

# 7 $\mu$ m GaAs/AlGaAs 多量子阱红外探测器

方晓明 黄醒良 陆卫 李言谨 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)

周小川 钟战天 蒋健 徐贵昌 杜全钢

牟善明 李承芳

(中国科学院表面物理国家实验室, 北京, 100080)

周鼎新 于美云 余晓中

(航空航天部上海航天局 803 研究所, 上海, 200233)

**摘要:** 利用 GaAs (51 Å)/Al<sub>0.36</sub>Ga<sub>0.64</sub>As (200 Å) 多量子阱结构实现了黑体辐射的探测, 探测器的峰值波长为 7 $\mu$ m, 77K 温度下  $D^*$  达到  $1.09 \times 10^9 \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ , 电压响应率为  $2.5 \times 10^4 \text{V} \cdot \text{W}^{-1}$ .

**关键词:** 多量子阱, 子带间跃迁, 红外探测器.

## 引言

近年来, 人们利用掺杂的 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构制成工作在 8~12 $\mu$ m 波段的光导型红外探测器<sup>[1~5]</sup>. 其工作原理是: 电子在红外辐射作用下, 从限制的基态跃迁到能量位置高于势垒顶的延展态, 并在外电场作用下以热电子方式输运, 产生光电流. 量子阱的第一激发态也可以是阱内的限制态, 在这种情况下, 被激发的电子必须隧穿出势垒顶部才能形成光电流. 通过改变势阱宽度和势垒高度 (由 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 中 Al 的组分决定), 可以获得不同响应波长的探测器.

最近, 我们用傅里叶红外光谱仪及波导结构测量了 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构的红外吸收谱, 在 1300~1800 $\text{cm}^{-1}$  范围观察到对应于限制的基态到第一激发态跃迁的红外吸收峰. 并以适当的工艺条件制成多量子阱结构红外探测器, 在 77K 温度下通过测量  $I$ - $V$  特性, 观察到由多量子阱阱间共振隧穿效应造成的周期性负阻振荡及有关实验现象 (有关详细结果将另文发表). 用 500K 黑体作为红外辐射源, 在 10~150K 温度范围测量了量子阱探测器的电压响应率和探测率.

## 1 实验结果与讨论

实验所用的 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构材料是在中国科学院表面物理国家实验室的 VG80H MBE 系统上生长的. 在半绝缘 GaAs (001) 衬底上生长厚度为  $1.5\mu\text{m}$ 、掺 Si 浓度为  $3.0 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$  的  $\text{N}^+$ -GaAs 层, 作为器件的一个欧姆接触层. 其上交替生长 50 周期厚度分别为  $51\text{\AA}$  和  $200\text{\AA}$  的掺 Si GaAs 势阱层和非掺杂的 AlGaAs 层, Si 的掺杂浓度为  $1.0 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ . 表面层是厚度为  $1.0\mu\text{m}$ 、掺 Si 浓度为  $3.0 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$  的  $\text{N}^+$ -GaAs 层, 作为另一个欧姆接触层.

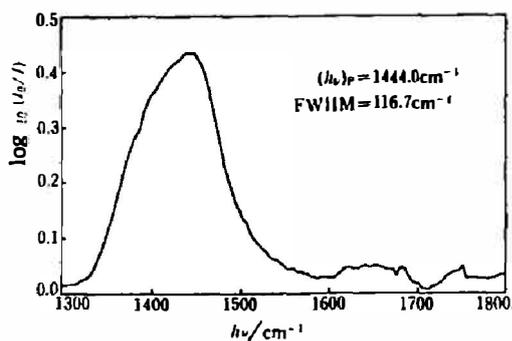


图1 室温下 GaAs( $51\text{\AA}$ )/ $\text{Al}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}$  ( $200\text{\AA}$ ) 多量子阱的红外吸收谱

Fig.1 Infrared absorption spectrum of the GaAs ( $51\text{\AA}$ )/ $\text{Al}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}$  ( $200\text{\AA}$ ) multiple quantum well at room temperature

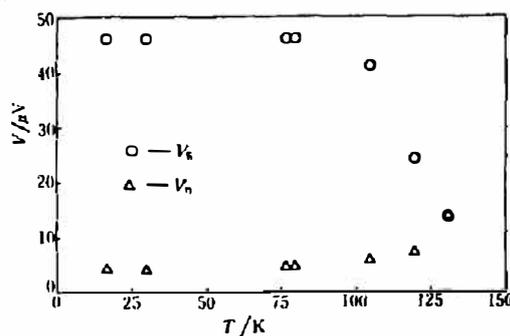


图2 GaAs ( $51\text{\AA}$ )/ $\text{Al}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}$  ( $200\text{\AA}$ ) 多量子阱红外探测器的信号电压和噪声电压对温度的依赖关系

Fig.2 Temperature dependence of signal and noise voltages for the GaAs ( $51\text{\AA}$ )/ $\text{Al}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}$  ( $200\text{\AA}$ ) multiple quantum well infrared detector

我们用 Bruker 113V 傅里叶红外光谱仪测量了室温下多量子阱结构的红外吸收谱. 为了增强吸收, 把样品做成  $8\text{mm}$  的  $45^\circ$  波导结构<sup>[6]</sup>, 入射光方向垂直于  $45^\circ$  斜面, 满足量子阱导带内子带间跃迁的选择定则. 图 1 所示是 GaAs( $51\text{\AA}$ )/ $\text{Al}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}$ ( $200\text{\AA}$ ) 多量子阱结构的红外吸收谱, 吸收峰位于  $1444\text{cm}^{-1}$  ( $=179\text{meV}=6.9\mu\text{m}$ ), 吸收峰的半高宽 (FWHM) 为  $116.7\text{cm}^{-1}$  ( $=14.5\text{meV}$ ). 用包络函数方法<sup>[7]</sup>计算了量子阱中限制的基态与第一激发态之间的能量差  $\Delta e_{12}$ . 计算中取  $\Delta E_c / \Delta E_g = 0.6$ ,  $\Delta E_g = 1.247\text{eV}$ <sup>[8]</sup>.  $\Delta e_{12}$  的计算值为  $1430\text{cm}^{-1}$  ( $=177\text{meV}$ ), 与实验值符合.

用通常的光刻和腐蚀等工艺, 把量子阱探测器做成台面结构, 台面直径为  $320\mu\text{m}$ , 在上下  $\text{N}^+$ -GaAs 层表面蒸镀 AuGe Ni 合金, 合金化之后焊上电极引线. 在衬底一侧磨抛出  $45^\circ$  斜面, 作为红外辐射的入射面, 其上没有蒸镀增透膜. 器件置于 APD 循环致冷系统的杜瓦瓶内, 温度可在  $10\sim 300\text{K}$  范围变化. 用斩波器对  $500\text{K}$  黑体和正弦调制, 调制频率为  $792\text{Hz}$ . 用 Keithley 220 电流源对器件提供恒定的偏置电流. 器件两端的交变电压信号由锁相放大器 (EG&G Model 124A) 检测, 其输入阻抗为  $100\text{M}\Omega$ , 等效噪声带宽

为 79.2Hz.

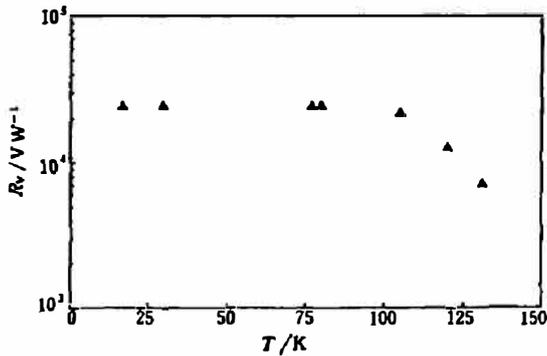


图3 GaAs (51 Å)/Al<sub>0.36</sub>Ga<sub>0.64</sub>As (200 Å) 多量子阱红外探测器的 $R_V$ 对温度的依赖关系  
Fig.3 Temperature dependence of voltage responsivity for the GaAs (51 Å) /Al<sub>0.36</sub>Ga<sub>0.64</sub>As (200 Å) multiple quantum well infrared detector

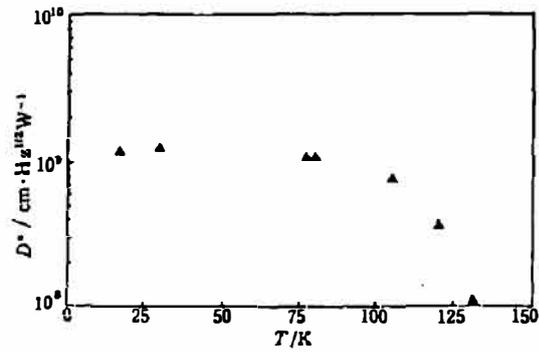


图4 GaAs (51 Å)/Al<sub>0.36</sub>Ga<sub>0.64</sub>As (200 Å) 多量子阱红外探测器的 $D^*$ 对温度的依赖关系  
Fig.4 Temperature dependence of detectivity for the GaAs (51 Å) /Al<sub>0.36</sub>Ga<sub>0.64</sub>As (200 Å) multiple quantum well infrared detector

图 2 所示是 GaAs (51 Å)/Al<sub>0.36</sub>Ga<sub>0.64</sub>As (200 Å) 多量子阱红外探测器的信号电压和噪声电压随温度的变化, 偏置电流 $I_b = 1\mu\text{A}$ . 在此偏流条件下, 在 12K 温度下测得器件的偏置电压为 8V. 由图 2 可见, 在 80K 以下, 信号电压基本不随温度变化, 在 80K 以上, 则随温度升高而迅速下降, 在 130K 附近完全被噪声电压所淹没. 探测器的电压响应率 $R_V$ 和探测率 $D^*$ 由下式计算:

$$R_V = \Gamma R_{500\text{K}}, \quad (1)$$

$$D^* = \Gamma D_{500\text{K}}^*, \quad (2)$$

其中 $R_{500\text{K}}$ 和 $D_{500\text{K}}^*$ 是量子阱探测器对 500K 黑体的电压响应率和探测率. 修正因子 $\Gamma$ 为

$$\Gamma = \int_0^{\alpha} W(500\text{K}, x) dx / \int_0^{\infty} W(500\text{K}, x) \beta(x) dx. \quad (3)$$

式 (3) 中 $W(500\text{K}, x)$ 由黑体辐射的普朗克公式决定;  $\beta(x)$ 是图 1 中的吸收曲线, 并且 $\beta(x_0) = 1$ ,  $x_0$ 是吸收峰的能量位置. 图 3、4 分别是 GaAs(51 Å)/Al<sub>0.36</sub>Ga<sub>0.64</sub>As(200 Å) 多量子阱红外探测器的 $R_V$ 和 $D^*$ 随温度的变化,  $\Gamma = 15.9$ . 量子阱探测器的暗电流主要是阱间共振隧穿电流以及热激载流子形成的电流. 在低温下, 主要是隧穿电流起作用. 随着温度升高, 热激电流的贡献会越来越大, 并占据主导地位<sup>[9]</sup>. 由图 3 和图 4 可见,  $R_V$ 和 $D^*$ 随温度的变化与上述趋势定性吻合.

## 2 结论

利用 GaAs(51 Å)/Al<sub>0.36</sub>Ga<sub>0.64</sub>As(200 Å) 多量子阱结构实现了对黑体辐射的响应, 峰值波长为  $7\mu\text{m}$ . 77K 温度下 $D^* = 1.09 \times 10^9 \text{cm}^2 \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ , 电压响应率 $R_V = 2.5 \times 10^4 \text{V} \cdot \text{W}^{-1}$ . 通过优化结构参数, 改进器件工艺, 量子阱探测器的性能将会进一步提高.

**致谢:** 感谢陆晓峰先生和刘卫军先生在红外光谱测量中提供的帮助.

## 参 考 文 献

- 1 Levine B F, Choi K K, Bethea C G et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 50: 1092
- 2 Levine B F, Bethea C G, Hasnain G et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, 53: 296
- 3 Levine B F, Hasnain G, Bethea C G et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, 54: 2704
- 4 Levine B F, Bethea C G, Hasnain G et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 56: 851
- 5 Choi K K, Dutta M, Newman P G et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 57: 1348
- 6 Levine B F, Malik R J, Walker J et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 50: 273
- 7 Bastard G. *Phys. Rev.*, 1982, B25: 7584
- 8 Gossard A C, Brown W, Allyn C L et al. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1982, 20: 694
- 9 Choi K K, Levine B F, Malik R J et al. *Appl. Phys. Lett.* 1987, B53: 4172

### GaAs/AlGaAs MULTIPLE QUANTUM WELL 7 $\mu\text{m}$ INFRARED DETECTOR

Fang Xiaoming, Huang Xinliang, Liu Wei, Li Yanjin, Shen Xuechu  
(National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Zhou Xiaochuan, Zhong Zhantian, Jiang Jian, Xu Guichang,  
Du Quangang, Mo Shanming, Li Chengfang  
(National Laboratory for Surface Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Zhou Dingxin, Yu Meiyun, Yu Xiaozhong  
(Shanghai 803 Research Institute of the Ministry of Aero-Space Industry,  
Shanghai 200233, China)

**Abstract:** The detection of blackbody radiation by GaAs (51 Å)/Al<sub>0.36</sub>Ga<sub>0.64</sub>As(200 Å) multiple quantum well infrared detector having a peak wavelength of 7 $\mu\text{m}$  with  $D^* = 1.09 \times 10^9 \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$  and  $R_{\nu} = 2.5 \times 10^4 \text{V} \cdot \text{W}^{-1}$  is reported.

**Key words:** multiple quantum wells, intersubband transitions, infrared detectors.