

## 可见光拓展 InP/InGaAs 宽光谱红外探测器

史衍丽, 郭 骞, 李 龙, 邓功荣, 杨绍培, 范明国, 刘文波

(北方夜视科技集团有限公司, 云南 昆明 650223)

**摘 要:** 由于标准 InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 短波红外探测器的响应波段为 0.87~1.7 μm, 在高性能夜视中具有重要的应用。为了进一步利用夜天光在可见光区间的辐射能量, 需要将 InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 短波探测器的光谱响应拓展到可见光, 从而实现包含可见光和短波波段的宽光谱探测。通过特殊的材料设计和背减薄工艺, 成功研制了可见光拓展的 320×256 InP/InGaAs 宽光谱红外探测器。采用增加滤光片的方法完成了器件在可见光、短波的成像演示, 结果表明: 目标在可见光、短波波段呈现出不同的特征信息, 而不加滤光片的可见光拓展 InP/InGaAs 宽光谱红外探测器则探测到两个波段的信息, 既包含目标的可见光信息同时也具有短波信息, 从而实现了可见/短波双波段探测的效果, 可显著提升对目标的探测能力。

**关键词:** InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As; 光谱响应; 可见光拓展; 可见/短波; 双波段探测

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3177-04

## Visible-extended InP/InGaAs wide spectrum response infrared detectors

Shi Yanli, Guo Qian, Li Long, Deng Gongrong, Yang Shaopei, Fan Mingguo, Liu Wenbo

(North Night Vision Science & Technology Group Corp, Kunming 650223, China)

**Abstract:** Standard InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As short wavelength detectors has important application in high performance night vision owing to special spectrum response from 0.87 to 1.7 μm. In order to fully utilize the visible irradiation energy of night sky glow, the response wavelength can be extended to visible with the standard InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As detector. By combining material structure design and substrate thinning processing technology, 320 ×256 visible -extended InGaAs wide spectrum detector were successfully prepared. Based on the detector, imagery demonstration was finished with different band filters. Different characterized information for the same target were indicated by detecting via short wavelength and visible filter respectively, at the same time, both visible and short wavelength information were obtained by wide spectrum detecting without band filter, the imagery behaved as visible and short wavelength dual band detecting. Consequently, target information and the recognition rate for the target will be improved dramatically by the visible-extended wide spectrum detector.

**Key words:** InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As; spectrum response; visible-extended; visible/short wavelength; dual band detecting

收稿日期: 2015-03-11; 修订日期: 2015-04-20

基金项目: 云南省重点基金(2015FA040)

作者简介: 史衍丽(1969-), 女, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事探测器的设计和研制工作。Email: ylishikm@hotmail.com

## 0 引言

InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 探测器由于光敏材料 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 与 InP 衬底材料的晶格匹配,采用金属有机化合物化学气相沉积系统(MOCVD)等薄膜材料生长技术能获得大面积高质量的 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP pin 结构材料,其器件响应波段为 0.87~1.7 μm,具有量子效率高、器件响应速度快、近室温工作、与常用可见光光学兼容等应用优势,是一种高性能的短波红外探测器,能够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<sup>[1-5]</sup>。通过进一步的材料优化设计和衬底去除工艺,还能把响应波段扩展到可见光<sup>[6-8]</sup>,实现可见-短波同时响应的宽光谱 InGaAs/InP 探测器,较之单个波段的探测,能够获得目标更为丰富的信息量,实现类似可见光和短波双波段探测的效果。

与标准的 InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 探测器相比,可见拓展的 InGaAs 宽光谱探测器在材料结构设计、材料生长及器件工艺上有所不同。两者相比,前者只有两个 InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 异质结,而后者具有 4 个 InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 异质结,一方面材料结构变得复杂,另外一方面,由于新增加的两个异质结导致 InGaAs 吸收层材料在一个晶格发生变化的 InP 材料上进行生长,材料生长过程中对晶格匹配方面的精细控制要求更高,InGaAs 吸收层材料生长难度增加。如果控制不好,InGaAs 晶体质量变差,器件性能将大大降低。另外,为了将 InP 衬底的吸收降低到最小,需要对 InP 衬底全部去除,留下不到 4 μm 的器件结构层,这对衬底去除工艺中的损伤和终点控制都提出了非常高的要求。

通过对材料进行优化设计,采用 MOCVD 生长系统完成 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP 探测器材料生长,采用常规半导体器件工艺实现了 320×256 器件制备,在完成与读出电路的倒装焊后进行了 InP 衬底去除工艺,并实现了 InP 衬底的彻底去除,获得了光亮无损的减薄器件表面,成功实现了可见光拓展的 InGaAs/InP 探测器及成像演示。在成像演示过程中通过在光学镜头前放置可见光及短波滤光片,分别滤掉目标的可见光和短波信号,能够清晰地看到目标在可见光、短波、可见+短波宽波段 3 种波段的成像效果及其差

异。由于目标在可见光和短波波段的特征信息不同,通过同时探测目标的短波、可见光信息,可以获得目标在可见光+短波双波段的复合信息,从而大大地丰富了探测目标的信息量,提高对目标的识别率。

## 1 器件制备

可见光拓展的 InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 探测器材料结构设计需要考虑以下 3 个因素的影响。

(1) 吸收层厚度:为了使器件获得较好的量子效率和暗电流,吸收层厚度要适中;

(2) InP 层下电极厚度:为了降低 InP 层对可见光的吸收,InP 层下电极厚度尽可能薄;另外考虑到下电极金属接触制备,InP 下电极厚度要选择一个适当的取值;

(3) 为了精确控制 InP 衬底彻底去除,需要加入一层 InGaAs 腐蚀层,以有效控制对 InP 衬底的去除深度,腐蚀层的组分和厚度决定腐蚀层的效果,需要进行优化设计和验证。

在材料结构进行理论优化设计和工艺验证的基础上,采用 MOCVD 生长系统完成了可见光拓展的 InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 探测器材料生长,之后通过光刻、蚀刻、钝化和金属膜生长等常规半导体器件工艺在 2 in(1 in=2.54 cm) InP 衬底上直接进行 320×256 探测器芯片的制备。探测器制备后进行芯片划片,通过测试陪管的性能对芯片进行筛选。挑选出性能良好的探测器芯片与读出电路互连,在完成下填充后采用机械磨抛、化抛、腐蚀的方法去除 InP 衬底,余留芯片厚度小于 4 μm。通过高倍率的光学显微镜对背减后的样品表面进行观察,从背面清晰地看到 320×256 探测器的像素分布,其照片如图 1 所示,照片中

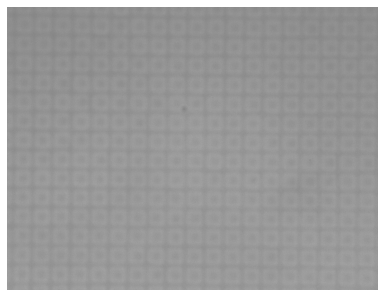


图 1 衬底全部去除后从背减背面看到的像素分布  
Fig. 1 Pixels of 320×256 InGaAs FPAs "seen" from thinned surface  
(back side surface)

由于器件芯片厚度非常薄已经呈现了透明状, 通过样品背面可以穿透地看到对面像素的分布。

通过对测试陪管  $I-V$  特性、探测率、光谱响应测试可知, 器件在 300K 室温下暗电流密度  $1.1E-7A/cm^2$ , 器件峰值探测率大于  $2E12\text{ cmHz}^{1/2}/W$ , 器件光谱响应  $0.6\sim 1.7\ \mu\text{m}$ , 如图 2 所示。以上结果显示目前制备的器件响应波长已扩展到可见光, 通过进一步的演示成像研究, 也能清晰地看到  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  探测器对可见光信号的探测。

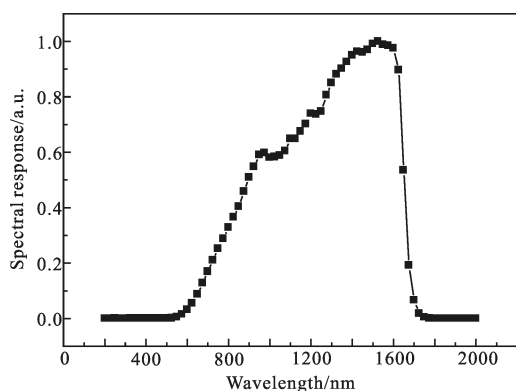


图 2 宽光谱探测器测试配管的光谱响应测试结果

Fig.2 Spectrum response of test element of visible extended wide spectrum InGaAs detectors

## 2 可见光拓展 $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 探测器成像

采用市售的可见光、短波可透的光学镜头以及中测检测柱瓦对可见光拓展  $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  探测器进行了简单的成像演示。在此基础上, 为了观察可见光拓展对  $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  探测器成像产生的效果, 采用滤短波、可见光的滤光片对目标分别进行了可见光、短波波段的成像, 同时, 完成了两个波段同时探测的宽光谱成像。图 3 和图 4 给出了对计算机屏幕和人脸在可见光、短波、以及可见+短波 3 种条件下的成像效果。从图 3 中可以看到, 采用透可见光的滤光片计算机屏幕上的字清晰可见, 而采用透短波的滤光片只能看到计算机屏幕, 屏幕上的字却看不到; 当不加滤光片, 可见光和短波都透过的条件下, 计算机屏幕及屏幕上的字同时都能看到, 显示获得了两个波段的信息。对人脸的成像也获得了类似的成像效果, 如图 4 所示, 采用可见光成像时, 人脸上的眼镜镜框、头发及眼珠呈现了明亮的黑色; 而采用

短波成像时, 眼镜镜框、头发及眼珠不再是原来的黑色, 而是呈现出灰色, 镜框呈半透明状; 当不加滤光片采用宽光谱探测时, 两个波段的信息同时采集, 眼镜镜框、头发及眼珠的成像图像则呈现了介于可见光和短波探测的成像效果, 既包含可见光信息也有短波波段的探测信息, 是两个波段探测得到的目标信息的融合状态, 实现了类似可见光和短波双波段探测的效果。另外, 以上成像结果只经过了简单的背景扣除, 没有进行其他任何图像增强处理, 成像细节却清晰可见, 反映了 InGaAs 探测器对室温目标反射成像的机理。

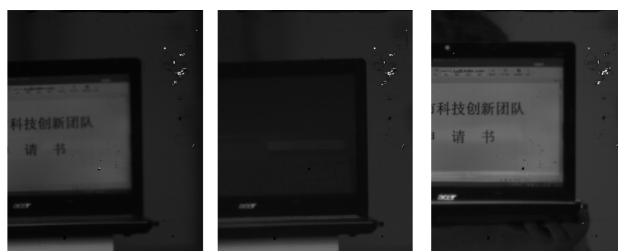


图 3 计算机屏幕 3 种条件下的成像效果

Fig.3 Imaging results of computer via three conditions

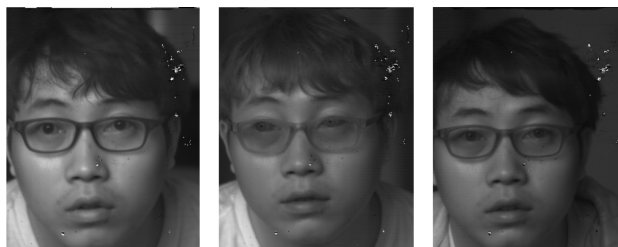


图 4 人脸 3 种条件下的成像效果

Fig.4 Imaging results of face via three conditions

## 3 结论

采用衬底去除的方法成功研制了  $320\times 256$  可见光拓展  $\text{InP}/\text{InGaAs}$  宽光谱红外探测器, 室温下器件探测率大于  $2E12\text{ cmHz}^{1/2}/W$ , 器件光谱响应和成像结果显示了对可见光信号的探测。通过把标准的  $\text{InP}/\text{InGaAs}$  短波红外探测器光谱探测延伸到可见光, 具有可见光/短波双波段探测的成像效果, 大大地丰富了对目标的探测信息, 能够有效提高对目标的识别率。

### 参考文献:

- [1] Hoffman A, Sessler T, Rosbeck J, et al. Megapixel InGaAs arrays for low background applications[C]//SPIE, 2007, 6660:

- 66600C-1.
- [2] Changa Shiuan-Ho, Fang Yean-Kuen, Ting Shyh-Fam, et al. Ultra high performance planar InGaAs PIN photodiodes for high speed optical fiber communication [J]. *Sensors and Actuators A*, 2007, 133(1): 9-12.
- [3] Boisvert J Isshiki T, Sudharsanan R, et al. Performance of very low dark current SWIR PIN arrays [C]//SPIE, 2008, 6940: 69400L.
- [4] Shi Yanli, Lv Yuzeng, Zhao Lusheng, et al. High performance solid-state and digitalized  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  low-light night vision devices [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3367-3372. (in Chinese)  
史衍丽, 吕玉增, 赵鲁生, 等.  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  高性能全固态数字化微光器件[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(12): 3367-3372.
- [5] MacDougal Michael, Geske Jon, Wang Chad, et al. Low dark current InGaAs detector arrays for night vision and astronomy[C]//SPIE, 2009, 7298: 72983F.
- [6] 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]//SPIE, 2007, 6660: 66600C-1.
- [7] Figgemeier H, Benecke M, Hofmann K, et al. SWIR detectors for night vision at AIM [C]//SPIE, 2014, 9070: 907008.
- [8] Abhay Joshi, Shubhashish Datta. Low-noise, UV-to-SWIR broadband photodiodes for large-format focal plane array sensors[C]//SPIE, 2012, 8385: 838507.