

长波 640×512 元 GaAs/AlGaAs 量子阱红外焦平面探测器的研制

胡小燕,周立庆,于艳,杜鹏,谭振,王南,孙海燕
(华北光电技术研究所,北京 100015)

摘要:量子阱红外探测器由于具有更高的材料均匀性和成品率,是红外探测技术研究的重点方向之一。本文通过突破材料外延、器件制备工艺、读出电路设计以及倒装互连等关键工艺技术,研制了长波 640×512 元 GaAs/AlGaAs 量子阱红外焦平面探测器。77 K 下,器件的平均黑体响应率 R_v 为 1.4×10^7 V/W,峰值探测率 D_λ^* 为 6.2×10^9 cm Hz^{1/2} W⁻¹,器件的盲元率达到了 0.87%,响应率不均匀性 5.8%,并在 77 K 下对探测器进行成像演示。

关键词:量子阱;焦平面;长波

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

Development of long-wavelength 640×512 quantum well infrared photodetector focal plane array

HU Xiao-yan, ZHOU Li-qing, YU Yan, DU Peng, TAN Zhen, WANG Nan, SUN Hai-yan
(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Quantum well infrared photodetector (QWIP) is an important direction in infrared detector research, for its excellent uniformity and high yield. After solving key technology such as material epitaxy, preparation of device, design of read-out circuit and flip-chip bending, long wavelength 640×512 GaAs/AlGaAs Quantum Well Infrared photodetector (QWIP) was developed. At 77 K, the average blackbody responsibility R_v is 1.4×10^7 V/W, and the peak blackbody detectivity D_λ^* is 6.2×10^9 cm Hz^{1/2} W⁻¹. The ratio of dead pixels is 0.87%, and the non-uniformity of responsibility is 5.8%. The infrared image of focal plane array is presented at 77 K.

Key words: quantum well; focal plane arrays; long wavelength

1 引言

1969年,Esaki和Tsu^[1]提出了由两种不同半导体薄层构成超晶格、量子阱的概念,后来借助分子束外延等设备技术,使得这一设想得以实现,这一概念是20世纪70年代以来凝聚态物理和材料学中最有价值的概念之一。它开辟了人工设计低维材料并对其能带结构进行人工裁剪的先例。80年代末,GaAs/AlGaAs量子阱材料首次应用于红外探测器件中^[2],以美国、德国、法国为代表的一些研究机构在长期积累的碲镉汞焦平面技术基础上,充分利用GaAs基材料与器件工艺的成熟性,很快将量子阱红

外焦平面探测器推到了工程实用化程度,阵列规模不断扩大,并向双多色、甚长波的方向发展,呈现出了多元化的发展趋势。

相对传统碲镉汞红外探测器,量子阱红外探测器由于具有更高的材料均匀性和更高的成品率;光谱范围分布更具灵活性,更容易对应不同的探测波段;光谱更窄,不同探测波段间串扰小;与硅读出电路的互连兼容性更好;抗高能粒子辐照能力更强等

作者简介:胡小燕(1979-),女,硕士,工程师,研究方向为半导体红外焦平面探测器器件技术。E-mail:huxiaoyan0602@yahoo.com.cn
收稿日期:2010-07-27

优点,近年来也成为了国内红外技术研制单位开展研究的重要方向之一^[3-5]。

本文报道了 640×512 元 GaAs/AlGaAs 量子阱红外焦平面阵列。在 77 K 条件下,器件的平均黑体响应率 R_v 为 1.4×10^7 V/W, 峰值探测率 D_λ^* 为 6.2×10^9 cm Hz^{1/2}W⁻¹, 器件盲元率为 0.87%, 响应率不均匀性 5.8%。

2 长波 640×512 量子阱红外焦平面探测器的制备

2.1 材料生长

探测器材料为 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构,采用 DCA P600 MBE 外延系统生长。衬底材料为 4 in 半绝缘 GaAs 衬底,多量子阱材料的势阱材料为 GaAs,厚度 5 nm,采用 Si 掺杂,掺杂浓度为 2×10^{18} cm⁻³,势垒材料 Al_xGa_{1-x}As 的厚度为 50 nm,组分 x 为 0.28,重复 50 个周期,多量子阱材料区上下分别生长 Si 掺杂的 GaAs 作为电极接触层,掺杂浓度为 1×10^{18} cm⁻³。具体材料的结构以及生长的长波量子阱材料的 TEM 图,如图 1、图 2 所示。

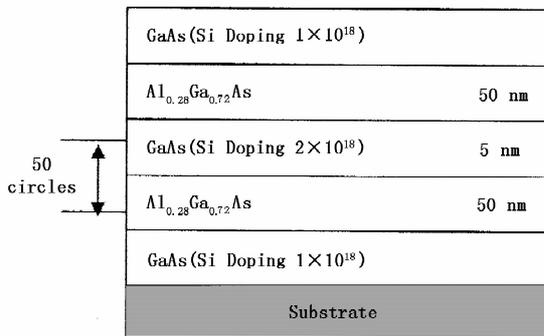


图 1 生长的长波量子阱材料结构

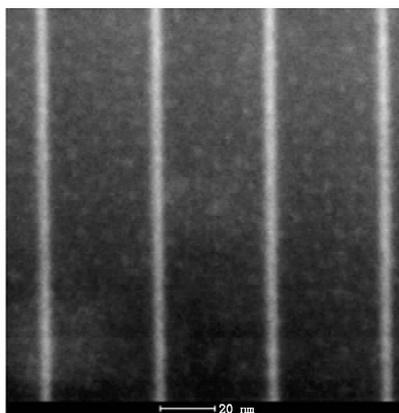


图 2 生长的长波量子阱材料的 TEM 照片

2.2 量子阱探测器芯片制备技术

对于 $A = A_0 e^{-i\omega t}$ 的入射光辐射,电子和光子之间的相互作用为 $\frac{e\hbar A \cdot \nabla}{m^*}$, 电子跃迁矩阵单元表述为^[6]:

$$\langle \psi_{jk} | \frac{e\hbar}{m^*} A \cdot \nabla | \psi_{0q} \rangle = \delta_{k,q} \frac{e\hbar}{m^*} A_z \langle \psi_j | \frac{\partial}{\partial z} | \psi_0 \rangle \quad (1)$$

在光跃迁的过程中,由于沿 xy 平面上的动量守恒,跃迁发生在 z 方向的包络函数之间,由于垂直样品表面的入射光辐射的电磁场矢量矢在 z 方向的分量 A_z 为零,该方向的光子辐射与电子之间没有耦合。因此,要求入射到 QWIP 的光的偏振必须有垂直量子阱平面的电场偏振分量,需要通过光耦合结构来实现光的偏振方向的偏转。

我们采用了二维周期性衍射光栅来实现红外辐射的光耦合,利用光刻和干法刻蚀工艺在量子阱材料上刻蚀出二维周期性光栅,光栅孔大小为 $1.5 \mu\text{m} \times 1.5 \mu\text{m}$,光栅周期长度 $3.0 \mu\text{m}$,如图 3 所示为我们刻蚀的二维周期性光栅的 SEM 图片。在刻蚀完光栅孔的材料上生长 Ni/AuGe 电极层作为上电极接触引出,然后通过光刻和干法刻蚀工艺将材料刻蚀出 640×512 规模的像元阵列,像元尺寸为 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$,像元中心间距为 $25 \mu\text{m}$,刻蚀至下电极接触层,在下电极接触层上生长 Ni/AuGe 电极层作为地线电极引出,生长钝化层后,刻蚀钝化孔并生长用于倒装互连所用的金属焊盘。

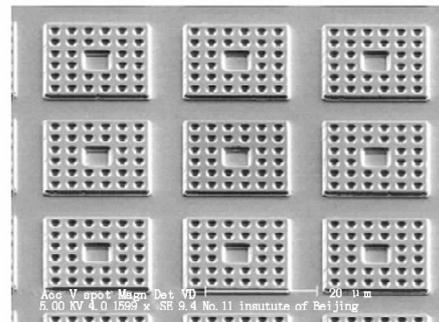


图 3 二维周期性光栅的 SEM 图片

2.3 读出电路设计

读出电路输入级设计采用直接注入型的结构;列处理电路采用乒乓形式的电荷-电压转换电路,工作方式采用奇偶行交替转换、交替读出,降低了对列电荷放大器的速度要求,同时能够减少行与行之间的串扰;输出级采用带有电阻-电容补偿的单级结构,能够提供足够的负载驱动能力。读出电路的流片采用 $0.35 \mu\text{m}$ 标准 CMOS 工艺,加工后的读出电路通过制备钢柱后与探测器进行互连。

2.4 探测器互连与背面减薄

量子阱红外探测器采用的是台面工艺,上电极引出点和地线引出点不在同一个平面上,高度差异

约为 3~4 μm,这种高度差异对器件互连的影响很大;特别对于 640×512 元 25 μm 量子阱红外探测器来说,由于像元中心间距小导致钢柱起球高度更低,这种影响可能会更大,会导致上电极引出点焊接上时,地线引出点根本无法连接上,具体示意如图 4(a)所示。为了解决此问题,我们增加了地线引出钢柱的高度,来弥补上电极引出点和地线引出点的高度差,保证上电极引出和地线引出都能和读出电路连通,如图 4(b)所示为改进后的互连工艺示意图。

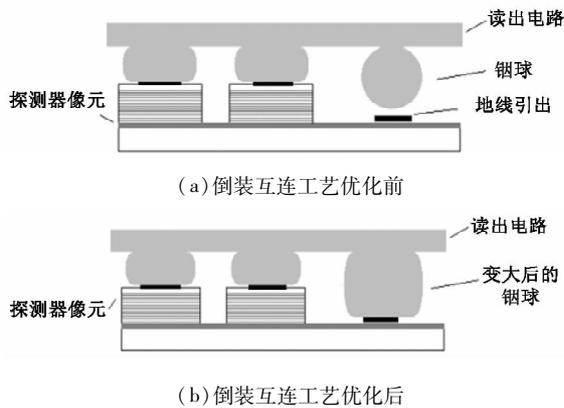


图4 倒装互连工艺优化前后的对比

为了降低串扰^[7]以及减小读出电路与探测器之间的热失配,互连后的探测器芯片经灌胶填充,采用机械磨抛和化学机械抛光相结合的办法将器件衬底减薄至 10 μm 以内,图 5 所示为减薄后的长波 640×512 量子阱焦平面探测器照片。



图5 背面减薄后的长波 640×512 量子阱焦平面探测器

3 测试与分析

3.1 探测器芯片的暗电流特性

为了准确测出探测器像元的暗电流,我们对探测器阵列正式像元以及地线进行了电学引出,利用 HP 4156C 半导体参数分析测试仪对引出点的的 I-V 特性进行测试,如图 6 所示为单个像元 77 K 下测试得到的暗电流曲线。外加偏压为 2 V 时,像元的电流平均密度为 8×10⁻⁴ A/cm²,与国外报道^[8]的长波暗电流结果 4×10⁻⁴ A/cm² 相当。

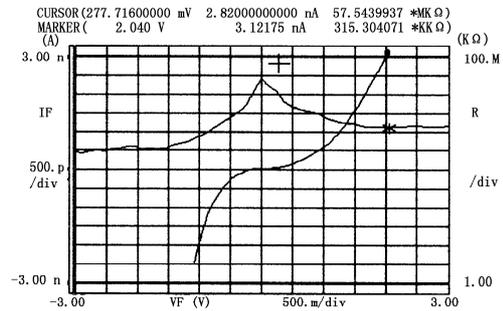


图6 77 K 下探测器的暗电流曲线

3.2 焦平面探测器的性能

采用红外焦平面测试系统对封装在液氮杜瓦中的长波 640×512 量子阱红外焦平面探测器进行测试,进行了响应率、平均黑体探测率、失效元、非均匀性的测试,其中,平均黑体探测率的定义为:

$$D_b^* = \frac{1}{m \times n - \Delta} \sum_{i,j=1}^{m,n} \sqrt{\frac{A_d}{2t_{int}} \cdot \frac{R_v(i,j)}{V_n(i,j)}} \quad (2)$$

其中, i, j 为像元计数; $m \times n$ 为总像元数; Δ 为无效元,即盲元; A_d 为探测器像元面积; t_{int} 为积分时间; $V_n(i, j)$ 为像元噪声; $R_v(i, j)$ 为像元响应率。通过对探测器的测试,得出器件的平均黑体探测率 D_b^* 为 $7.39 \times 10^8 \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, 平均黑体响应率为 $1.4 \times 10^7 \text{ V/W}$, 盲元率为 0.87%, 响应率不均匀性 5.8%。

利用红外光谱仪对长波 640×512 量子阱红外焦平面探测器进行了光谱响应测试,77 K 下测得的光谱响应如图 7 所示,器件的响应截止波长为 8.15 μm,通过光谱计算出转换因子,进而得到探测器的平均峰值探测率 D_λ^* 为 $6.2 \times 10^9 \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 。

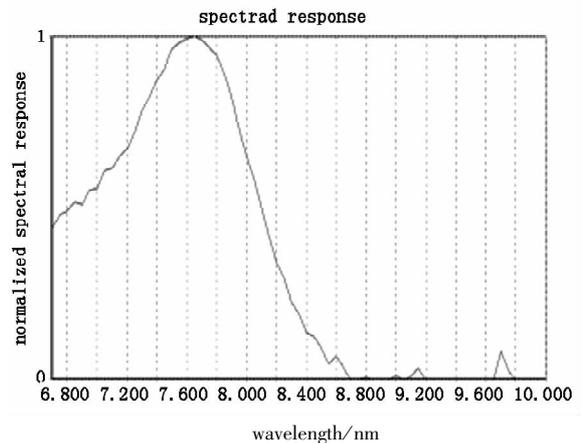


图7 77 K 下测得的探测器光谱响应

对研制的长波 640×512 量子阱红外焦平面探测器进行了实验室成像演示,如图 8 所示为 77 K 下长波 640×512 量子阱红外焦平面探测器的成像演

示图。

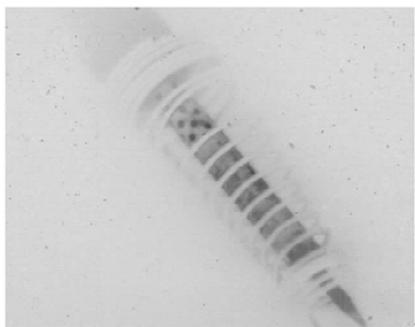


图8 77 K下焦平面探测器的成像演示图

从测试结果以及成像图像来看,我们的探测器均匀性非常好,盲元点也很少,这显示出了量子阱材料在制备大面阵探测器件上的优势和潜力。但器件的黑体探测率比国外报道的水平要低约一个数量级。下一步的工作将主要针对读出电路进行优化设计,降低噪声;优化光栅设计和器件制备工艺,提高器件的占空比;另外将对探测器波长进一步优化和调整;尽快制备出性能更优的长波 640×512 量子阱探测器微杜瓦组件。

4 结 论

通过突破材料外延、器件制备工艺、读出电路设计以及倒装互连等关键工艺技术,研制出了长波 640×512 GaAs/AlGaAs 量子阱红外焦平面探测器样品。77 K 下测试出该探测器件的平均黑体响应率为 1.4×10^7 V/W,平均峰值探测率 D_λ^* 为 6.2×10^9 cm Hz^{1/2} W⁻¹,响应率不均匀性 5.8%,盲元率 0.87%。充分体现了量子阱材料在制备大面阵探测器芯片上的优势。接下来,我们将在探测器制备工艺、读出电路设计等方面进一步优化,提高探测器器件的性能,并向工程化和实用化迈进。

致 谢:感谢华北光电技术研究所红外焦平面探测器研制工艺线所有从事该项工作的工艺人员。

参考文献:

- [1] Esaki L, Tsu R. Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors [J]. IBM Journal of Research and Development, 1970, 14(1): 61 - 65.
- [2] B F Levine, K K Choi, et al. New 10 μ m infrared detector using intersubband absorption in resonant tunneling GaAlAs superlattices [J]. Appl. Phys. Lett., 1987, 50(16): 1092 - 1094.
- [3] Wu Ren-qi, Yin Jie, et al. High performance GaAs/AlGaAs multiple quantum well infrared detector [J]. Laser & Infrared, 1994, 24(2): 40 - 42.
吴人齐,尹洁,等.高性能 GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器的研制[J].激光与红外,1994,24(2):40 - 42.
- [4] Chong Ming, Su Yan-mei, et al. 160×128 focal plane arrays of long-wavelength GaAs/AlGaAs multiple quantum well infrared photodetector [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(5): 702 - 704.
种明,苏艳梅,等. 160×128 元多量子阱长波红外焦平面探测器件研制[J].红外与激光工程,2007,36(5): 702 - 704.
- [5] Shi Yan-Li, Cao Wan-ru, et al. GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetectors array with 2 μ m pixel distance [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(6): 968 - 971.
史衍丽,曹婉茹,等. 2 μ m 像元间距 GaAs/AlGaAs 量子阱红外焦平面 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 968 - 971.
- [6] Fu Ying, Lu Wei. Physics of semiconductor quantum device [M]. Beijing: Science Press, 2005: 234 - 236.
傅英,陆卫. 半导体量子器件物理 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 234 - 236.
- [7] Arnold Goldberg. Laboratory and field performance of a megapixel QWIP focal plane array [C]. SPIE, 2005, 5783: 755 - 766.
- [8] P Castelein, F Guellec, et al. Demonstration of 256×256 dual-band QWIP infrared FPAs [C]. SPIE, 2005, 5783: 804 - 815.