text{A/cm}^2$; 在 300 K 温度下, $2.18 \mu\text{m}$ 处的量子效率可达 40%, 在 $2 \mu\text{m}$ 处的

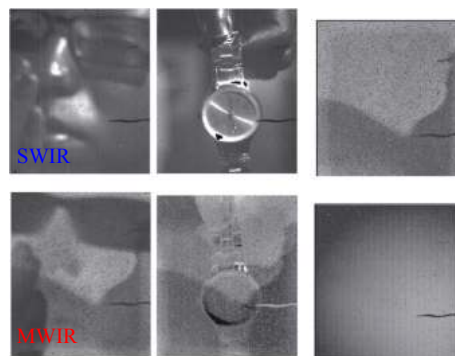


图 7 在 77 K 温度下, 短波、中波的热成像和响应度

Fig.7 Thermal imaging and responsivity of short and medium wavelength at 77 K

探测率为 $1.7\times 10^{10} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ 。

2019 年, 朱旭波等^[42] 采用 MBE 生长出性能优良的 PNP 结构 T2SLs 材料, 采用硫化与 SiO_2 复合钝化, 制备出了基于 InAs/GaSb 320×256 双色焦平面探测器。该探测器的短波响应波段为 $1.7\sim 3 \mu\text{m}$, 中波为 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 。双波段峰值探测率达到中波 $\geq 3.7\times 10^{11} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$, 短波 $2.2\times 10^{11} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ 。响应非均匀性中波为 9.9%, 短波为 9.7%。中波有效像元率为 98.46%, 短波为 98.06%。

2020 年, Stephenson 等^[43] 以 InP 为衬底, 设计了基于 InGaAs/GaAsSb T2SLs 的拓展短波红外探测器, 截止波长为 $2.6\sim 2.9 \mu\text{m}$ 。在 -1 V 偏压下, 在 295 K 和 235 K 温度下的暗电流密度分别为 1.4 mA/cm^2 、 $13 \mu\text{A/cm}^2$, 但是 EQE 较低, 仅为几个百分点, 需要进一步优化。

2021 年, 上海理工大学量子器件实验室^[44] 报道了基于 InP 的拓展 SWIR 探测器, 采用半导体异质结构, 以 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{GaAs}_{0.5}\text{Sb}_{0.5}$ T2SLs 作为集电极和基极层, 覆盖 $1\sim 2.7 \mu\text{m}$ 的短波红外波段, 在 -0.8 V 偏压、 $2 \mu\text{m}$ 处, 室温下的响应度为 86 A/W , 探测率为 $6.59\times 10^{10} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$, 暗电流密度为 4.57 A/cm^2 。

3.3 Si 基 SWIR 探测器

2016 年, 中国科学院半导体物理研究所^[45] 制造了基于 Si 的 GeSn PIN 短波红外探测器, 利用 MBE 将高品质的 $\text{Ge}_{0.92}\text{Sn}_{0.08}$ 薄膜生长在 n 型 Si (100) 衬底上, 截止波长为 $2.3 \mu\text{m}$ 。施加 1 V 反向偏压, 室温下响应度为 93 mA/W , 暗电流为 $171 \mu\text{A}$ 。

2020 年, 美国 Stratio 公司^[46] 发布了全球首款基于锗并兼容智能手机的 BeyonSense SWIR 相机。其

核心技术为,以低成本的 Ge 材料代替传统 InGaAs,采用选择性外延 Ge 生长技术与成熟的 Si 基 CMOS 读出电路技术相结合;同时采用双用双芯片封装(传感器与 ROIC)技术,相比于目前成熟的单片集成技术方案具有更大的制造灵活性。BeyonSense Pre 拥有 11×8 pixel,覆盖 $0.4 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 波段,最大帧频为 20 Hz。

2021 年,德国于利希研究中心^[47]通过两个 p-i-n 光电二极管的垂直集成获得了一种新型双波段 GeSn/Ge/Si 探测器,可以通过改变偏置电压极性在近红外 ($0.75 \sim 1.4 \mu\text{m}$) 和短波红外 ($1.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$) 两个波段之间切换光谱响应,极大地拓宽了操作的光谱范围。在 $1.1 \sim 1.55 \mu\text{m}$ 范围内施加 -0.15 V 偏压,探测率超过 $1 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$,在 $1.2 \mu\text{m}$ 处探测率最大,为 $2 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$;在 $1.6 \sim 2.25 \mu\text{m}$ 范围内施加 $+0.25 \text{ V}$ 偏压,探测率超过 $3 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$,在 $1.9 \mu\text{m}$ 处探测率最大,为 $4 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。此外,以 GeSi 光子技术为核心的光程研创^[48](Artlux)发布,基于 12 in Si 的 CMOS 工艺结合高分辨率 GeSi 像素制造技术,推出了 GeSi SWIR 两维/三维双模 (2 D/3 D) 感知芯片,在单个芯片上同时具备两维和三维(含深度信息)探测成像的功能,实现了 SWIR 波段从 2 D 成像技术到 3 D 成像技术的巨大突破。另外,该技术利用与 Si CMOS 技术完全兼容的 GeSi 探测芯片单片集成技术,解决了目前 SWIR 成像像素只能在 6 in 以下晶圆产线制造的问题,直接在 12 in 晶圆产线进行量产制造,必将带来显著的成本优势,并进一步促进 SWIR 技术在机器视觉、半导体工艺检测、工业质量管控、激光雷达等应用场景的应用。

4 短波红外探测器的发展趋势

InGaAs 探测器凭借其优异性能成为 SWIR 探测器的首选,但是其各项性能已经接近极限,在进一步缩小像素间距、提高分辨率、扩大阵列规格方面遇到瓶颈,且面临可见光波段灵敏度低,成本高昂导致民用领域应用受限等问题。未来短波红外探测器的发展将会集中在以下几个方面:(1)拓展波长 SWIR 探测器。随着响应波长的延长,能获得目标更丰富的信息,获得更广阔的应用市场,对响应波长扩展到 $2 \mu\text{m}$ 以上的探测需求与日俱增,同时也面临着降低暗电流、提高信噪比的技术问题。(2)使用低维材料制备

SWIR 探测器。胶体量子点 (CQD) 因其易于溶液加工、制造成本低、尺寸可调的特性,可以制造出更小像元间距、更高分辨率、成本更低的 SWIR 探测器,部分性能已经优于 InGaAs SWIR 探测器,成为下一代 SWIR 探测器的材料选择。进一步的研究工作包括在提升外量子效率与降低暗电流方面进行突破。(3)与 Si 基 CMOS 技术兼容的 GeX、SiX SWIR 技术,将成为一大研究热点。借助成熟的、高集成度的 Si 工艺,实现 SWIR 探测器,是提高集成度、实现功能多样化、提高成品率、降低成本的最佳选择,将开启 SWIR 技术的新挑战和发展应用。(4)借助于单像素成像等技术实现低成本 SWIR 相机,单像素成像技术不需要复杂的芯片工艺,探测器只有一个点像素,但结合计算成像、深度学习等技术,可实现低成本高分辨率的短波红外成像。

5 结 论

文中归纳整理了美国、法国、以色列、比利时和日本等国外主要机构的 InGaAs 短波红外探测器的最新研究成果及国内的发展现状,报道了有关短波红外探测器的新材料和新工艺技术,提出了现阶段短波红外探测器的发展趋势。国外的产品器件性能好,市场竞争力强,具备读出噪声、暗电流小,量子效率高等优势;国产短波红外探测器目前正向更大面阵(百万像素以上),更小像元尺寸(像元间距 $10 \mu\text{m}$ 以下)发展,器件性能还有优化空间。短波红外探测器在军事和民用领域都有着广阔的应用需求,前者重在需要更高灵敏度、更高像元密度、更大面阵的产品;而民用领域的应用则需要成本低廉、集成简单的产品。应根据军民两用市场需求,加强创新,优化制备工艺,加快新材料的研发,研制出性能优越、竞争力强,同时又兼具国产特色,凝聚中国智慧的短波红外探测器。

参考文献:

- [1] Bai Tingzhu. Principle and Technology of Photoelectric Imaging [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006. (in Chinese)
- [2] Richards A A. Emerging applications for high-performance near-infrared imagers[C]//Proceedings of SPIE, 2002, 4710(1): 450-455.

- [3] Ettenherg M H, Lange M J, O'Grady M T, et al. Room temperature 640×512 pixel near-infrared InGaAs focal plane array[C]//Proceedings of SPIE, 2000, 4028: 201-207.
- [4] Hoffman A, Sessler T, Rosbeck J, et al. Megapixel InGaAs arrays for low background applications[C]//Proceedings of SPIE, 2005, 5783: 32-38.
- [5] Lange D A, Vu P, Wang S, et al. 6000-element infrared focal plane array for reconnaissance applications[C]//Proceedings of SPIE, 1999, 3751: 1-14.
- [6] 国惠光电. 了解短波红外[EB/OL].[2021-11-25].http://ghoptocom.sx8.lcweb01.cn/index.php?p=news_list&c_id=49&lanmu=5.
- [7] Zhang Weifeng, Zhang Ruolan, Zhao Lusheng, et al. Development progress of InGaAs short-wave infrared focal plane arrays [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(6): 361-365. (in Chinese)
- [8] Sensors Unlimited. Mini-SWIR 1280JSX High Definition Camera[EB/OL].[2021-11-25].<https://www.sensorsinc.com/products/detail/mini-swir-jsx-snapshot-camera-60-fps>.
- [9] Teledyne Flir. FLIR A6260[EB/OL].[2021-11-25].<https://www.flir.cn/products/a6260/>.
- [10] Teledyne Flir. Tau™ SWIR[EB/OL].[2021-11-25].<https://www.flir.cn/products/tau-swir/>.
- [11] Keal L. Breakthrough instruments and products: Scientific imaging in the short-wave infrared with the NIRvana family of SWIR cameras [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(7): 079501.
- [12] Bruns O, Bischof T, Harris D, et al. Next-generation in vivo optical imaging with short-wave infrared quantum dots [J]. *Nature Biomedical Engineering*, 2017, 1: 0056.
- [13] Settele S, Berger F J, Lindenthal S, et al. Synthetic control over the binding configuration of luminescent sp³-defects in single-walled carbon nanotubes [J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 2119.
- [14] Rouvié A, Huet O, Hamard S, et al. SWIR InGaAs focal plane arrays in France[C]//Proceedings of SPIE, 2013, 8704: 870403.
- [15] Lynred. SNAKE SW[DB/OL].[2021-11-25].<https://www.lynred.com/index.php/products/snake-sw>.
- [16] Pidancier P, Madet K, Chorier P, et al. Sofradir detectors for MTG FCI application[C]//International Conference on Space Optics, 2017, 10563: 105631V.
- [17] Sierk B, Bezy J L, Caron J, et al. The Copernicus Sentinel-5 mission for operational atmospheric monitoring: status and developments[C]//Sensors, Systems, & Next-generation Satellites XVIII, 2014, 9241: 92410H.
- [18] 张小华. 法国Sofradir公司设计出其空间观测项目中的第一个超大型15 μm间距近红外探测器[J]. 红外, 2017, 38(9): 47.
- [19] New Imaging Technologies. New imaging technologies[EB/OL].[2021-11-25]. <https://www.new-imaging-technologies.com>.
- [20] Li Junbin, Li Dongsheng, Yang Yulin, et al. Research progress of III-V infrared detector from Israel SCD company [J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(10): 936-945. (in Chinese)
- [21] Semi Conductor Devices. Cardinal 640 SWIR detector[EB/OL].[2021-11-25].https://www.scd.co.il/wp-content/uploads/2019/07/Cardinal_640_brochure.pdf.
- [22] Semi Conductor Devices. Cardinal 1280 high sensitivity SWIR detector[EB/OL].[2021-11-25].<https://www.scd.co.il/products/cardinal-1280/>.
- [23] 岳楨干. 比利时Xenics公司研制Proba-V卫星载InGaAs短波红外探测器[J]. 红外, 2013, 34(7): 19.
- [24] Xenics. Short-wave-infrared-imagers [EB/OL].[2021-11-25]. <https://www.xenics.com/short-wave-infrared-imagers/>.
- [25] 红外芯闻. 索尼发布工业设备用SWIR图像传感器, 采用5微米像素尺寸[EB/OL].[2021-11-25]. <https://mp.weixin.qq.com/s/jwvVQHucZPAY5gnzPs-5sA>.
- [26] Hamamatsu. InGaAs camera[EB/OL].[2021-11-25]. <http://www.hamamatsu.com.cn/product/12370/12419/19331/list.html>.
- [27] Shao Xiumei, Gong Haimei, Li Xue, et al. Development of high performance short-wave infrared InGaAs focal plane detectors [J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(8): 629-635. (in Chinese)
- [28] Li Xue, Shao Xiumei, Li Tao, et al. Developments of short-wave infrared InGaAs focal plane detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 0103006. (in Chinese)
- [29] Zhang J X, Wang W, Li Z B, et al. Development of a high performance 1280×1024 InGaAs SWIR FPA detector at room temperature [J]. *Front Phys*, 2021, 9: 678192.
- [30] Klem E, Gregory C, Temple D, et al. PbS colloidal quantum dot photodiodes for low-cost SWIR sensing[C]//Proceedings of SPIE, 2015, 9451: 945104.
- [31] Barrow L, Bock N, Bouvier A, et al. A QuantumFilm based QuadVGA 1.5 μm pixel image sensor with over 40% QE at 940 nm for actively illuminated applications[C]//Proc of IISW, 2017.
- [32] SWIR. Acuros® SWIR camera[EB/OL].[2021-11-25]. <https://www.swirvisionsystems.com/acuros-swir-camera/>.
- [33] Imec. Imec presents a thin-film short-wave-infrared image sensor with sub-2 μm pixel pitch[EB/OL].[2021-11-25]. <https://www.imec-int.com/en/press/imec-presents-thin-film-short-wave-infrared-image-sensor-sub-2mm-pixel-pitch>.
- [34] Vafaie M, Fan J Z, Najarian A M, et al. Colloidal quantum dot photodetectors with 10-ns response time and 80% quantum

- efficiency at 1, 550 nm [J]. *Matter*, 2021, 4(3): 1042-1053.
- [35] Pejovic V, Lee J, Georgitzikis E, et al. Thin-film photodetector optimization for high-performance short-wavelength infrared imaging [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2021, 42(8): 1196-1199.
- [36] Tang X, Hao Q. Towards dual-band short-wave and mid-wave infrared focal plane array by using colloidal quantum dots[C]//Seventh Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications, 2021, 11763: 1176300.
- [37] Sai-Halasaz G A, Tsu R, Esaki L. A new semiconductor superlattice [J]. *Applied Physics Letters*, 1977, 30(12): 651-653.
- [38] Razeghi M, Haddadi A, Hoang A M, et al. High-performance bias-selectable dual-band mid-/long-wavelength infrared photodetectors and focal plane arrays based on InAs/GaSb Type-II superlattices[C]//Infrared Technology and Applications, 2013, 8704: 87040S.
- [39] Zhang L X, Sun W G, Lv Y Q, et al. Anodic fluoride passivation of Type II InAs/GaSb superlattice for short-wavelength infrared detector [J]. *Applied Physics A*, 2015, 118(2): 547-551.
- [40] Sun Yaoyao, Han Xi, Hao Hongyue, et al. 320 × 256 short-/mid-Wavelength dual-color infrared focal plane arrays based on Type-II InAs/GaSb superlattice [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 82: 140-143.
- [41] 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.
- [42] Zhu Xubo, Peng Zhenyu, Cao Xiancun, et al. Mid-/short-wavelength dual-color infrared focal plane arrays based on type-II InAs/GaSb superlattice [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(11): 1104001. (in Chinese)
- [43] Stephenson C A, Klem J F, Olesberg J T, et al. Extended SWIR InGaAs/GaAsSb Type-II superlattice photodetector on InP[C]//Infrared Technology and Applications XLVI, 2020, 11407: 114070A.
- [44] Xie Zongheng, Deng Zhuo, Huang Jian, et al. InP-based extended-short wave infrared heterojunction phototransistor [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(14): 4814-4819.
- [45] Cong Hui, Xue Chunlai, Zheng Jun, et al. Silicon based GeSn p-i-n photodetector for SWIR detection [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(5): 1-6.
- [46] Stratio. About Stratio[EB/OL].[2021-11-25].<https://stratiotechology.com/>.
- [47] Simola E T, Kiyek V, Ballabio A, et al. CMOS-compatible bias-tunable dual-band detector based on GeSn/Ge/Si coupled photodiodes [J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(7): 2166-2173.
- [48] 红外芯闻. Artilux短波红外双模感知芯片导入量产, 开启 3D传感新世界[EB/OL].[2021-11-25].<https://mp.weixin.qq.com/s/dqJY22lmYyAQH7g2m9EdLQ>.