

InGaAs 近红外线列焦面阵的研制进展

龚海梅^{1,2}, 张可锋^{1,2}, 唐恒敬^{1,2}, 李 雪^{1,2}, 张永刚³, 缪国庆⁴, 宋 航⁴, 方家熊^{1,2}

- (1.中国科学院上海技术物理研究所 传感技术联合国家重点实验室, 上海 200083;
2.中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件国防科技创新实验室, 上海 200083;
3.中国科学院上海微系统与信息技术研究所 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050;
4.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激发态物理重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘 要:研制出光谱响应为 0.9~1.7 μm 的 256×1、512×1 元 InGaAs 线列焦平面组件, 和光谱响应延展至 2.4 μm 的 256×1 元 InGaAs 线列焦平面组件。焦平面组件包括光敏芯片、读出电路、热电制冷器以及管壳封装。光敏芯片在 InP/InGaAs/InP(p-i-n)双异质结外延材料上采用台面结构实现, 并与 128×1 或 512×1 元 CTIA 结构的读出电路耦合。焦平面器件置于双列直插金属管壳中, 采用平行缝焊的方式进行封装。介绍了高均匀性长线列 InGaAs 焦平面组件的关键技术和主要性能结果, 为更长线列焦平面组件的研制提供了坚实的基础。

关键词: 短波近红外; InGaAs; 焦平面组件; 读出电路

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2009)01-0014-05

Developments of near IR linear InGaAs FPAs in China

GONG Hai-mei^{1,2}, ZHANG Ke-feng^{1,2}, TANG Heng-jing^{1,2}, LI Xue^{1,2}, ZHANG Yong-gang³,
MIAO Guo-qing⁴, SONG Hang⁴, FANG Jia-xiong^{1,2}

- (1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. Innovation Laboratories for National Defense Science and Technology of Infrared Imaging Materials and Devices, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 3. State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 4. Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Both 256×1, 512×1 element linear near IR InGaAs focal plane array (FPA) modules with wavelengths of 0.9~1.7 μm and 256×1, cut-off wavelength of 2.4 μm are fabricated. The InGaAs FPA modules consist of the detector sensitive chip, CMOS readout circuit, thermoelectric cooler and sealed package as well. The sensitive chip of InGaAs detector was provided by mesa structure on the InP/InGaAs/InP(p-i-n) double hetero-structure epitaxial material, which was wire-bonded to 128×1 or 512×1 element readout integrated circuit (ROIC). The detector arrays were packaged in a dual in-line package by parallel sealing. The key techniques of fabrication and main results of the high uniformity linear InGaAs FPA modules were introduced, which provided a foundation for the manufacture of the longer linear FPA modules.

Key words: Short-wavelength near IR; InGaAs; FPA modules; ROICs

收稿日期: 2008-05-10; 修订日期: 2008-06-25

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50632060)

作者简介: 龚海梅(1965-), 男, 江苏海门人, 研究员, 副所长, 博士生导师, 博士, 主要从事航天遥感红外光电传感器, 红外、紫外焦平面等新型探测器组件及其抗辐射机理与可靠技术等方面的研究。Email: hmgong@mail.sitp.ac.cn

0 引言

InGaAs 近红外探测器组件在 $0.9\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 波段可以非制冷室温工作,当响应光谱延展至 $2.4\ \mu\text{m}$ 时可以在近室温热电制冷环境下工作。它们具有探测率高、均匀性好等优点,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,所以长线列和面阵 InGaAs 焦平面探测器逐渐应用于空间遥感领域,以及夜视、侦察与监视、遥感系统、红外成像制导、光电对抗等军事领域。

在国外,InGaAs 红外焦平面在空间遥感的应用起步较早,欧洲环境卫星的大气分布扫描成像吸收光谱仪^[1-2]、法国的陆地卫星的高分辨可见红外系统和植被仪^[3-4]、印度环境卫星和资源卫星的线性成像扫描仪和高级广角传感器^[5]均采用了 $1\ 024\sim 6\ 000$ 元 InGaAs 长线列焦平面器件,用于近红外($1\sim 1.75\ \mu\text{m}$)和延展波长的短波红外($\sim 2.4\ \mu\text{m}$)的探测,美国 NASA 启动的新千年计划地球观测 1 号卫星的大气水蒸气变化校正及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。2005 年美国传感无限公司制备了 $1\ 280\times 1\ 024$ 和 $1\ 024\times 1\ 024$ 元的 InGaAs 短波红外焦平面^[6]。随着国内空间遥感领域的发展,对红外探测器的性能要求越来越高,国内开始关注并发展用于空间遥感领域的 InGaAs 红外焦平面。

文中介绍了工作波段为 $0.9\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 的 256×1 、 512×1 元 InGaAs 线列焦平面组件,及工作波段延展至 $2.4\ \mu\text{m}$ 的 256×1 元 InGaAs 线列焦平面组件,线列焦平面组件包括光敏芯片、读出电路、热电制冷器以及管壳封装,并实现了 $0.9\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 波段 256×1 元线列焦平面的成像演示。高性能 256×1 、 512×1 元 InGaAs 线列焦平面组件的成功研制,为更长线列焦平面组件的研制奠定了坚实的基础。

1 光敏芯片的制备

InGaAs 短波红外探测器组件中的光敏芯片是在金属有机气相外延生长的 $\text{p-InP}/\text{i-InGaAs}/\text{n-InP}$ 双异质结上采用台面结构实现的。截止波长为 $1.7\ \mu\text{m}$ 的光敏芯片,采用与 InP 晶格匹配的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料,在

InP 半绝缘衬底上依次生长厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 、掺杂浓度为 $2\times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ 的 n-InP 缓冲层,厚度为 $2.5\ \mu\text{m}$ 、掺杂浓度为 $4\times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ 的 $\text{n-In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 吸收层,厚度为 $0.5\ \mu\text{m}$ 、掺杂浓度为 $2\times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ 的 p-InP 窗口层。为使 InGaAs 探测器的截止波长向长波方向延展,需要增加 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中 In 的组分,从而使材料的禁带宽度相应减小。将 InGaAs 探测器的截止波长从 $1.7\ \mu\text{m}$ 延展至 $2.4\ \mu\text{m}$,需要使 In 的组分从 0.53 增加至 0.78,这会使 $\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}$ 和 InP 衬底间有 1.85% 的晶格失配。在此情况下为保证良好的材料质量,防止探测器性能劣化,必须引入合适的缓冲层结构。采用了 In 组分线性渐变的 $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ 三元体系为缓冲层,其晶格常数随 In 组分的变化同样也线性渐变,在缓冲层上依次生长 $\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}$ 的吸收层和窗口层,通过对外延材料进行 X 射线衍射(XRD)等分析可以得出: $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ 缓冲层能有效地抑制晶格失配,得到了较好的外延材料。

外延材料经过常规清洗后,通过台面刻蚀和腐蚀、表面和侧面钝化后,在电极孔处采用 $\text{Ti}/\text{Pt}/\text{Au}$ 生长 n 型和 p 型电极,经过快速热退火工艺形成欧姆接触的电极。光敏元区成“品”字形排布,p 电极通过两侧延伸引出,中间为 n 电极。 256×1 和 512×1 元线列焦平面均采用此结构。图 1 是 256×1 元 InGaAs 光敏芯片照片,中间为 n 区公用电极, 256 元光敏元区成“品”字形排布,其光敏元面积为 $50\times 50\ \mu\text{m}^2$,两行中心距为 $200\ \mu\text{m}$ 。

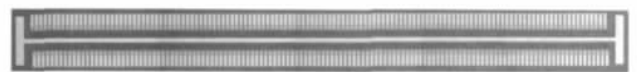


图 1 256×1 元 InGaAs 探测器光敏芯片照片
Fig.1 Photograph of 256×1 element linear InGaAs sensitive chip

2 读出电路

读出集成电路是焦平面阵列的重要组成部分,是把焦平面的各种功能集成在单一的半导体芯片中的高集成度电路,其基本功能是探测器信号的转换、放大以及将数据传输到较少的输出端。对于周围物体的黑体辐射,被测物体的辐射信号相当微小,电流大小为纳安或皮安,而且这种小信号很容易受其他噪声的干扰,因此,选择和设计电路就成为焦平面组件研制过程中非常关键的环节。电容跨阻抗放大器(CTIA)是读出电路常用的输入级,具有低输入阻抗,可提供

间为 1 000 μs , 每一像元的读出时间为 50 μs 。通过测量 256 \times 1 元 InGaAs 探测器组件的响应输出信号, 可根据公式(1)计算响应的不均匀性 U_s :

$$U_s = \frac{1}{V_s} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_s - \bar{V}_s)^2} \quad (1)$$

式中: N 为 256 元; V_s 和 \bar{V}_s 分别为输出信号电压及其平均值。

根据公式(2)计算焦平面组件像元的黑体响应率:

$$R_{bb} = \frac{V_s}{P \times \tau} = \frac{V_s \times 4L^2}{\sigma(T_2^4 - T_1^4) \times d \times A_D} \quad (2)$$

式中: L 为黑体到探测器距离; σ 为斯忒藩常数; T_2 为黑体温度; T_1 为背景温度; d 为黑体出射孔径; A_D 为光敏芯片的面积。读出电路的源随器增益 α 为 0.644, 根据公式(3)和(4)可计算光敏元上产生的光电流和峰值响应率, 再根据公式(5)可计算峰值探测率, 其中 V_n 为噪声, 一般在 10^{-4} V 数量级。

$$V_s = \frac{I_{ph} t_{int}}{C_{int}} \alpha \quad (3)$$

$$R_\lambda = G R_{bb} = G \frac{I_{ph}}{P} \quad (4)$$

$$G_{\lambda_p}^* = G D_{bb}^* = \frac{G V_s 4L^2 V_s \sqrt{1/2t_{int}}}{V_n \sigma(T_B^4 - T_0^4) d \sqrt{A_D}} \quad (5)$$

图 6 是响应波段为 0.9~1.7 μm 256 \times 1 元 InGaAs 探测器组件的峰值探测率的直方图, 其平均峰值探测率为 $1.20 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, 响应不均匀性为 3.87%, 无盲元; 图 7 是响应波段为 0.9~1.7 μm 512 \times 1 元 InGaAs 探测器组件的响应直方图, 其平均峰值探测率为 $6.13 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, 响应不均匀性为 3.71%, 盲元率为 0.39%。

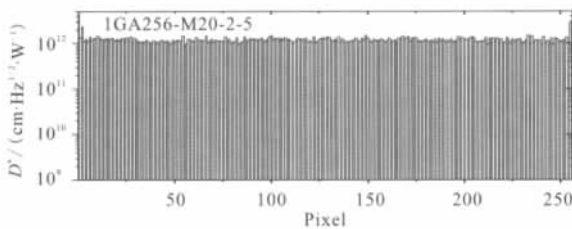


图 6 256 \times 1 元 InGaAs 短波焦平面组件的峰值探测率直方图($\lambda_c=1.7 \mu\text{m}$)

Fig.6 Detectivity histogram of 256 \times 1 element linear InGaAs FPA module($(\lambda_c=1.7 \mu\text{m})$)

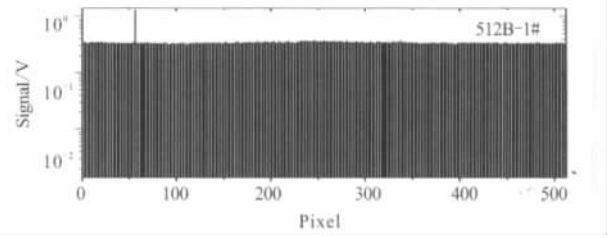


图 7 512 \times 1 元 InGaAs 短波焦平面组件的响应直方图($\lambda_c=1.7 \mu\text{m}$)

Fig.7 Response histogram of 512 \times 1 element linear InGaAs FPA module($(\lambda_c=1.7 \mu\text{m})$)

2.4 μm 波段器件的性能是通过抽测同一批次器件上 50 元 InGaAs 光敏芯片得到的, 根据信号和噪声, 计算器件的探测率, 其室温下的探测率直方图如图 8 所示, 抽测的 50 元芯片的响应不均匀性为 11%, 平均探测率为 $3.25 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, 降低温度到 -20°C , 芯片探测率可提高到 $8 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, 图 9 为实测的芯片探测率随温度的变化关系。

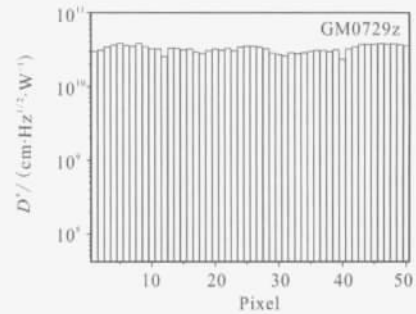


图 8 延伸波长的 InGaAs 芯片探测率直方图

Fig.8 Detectivity histogram of InGaAs chip at extended wavelength

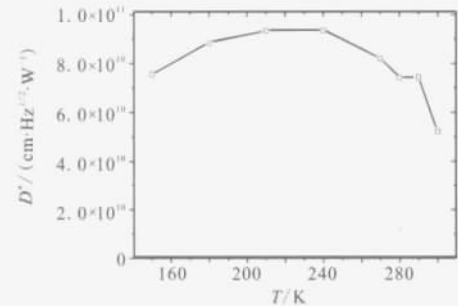


图 9 芯片探测率随温度的变化关系

Fig.9 Detectivity as a function of temperature

5 组件成像演示

选用了 256 \times 1 元 0.9~1.7 μm 波段的 InGaAs 线列

焦平面组件进行成像演示,把封装后的组件安装在扫描系统上,窗口采用 Si 基滤光片,选用了不同的积分时间和累加次数,在室温下进行了多次扫描成像实验,实验时,物距定为无穷远,电路积分时间为 0.5 ms。图 10 是经过均匀化矫正后的清晰图片。



图 10 256×1 元 InGaAs 探测器组件成像照片
Fig.10 Scanning photograph of 256×1 element linear InGaAs detector module

6 结论与展望

研制出光谱响应为 0.9~1.7 μm 的 256×1、512×1 元 InGaAs 线列焦平面组件,和光谱响应延展至 2.4 μm 的 256×1 元 InGaAs 线列焦平面组件。InGaAs 短波红外线列焦平面组件包括光敏芯片、读出电路、热电制冷器以及管壳封装,采用金属管壳平行封焊的方式密封。响应光谱截止到 1.7 μm 的 256×1 元焦平面组件的不均匀性为 3.87%,无盲元,室温平均探测率达 $1.20 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$,并实现了成像演示。512×1 元焦平面组件的不均匀性为 3.71%,盲元率为 0.39%,室温平均探测率为 $6.13 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。2.4 μm 波段的 256×1 元焦平面器件在室温下的响应不均匀性为 11%,平均探测率为 $3.25 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}$ (抽测 50 元光敏元)。

为满足应用和进一步发展的要求,InGaAs 红外焦平面探测器组件的研制需要进一步提高探测率、降

低响应不均匀性,同时向更长线列(如 6 000 元)、大面阵(如 1 024×1 024 元)发展。

参考文献:

- [1] HOOGEVEEN R W, SPRUIJT H J, BROERS B, et al. Near - infrared focal - plane arrays for SCIAMACHY [C]// **Proceedings of SPIE, Advanced and Next-Generation Satellites**, 1995, **2583**: 459-470.
- [2] HOOGEVEEN R W, VAN DER A R, GOEDE A P. Extended wavelength InGaAs infrared (1.0 -2.4 μm) detector arrays on SCIAMACHY for space - based spectrometry of the Earth atmosphere [J]. **Infrared Physics & Technology** V, 2001, **42**: 1-16.
- [3] MOY J P, CHABBAL J J, CHAUSSAT S, et al. Buttable arrays of 3000 multiplexed InGaAs photodiodes for SWIR imaging [C]// **SPIE**, 1986, **686**: 93-95.
- [4] MOY J P, HUGON X, CHABBAL J, et al. 3000 InGaAs photodiode multiplexed linear array for SPOT4 SWIR channel [C]// **SPIE**, 1989, **1107**: 137-151.
- [5] DAVE H, DEWAN C, PAUL S, et al. AWiFS camera for resourcesat [C]// **Proceedings of SPIE, Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Remote Sensing Technology, Techniques, and Applications**, 2006, **6405**: 64050X.
- [6] HOFFMAN A, SESSLER T, ROSBECK J, et al. Megapixel InGaAs arrays for low background applications [C]// **Proceedings of SPIE, Infrared Technology and Applications XXXI**, 2005, **5783**: 32-28.
- [7] HEWIT M J, VAMPOLA J L, BLACK S H. Infrared readout electronics: a historical perspective [C]// **Proceedings of SPIE, Infrared Readout Electronics**, 1994, **2226**: 108-119.
- [8] FOSSUM E R, PAIN B. Infrared Readout Electronics for Space Sensors: State of the Art and Future Directors [C]// **Proceedings of SPIE, Infrared Technology XIX**, 1993, **2020**: 262-285.