

〈综述与评论〉

InGaAs 短波红外探测器研究进展

张卫锋, 张若岚, 赵鲁生, 胡 锐, 史衍丽

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650023)

摘要: $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料属于III-V族化合物半导体合金材料, 随In组分含量的不同, 其光谱响应的截止波长可在 $0.87\sim 3.5\ \mu\text{m}$ 范围内变化, 并具有高量子效率, 加之成熟的MBE和MOVCD材料生长方式, 很容易获得大面积高质量的外延材料, InGaAs材料因此成为一种重要的短波红外探测材料。InGaAs探测器可以在室温或近室温下工作, 且具有较高的灵敏度和探测率, 是小型化、低成本和高可靠性的短波红外探测系统的最佳选择, 因此InGaAs短波红外探测器获得了飞速的发展和广泛的应用。同时对国内外InGaAs焦平面探测器发展状况和趋势进行了介绍。

关键词: InGaAs; 短波红外; 焦平面阵列; 红外探测器

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2012)06-0361-05

Development Progress of InGaAs Short-wave Infrared Focal Plane Arrays

ZHANG Wei-feng, ZHANG Ruo-lan, ZHAO Lu-sheng, HU Rui, SHI Yan-li

(Kunming Institute of Physics, Kunming Yunnan 650223, China)

Abstract: As the cut-off wavelength of spectral response of the III-V semiconductor alloy material, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ can be changed from 0.87 to $3.5\ \mu\text{m}$ by tuning the relative amount of Indium in the alloy. Besides, with high quantum efficiency, as well as mature MBE and MOVCD material growth technology, it is easy to gain large area and high-quality epitaxial materials. Therefore InGaAs become an important SWIR detector materials. InGaAs detector can work at room temperature with higher sensitivity and detectivity. So it is one of the best choices for miniature, low-cost and high-reliable SWIR detection system. The results of analysis and comparison provide guidance for rapid development of InGaAs short-wave infrared detectors. So InGaAs detectors obtain a rapid development and wide applications. At the same time, the status and development trends of the InGaAs infrared focal plane arrays(FPAs) domestic and abroad are introduced.

Key words: InGaAs, SWIR, focal plane arrays, infrared detector

0 引言

III-V族化合物 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 是一种直接带隙半导体合金材料, 具有高的电子迁移率和量子效率、良好的抗辐照特性等特点。 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料制备的短波红外探测器具有较高灵敏度和探测率, 在热电制冷或室温下工作仍具有较好的性能, 而且工艺简单、加工成本低, 因此InGaAs器件得到了快速发展和广泛应用。InGaAs器件在军事上可用于微光夜视

系统, 情报、监视和侦察(ISR)的军事和安全系统, 精确制导, 激光探测、定位与跟踪, 高光谱成像等方面。在民用方面可用于安防, 农业监测, 对地观测, 空间遥感, 生物医疗, 半导体检测, 仪器仪表, 航空安全和机器视觉等方面。图1所示为InGaAs部分应用实例。

1 InGaAs材料及器件的优越性

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料是III-V族化合物半导体合金

收稿日期: 2012-05-07.

作者简介: 张卫锋(1978—), 男, 博士生, 主要从事红外系统总体结构设计、红外探测器器件模拟与表征。

通讯作者: 史衍丽(1969—), 女, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为红外探测器研究。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助, 编号: U1037602.

材料，其具有以下几方面优点：

首先， $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料为闪锌矿立方晶体结构，晶格常数随In组分含量不同的变化关系遵循Vegard定律，近似为线性：

$$a(x) = (1-x)a_{\text{GaAs}} + xa_{\text{InAs}}$$

随着 x 值的变化， $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料的晶格常数由GaAs的0.56533 nm变化到InAs的0.60583 nm。当 $x=0.53$ 时， $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 晶格常数与InP的晶格常数完全匹配。因此，可以在InP衬底上外延生长高质量的InGaAs薄膜^[1]。另外，三元化合物 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 为直接带隙材料，其禁带宽度 E_g 随In含量的变化由InAs的0.35 eV变化到GaAs的1.43 eV，与之相对应的截止波长从3.5 μm 变化到0.87 μm 。如图2所示。

其次，在近室温条件下， $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 器件具有较高的量子效率，并具有较高的灵敏度和探测率。如图3所示，在 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 探测器光谱响应范围0.92~1.7 μm 内，InGaAs器件的量子效率大于80%；即使是当 $x=0.74$ 时，InGaAs器件的光谱响应范围在1~2.2 μm 时，量子效率也超过了65%^[2]。再次，与其它短波探测器材料相比，InGaAs材料具有更好

的材料稳定性，采用成熟的MBE和MOVCD生长方法，更容易获得大面积高质量的外延材料。最后，与HgCdTe材料相比，在室温和近室温的工作条件下，InGaAs材料芯片的各个性能参数均高出HgCdTe芯片一到两个量级，对应同一截止波长，其品质因子 R_0A 比HgCdTe高出1~2个数量级，具有更高的量子效率和灵敏度。降低工作温度，InGaAs的品质因子的增幅比HgCdTe更为明显^[3]。同时InGaAs器件具有温度响应比较稳定，一致性较好，极好的灵敏度及长时间工作的稳定性等特点。通过调节In组分，InGaAs红外焦平面的工作波长范围可延长至约2.6 μm ，覆盖了夜天光的主要能量范围，因此InGaAs红外探测器是微光夜视、近红外和短波红外领域探测系统更佳的选择。

2 InGaAs 探测器国内外的发展情况

在国外，对于InGaAs材料及探测器的研究与应用较为成熟，尤其是在空间遥感方面。如欧洲空间局（NSA）新一代环境卫星（ENVISAT）上使用



图1 InGaAs 探测器的应用实例

Fig.1 The application examples of InGaAs detector

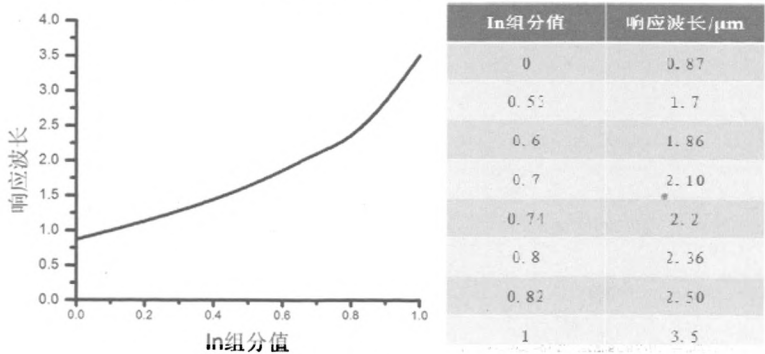


图2 响应波长随 In 组分的变化图

Fig.2 Spectral response changes with In content

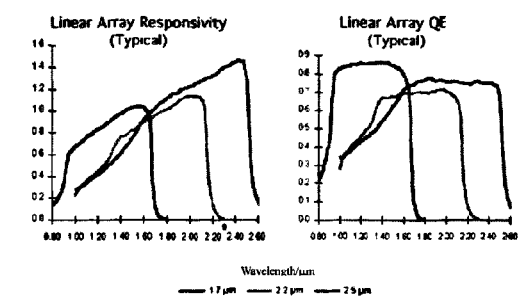


图 3 InGaAs 的探测器光谱响应及量子效率

Fig.3 InGaAs detector response and Quantum efficiency
的大气分布吸收光谱仪 (SCIAMACHY), 由美国 EPITAXX 公司提供, 采用的是 1024 元 InGaAs 短波红外扫描型焦平面组件。法国的陆地 (SPOT4 和 SPOT5) 卫星上使用的高分辨可见红外系统和植被仪, 由法国 THOMSON 公司提供, 采用的是由 10 个 300 元 InGaAs 线列探测器拼接成的线列 SWIR FPA, 响应波长 1.55~1.701 μm^[4]。印度国家环境卫星和资源卫星上装配的全自动扫描仪和高级广角探测仪^[5], 采用了 1024~6000 元 InGaAs 长线列焦平面器件, 用于近红外 (1~1.75 μm) 和延展波长的短波红外 (~2.4 μm) 探测。美国 NASA 新千年计划 (NMP) 地球观测 1 号卫星 (EO-1), 装备了大气水蒸气变化校正仪和探测卷云的大气校正仪 (LAC), 采用 3 个 256×256 元 InGaAs 红外探测器焦平面组件, 能获得空间维和光谱维的丰富信息^[6]。

比利时微电子中心^[8]研制了的 320×256 InGaAs 短波凝视红外焦平面组件, 响应波长为 0.9~2.3 μm, 量子效率大于 80%, 目前该产品已进入工

程化阶段。Xenics 公司推出的 XS-1.7-640/XS-1.7-320 系列化数字红外相机也采用了 InGaAs 探测器技术, 用于搜索营救、短程监控和视觉增强等领域, 其探测器响应波段为 0.9~1.7 μm, 工作方式 TE1 制冷, 像素为 640×512/320×256, 像元尺寸为 20 μm/30 μm, 有效像元 >99%, 帧频为 20~90 Hz。

美国 Goodrich 旗下的传感无限公司 (Sensors Unlimited Inc.) 是近红外 (NIR) 和短波红外 (SWIR) 成像用 InGaAs 器件及相机的国际著名提供商, 在 InGaAs 探测器的研究方面处于世界领先地位, 目前已开发的 InGaAs 产品如表 1 所示。该公司一维 InGaAs 阵列一般采用前照明, 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。二维阵列采用背照明, InGaAs 阵列与 ROIC 之间则采用 In 柱倒装焊方式连接^[8]。目前, 该公司把 InGaAs NIR/SWIR FPAs 的应用定位在武器的激光跟踪和通讯系统, 军用夜视, 工业过程、安全监测及科学研究等领域。

FILR 公司的 Tau SWIR 采用高分辨率 640×480 InGaAs FPA 器件, 像元中心距为 25 μm, 可从远距离透过烟雾获得清晰的图像质量, 可识别微弱光线下隐藏的各种细节。适用于各种光电设备 (OEM) 应用, 包括各种光电 (EO) 系统, 武器瞄准、夜视系统, 无人机, 无人地面传感器等。FILR 下属的 Indigo 子公司生产的 320×256, 640×512 短波 InGaAs FPA, 工作波段为 0.9~1.7 μm, 焦平面探测器组件安装在 84-pin 无线芯片基片上, 也可直接集成在探测器组件中。在国内, InGaAs 焦平面阵列的研究还处于起步阶段, 还没有相应工程化的产品出

表 1 美国传感无限公司 InGaAs 探测器

Table 1 Sensors Unlimited Inc. of American InGaAs detector

规格	像元间距	响应波段	性能
128×128	30 μm	1.0~1.7 μm	量子效率大于 80%, 暗电流小于 100 pA
320×240	40 μm	0.9~1.7 μm	工作温度为 -40℃~70℃, 探测率达 $>1\times10^{14}\text{ cmHz}^{1/2}\text{ W}^{-1}$, 量子效率大于 70%, 帧频 60 fps;
320×256	25 μm	0.9~1.7 μm	工作温度为 -35℃~70℃, 探测率达 $>1\times10^{14}\text{ cmHz}^{1/2}\text{ W}^{-1}$, 量子效率大于 70%, 帧频 30 fps。
640×480	30 μm	0.9~1.7 μm	工作温度为 -25℃~60℃, 探测率达 $2.6\times10^{13}\text{ cmHz}^{1/2}\text{ W}^{-1}$, 量子效率大于 65%, 帧频 30 fps。
640×512	15 μm	400~750 nm 750~1000 nm 1000~1700 nm	工作温度为 -35℃~71℃, 室温下 $D^*\!=\!1.8\times10^{13}\text{ cmHz}^{1/2}\text{ W}^{-1}$ 。 盲元率小于 2%, 量子效率大于 65%, 帧频 30 fps。
1024×1024	20 μm	0.9~1.7 μm	工作温度为 -20℃~45℃, 近室温下 $D^*\!=\!9.7\times10^{12}\text{ cmHz}^{1/2}\text{ W}^{-1}$ 。
1280×1024	15 μm	0.9~1.7 μm	量子效率在波长 850 nm 为 70%, 1310 nm 为 85%, 1350 nm 为 80%; $D^*\!=\!9.7\times10^{12}\text{ cmHz}^{1/2}\text{ W}^{-1}$, 帧频 30 fps。

现。国内 InGaAs 探测器主要研究机构包括中科院上海技术物理研究所、中科院长春光学精密机械与物理研究所、中国电子科技集团第 44 所、洛阳光电技术发展中心和昆明物理研究所等单位。

国内研发的进展情况如表 2 所示。目前，国内开始注重并发展 InGaAs 红外焦平面阵列器件的研发工作，但还处于起步阶段，没有研制出能够产业化的 InGaAs 焦平面产品，关键是没有解决响应均匀性问题。

3 InGaAs 光电探测器的研究趋势

InGaAs材料在制备短波探测器方面的一系列优点使得国际上相关研究机构纷纷加入研究行列，近年来相关方面的报道逐年增加。InGaAs器件的最新研究动态主要集中在两个方面，一是继续提高器件性能，器件规模向更大焦平面阵列发展。二是光谱响应范围向短、长波范围拓展，短波方向可见光扩展，长波方向向更长的波长发展，以获得同时响应可见、近红外和短波红外光谱范围的双色或多色 InGaAs焦平面探测器^[7]。

第一方面的研究动态是目前所有探测器共同的发展规律。目前几种主要的短波红外探测器材料都实现了百万像素级的大规模焦平面阵列突破。另外，通过焦平面上的多探测器拼接技术，可将现有规模的阵列器件拼接成 4 倍、9 倍、甚至 16 倍的超大规模器件，以满足对大面阵探测器的实际应用需求^[3]。第二方面趋势是InGaAs探测器发展的重点，经过近

十年来的发展，InGaAs短波红外探测器的光谱响应范围已从最短的短波红外范围向可见光区域延伸。另外，截止波长向长波方向拓展，即研制所谓的拓展波长的InGaAs探测器。GOODRICH旗下的SUI团队的研究成果最为引人注目，该团队的研究人员发明了一种其称之为“Visible InGaAs”的技术，可以将光谱响应范围延伸到 400 nm。因为研究人员在进行InGaAs器件的光谱测量时发现，从器件正面照射与从器件背照射所得到的光谱响应存在差异。通过研究分析发现，造成这种差异的主要原因是由于InP衬底（背面照射）和InP钝化层（正面照射）的对光照的吸收不同。该团队的研究人员采用In柱互联后去除InP衬底的工艺方法，实现了将光谱响应范围向可见光方向延伸的目的。经过“Visible InGaAs”技术处理，InGaAs 短波红外焦平面探测器的响应光谱明显包含了丰富的可见光成份，后续的光谱特性测量也证明了这一观点。图 4 所示为 Visible InGaAs SWIR焦平面探测器的光谱响应曲线^[10]。美国Indigo Systems公司同时开展了InGaAs光谱响应向可见光延伸的研究，采取的方法是直接处理 InGaAs材料，研究人员将该技术命名为“visGaAs”。根据得到的实验数据可知，器件在 350 nm仍具有较高响应。

众所周知，标准的InGaAs具有 1.68 μm的长波长截止，但是许多实际应用需要检测波长较长的光。为了满足实际应用的需要，使InGaAs探测器的截止波长向长波方向拓展，需要增加InGaAs材料中

表 2 国内 InGaAs 器件进展情况

Table 2 R&D situation of domestic InGaAs detector			
单 位	规格	响应波段	性 能
中电 44 所	320×240	1.0~1.7 μm	峰值探测率为 6.7×10 ¹² cmHz ^{1/2} W ⁻¹ ，量子效率>65%
	256×1	0.9~1.7 μm	峰值探测率为 1.2×10 ¹² cmHz ^{1/2} W ⁻¹ ，响应不均匀性 3.87%
		~2.4 μm	峰值探测率为 3.25×10 ¹⁰ cmHz ^{1/2} W ⁻¹ ，响应不均匀性 11%。
中科院上海 技术所	512×1	0.9~1.7 μm	峰值探测率为 6.13×10 ¹¹ cmHz ^{1/2} W ⁻¹ ，响应不均匀性 3.71%， 盲元率为 0.39%
	640×1 ^[9]	1.7~2.6 μm	响应截止波长和峰值波长分别为 2.36 μm 和 1.92 μm，
			峰值探测率 2.01×10 ¹¹ cmHz ^{1/2} W ⁻¹ ，峰值量子效率 37.5%，响应非均匀 性 8.77%，盲元率为 0.6% ^[10]
重庆光电技术 研究所	320×256	0.9~1.7 μm	读出电路为SiCMOS数模混合集成电路 ^[11] ， 峰值探测率为 6×10 ¹² cmHz ^{1/2} W ⁻¹ ，动态范围达 68 dB。
洛阳光电技术 发展中心	128×128	0.9~1.7 μm	采用闭管扩散平面结工艺，读出电路采用 DI 模式电路， 峰值探测率为 1.2×10 ¹² cmHz ^{1/2} W ⁻¹ ，响应不均匀性 23%。
中国空空导弹 研究院		0.9~1.7 μm	峰值响应率为 R _{VP} =2.41×10 ⁷ V/W， 峰值探测率为 1.51×10 ¹² cmHz ^{1/2} W ⁻¹ ，透射率能够超过 80%。

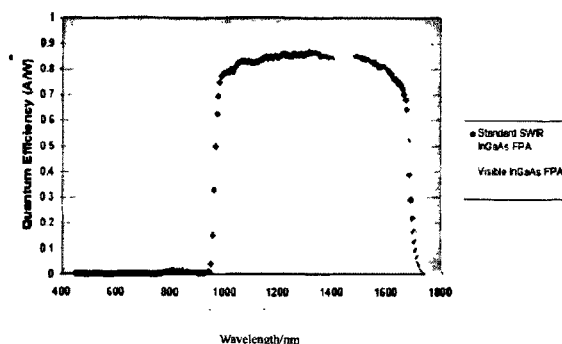


图4 Visible及SWIR InGaAs FPA的光谱响应曲线

Fig.4 Special response of VisGaAs and SWIR InGaAs FPA

In的含量,从而InGaAs材料的禁带宽度减小,截止波长增大。但这样就会使InGaAs材料与衬底材料的晶格失配比增大,为了保证材料的生长质量从而防止器件性能劣化,就必须在薄膜和衬底之间引入合适的缓冲层结构。目前国内外已有不少这方面成功的报道,InGaAs器件的响应波长已延长到 $\sim 2.6 \mu\text{m}$ 。

4 结论

通过对 InGaAs 材料的光谱响应特性分析,以及对 InGaAs 材料的一系列优点了解,表明了 InGaAs 是一种在短波红外领域极有前景的探测器材料。如今,国外高性能、大面阵的 InGaAs 焦平面阵列技术获得比较成熟的发展,已在科学、军事、民用等方面的微光夜视、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获得广泛的应用;而在国内,InGaAs 焦平面阵列的研究起步较晚,能够成功工程化应用的产品还很少。因此,加快 InGaAs 短波红外探测器的研制,特别是近室温 InGaAs 短波红外焦平面探测器的研制和开发,对我国的红外事业而言具有非常重要的战略意义。

参考文献:

- [1] 陈洪钧,周航宇. InGaAs 可见/短波红外焦平面探测器新进展[J]. 红外与激光工程, 2007(4): 431-434.
- [2] Michael A Blessinger M A, Enriyuez M, Croppe J V, et al. Performance of focal plane arrays for the photon counting arrays(PCAR) program[J]. *Proc. of SPIE*, 2007, **6542**: 65420K(11).
- [3] 潘建旋,以善珍,周航宇. InGaAs 短波红外探测器[J]. 红外与激光工程, 2007(4): 202-205.
- [4] MOY J P, HIJGoN X, CHABBAL J, et al. 3000 InGaAs photodiode multiplexed linear array for SPOT4 SWIR channel[C]//*Pro. of SPIE*, 1989, **1107**: 137-151.
- [5] Dave H, Dewan C, Paul S, et al. AWIFS camera for resource sat[C]//*Pro. of SPIE on Multispectral, hyp-erspectral, and Ultra spectral Remote Sensing Technology, Techniques, and Applications*, 2006, **6405**.
- [6] 钟建业,魏雯. 美国预警卫星探测器及其相关技术[J]. 中国航天, 2005(6): 22-30.
- [7] Alan Hoffman, Todd Sessler, Joseph Rosbeck, et al.. Megapixel InGaAs Arrays for Low Background Applications[C]// *Pro. of SPIE on Infrared Technology and Applications XXXI*, 2005, **5783**: 32-38.
- [8] 曹扬,金伟其,王霞,等. 短波红外焦平面探测器及其应用进展[J]. 红外技术, 2009, **31**(2): 63-68.
- [9] 朱耀明,李永富,李雪,等. 基于 N-on-P 结构的背照射延伸波长 640×1 线列 InGaAs 探测器[J]. 红外与毫米波学报, 2012, **31**(1): 11-14.
- [10] 高新江,张秀川,唐遵烈,等. 320×256 InGaAs 短波红外焦平面阵列探测器[J]. 半导体光电, 2009, **30**(2): 178-190
- [11] HOELTER T R, BARTON J B. Extended short wavelength spectral response from InGaAs focal plane array [C]//*Pro. of SPIE on Infrared Technology and Application XXIX*, 2003, **5074**: 481-490
- [12] M.G. Brown. Development of NIR Detectors and Science Driven Requirements for SNAP[C]//*Pro. of SPIE on Astronomical Telescopesand Instrumentation* 2006, **6265**: 113-121
- [13] C.J. Han, R. Rawlings, M. Sweeney, et al. 320×240 and 640×480 UFPAs for TWS and DVE applications[C]// *Pro. of SPIE*, 2005, **5783**: 459-65
- [14] M. Ueno, Kosasayama, T. Sugino, et al. 640×480 pixel uncooled infrared FPA with SOI diode detectors[C]// *Pro. of SPIE*, 2005, **5783**: 566-577.
- [15] M. Enriquez, Marlon, M. Blessinger, et al. Performance of high-resolution visible-InGaAs imager for day/night vision[C]// *Pro. of SPIE*, 2008, **6940**: 64900-1
- [16] R. Smith, Christopher Bebek, Marco Bonati et al., Noise and zero-point drifts in $1.7 \mu\text{m}$ cutoff detectors for SNAP, *Astronomical Telescopes and Instrumentation*, [C]// *Pro. of SPIE*, 2006: **6276**-30.
- [17] Bora M. Onat, Wei Huang, Navneet Masaun et al. Ultra-low dark current InGaAs technology for focal plane arrays for low-light level visible-shorhuave infrared imaging[C]// *Pro. of SPIE*, 2007, **6542**: 65420L(9).
- [18] HANSEN M P, MALCHOW D S. Overview of SWIR detectors, cameras, and applications[J]. *SPIE*, 2008, **6939**: 1-11
- [19] Martin, T. R. Bniaker, P. Dixon, et al. 640×512 InGaAs focal plane array camera for visible and SWIR imaging[C]// *Pro. of SPIE* 2005, **5783**: 12-20
- [20] P.W. Norton, M. Kohin. Technology and application advancement of uncooled imagers[C]// *Pro. of SPIE*, 2005, **5783**: 424-430.
- [21] F.P. Pantuso. The path to affordable and available 640×480 uncooled FPAs [C]// *Pro. of SPIE*, 2005, **5783**: 439-443.