

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

苏艳梅¹ 种 明¹ 张艳冰² 胡小燕² 孙永伟¹ 赵 伟³ 陈良惠¹

(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^[1~4]. 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^[5]. 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^[6]. 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^[7]以及 64 ×64 元的 GaAs/ AlGaAs 长波红外焦平面^[8]. 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_{0.3}Ga_{0.7}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_{0.3} Ga_{0.7} 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.

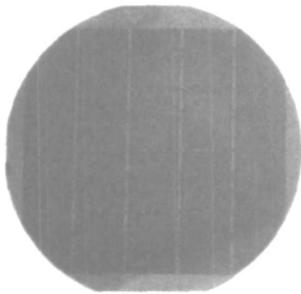


图 1 一个 50mm GaAs 片上的 16 个 128 ×160 元量子阱焦平面阵列

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.

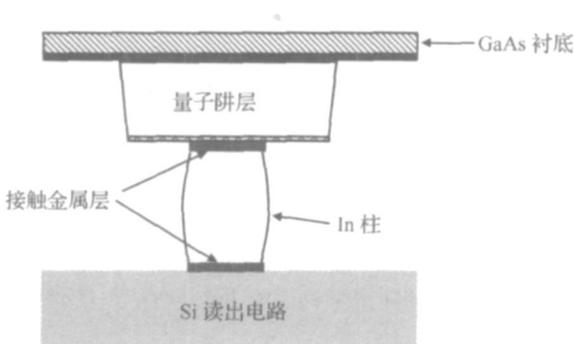


图 2 探测器面阵的一个像元与 Si 读出电路互连示意图

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.

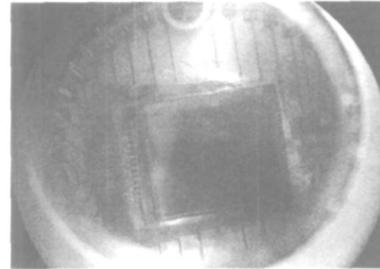


图 3 与读出电路倒装连接之后的 128 ×160 元量子阱红外探测器焦平面阵列

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:

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

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; ϵ_1, ϵ_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

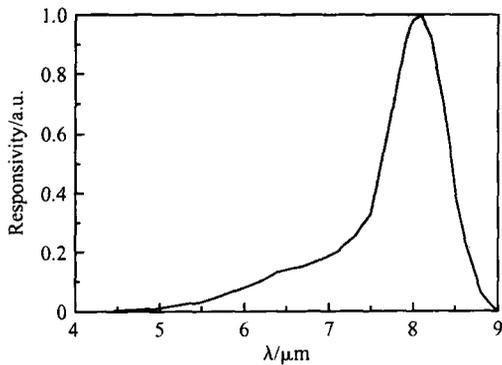


图 4 焦平面阵列在 77 K 下的相对光谱响应

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^[9].

5 结论

所研制的 128×160 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. 1024×1024 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 128×1 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. 128×1 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 64×64 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. 64×64 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 Yanmei¹, Chong Ming¹, Zhang Yanbing², Hu Xiaoyan², Sun Yongwei¹,
Zhao Wei³, and Chen Lianghui¹

(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