

# GaAs/GaAlAs 量子阱红外 探测器实用性探讨\*

陆 卫 欧海江 陈敏辉 马朝晖 刘兴权  
黄醒良 茅惠兴 蒋 伟 沈学础

(中国科学院上海技术物理研究所, 红外物理国家实验室, 上海, 200083)

顾勇华 叶礼斌

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

**摘要** 通过长波 GaAs/GaAlAs 量子阱红外探测器线列在红外像机上的应用演示及其成像效果与传统 HgCdTe 探测器的比较, 直接地显示了 GaAs/GaAlAs 量子阱红外探测器在红外焦平面应用领域具有很强的竞争力.

**关键词** 多量子阱, 红外探测器, 热成像.

## 引言

多量子阱红外探测器的发展, 尤其是 GaAs/GaAlAs 和 InGaAs/InP 在红外焦平面凝视系统中的应用<sup>[1]</sup>, 已使人们对于这类探测器能否替代当前的 InSb、HgCdTe 和非本征 Si 红外探测器这一问题愈来愈感兴趣. 这是因为红外焦平面的使用受到探测器阵列均匀性、使用方便性和价格的限制. 所以, 对于一种探测器的实用性探讨需要考虑其综合指标. 对于 GaAs/GaAlAs 多量子阱红外探测器, 目前较多的工作是在它自身性能的研究上, 尚缺乏与 HgCdTe 典型红外探测器的直接实验比较研究. 本文将通过 GaAs/GaAlAs 多量子阱红外探测器在红外像机上的成像演示, 从整体综合指标考察这类探测器的实用性问题.

## 1 探测器的基本特性

实验用的探测器量子阱结构是用 Riber 32R&D 分子束外延系统外延生长在半绝缘的 GaAs (100) 衬底上. 生长速率和  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  势垒层的 Al 组分由反射式高能电子衍射

\* 国家自然科学基金和中国科学院留学人员择优资助基金资助课题  
本文 1993 年 10 月 13 日收到, 修改稿 1993 年 11 月 16 日收到

(RHEED) 的强度振荡周期决定. 量子阱中的各参量如阱宽、垒高等在生长后进一步由调制反射光谱进行非接触测定. 探测器由 50 周期的 GaAs/GaAlAs 多量子阱组成. 量子阱中的垒厚为 600 Å, 阱厚为 55 Å, 对阱的中心 30 Å 区域高掺杂 Si (浓度到  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ). 阱的上下电极层厚分别为  $0.8 \mu\text{m}$  和  $1.8 \mu\text{m}$ , 掺杂浓度为  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . 这些由 RHEED 振荡决定的量子阱参数与由调制反射光谱测得参数十分吻合. 进一步的荧光光谱峰具有很窄的线宽也表明了材料有较好的均匀性.

在量子阱外延衬底上制成了 46 元的拥有  $200 \times 280 \mu\text{m}^2$  像元面积的探测器线列. 并取出其中连续的 12 元应用于热成像演示. 探测器采用在衬底上作  $45^\circ$  磨角的光学耦合方法. 器件的光电流谱如图 1 所示, 在 4 V 偏压条件下, 器件拥有峰值响应率  $R_p = 1.3 \times 10^5 \text{ V/W}$ , 响应波长为  $\lambda_p = 7.7 \mu\text{m}$ , 长波限为  $\lambda_c = 8.1 \mu\text{m}$ . 在偏压小于 10 V 条件下, 响应率与外加偏压成良好的正比关系. 这种线性关系对应着由光电子的传输时间下降而导致的光学增益的增加. 由于阱中是重掺杂, 所以即使在 10 V 偏压下, 在光谱分辨率精度范围 ( $0.5 \text{ cm}^{-1}$ ) 内未观察到 Stark 效应.

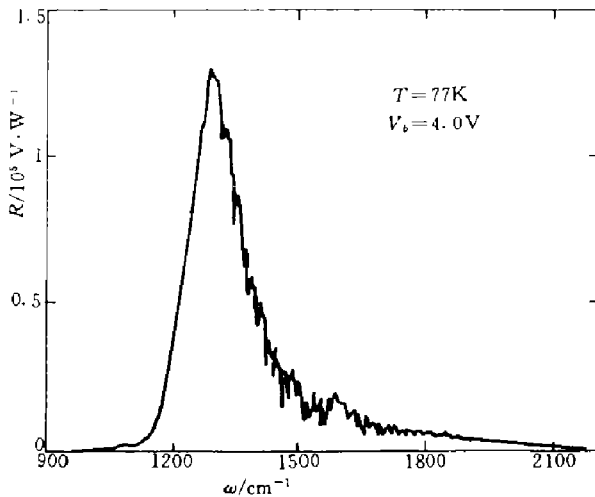


图 1 探测器在 77 K 和 4 V 偏压条件下的分谱响应

Fig. 1 Spectral responsivity  $R(\lambda)$  at 77 K and bias 4 V

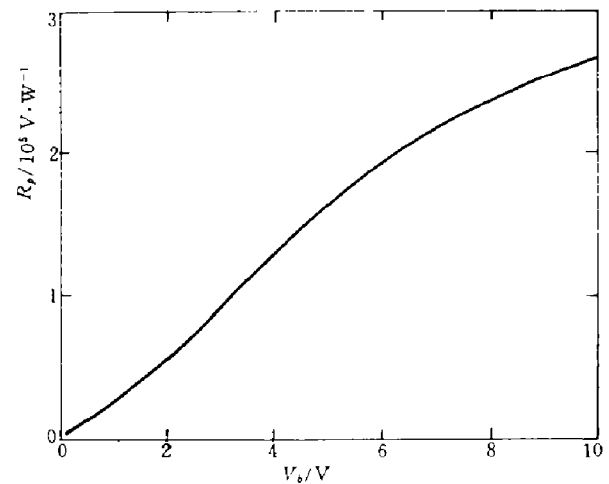


图 2 77 K 峰值响应率随偏压的依赖关系

Fig. 2 Bias dependence of peak responsivity at 77 K

我们对封装在用于红外像机上的 77 K 杜瓦瓶中的器件探测率进行了检测. 采用常规的黑体探测率定义

$$D_{b,0}^* = \left( \frac{V_s}{V_n} \right) \sqrt{\Delta\nu A_d} / \left( \frac{\sigma(T_b^4 - T_0^4) A_b A_d}{2\sqrt{2\pi} L^2} \right),$$

其中  $V_s$  是光电诱导电压, 视场角为  $180^\circ$ , 宽谱黑体辐射源温度为  $T_b$ ,  $V_n$  是噪声电压,  $A_b$  与  $A_d$  分别是黑体源出口面积和器件光敏面积,  $T_0$  是室温 293 K,  $L$  是黑体源与器件之间的距离,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \text{ K}^4$ . 在偏压  $V_b = 4 \text{ V}$  时测得的  $T_b = 500 \text{ K}$  时的黑体探测率  $D_{b,0}^* = 2.0 \times 10^9 \text{ cm}\sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$ . 若采用 B. F. Levine 的相对黑体探测率  $D_B^*$  定义<sup>[3]</sup>,

则有  $D_B^* = 9.7 \times 10^9 \text{ cm}\sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$ . 利用图 1 所示的光电流谱, 可得  $\lambda_p = 7.7 \mu\text{m}$  处峰值探测率为  $D_{\lambda,0}^* = 2.1 \times 10^{10} \text{ cm}\sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$ .  $D_{\lambda,0}^*$  与  $D_{b,0}^*$  满足如下关系

$$D_{\lambda,0}^* = \frac{D_{b,0}^* R(\lambda)}{\int_0^\infty R(\lambda) S(\lambda) d\lambda / \int_0^\infty S(\lambda) d\lambda}$$

其中, 黑体光谱分谱 ( $S(\lambda)$ ) 可表示为  $S(\lambda) = 2\pi hc^2 / [\lambda^5 \exp(ch/\lambda KT) - 1]$ ,  $R(\lambda)$  是器件响应谱.

考虑到杜瓦瓶窗口有限透过率和器件表面反射率等的修正, 我们得到黑体探测率  $D_b^* = D_{b,0}^* / f(1-r) = 3.4 \times 10^9 \text{ cm}\sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$ , 峰值探测率  $D_\lambda^* = D_{\lambda,0}^* / f(1-r) = 3.6 \times 10^{10} \text{ cm}\sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$ , 其中参数  $f = 0.8$  为实测的杜瓦瓶窗口透过率,  $r = 0.27$  为 GaAs 表面反射率.

## 2 线列器件成像结果

我们用上述量子阱红外探测器线列替换红外扫描像机中工作于  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  光谱波段的 HgCdTe 12 元线列探测器, 从而检测 GaAs/GaAlAs 多量子阱探测器的成像效果. 该像机用于低空红外监测装置, 采用 12 元并行扫描技术, 瞬时视场角  $0.67 \text{ mrad}$ , 扫描率为  $104 \text{ 线/s}$ , 总视场角  $100^\circ$ . 由地面目标发射的红外辐射经像机中四方棱镜扫描和光学聚焦镜会聚在线列探测元件上, 探测元件输出的 12 路并行信号经低噪声前置放大和信号处理电路由电光转换器件转换成可见光, 再由与地物扫描同步的成像扫描系统把目标辐射扫描成像在“航微-1”型号胶片上. 对我们像机的光学与电子学部分作了适当的修改, 使其适用于输入阻抗高 ( $10^6 \Omega$ ) 且峰值响应在  $7.7 \mu\text{m}$  的 GaAs/GaAlAs 的探测器线列. 量子阱探测器的几何尺寸与 12 元 HgCdTe 探测器线列器件完全一致. 为了解决两种探测器在阻抗上的巨大差别, 我们设计和制作了相应的阻抗转换线路.

实验结果表明, 用两种器件成像均能获得包括树木、路灯、房屋、门窗等物在内的清晰的热像照片, 但在清晰度上, 用量子阱探测器 12 元线列获得的热像照片较差. 对两种器件获得的热像照片在同一空间位置上的明暗起伏强度作了扫描, 结果如图 3 所示. 图中实线对应于 HgCdTe 探测器热图像, 而虚线对应于 GaAs/GaAlAs 探测器热图像. 图 3 表明: HgCdTe 探测器测得的明暗结构在 GaAs/GaAlAs 探测器热图像上都明显地反映出来了. 但在照片的暗区, 即景物的低温区域, GaAs/GaAlAs 探测器表现出的噪声明显大于 HgCdTe 探测器.

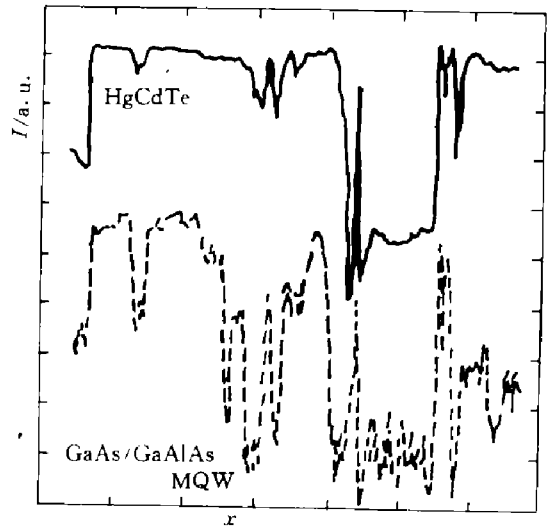


图 3 成像照片在水平方向 ( $x$ ) 上灰度 ( $I$ ) 的比较, 点线表示 GaAs/GaAlAs 探测器, 实线表示 HgCdTe 探测器

Fig. 3 A comparison of the brightness ( $I$ ) between GaAs/GaAlAs (dots) and HgCdTe (line) taken from the thermal image along the horizontal direction ( $x$ )

### 3 讨论

本文实验结果表明, 12 元 GaAs/GaAlAs 量子阱探测器线列在总体上已达到与 HgCdTe 探测器可比拟的热成像效果. 由于 GaAs 这类 III-V 族材料的外延薄膜的横向均匀性可以远比 HgCdTe 外延薄膜材料为好, 因此, 可以预期在从线列推向面阵的过程中, 从材料角度来看, GaAs/GaAlAs 量子阱器件有它自身的优势. 从实用型面阵器件角度看, 读出线路也是至关重要的一个方面, 其中的开关电路十分重要. 用于典型的 GaAs/GaAlAs 量子阱器件的阻抗比典型 HgCdTe 器件阻抗高约 4 个数量级, 所以, 量子阱器件对开关电路中的短路电阻要求降低到  $10\text{ k}\Omega$  量级, 相对于 HgCdTe 探测器而言, 大大降低了读出电路中开关电路的难度. 再由于 GaAs/GaAlAs 材料是高温 ( $600^\circ\text{C}$ ) 生长材料, 比 HgCdTe 生长温度 ( $\sim 200^\circ\text{C}$ ) 高得多, 这种耐高温的材料特性亦为许多器件工艺提供了许多方便. 近来我们在实用型红外量子阱线列研制中, 64 元线列的研制均为一次成功, 且光电测量表明 64 元中无盲点, 表明了这类器件的工艺已十分成熟. 所以, 从面阵角度考虑, 在材料特性与器件工艺两方面 GaAs/GaAlAs 材料有许多优势. 另外, 考虑到 GaAs/GaAlAs 材料相对 HgCdTe 成本更低, 许多工艺条件更成熟等因素, 可以认为在制作  $8\sim 14\ \mu\text{m}$  红外焦平面探测器方面, GaAs/GaAlAs 量子阱探测器有着很强的竞争力.

至于我们的 GaAs/GaAlAs 量子阱探测器线列热成像的初步演示, 由于器件尚未处在最佳的工作状态. 例如: 没有采用冷屏或视场角的限制, 也没有使用增透膜, 所有器件都采用了完全相同的偏置电压而未逐一调整到最佳偏置电压等, 另外, 本文所用量子阱探测器的光谱响应波段是  $7.2\ \mu\text{m}$  到  $8.1\ \mu\text{m}$ , 已在大气窗口之外, 远不如 HgCdTe 器件是工作于  $8\ \mu\text{m}$  到  $14\ \mu\text{m}$  这一大气窗口之中. 而所有这些不足, 对量子阱红外探测器而言都是可以克服的. 可以相信, 只要对上述若干问题作进一步的修正与改善, 量子阱红外探测器将会获得更高质量的热成像效果. 完全可能实现高灵敏度低价格的红外像机.

**致谢** 作者十分感谢褚君浩、陆明生、张林发先生对本项工作的鼓励和支持.

### 参考文献

- 1 *Intersubband Transitions in Quantum Wells*. edited by E. Rosencher, B. Vinter, B. Levine, NATO. ASI Series, Series B: Physics Vol. 288
- 2 In *Proc. IRIS Specialty Group on Infrared Detector*, August, 1988.
- 3 Levine B F, Hasnain G, Berhea C G, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1989,54:2704

## STUDY ON THE PRACTICALITY OF GaAs/GaAlAs MULTIPLE QUANTUM WELL INFRARED DETECTOR\*

Lu Wei Ou Haijiang Chen Minhui Ma Chaohui Liu Xingquan  
Huang Xinliang Mao Huixing Jian Wei Shen Xuechu

*(National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)*

Gu Yonghua Ye Libing

*(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Shanghai 200083, China)*

**Abstract** The practicality of GaAs/GaAlAs multiple quantum well infrared detector (MQWD) was studied experimentally by the infrared imaging demonstration. The competitiveness of the MQWD was directly demonstrated through the comparison of the infrared imaging property from the infrared detector array made by MQWD and HgCdTe detector, respectively.

**Key words** multiple quantum wells, infrared detector, thermal imaging.

---

\*The project supported by the National Natural Science Foundation of China and the Foundation of Chinese Academy of Science for Young Scientists