

〈材料与器件〉

高性能 InP/InGaAs 宽光谱红外探测器

史衍丽^{1,2}, 李 龙¹, 杨绍培¹, 刘文波¹, 范明国¹, 龚燕妮¹, 葛 鹏¹, 李 雪¹
(1.北方夜视科技集团有限公司, 云南 昆明 650223; 2.微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As 短波红外探测器是一种高性能的近室温工作器件, 从 200 K 到室温下都能获得较好的器件性能, 从而大大降低了对制冷的要求。为了充分利用目标在可见光和短波波段的光谱信息, 通过特殊的材料结构设计和器件背减工艺, 成功实现了 320×256InP/InGaAs 宽光谱红外探测器, 能够同时对可见光和短波红外响应, 并从 77 K 到 263 K 工作温度下实现了对人脸、计算机及室外 2.3 km 处的景物成像。测试样管平均峰值探测率为 2×10¹² cmHz^{1/2}/W, 光谱响应为 0.6~1.7 μm, 光谱响应测试和成像结果同时验证了 InP/InGaAs 宽光谱探测器对可见光信号的探测。相比标准的 InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As 短波探测器, InP/InGaAs 宽光谱探测器显示了可见/短波双波段探测的效果, 大大丰富了探测目标的信息量, 可显著提升对目标的识别率。

关键词: InP/InGaAs; 高性能; 宽光谱; 可见/短波; 双波段探测

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2016)01-0001-05

High Performance InP/InGaAs Wide Spectrum Infrared Detectors

SHI Yanli^{1,2}, LI Long¹, YANG Shaopei¹, LIU Wenbo¹, FAN Mingguo¹, GONG Yanni¹, GE Peng¹, LI Xue¹
(1.North Night Vision Science & Technology Group Corp., Kunming 650223, China;
2.Science and Technology on low-light-level night vision Labtorary, Xi'an 710065, China)

Abstract: InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As short wavelength detectors can work under or near room temperature with high performance, so requirement for cooling was largely decreased, then reduced size and cost and so on. In order to fully utilize the energy of visible light and short wavelength reflected from targets, the InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As short wavelength detectors was adopted to extend response wavelength from short wavelength to visible light range. Special materials design and substrate thinning was combined to remove InP substrate, then 320×256 InGaAs wide spectrum detectors were prepared. Building positioned at 2.3 km away, face and computer were imaged by the 320×256 InGaAs wide spectrum detector by using F# = 1.3 optical lens from 77 K to 263 K. The imaging results showed both visible light and short wavelength information of targets were detected and collected. Further measurement results disclosed average peak detectivity 2×10¹² cmHz^{1/2}/W under 300 K temperature with spectrum response 0.6~1.7 μm for the wide spectrum detector. It can be concluded that target information from both visible and short wavelength dual bands other than short wavelength band were gained by the wide spectrum detector, and it behaved as visible/short wavelength dual band detecting. Recognition rate of targets could be expected to improve with the InP/InGaAs wide spectrum detectors.

Key words: InP/InGaAs, high performance, wide spectrum response, visible/short wavelength, dual band detecting

0 引言

InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As 探测器是一种高性能的短波红外探测器, 已报道的器件规格达 2 k×2 k, 器件性能

收稿日期: 2016-01-01; 修订日期: 2016-01-11.
作者简介: 史衍丽 (1969-), 女, 山东郓城人, 博士, 博导, 研究员, 主要从事探测器的设计和研制工作。E-mail: ylshikm@hotmail.com。
基金项目: 云南省重点项目 (2015FA040)。

在室温下可达到 $1 \times 10^{14} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ，是迄今为止性能最好的短波红外探测器^[1-4]，具有高性能、高性价比的优势，可广泛应用于高性能夜视、人眼安全激光主被动探测、航天航空、水上搜救、居民安防、工业生产监视等领域^[5-9]。

InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As 焦平面探测器工作时目标反射的光子从探测器背面入射，其响应波段由 InP 衬底、In_{0.53}Ga_{0.47}As 吸收层材料决定其前截止和后截止波长。室温下 InP 材料的禁带宽度为 1.35 eV，大于该能量的辐射光子都能被 InP 材料吸收，从而限制了探测器的前截止波长为 0.92 μm ；In_{0.53}Ga_{0.47}As 吸收层室温下的禁带宽度为 0.75 eV，对应于探测器的后截止波长 1.7 μm ，因此探测器的响应波段为 0.9~1.7 μm ，称之为标准 InGaAs 探测器。考虑到夜天光光谱能量包含可见光和短波红外，为了充分利用夜天光辐射能量中的可见光部分，需要把标准 InGaAs 探测器的光谱向可见光延伸，以提高对夜天光能量的利用率。目前国际上常用的方法是把 InP 衬底全部去除，从而把器件前截止波长延伸到 0.9 μm 以前，即可见光部分，实现对可见光和短波都响应的宽光谱探测。通过宽光谱探测，利用目标对 2 个波段的反射信息，能够增加探测目标的信息量，可望显著地提高对目标的识别率^[10-13]。

为了实现高性能 InP/InGaAs 宽光谱探测器，在去除衬底的基础上还需要结合材料优化设计，提高在可见光波段的吸收和量子效率。相比标准 InGaAs 探测器，InP/InGaAs 宽光谱探测器材料层数增加，InP/InGaAs 异质界面增加，结构变得复杂，材料生长中对 InP/InGaAs 异质界面的晶格匹配控制也更困难，要求也更高。

通过对 InP/InGaAs 宽光谱探测器材料结构和器件工艺的优化研究，研制出高性能的 320×256 宽光谱探测器，测试配管性能显示 300 K 工作温度下器件暗电流密度 $1.1 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ，器件平均峰值探测 $2 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ，器件光谱响应 0.6~1.7 μm ；另外采用市售的可见光、短波可透的光学镜头对室外建筑物、室内人脸和计算机等典型目标实现了从低温 77 K 到 263 K 温度的成像，220 K 工作温度下对 2.3 km 建筑物的成像与 77 K 温度下的成像效果相当，都显示了清晰的成像细节。

1 材料设计和器件制备

通过理论优化设计和工艺验证，采用的 InP/InGaAs 宽光谱探测器材料结构如图 1 所示。

为了得到高性能的宽光谱探测器，图 1 中的 4 个 InP/InGaAs 界面生长非常重要。由于腐蚀停层的加

入，在吸收层下面引入了 2 个 InP/InGaAs 异质结界面，因此 InGaAs 吸收层的生长是在一个晶格发生变化的 InP 层上进行，相对在一个晶格完整的 InP 层生长，生长过程中对 InGaAs 吸收层的晶格匹配和应力控制更为困难，InGaAs 吸收层的晶格质量更难保障。另外，为了提高可见光部分的量子效率，除了彻底去除 InP 衬底，需要 InP 下电极层厚度尽可能薄，以减少 InP 电极层对可见光的吸收。通过理论计算，为了在可见光 0.5 μm 处获得 10% 的量子效率，InP 下电极层厚度不大于 0.3 μm ，具体的理论计算结果如图 2 所示。

InP	
InGaAs 吸收层	
DnInP	
InGaAs 腐蚀停	
InP 缓冲层	
衬底	

图 1 InP/InGaAs 宽光谱探测器材料结构

Fig.1 Material structure of InP/InGaAs wide spectrum detectors

图 2 理论计算获得的不同下电极层厚度和量子效率的对应关系

Fig.2 Quantum efficiency calculated under different thickness of InP layer for InP/InGaAs detectors

从图 2 的计算结果可见，在其他结构参数不变的条件下，随着 InP 下电极层厚度从 0.5 μm 减少到 0.1 μm ，InP/InGaAs 器件在可见光 0.5 μm ~0.8 μm 范围的量子效率明显提高，而在短波部分的量子效率基本没有变化。计算结果显示通过减少 InP 下电极层厚度能够有效地提高 InP/InGaAs 器件在可见光波段探测的量子效率。

采用金属有机化合物化学气相沉积设备 (MOCVD) 在 2 英寸 InP 衬底上完成了 InP/InGaAs 宽光谱探测器材料的生长，之后采用大片工艺，通过光刻、钝化、台面刻蚀等器件加工技术，在 2 英寸 InP/InGaAs 材料上直接进行 320×256 探测器芯片的制备，制备的探测器芯片如图 3 所示。像元中心距 30 μm

$\times 30\text{ }\mu\text{m}$, 在每个 320×256 InP/InGaAs 探测器芯片上布有相应的测试配管, 其工艺与 320×256 探测器芯片完全相同, 用于对工艺和器件性能进行检测分析。

对测试配管完成性能检测后, 挑选性能较好的探测器芯片与读出电路互连, 完成下填充后通过机化抛和腐蚀的方法去除 InP 衬底, 余留芯片厚度小于 $4\text{ }\mu\text{m}$ 。由于减薄样品已经非常薄, 在光学显微镜下观测背减表面时能看到对面的像素分布, 图 4 给出了从背减表面看过去的 320×256 部分像素。减薄后的焦平面器件封装到中测变温杜瓦, 进行成像测试。

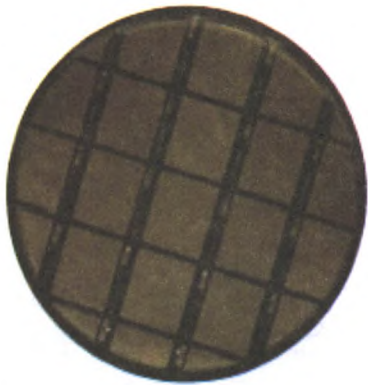


图3 在2英寸材料上制备的 320×256 InGaAs 探测器芯片
Fig.3 320×256 InGaAs detector prepared on the 2" InP/InGaAs material

2 InP/InGaAs 宽光谱探测器性能测试分析

把 InP/InGaAs 宽光谱探测器测试陪管封装于检测杜瓦, 进行电流-电压 (I - V) 特性、探测率、光谱响应测试, 对材料质量和器件工艺进行综合评价。电流-电压特性的测试结果如图 5 所示。由测试结果可知, 器件在室温 300 K、 -100 mV 偏压时的暗电流 40 pA , 对应的电流密度 $1.1\times 10^{-7}\text{ A/cm}^2$, 相比之前研制器件的暗电流显著降低^[14]。另外, 器件光电性能测试结果显示, 室温下器件平均峰值探测率 $2\times 10^{12}\text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 暗电流和探测率的测试结果表明目前器件研制达到了国内报道的较好水平^[15-16]。对器件进行了光谱响应测试, 测试结果如图 6 所示。通过测试结果可看到光谱响应 $0.6\sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$, 表明器件响应波长已扩展到可见光; 同时, 器件对可见光部分的响应还有待提高, InP 电极层厚度需要进一步减少。

在陪管性能测试的基础上, 把 320×256 InP/InGaAs 焦平面探测器封装于中测检测杜瓦, 加上市售的可见光、短波可透的光学镜头 ($F\# = 1.3$, 焦距 75 mm), 对室内外的景物进行了简单的成像演示。通过成像演示研究, 也能清晰地看到 InP/InGaAs 宽光谱探测器对可见光信号的探测。中测杜瓦的温度从 77 K

到室温连续可调, 通过调节中测杜瓦温度, 对 InP/InGaAs 焦平面探测器进行了从 77 K 到 263 K (零下 10°C) 的成像实验研究。对距离 2.3 km 的建筑物成像效果来看, 目前研制的焦平面探测器从 77 K 到 263 K 都能成像, 在低温 77 K 和 220 K 温度下的成像效果相当, 进一步升高温度, 超过 220 K 温度后成像噪声变大, 图像质量逐步变差。图 7(a)、图 7(b)给出了 77 K 、 220 K 温度下对 2.3 km 处塔尖的成像, 从成像效果来看 2 幅图成像细节没有明显的差别, 都能清晰地看到天空中的云彩、塔尖和背后的树林。图中成像效果与可见光成像非常类似, 成像细节清晰, 反映了 InP/InGaAs 探测器对室温目标反射成像的机理。对近距离人脸的成像结果如图 8 所示, 图中人的眼睛细节包括黑色眼珠清晰可见。需要说明的是以上图中的成像结果只进行了简单的背景扣除, 没有进行图像增强处理。

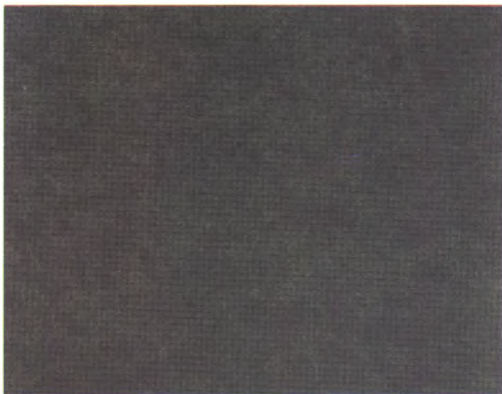


图4 衬底全部去除后从背减表面看到的 320×256 InP/InGaAs 部分像素分布
Fig.4 Pixels of 320×256 InP/InGaAs FPAs "seen" through from the thinned surface (back side surface)

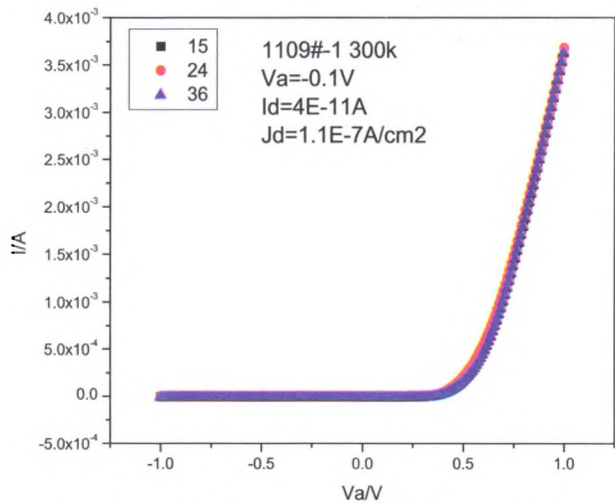


图5 宽光谱 InP/InGaAs 探测器测试配管的 I - V 特性
Fig.5 I - V characteristics of InP/InGaAs test detector under 300 K

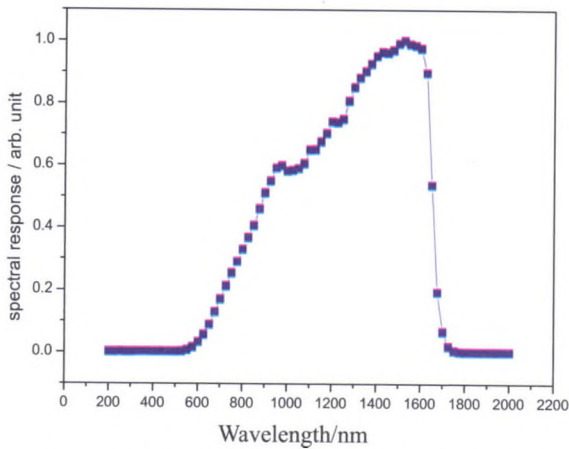


图6 宽光谱探测器测试配管的光谱响应测试结果

Fig.6 Spectral response of test element of wide spectrum InP/InGaAs detector



图7 77 K 和 220 K 温度下对 2.3 km 处塔尖的成像效果（没有进行图像增强处理，只进行了简单的背景扣除）

Fig.7 Imaging of building at 2.3 km distance under temperature 77 K and 220 K without image enhancement processing

为了进一步比较短波成像和宽光谱成像的差别，在光学镜头前放置滤可见光透短波的滤光片，通过把目标反射的可见光信号滤掉，对目标进行了短波成像。图9给出了计算机屏幕在短波和宽光谱成像条件

下的成像结果。从图9中可见，采用宽光谱探测器成像（不加滤光片）时，可见光和短波信号都采集的条件下，计算机屏幕及屏幕上的字同时都能看到，显示了可见光和短波2个波段的信息。而加上滤可见光的滤光片进行成像时只能看到计算机屏幕，人眼可见的屏幕上的字却看不到，这是因为目前InP/InGaAs探测器只能探测计算机屏幕反射的短波信息，而屏幕上文字反射的可见光信号被滤光片滤掉，InP/InGaAs探测器探测不到文字显示的可见光信息，由于成像信息里可见光信号缺失，成像结果只能显示探测到的计算机的短波信息，即计算机的外形；从以上成像结果可看到，通过拓展探测可见光信号，InP/InGaAs宽光谱探测器成像信息里既包含了目标的可见光信息也含有短波信息，是目标在2个波段信息的融合状态，获得了类似可见光和短波双波段探测的效果。相比标准InGaAs短波探测器，InP/InGaAs宽光谱探测器增加了目标的可见光信息，大大地丰富了对目标的探测和成像信息，可望显著提高对目标的识别率。



图8 InP/InGaAs 宽光谱探测器对人脸的成像效果

Fig.8 Imaging of face without image enhancement processing

3 结论

采用材料结构优化设计结合衬底背减薄的技术，成功研制了320×256 InP/InGaAs宽光谱探测器，室温下器件暗电流密度 $1.1 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ，器件平均峰值探测率大于 $1 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。从低温77 K到近室温220 K的工作温度下都获得了对室外景物、室内人脸和计算机清晰的成像，反映了InP/InGaAs宽光谱探测器对室温目标反射成像的原理，验证了InP/InGaAs宽光谱红外探测器高温、高性能工作的优势。从短波成像和宽光谱成像的比较结果来看，通过把光谱响应延伸到可见光，相比标准InGaAs短波红外探测器，

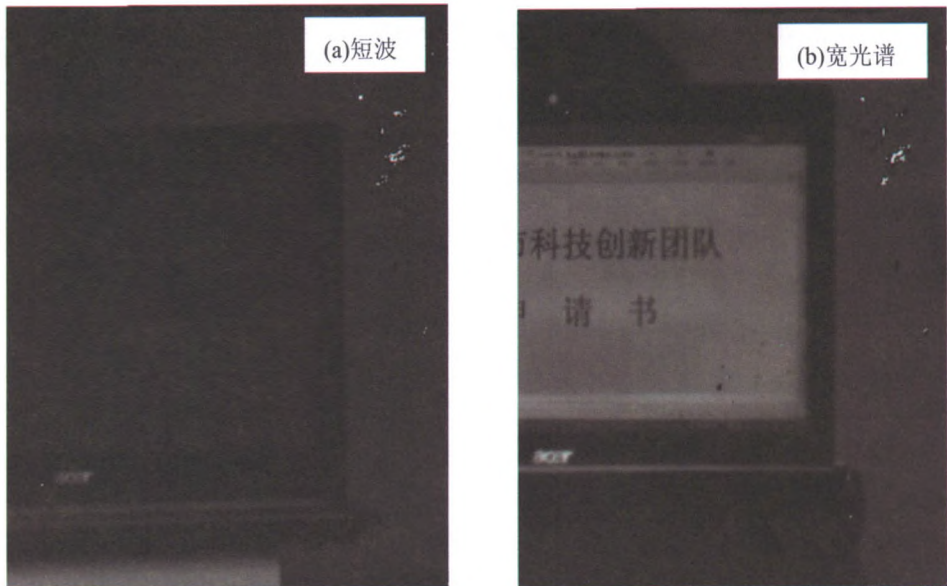


图9 利用短波和宽光谱探测对计算机屏幕成像的差别

Fig.9 Imaging of computer and words in screen with short wavelength(a) via visible band filter and wide spectrum(b) detecting

InP/InGaAs 宽光谱探测器增加了目标对可见光的反射信息，大大丰富了目标的探测信息，实现了类似可见/短波双波段探测的效果，可有效提高对目标的探测和识别能力。

致谢

感谢上海技术物理研究所胡伟达研究员、徐娇博士在器件理论计算工作方面的合作和支持。

参考文献：

[1] H. Figgemeier, M. Benecke, K. Hofmann, R. Oelmaier, et al. SWIR detectors for night vision at AIM[C]//*Proceedings of SPIE*, 2014, **9070**: 907008-1.

[2] Alan Hoffman, Todd Sessler, Joseph Rosbeck, et al. Megapixel InGaAs arrays for low background applications[C]//*Proc. of SPIE*, 2005, **5783**: 32-38.

[3] Anne Rouvié, Jean-Luc Reverchon, Odile Huet, et al. InGaAs focal plane arrays developments at III-VLab[C]//*Proc. of SPIE*, 2012, **8353**: 835308.

[4] S. Seshadri, D.M. Cole, B. Hancock, et al. Comparing the low-temperature performance of megapixel NIR InGaAs and HgCdTe imager arrays[C]//*Proc. of SPIE*, 2007, **6690**: 669006-1.

[5] CHANG Shiuan-Ho, FANG Yean-Kuen, TING Shyh-Fann, et al. Ultra high performance planar InGaAs PIN photodiodes for high speed optical fiber communication[J]. *Sensors and Actuators A*, 2007, **133**: 9-12.

[6] 史衍丽, 胡锐, 张卫锋, 等. InGaAs 固体微光器件研究进展[J]. *红外技术*, 2014, **36**(2): 81-88.

SHI Yanli, HU Rui, ZHANG Weifeng, et al. Progress of InGaAs Solid-State Low-Light Devices[J]. *Infrared Technology*, 2014, **36**(2): 81-88.

[7] Bora M Onatla, Wei Huang, Navneet Masauna, et al. Ultra low dark current InGaAs technology for focal plane arrays for low-light level visible-shortwave infrared imaging[C]//*Proc. of SPIE*, 2007, **6542**: L-1-L9.

[8] Michael MacDougall, Andrew Hood, JonGeske, et al. InGaAs focal plane arrays for low light level SWIR imaging[C]//*Proc.of SPIE*, 2011, **8012**: 801221-1-10.

[9] 张卫锋, 张若岚, 史衍丽, 等. InGaAs 短波红外探测器研究进展[J]. *红外技术*, 2012, **34**(6): 361-365.

ZHANG Weifeng, ZHANG Ruolan, SHI Yanli, et al. Development Progress of InGaAs Short-wave Infrared Focal Plane Arrays[J]. *Infrared technology*, 2012, **34**(6): 361-365.

[10] Devon G Turner, Timothy C Bakker, Peter Dixon, et al. The development of, and applications for extended response (0.7 to 1.7 μm) InGaAs focal plane arrays s[C]//*Proc. of SPIE*, 2008, **6940**: 694037-1-8.

[11] Tara Martin, Robert Brubaker, Peter Dixon, et al. 640 \times 512 InGaAs focal plane array camera for visible and SWIR imaging[C]//*Proc. of SPIE*, 2005, **5783**: 12-20.

[12] Tara J Martin, Marshall J Cohen, J Christopher Dries, et al. InGaAs/InP focal plane arrays for visible light imaging[C]//*Proc. of SPIE*, 2004, **5406**: 38-44.

[13] Jonathan Getty, Ellie Hadjiyska, David Acton, et al. VIS/SWIR Focal Plane and Detector Development at Raytheon Instruments Performance Data and Future Developments at Raytheon[C]//*Proc. of SPIE*, 2007, **6660**: 66600C-1.

[14] SHI Yanli, LU Qiang, HU Rui, et al. 320 \times 256 InGaAs Solid-State Low-Light Devices[C]//*Proc. of SPIE*, 2014, **9300**: 930004.

[15] 高新江, 张秀川, 唐遵烈, 等. 320 \times 256 InGaAs 短波红外焦平面阵列探测器[J]. *半导体光电*, 2009, **30**(2): 178-190.

GAO Xinjiang, ZHANG Xiuchuan, TANG Zunlie, et al. 320 \times 256 InGaAs short wave infrared focal plane arrays detector[J]. *Semiconductor optoelectronics*, 2009, **30**(2): 178-190.

[16] LI Xue, TANG Hengjinga, FAN Guangyua, et al. 256 \times 1 element linear InGaAs short wavelength near-infrared detector arrays[C]//*Proc. of SPIE*, 2007, **6835**: 68350501-08.