

短波红外 InGaAs 焦平面探测器研究进展

李 雪^{1,2}, 邵秀梅^{1,2}, 李 涛^{1,2}, 程吉凤^{1,2}, 黄张成^{1,2}, 黄松垒^{1,2},
杨 波^{1,2}, 顾 溢^{1,2}, 马英杰^{1,2}, 龚海梅^{1,2*}, 方家熊^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 短波红外 InGaAs 焦平面探测器具有探测率高、均匀性好等优点, 在航天遥感、微光夜视、医疗诊断等领域具有广泛应用。近十年来, 中国科学院上海技术物理研究所围绕高灵敏度常规波长(0.9~1.7 μm)InGaAs 焦平面、延伸波长(1.0~2.5 μm)InGaAs 焦平面以及新型多功能 InGaAs 探测器取得了良好进展。在常规波长 InGaAs 焦平面方面, 从 256 \times 1、512 \times 1 元等线列向 320 \times 256、640 \times 512、4 000 \times 128、1 280 \times 1 024 元等多种规格面阵方面发展, 室温暗电流密度优于 5 nA/cm², 室温峰值探测率优于 5 \times 10¹² cm \cdot Hz^{1/2}/W。在延伸波长 InGaAs 探测器方面, 发展了高光谱高帧频 1 024 \times 256、1 024 \times 512 元焦平面, 暗电流密度优于 10 nA/cm² 和峰值探测率优于 5 \times 10¹¹ cm \cdot Hz^{1/2}/W@200 K。在新型多功能 InGaAs 探测器方面, 发展了一种可见近红外响应的 InGaAs 探测器, 通过具有阻挡层结构的新型外延材料和片上集成微纳陷光结构, 实现 0.4~1.7 μm 宽谱段响应, 研制的 320 \times 256、640 \times 512 焦平面组件的量子效率达到 40%@0.5 μm 、80%@0.8 μm 、90%@1.55 μm ; 发展了片上集成亚波长金属光栅的 InGaAs 偏振探测器, 其在 0 $^\circ$ 、45 $^\circ$ 、90 $^\circ$ 、135 $^\circ$ 的消光比优于 20:1。

关键词: InGaAs; 焦平面; 短波红外; 暗电流; 探测率

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0103006

Developments of short-wave infrared InGaAs focal plane detectors

Li Xue^{1,2}, Shao Xiumei^{1,2}, Li Tao^{1,2}, Cheng Jifeng^{1,2}, Huang Zhangcheng^{1,2}, Huang Songlei^{1,2}, Yang bo^{1,2},
Gu Yi^{1,2}, Ma Yingjie^{1,2}, Gong Haimei^{1,2*}, Fang Jiexiong^{1,2}

(1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: SWIR InGaAs FPAs are widely applied to space remote sensing, low light level night vision and medical diagnostics due to the high detectivity and uniformity. Highly sensitive NIR InGaAs FPAs with response covering from 0.9 μm to 1.7 μm , the extended SWIR InGaAs FPAs with the cutoff wavelengths from 1.0 μm to 2.5 μm , and other novel SWIR InGaAs FPAs have been studied respectively at Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy of Sciences over the past ten years. NIR InGaAs FPAs have developed from some typical linear 256 \times 1, 512 \times 1 FPAs to 2D format 320 \times 256, 640 \times 512, 4 000 \times 128 and 1 280 \times 1 024 FPAs. Typically, the dark current density was about

收稿日期:2019-10-11; 修订日期:2019-11-21

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2012CB619200)

作者简介:李雪(1976-),女,研究员,博士生导师,主要从事红外探测器方面的研究。Email: lixue@mail.sitp.ac

通讯作者:龚海梅(1965-),男,研究员,博士生导师,主要从事红外探测器方面的研究。Email: hmgong@mail.sitp.ac.cn

5 nA/cm² and the peak detectivity was superior to 5×10¹² cm·Hz^{1/2}/W at room temperature. 2D format 1 024×256, 1 024×512 extended wavelength InGaAs FPAs with high frame rate were also developed for the hyperspectral applications at SITP. The dark current density drops to 10 nA/cm² and peak detectivity was over 5×10¹² cm·Hz^{1/2}/W at 200 K. By using novel epitaxial materials and the light trapping structures, the visible-NIR InGaAs FPAs for wavelength band of 0.4–1.7 μm have also been developed. The as-prepared 320×256, 640×512 InGaAs FPAs were obtained with quantum efficiency superior to 40% @0.5 μm, 80% @0.8 μm and 90% @1.55 μm. For polarimetric detecting, InGaAs devices integrated with sub-wavelength metal grating of different angles (0°, 45°, 90°, 135°) have been developed, which exhibit the extinction ratio of greater than 20:1.

Key words: InGaAs; FPAs; SWIR; dark current; detectivity

0 引言

短波红外探测广泛应用于航天遥感、微光夜视、医疗诊断、农业工业、安全监控等领域^[1-2]。基于 III-V 族 InP/InGaAs 材料体系短波红外 InGaAs 探测器,具高探测率、高均匀性、高稳定性等特点,是发展小型化、低功耗和高可靠性短波红外光电系统的理想选择之一。

近年来,国内外研究机构在短波红外 InGaAs 焦平面探测领域开展了大量相关研究。2015 年,美国 UTC Aerospace Systems 公司推出了像元尺寸为 12.5 μm×12.5 μm 的 640×512 型短波红外 InGaAs 成像机芯,重量小于 45 g,功耗小于 1.5 W^[3]。2018 年,该公司报道了规模 4 000×4 000 的近红外 InGaAs 焦平面探测器及机芯,中心距为 5 μm,相机系统的量子效率>70%。

美国 Teledyne Technologies 公司开展了中心距为 15、10 μm 的 1 280×1 024 元面阵研究^[4-5]。此外,英国的 Photonic Science Limited, 法国 Sofradir 公司,以色列的 SCD 公司、比利时的 XenICs 公司等也长期致力于 InGaAs 焦平面探测器的研制和应用^[6]。

中国科学院上海技术物理研究所围绕航天遥感工程的应用需求,在高灵敏度常规波长(0.9~1.7 μm) InGaAs 焦平面、延伸波长(1.0~2.5 μm) InGaAs 焦平面以及新型多功能 InGaAs 探测器取得了良好进展^[7-11]。在常规波长 InGaAs 焦平面方面,从 256×1、512×1 元等线列向 320×256、640×512、4 000×128、1 280×1 024 元等多种规格面阵方面发展,探测率和暗电流水平不断提高。在延伸波长 InGaAs 探测器方面,

发展高光谱高帧频 1 024×256、1 024×512 元焦平面。在新型多功能 InGaAs 探测器方面,发展了一种宽波段响应的 InGaAs 探测器,通过具有阻挡层结构的新型外延材料和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,提高偏振器件的消光比。

我国自主研制的短波红外 InGaAs 焦平面探测器已经进入了航天工程应用中,至今在轨稳定运行两年多,在对地观测、气象预报中发挥了重要作用。文中综述了十余年来,中国科学院上海技术物理研究所短波红外 InGaAs 焦平面探测器研究进展。

1 常规波长 0.9~1.7 μm 近红外 InGaAs 焦平面探测器

1.1 大面积 InP 基 InGaAs 探测材料

基于 InP 基多层异质 InGaAs 探测材料体系,采用分子束外延技术开展了大面积均匀、低掺杂浓度吸收层 InGaAs 外延材料。所生长的 In_{0.53}Ga_{0.47}As 外延材料本底电子浓度约 1E15 cm⁻³,室温迁移率大于 10 000 cm²/Vs。图 1 为所生长的 InGaAs 材料本底浓度和迁移率与国际报道的对比,可以看出基本与国际报道相当^[12-19]。

为了获得高性能大规模焦平面,对外延材料的均匀性进行了研究。通过提升材料生长表面的温度均匀性,提高了外延材料参数的均匀性^[20]。采用 X 射线衍射对 4 in(1 in=2.54 cm) InGaAs 外延材料的 In 组分进行了表征,非均匀性控制在约±0.1%,见图 2(a)所示,光致发光强度的分布波动则处于约±5%

范围,见图 2(b)所示。

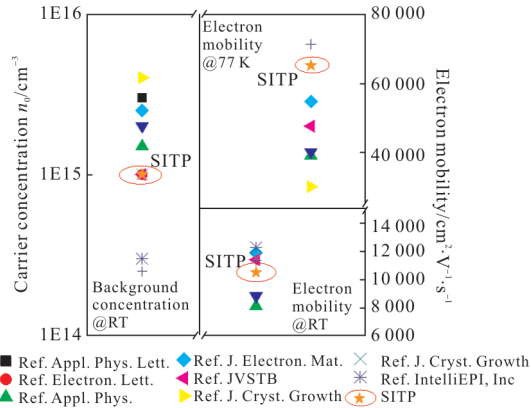


图 1 所生长 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料载流子浓度和迁移率与国际报道对比

Fig.1 Comparison of background concentration and electron mobility of several high-purity $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ sample with international reports

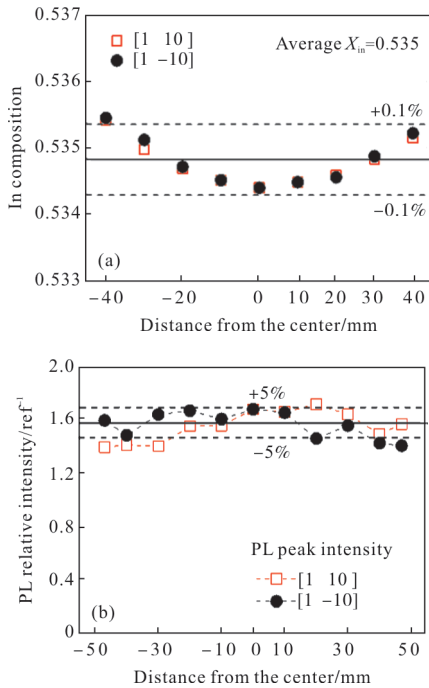


图 2 所生长 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料的(a)组分非均匀性和(b)室温光致发光峰强度非均匀性

Fig.2 (a)Composition non-uniformity and(b)PL peak-intensity non-uniformity for $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ sample

1.2 常规波长 InGaAs 焦平面探测器噪声研究

为发展大规模、低噪声短波红外 InGaAs 焦平面探测器,通过研究不同材料参数、器件性能与焦平面噪声的关系,定量分析了短波红外 InGaAs 焦平面

噪声特性,建立了焦平面噪声模型。如图 3 所示,测试分析了同一款读出电路、探测器输入参数不同的两种短波红外 InGaAs 焦平面在不同积分时间下的噪声。结果表明,基于 CTIA 输入级读出电路,研制的短波红外 InGaAs 焦平面噪声主要来源于焦平面耦合噪声和探测器噪声。其中焦平面耦合噪声受探测器电容和电路输入级积分电容影响,在较短积分时间条件下起主导作用;而探测器噪声受探测器暗电流和工作温度影响,该噪声在长积分时间下决定了焦平面的总噪声水平。通过优化读出电路单元内的运放参数、探测器的结电容和暗电流以及外延材料吸收层掺杂浓度和少子寿命等参数,该类焦平面的噪声降低到 $50e^{-[21]}$ 。

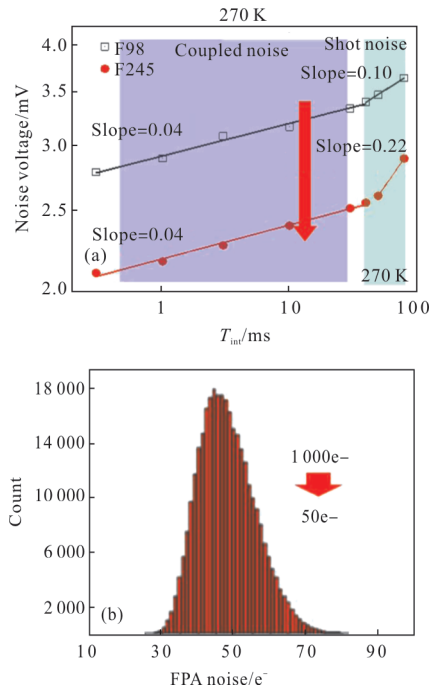


图 3 短波红外 InGaAs 焦平面噪声随积分时间 270 K 的变化

Fig.3 SWIR InGaAs FPAs noise vs. integration time at 270 K

1.3 常规波长 InGaAs 焦平面探测器研究进展

经过材料、光敏芯片、读出电路、焦平面模块、组件封装技术的一系列关键技术攻关,该类焦平面在像元规模、中心距、暗电流、噪声、峰值探测器等多个性能指标上不断提升。常规波长 InGaAs 焦平面从 256×1 、 512×1 等小线列开始,到 2012 年,研制了成像用 $30 \mu\text{m}$ 中心距的 320×256 面阵、 $25 \mu\text{m}$ 中心距的 640×512 面阵,到 2018 年已研制出 $15 \mu\text{m}$ 中心距的 1280×1024 元焦平面探测器,突破了高密度小

光敏元探测器暗电流与噪声抑制和百万像素焦平面倒焊关键技术,研制的 1 280×1 024 元组件的平均峰值探测率达 $5.3 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$, 盲元率小于 1%, 非均匀性为 6.4%, 如图 4 所示。

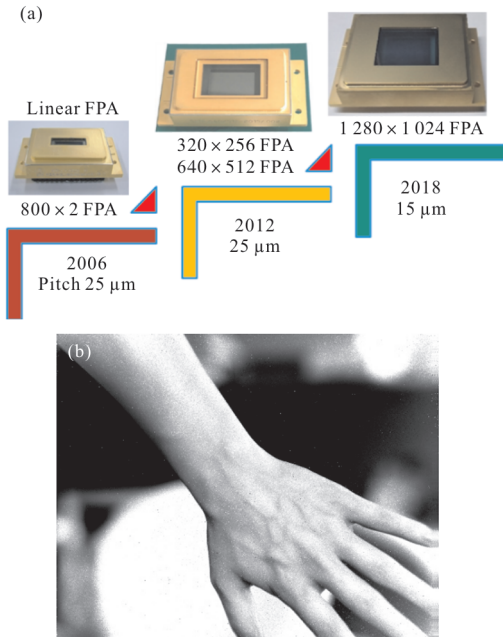


图 4 中国科学院上海技术物理研究所 1.7 μm 近红外 InGaAs 焦平面探测器组件及成像图片

Fig.4 NIR InGaAs FPAs of SITP and image yielded by the 1280 ×1024 InGaAs FPAs

2 延伸波长短波红外 InGaAs 焦平面探测器

2.1 延伸波长 InGaAs 探测器表面钝化的研究

基于 InP 基多层异质 InGaAs 探测材料体系,增加 InGaAs 吸收层中 In 组分,可将短波红外 InGaAs 探测器的响应波长拓展到 2.5 μm。在高 In 组分 InGaAs 吸收层与 InP 衬底之间由于晶格失配的存在,高质量外延材料和器件制备是研制难点。发展了台面型延伸波长 InGaAs 探测器制备方法,研究了器件表面侧面钝化工艺,以降低器件表面产生复合电流。以吸收层 $\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}$ 外延材料为例,研究了低温 SiN_x 钝化、低温低应力 SiN_x 钝化和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ 复合钝化三种不同的钝化方法对探测器暗电流的影响,其中探测器采用变面积周长比的测试结构, Al_2O_3 膜采用 ALD 沉积方法^[22]。对制备的器件进行变温 I-V 测试并计算得到 200 K 温度下器件的暗电流密度随偏压的变化,如图 5 所示。可以看出在反向偏压下,三种钝化膜制备的大光敏元 (200 μm×

200 μm)的暗电流密度几乎不变,而小光敏元(20 μm×20 μm) 的暗电流密度却有很大差别。其中,采用 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ 双层钝化膜制备的器件的暗电流密度是最低的,表明 ALD 沉积的 Al_2O_3 会减小 InGaAs 表面的 As 的氧化物,可以降低表面态密度;但是由于 ALD 的自限制性,ALD 沉积的自限制性导致沉积速率非常缓慢,所以采用 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ 双层钝化膜作为钝化膜。

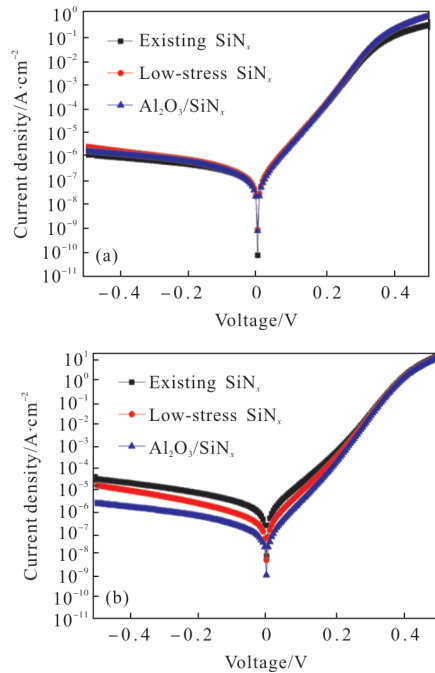


图 5 200 K 温度下 (a)200 μm×200 μm 探测器和 (b)20 μm×20 μm 探测器的暗电流密度

Fig.5 Dark current density of (a) 200 μm×200 μm device and (b)20 μm×20 μm device at 200 K

2.2 延伸波长 2.2 μm InGaAs 焦平面探测器

在台面型延伸波长 InGaAs 器件的钝化新工艺研究的基础上,设计并研制了规模为 1 024×32 元的长行列探测器,像元中心距为 30 μm,采用 In 组分为 0.74 的 $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}$ 外延材料,器件对应的截止波长 2.2 μm。采用 ICP 刻蚀技术进行台面成型工艺,对光敏元进行精确定义,并采用 ICPCVD 镀膜方法进行钝化。用傅里叶光谱仪测试单元器件的相对响应光谱,如图 6 所示,器件在室温的截止波长约为 2.23 μm,随温度变化系数为 1.13 nm/K。采用该批次光敏芯片研制了 1 024×32 元焦平面组件,在 200 K 温度下进行性能测试,焦平面的盲元率为 0.44%,响应非均匀性约 5.7%,在 1.6 μm 峰值波长处的量子效率达到 81.7%,峰值探测率达到 $2.5 \times$

$10^{12}\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$,其信号分布及组件照片如图 7 所示。

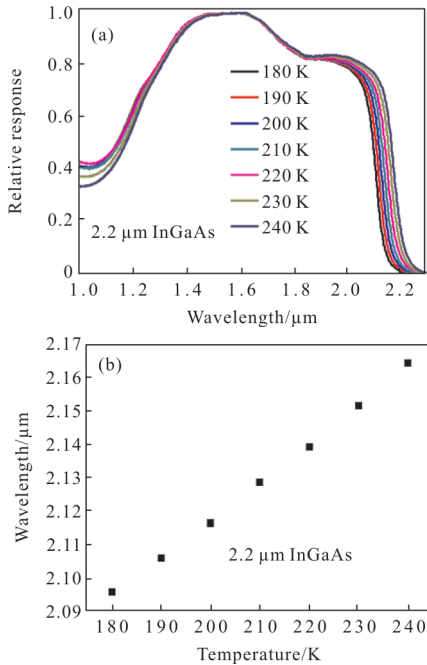


图 6 (a) 变温下 InGaAs 探测器的相对响应光谱及 (b) 截止波长随温度变化图

Fig.6 (a) Response spectra of the extended InGaAs detector, (b) curves of cutoff wavelength variation with temperature

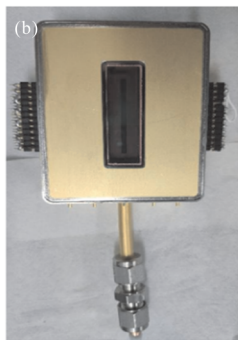
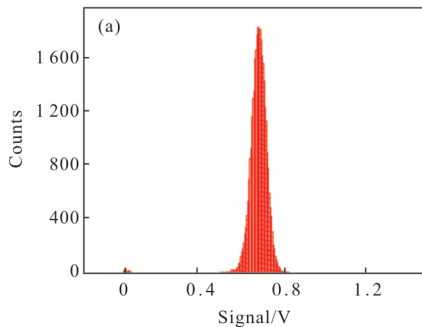


图 7 (a) 1 024x32 焦平面组件测试的信号统计分布图和 (b) 1 024x32 和组件实物照片(b)

Fig.7 (a)Signal statistics of the 1 024x32 FPAs and (b) the 1 024x32 FPAs Assembly

2.3 延伸波长 2.5 μm InGaAs 焦平面探测器

针对短波红外高光谱探测的应用需求,研制了响应波段在 0.95~2.5 μm 的 1 024x256 元超光谱用 InGaAs 焦平面组件,如图 8 所示,平均峰值探测率达 $5\times 10^{11}\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 、响应非均匀性 10%、盲元率 1%、帧频达 150 Hz。在此基础上,设计并研制了单片规模为 1 024x512 元短波红外 InGaAs 焦平面组件,对应的截止波长 2.5 μm,像元中心距为 30 μm,峰值探测率达到 $8\times 10^{11}\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$,响应不均匀性为 6%,工作帧频达到 250 Hz 以上。

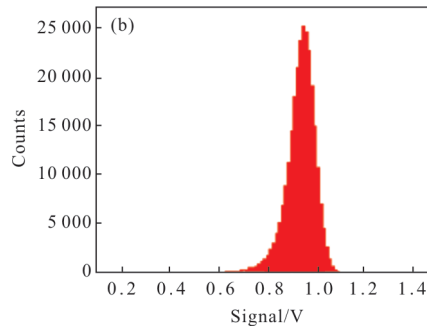
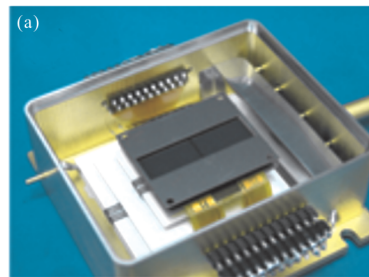


图 8 (a)1 024 x256 延伸波长 InGaAs 焦平面探测器组件及 (b)其信号统计分布图

Fig.8 (a) 1 024 x256 InGaAs FPAs detector assembly with extended wavelength and (b) its signal statistics

3 InGaAs 新结构探测器探索研究

3.1 集成微纳人工结构的 InGaAs 焦平面探测器

针对宽光谱成像探测的应用需求,InGaAs 探测器研究的一个重要方向是将光谱响应范围向可见波段拓展。研制了集成 InP 纳米柱阵列的 320x256 面阵焦平面,经测试,该焦平面的光谱响应范围向可见波段拓展,前截止波长由 0.9 μm 扩展至 0.45 μm,峰值波长为 1.569 μm,器件在 0.5 μm 的量子效率约 40%,在 0.8 μm 的量子效率约 60%,器件在可见波段的量子效率得到明显提升,如图 9 所示;所得到的信号分布如图 10 所示,表面集成了 InP 纳米柱的

光敏元区域,明显增强了响应信号。

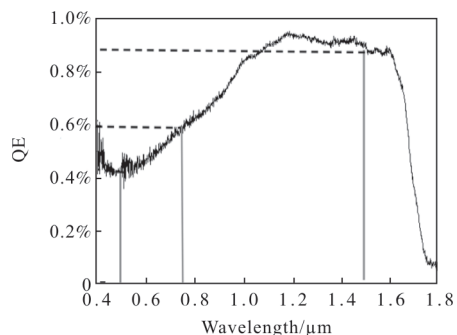


图 9 集成微纳结构的 InGaAs 焦平面量子效率

Fig.9 Quantum efficiency of the InGaAs FPAs integrated with InP nanopillar

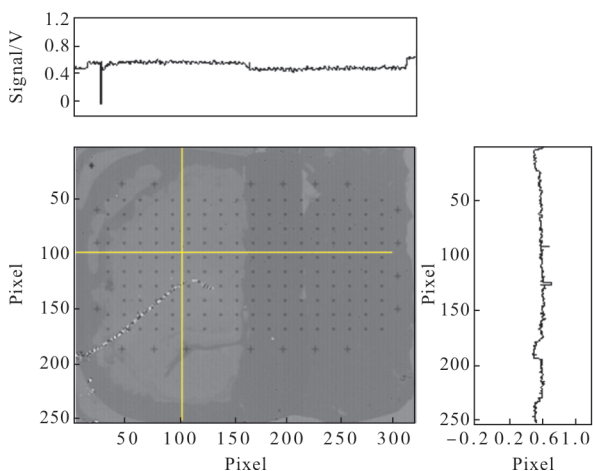


图 10 焦平面响应信号分布示意图

Fig.10 Schematic of the FPAs response signal distribution

3.2 集成亚波长偏振近红外 InGaAs 探测器

结合亚波长金属光栅的偏振特性和近红外 InGaAs 探测器制备工艺的稳定性,研究了片上集成亚波长金属光栅结构的近红外 InGaAs 偏振探测器,开展了光栅与器件集成结构的设计与兼容性制备工艺研究,将不同偏振方向的微型偏振光栅直接集成到近红外 InGaAs 焦平面探测器的相应像元上,可同时获取目标的各偏振分量信息。集成四方向金属光栅的 InGaAs 偏振焦平面探测器规模为 128 和 512 元,探测率达 $1 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$,其中 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个角度偏振光敏元的消光比均达到了 20:1 以上,并进行了演示成像,见图 11^[23]和图 12。通过仿真结果,分析了光栅的高度、角度、宽度和占空比等结构参数偏差对于偏振性能的影响,亚波长金属光栅的占空比是影响偏振器件消光比的关键因

素,调整电子束光刻的版图图形以及曝光剂量是控制亚波长金属光栅的占空比的工艺方法。

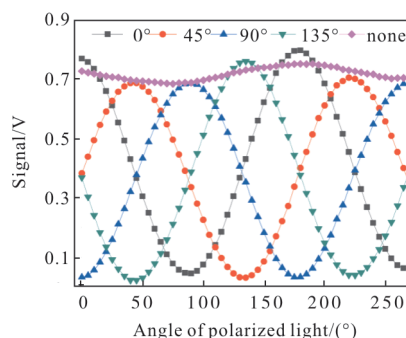


图 11 集成偏振 InGaAs 焦平面对 1.310 μm 波长下不同角度线偏振光的响应信号

Fig.11 Response signal of polarimetric InGaAs FPA to linearly polarized light of different angles at 1.310 μm wavelength

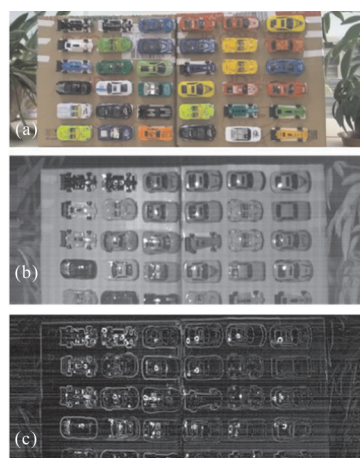


图 12 (a)CMOS 图像传感器,(b)常规 InGaAs 焦平面与 (c)集成偏振 InGaAs 焦平面的演示成像结果

Fig.12 Demonstration imaging results recorded from (a) CMOS imaging sensor, (b) conventional InGaAs FPA, and (c) fabricated polarimetric InGaAs FPA

4 结论

文中介绍了中国科学院上海技术物理研究所短波红外 InGaAs 探测器方面的研究进展,解决了大面积材料均匀性、器件量子效率、暗电流以及噪声等多项关键技术,推进了该类焦平面向高性能、系列化方向发展及其在航天工程中的应用。在常规波长(0.9~1.7 μm)InGaAs 焦平面方面,焦平面规格达到 1 280×1 024 元,室温暗电流密度优于 $5 \text{ nA}/\text{cm}^2$,室温峰值探测率优于 $5 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。

在延伸波长(1.0~2.5 μm)InGaAs 探测器方面,规模达到 1 024×512 元,暗电流密度优于 10 nA/cm² 和峰值探测率优于 5×10¹¹ cm·Hz^{1/2}/W@200 K。在新型多功能 InGaAs 探测器方面,发展了微纳结构集成的宽谱段响应的 InGaAs 探测器和片上集成亚波长金属光栅的 InGaAs 偏振探测器,消光比优于 20:1,并进行了演示成像。

致 谢

特别感谢中国科学院上海微系统与信息技术研究所张永刚研究员课题团队在短波红外 InGaAs 探测材料与器件方面的长期合作!感谢中国科学院长春光学精密机械与物理研究所缪国庆研究员课题团队、中国科学院半导体研究所韦欣研究员课题团队在延伸波长 InGaAs 外延材料方面的合作!

参考文献:

- [1] MacDougal Michael, Hood Andrew, Geske Jon, et al. InGaAs focal plane arrays for low light level SWIR imaging[C]//Proceedings of SPIE, 2011, 8012: 801221.
- [2] Battaglia J, Blessinger M, Enriquez M, et al. An uncooled 1 280×1 024 InGaAs focal plane array for small platform, shortwave infrared imaging [C]// Proceedings of SPIE, 2009, 7298: 72983C1-8.
- [3] Sensors Unlimited, Micro-SWIR 640CSX legacy camera [EB/OL]. [2015]. <http://www.sensorsinc.com/products/detail/legacy-640csx-swir-camera>.
- [4] Rouvié A, Huet O, Hanmard S, et al. SWIR InGaAs focal plane arrays in France [C]// Proceedings of SPIE, 2013, 8704: 870403.
- [5] Rouvié A, Coussement J, Huet O, et al. InGaAs focal plane array developments and perspectives [C]// Proceedings of SPIE, 2014, 9249: 92490Z.
- [6] Xenics, Product Selector Guide [EB/OL]. [2016]. [http://www.xenics.com/en/products/cameras/f\[0\]=field_technology_term%3A624](http://www.xenics.com/en/products/cameras/f[0]=field_technology_term%3A624).
- [7] Li Xue, Huang Songlei, Chen Yu, et al. Noise characteristics of short wavelength infrared InGaAs linear focal plane arrays [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(6): 1-5.
- [8] Shi M, Tang H J, Shao X M, et al. Interface property of silicon nitride films grown by ICPCVD and PECVD on In_{0.82}Al_{0.18}As [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2015, 71: 384-388.
- [9] Huang Xing, Li Xue, Shi Ming, et al. The 1/f noise characteristics of In_{0.83}Ga_{0.17}As photodiodes with SiN_x passivation films fabricated by two different techniques [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 67: 596-599.
- [10] Gong Haimei, Li Xue, Shao Xiumei, et al. Developments of high performance short-wave infrared InGaAs focal plane detectors [J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(8): 629-635. (in Chinese)
- [11] Xue Li, Gong Haimei, Jiaxiong Fang, et al. The development of InGaAs short wavelength infrared focal plane arrays with high performance [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 80: 112-119.
- [12] Massies J, Rochette J, Delescluse P, et al. High-mobility Ga_{0.47}In_{0.53}As thin epitaxial layers grown by MBE, very closely lattice-matched to InP [J]. *Electronics Letters*, 1982, 18(18): 758-760.
- [13] Cheng K Y, Cho A Y, Wagner W R. Tin doping in Ga_{0.47}In_{0.53}As and Al_{0.48}In_{0.52}As grown by molecular-beam epitaxy [J]. *Journal of Applied Physics*, 1981, 52: 6328.
- [14] Razeghi M, Poisson M A, Larivain J P, et al. Low pressure metalorganic chemical vapor deposition of InP and related compounds [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1983, 12(2): 371-395.
- [15] Lee T P, Burrus C A, Cho A Y. Zn-diffused back-illuminated p-i-n photodiodes in InGaAs/InP grown by molecular-beam epitaxy [J]. *Applied Physics Letters*, 1980, 37: 730.
- [16] Lee W, Fonstad C G. The growth of high mobility InGaAs and InAlAs layers by molecular beam epitaxy [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 1980, 4: 536.
- [17] Jin X, Pinsukanjana P, Pepper J, et al. Ultra low background InGaAs Epi-layer on InP for PIN applications by production MBE [C]//16th IPRM 2004 International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, 2004: 48-51.
- [18] Claxton P A, Roberts J S, David J P R, et al. Growth and characterisation of quantum wells and selectively doped heterostructures of InP/Ga_{0.47}In_{0.53}As grown by solid source MBE [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1987, 81(1-4): 288-295.

- [19] Thrush E J, Cureton C G, Briggs A T R. MOCVD grown InP/InGaAs structures for optical receivers [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1988, 93(1-4): 870-876.
- [20] Zhang Y G, Gu Y, Chen P P, et al. Composition uniformity characterization and improvement of AlGaAs/GaAs grown by molecular beam epitaxy [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2018, 79: 107-112.
- [21] Yu Chunlei, Li Xue, Yang Bo, et al. Noise characteristics analysis of short wave infrared InGaAs focal plane arrays [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 85: 74-80.
- [22] Wan Luhong, Cao Gaoqi, Shao Xiumei, et al. High performance In_{0.83}Ga_{0.17}As SWIR photodiode passivated by Al₂O₃/SiN_x stacks with low-stress SiN_x films [J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 126: 033101.
- [23] Duo Sun, Tao Li, Bo Yang, et al. Research on polarization performance of InGaAs focal plane array integrated with superpixel-structured subwavelength grating[J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 9447-9458.