

# 128 ×160 元 GaAs/ AlGaAs 多量子阱 长波红外焦平面阵列\*

苏艳梅<sup>1</sup> 种 明<sup>1</sup> 张艳冰<sup>2</sup> 胡小燕<sup>2</sup> 孙永伟<sup>1</sup> 赵 伟<sup>3</sup> 陈良惠<sup>1</sup>

(1 中国科学院半导体研究所 纳米光电子实验室, 北京 100083)

(2 中国电子科技集团第十一研究所 (华北光电所), 北京 100015)

(3 中科光电有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 研制了 128 ×160 元 GaAs/ AlGaAs 多量子阱红外焦平面阵列,它是目前国内报道的最大像元数的量子阱红外焦平面阵列. 77 K 时,器件的平均黑体响应率  $R_v = 2.81 \times 10^7 \text{ V/W}$ ,平均峰值探测率  $D^* = 1.28 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{Hz}^{1/2}$ ,峰值波长  $\lambda_p = 8.1 \mu\text{m}$ ,器件的盲元率为 1.22%.

**关键词:** 红外探测器; 量子阱; 焦平面阵列

**PACC:** 0762; 7240

**中图分类号:** TN215

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2005)10-2044-04

## 1 引言

红外探测技术在通讯、气象、地球资源探测、工业探伤、医学等民用部门有广泛的应用,同时还在战略预警、战术报警、夜视、制导等军事方面有重要应用. HgCdTe 是目前应用比较广泛的材料,通过调整组分可以改变其响应波长. 目前 HgCdTe 红外探测器已经被成功地应用到气象勘测、夜视、预警探测等各个方面. 但是 HgCdTe 红外探测器的研究也遇到了一些困难,例如材料制备困难、成本高、均匀性差等. 近年来,人们对 III-V 族材料制成的量子阱红外探测器进行了深入的研究<sup>[1~4]</sup>. III-V 族材料生长及器件制作工艺已十分成熟,材料的均匀性好,成本较低,材料组分容易控制,这为基于 III-V 族材料的大面阵量子阱红外探测器提供了技术基础.

自上世纪 80 年代以来,量子阱红外探测器的研究取得了很大的进展. 2003 年,报道了 640 ×512 元的四色量子阱红外焦平面阵列<sup>[5]</sup>. 2005 年,美国的 Gunapala 等人又成功地研制了 1024 ×1024 元的长波和中波量子阱红外焦平面阵列<sup>[6]</sup>. 国内方面,中科院上海技术物理所已报道了他们研制的 128 ×1 元

的 GaAs/ AlGaAs 多量子阱扫描型红外焦平面<sup>[7]</sup>以及 64 ×64 元的 GaAs/ AlGaAs 长波红外焦平面<sup>[8]</sup>. 本文报道在国内率先研制的 128 ×160 元 GaAs/ AlGaAs 量子阱红外焦平面阵列. 在 77 K 时,器件的平均黑体响应率  $R_v = 2.81 \times 10^7 \text{ V/W}$ ,平均峰值探测率  $D^* = 1.28 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{Hz}^{1/2}$ ,峰值波长  $\lambda_p = 8.1 \mu\text{m}$ ,器件盲元率为 1.22%.

## 2 器件的材料生长结构

在半绝缘的 GaAs (100) 衬底上生长 1.0 μm 的下接触层. 然后生长 50 个周期的 GaAs/ Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 多量子阱,其中阱宽为 4.5 nm,垒宽为 50 nm. 为了提供激发跃迁的光电子,阱区进行 n 型掺杂. 阱中的 Si 掺杂浓度为  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . 最后生长 0.7 μm 的上接触层,上下接触层的掺杂浓度均为  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

## 3 128 ×160 元面阵的制作

在上接触层上用光刻和干法刻蚀的方法制备二维光栅,光栅周期为 3 μm. 然后在上接触层处真空

\* 国家高技术研究发展计划资助项目 (批准号: 2002AA313100)

蒸镀 AuGeNi/ Au 作为上电极层和反射层. 再用干法刻蚀的方法刻蚀材料, 穿过 GaAs/ Al<sub>0.3</sub> Ga<sub>0.7</sub> As 多量子阱层, 直到重掺杂的下接触层, 形成面阵. 在下接触层上真空蒸镀 AuGeNi/ Au 作为下电极层. 生长钝化层后, 腐蚀出倒装焊用的引线孔.

将探测器光敏元设计成 128 ×160 元的二维面阵结构, 单元面积为 30μm ×30μm, 光敏元的中心距为 60μm. 我们在一个 50mm 的 GaAs 片上制作了 16 个 128 ×160 元的面阵, 如图 1 所示.

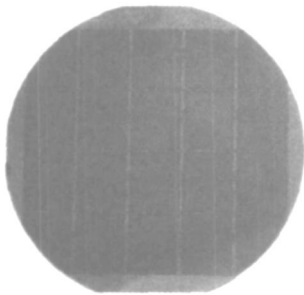


图 1 一个 50mm GaAs 片上的 16 个 128 ×160 元量子阱焦平面阵列

Fig.1 Sixteen 128 ×160 pixels QWIP focal plane arrays on a 50mm GaAs wafer

通过复杂的互连技术将面阵与读出电路相连, 图 2 为互连示意图. 通过 In 柱把 Si 读出电路与面阵相连. 为了保证互连的可靠性, 在工艺上要求生长的 In 柱具有合适的高度和适当的形状, 高度均匀并无氧化.

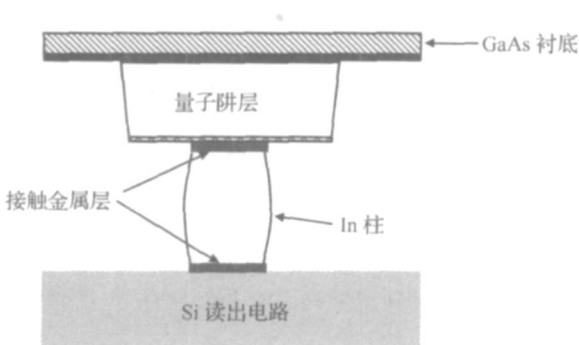


图 2 探测器面阵的一个像元与 Si 读出电路互连示意图

Fig.2 Schematic diagram of a pixel connecting with a Si multiplexer

互连后进行背面减薄, 抛光到约 20μm. 最后把芯片装入 77 K 杜瓦中进行测试. 加冷屏以抑制背景辐射, 杜瓦中的芯片如图 3 所示.

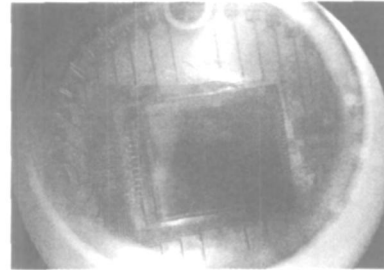


图 3 与读出电路倒装连接之后的 128 ×160 元量子阱红外探测器焦平面阵列

Fig.3 Picture of a 128 ×160 pixels QWIP focal plane array integrated with a readout circuit

### 4 器件性能测试及结果分析

采用双面源黑体对封装在 77 K 杜瓦瓶中的焦平面探测器进行测试, 采集器件的响应电压, 根据以下定义计算出平均黑体探测率:

$$D_b^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{V_s(i)}{V_N(i) I_{PFBB} FOV(i) A_d} \sqrt{A_d} f$$

其中

$$I_{PFBB} = \frac{1}{2} (\epsilon_2 T_2^4 - \epsilon_1 T_1^4)$$

其中  $I_{PFBB}$  为面源黑体在低温  $T_1$  (20 ) 和高温  $T_2$  (35 ) 时辐射功率变化量;  $\epsilon_1, \epsilon_2$  分别为对应的低温面源黑体和高温面源黑体的黑体辐射率;  $\epsilon = 5.67 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ;  $FOV(i)$  为探测器所张的立体角;  $n$  为有效像元个数;  $A_d$  为探测器接收面积;  $f$  为带宽. 得出器件的平均黑体探测率  $D_b^* = 0.95 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{Hz}^{1/2}$ . 平均黑体响应率为  $R_v = 2.81 \times 10^7 \text{ V/W}$ , 所测面阵的盲元率为 1.22%. 以上测试中, 器件本身并未加增透膜.

用红外光谱仪对 GaAs/ AlGaAs 多量子阱红外焦平面进行相对光谱响应测试, 器件的光谱如图 4 所示. 器件的响应峰值波长为  $\lambda_p = 8.1 \mu\text{m}$ , 截止波长为  $\lambda_c = 8.47 \mu\text{m}$ . 通过光谱可计算出平均峰值探测率  $D^*$  与平均黑体探测率  $D_b^*$  之间的转换因子, 进而可得出平均峰值探测率. 我们的器件平均峰值探测率  $D^* = 1.28 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{Hz}^{1/2}$ . 从测试结果看出, 我们的器件的响应波段位于长波红外大气窗口, 而且具有很好的整体均匀性和良好的性能.

同时还对衬底厚度分别为 100μm 和 20μm 的面阵性能进行了测试, 发现把衬底厚度从 100μm 减薄到 20μm, 器件的性能大大改善, 黑体平均探测率

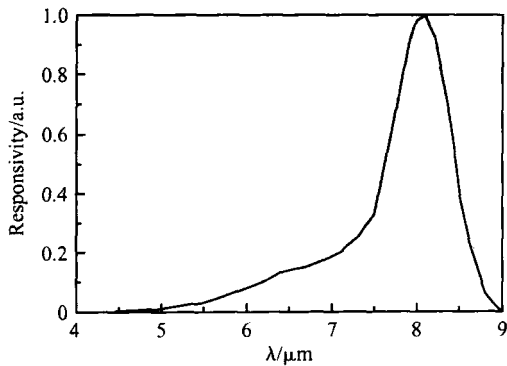


图 4 焦平面阵列在 77 K 下的相对光谱响应

Fig. 4 Normalized spectral responsivity of the focal plane array at 77 K

$D_b^*$  从  $0.3 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{Hz}^{1/2}$  提高到  $0.95 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{Hz}^{1/2}$ , 这主要是由于衬底减薄后, GaAs 和空气的折射率差形成波导的缘故<sup>[9]</sup>.

## 5 结论

所研制的  $128 \times 160$  元 GaAs/AlGaAs 多量子阱红外焦平面阵列, 是国内目前报道的最大像元数的量子阱红外焦平面阵列. 这是在突破了很多关键技术的基础上取得的. 包括大面积低缺陷密度的材料生长工艺; 周期  $3 \mu\text{m}$  的光栅制作工艺; 大面积光敏元与耦合光栅的均匀刻蚀; 高质量 In 柱的生长互连工艺; 背面减薄工艺等. 此焦平面阵列在 77 K 时, 器件的平均黑体响应率为  $R_v = 2.81 \times 10^7 \text{ V/W}$ , 平均峰值探测率为  $D^* = 1.28 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{Hz}^{1/2}$ , 峰值波长为  $\lambda_p = 8.1 \mu\text{m}$ , 器件的盲元率达到了 1.22%. 这一低盲元率充分体现了 GaAs/AlGaAs 材料在制作大面阵量子阱红外探测器方面的优势和潜力. 随着材料生长、制作工艺、测试电路等方面的改进, 探测器性能将会有进一步的提高, 逐步向实用化迈进.

致谢 感谢中国电子科技集团第十一所的老师们在

器件研制过程中给予的积极合作和帮助, 感谢中科院光电在器件制作过程中给予的大力支持.

## 参考文献

- [ 1 ] Levine B F. Quantum-well infrared photodetectors. *J Appl Phys*, 1993, 74(8) :R1
- [ 2 ] Gunapala S D, Bandara S V. Quantum well infrared photodetector(QWIP) focal plane arrays. *Semiconductors and Semimetals*, 1999, 62:197
- [ 3 ] Gunapala S D, Bandara S V, Liu J K, et al. Quantum well infrared photodetector research and development at Jet Propulsion Laboratory. *Infrared Physics and Technology*, 2001, 42: 267
- [ 4 ] Cui Liqiu, Jiang Desheng, Zhang Yaohui, et al. Photovoltaic response under varied bias in  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  double barrier quantum well intersubband photodetectors. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1996, 17(7) :557 (in Chinese) [ 崔丽秋, 江德生, 张耀辉, 等.  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  双势垒量子阱红外探测器结构在不同偏压下的光伏响应. *半导体学报*, 1996, 17(7) :557 ]
- [ 5 ] Bandara S V, Gunapala S D, Liu J K, et al. Four-band quantum well infrared photodetector array. *Infrared Physics and Technology*, 2003, 44 :369
- [ 6 ] Gunapala S D, Bandara S V, Liu J K, et al.  $1024 \times 1024$  pixel mid-wavelength and long-wavelength infrared QWIP focal plane arrays for imaging applications. *Semiconductor Science and Technology*, 2005, 20:473
- [ 7 ] Wan Mingfang, Ou Haijiang, Lu Wei, et al. Infrared imaging by  $128 \times 1$  GaAs/AlGaAs MQW infrared FPAs. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1998, 17(1) :76 (in Chinese) [ 万明芳, 欧海疆, 陆卫, 等.  $128 \times 1$  元 GaAs/AlGaAs 多量子阱扫描型红外焦平面的红外成像. *红外与毫米波学报*, 1998, 17(1) :76 ]
- [ 8 ] Li Ning, Li Na, Lu Wei, et al. Development of  $64 \times 64$  GaAs/AlGaAs MQW long-wave infrared FPAs. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1999, 18(6) :127 (in Chinese) [ 李宁, 李娜, 陆卫, 等.  $64 \times 64$  元 GaAs/AlGaAs 多量子阱长波红外焦平面研制. *红外与毫米波学报*, 1999, 18(6) :127 ]
- [ 9 ] Sarusi G, Levine B F, Pearton S J, et al. Improved performance of quantum well infrared photodetectors using random scattering optical coupling. *Appl Phys Lett*, 1994, 68(8) :960

## A 128 ×160 Pixel GaAs/AlGaAs Multi-Quantum Well Long-Wavelength Infrared Photodetector Focal Plane Array \*

Su Yanmei<sup>1</sup>, Chong Ming<sup>1</sup>, Zhang Yanbing<sup>2</sup>, Hu Xiaoyan<sup>2</sup>, Sun Yongwei<sup>1</sup>,  
Zhao Wei<sup>3</sup>, and Chen Lianghui<sup>1</sup>

(1 *NanoOptoelectronics Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

(2 *North China Research Institute of ElectroOptics, Beijing 100015, China*)

(3 *EO National Co. Ltd, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** A 128 ×160 long-wavelength GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetector (QWIP) focal plane array (FPA) was developed. It is the biggest FPA reported in China. At 77 K, the average blackbody responsivity  $R_V = 2.81 \times 10^7$  V/W is obtained with the peak wavelength  $\lambda_p = 8.1 \mu\text{m}$ . The average peak detectivity is  $D^* = 1.28 \times 10^{10} \text{cm} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{Hz}^{1/2}$ . The ratio of dead pixels is 1.22%.

**Key words:** infrared photodetectors; quantum well; focal plane arrays

**PACC:** 0762; 7240

**Article ID:** 0253-4177(2005)10-2044-04

---

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2002AA313100)

Received 11 July 2005

© 2005 Chinese Institute of Electronics