

高灵敏度低暗电流 GaAs 量子阱 红外探测器*

钟战天¹ 周小川¹ 杜全钢¹ 周鼎新³ 吴荣汉²

王 森¹ 李承芳² 於美云³ 徐俊英² 朱勤生¹

(1 中国科学院表面物理国家重点实验室 北京 100080)

(2 中国科学院半导体研究所 北京 100083)

(3 航空航天部上海 803 研究所 上海 200233)

摘要 本文报道我们研制的高灵敏度、低暗电流的 GaAs 量子阱长波长红外探测器的制备和性能。探测器具有 50 个 GaAs 量子阱和 $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ 势垒, 器件制成直径为 $320\mu\text{m}$ 的台面型式单管。探测器的主要性能——响应率和探测率与偏置电流和工作温度关系很大。通过材料结构的精心设计和器件工艺的改进使探测器的性能进一步提高: 探测峰值波长为 $9.2\mu\text{m}$, 工作温度为 77K 时, 峰值电压响应率为 $9.7 \times 10^2 \text{V/W}$, 峰值探测率超过 $1 \times 10^{11} \text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$, 暗电流小于 $0.1\mu\text{A}$ 。

EEACC: 7230C

1 引言

量子阱内电子由束缚基态至势垒顶附近连续态跃迁为机理的红外探测器是在半导体超晶格研究基础上发展起来的。它具有响应速度快、量子效率高、可变波长以及热稳定性和均匀性好的特点, 可以制成大面积红外焦平面阵列, 在红外成像技术、新型红外光谱仪以及空间精确制导系统中占有重要地位。这种近几年发展起来的新型红外探测器是目前红外传感技术的发展方向之一, 已成为国际上极为重视的高技术研究的前沿课题。

1985 年 West 和 Eglash 首先观察到 GaAs 量子阱中的光跃迁现象^[1], 接着 Levine 及其合作者在实用性的器件研制及器件改进方面作了许多工作^[2-10], 在 1987 年已制造出 GaAs/AlGaAs 多量子阱红外探测器^[3], 这种最初的器件设计成 2 个束缚态的量子阱。为了改进器件的性能, 他们又设计了新的超晶格结构^[4], 作成由阱中束缚基态至导带中扩展态之间光跃迁, 避开光激发电子隧穿势垒的问题, 从而可以增加势垒厚度减少暗电流, 使探测率大大提高。最好性能的多量子阱红外探测器也是由 Levine 等人制出, 其主要性能指标如下: 工作温度 77K, 峰值波长为 $8\mu\text{m}$, 峰值探测率 $D^* = 4.0 \times 10^{10} \text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$

* 国家自然科学基金资助课题
1992 年 6 月 15 日收到本文

W^[7]. 目前, 人们除了继续提高单管性能外, 已开始进入实用化阶段, 即试制 GaAs/AlGaAs 量子阱焦平面红外探测器多元阵列^[11], 并成功地应用到红外摄影仪中^[12].

我们在 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料生长和物理研究的基础上开展了量子阱红外探测器的研制, 着重在结构设计和器件工艺的改进使其红外探测器的性能进一步提高. 结果研制成功高灵敏度低暗电流多量子阱长波长红外探测器. 其性能和指标已达到目前国际上报道的最好水平.

2 器件制备

我们进行了量子阱结构设计、材料生长、器件研制和电学光学等测量的研究全过程. 利用英国 VGV80H 分子束外延系统生长了阱内掺杂 50 周期的 (75 Å) GaAs/(300 Å) Al_{0.28}Ga_{0.72}As 的矩形多量子阱结构外延材料, 此高质量红外探测器的材料生长和研究在另文叙述.

图 1 (见图版 I) 示出了器件结构简图. 单元器件为直径 320 μm 的台面型式, 台面采用通常光刻和湿法化学腐蚀工艺制成. 在台面顶部和底部的 N⁺-GaAs 层上蒸上 AuGe/Ni 薄层, 并经合金形成良好欧姆接触, 并在此欧姆接触层覆盖一层 Au, 并用超声压焊连接金属引线. 在器件工艺中要注意以下问题. 为了增加欧姆接触层面积, 避免电极间短路以及增加器件成品率, 要合理设计光刻板面图形和简化器件工艺. 寻找最优合金条件做成良好欧姆接触电极. 要精确控制台面腐蚀深度使其恰好穿过量子阱区域, 使台面顶部露出 N⁺-GaAs 层, 才能在此层上作出好的欧姆接触. 为了确定台面腐蚀深度, 我们发展了一种新的显微观察方法, 即利用反射电子显微术 (REM) 对腐蚀台面剖面进行观察, 从而直观、准确地确定出多量子阱台面的腐蚀状况. 图 2 (见图版 I) 为腐蚀台面的 REM 剖面照片, 它清楚地显示出 50 个周期的 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构, 照片中亮窄线和较宽的暗线分别为 GaAs 量子阱和 AlGaAs 势垒, 量子阱区的上面和下面是 N⁺-GaAs 层, 右边的暗区为腐蚀坑 (腐蚀坑的边之所以倾斜是由斜入射光引起的). 从此照片中可以看出台面的腐蚀深度恰好被控制在刚刚穿过量子阱区域的地方.

基于选择性定则, 利用导带内子带间跃迁的多量子阱红外探测器的光耦合方式与带间跃迁的红外探测器不同, 前者要求入射到多量子阱探测器的光的偏振必须有垂直于量子阱生长平面的电矢量, 于是采用 45 度斜面背入射或利用衍射光栅. 我们采用 45 度斜面耦合方式. 如图 1 所示, 此斜面是在外延衬底上进行机械研磨和抛光制成.

3 器件特性和结果

3.1 伏安特性

为了检测量子阱结构特性, 暗电流和器件电极质量引起的漏电流等, 我们进行了无光照 77K 温度下伏安特性测量, 测量结果如图 3 所示. 伏安特性曲线的中部显示出明显的负阻振荡现象, 这表明电场强度改变时相邻阱间共振条件的破坏与建立的过程, 同时说明此时暗电流主要由共振隧穿电流构成, 暗电流在 0.2 μA 以下. 若增加势垒厚度, 如 G122

样品势垒厚度为 $300 \text{ \AA}$, 则暗电流降低 2 个数量级为 $0.002 \mu\text{A}$, 这将大大提高探测率. 明显的负阻振荡和低暗电流证实了我们生长的多量子阱结构分子束外延材料是优质的以及器件无漏电并具有良好的欧姆接触. 我们由 77 K 温度下的伏安特性曲线计算出微分电阻与偏压的关系, 在所使用的偏压范围内微分电阻在 $1-10 \text{ M}\Omega$. 在低温下探测器的电阻要比其它类型探测器(如 HgCdTe 光导红外探测器)要大的多, 要注意连接导线的分布电容引起的信号损失.

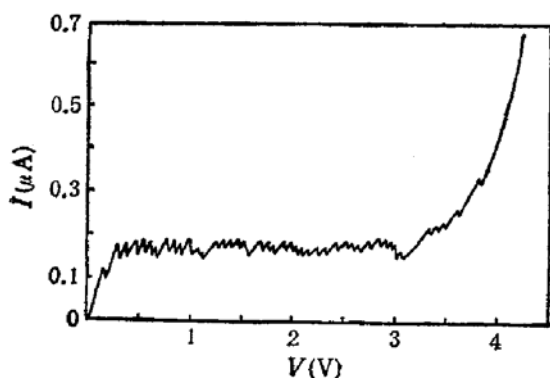


图 3 在 77 K 温度下无光照的伏安特性曲线

明显的负阻振荡和低暗电流证实了我们生长的多量子阱结构分子束外延材料是优质的以及器件无漏电并具有良好的欧姆接触. 我们由 77 K 温度下的伏安特性曲线计算出微分电阻与偏压的关系, 在所使用的偏压范围内微分电阻在 $1-10 \text{ M}\Omega$. 在低温下探测器的电阻要比其它类型探测器(如 HgCdTe 光导红外探测器)要大的多, 要注意连接导线的分布电容引起的信号损失.

3.2 电压响应率和探测率测量分析

探测器置放于美国生产的 E-1332 低温致冷装置中, 其温度变化范围为 $10-300 \text{ K}$. 500 K 黑体源产生的黑体辐射经过 800 Hz 频率调制后, 通过制冷器窗口斜入射到探测器上, 探测器的视角为 136° . 采用 Keithley 220 电流源给出恒定偏流, EG&G 5210 锁相放大器可以测量基频信号均方根电压 V_s 和噪声均方根电压 V_n .

汤定元等人编著的“光电器件概论”^[13]一书给出了黑体电压响应率 R_b 和黑体探测率 D_{bb}^* 的计算方法, 即

$$R_b = V_s / \Phi_s (V/W), \quad (1)$$

式中 Φ_s 为入射辐射基频功率均方根值, 这可以由测量系统和测试条件有关的某些参量(如黑体温度, 调制盘温度, 黑体出射孔和探测器光照面积等)计算出. 黑体探测率为

$$D_{bb}^* = \frac{V_s}{V_n} \cdot \frac{\sqrt{A_d \cdot \Delta f}}{\Phi_s} (\text{cm}\sqrt{\text{Hz}}/W), \quad (2)$$

其中 A_d 为探测器面积, Δf 为测量电路带宽. $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ 多量子阱红外探测器为窄带探测器, 因此为了表示该种探测性能, 国际上通常用峰值探测率 $D_{\lambda p}^*$ 表征^[10], 其计算公式如下:

$$D_{\lambda p}^* = D_{bb}^* \cdot \Gamma. \quad (3)$$

校正因子 Γ 可用下式表示

$$\Gamma = \frac{\int_0^\infty M_b(500\text{K}, \nu) d\nu}{\int_0^\infty M_b(500\text{K}, \nu) R(\nu) d\nu}. \quad (4)$$

式为 ν 为波数. $M_b(500\text{K}, \nu)$ 是黑体辐射功率分布函数, 可用描述黑体热辐射的普朗克辐射公式来表示. 波数响应率 $R(\nu)$ 我们用峰值归一化的高斯分布表示, 其中峰值位置和半高宽由于带跃迁红外吸收谱分析得到. 文献 [3] 证实频谱响应率与带跃迁红外吸收谱具有近似的谱形, 因此以上分析是合适的.

3.3 峰值探测率 $D_{\lambda p}^*$ 与偏流和温度关系

基于量子阱中子带跃迁为机理的红外探测器的光电性能如峰值探测率 $D_{\lambda p}^*$ 是与工作条件有很大关系. 我们发现探测率随偏置电流有明显变化, 如图 4 所示. 而且不同温

度具有不同变化曲线。显然,每个探测器在某个工作温度下存在一个最佳工作点,而此时的探测率最大,相应的电流为最佳偏置电流(此偏置电流随着工作温度不同而变化)。因此,在使用量子阱红外探测器时,在最佳工作点运行是非常重要的。图5显示出探测率随着工作温度的升高而降低,尤其工作温度超过液N₂温度(77K)后,探测率降低更快。对于我们研制的多量子阱红外探测器在工作温度超过100K时还有黑体响应。

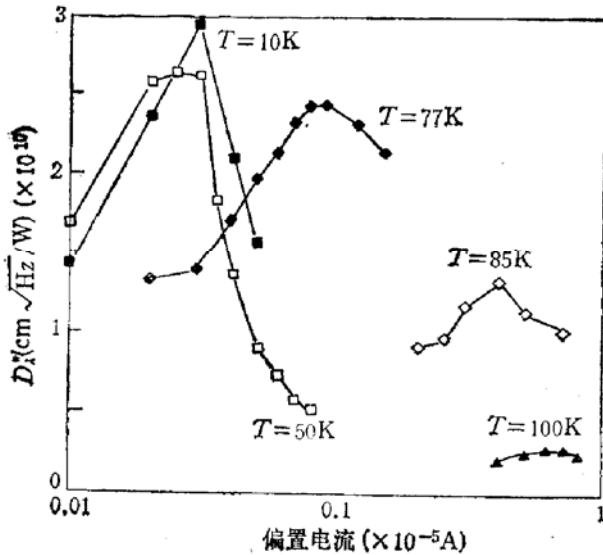


图4 不同温度下探测率随偏流变化的工作特性曲线

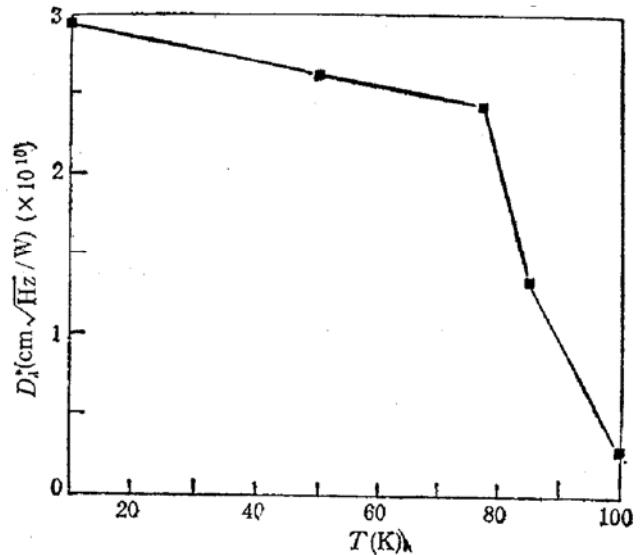


图5 峰值探测率随工作温度的变化

3.4 测量结果

我们研制了5组不同尺寸量子阱结构的红外探测器,在工作温度为77K时,其主要性能和参数如表1所列。响应率和探测率测量和计算如上节所叙。样品参数和测试条件如下(对于G236样品):探测器面积为 $8.04 \times 10^{-4} \text{cm}^2$,黑体出射孔径为0.4cm,出射孔与探测器间的距离为20cm,调制频率为799Hz,测量电路带宽为24.08Hz和窗口透射率为63%。表1中只给出电压响应率 R_v 数据,而电流响应率 R_i 可从 R_v 和已计算出的微分电阻得到,即 $R_i = R_v / r$ 。例如G236样品在77K时最佳偏置电流为 $9 \times 10^{-7} \text{A}$ (由图4得出),相应的微分电阻 $r = 2.4 \times 10^6 \Omega$ (由已计算出的微分电阻与偏压关系曲线查出),因此对应的电压响应率 $R_v = 9.7 \times 10^5 (\text{V/W})$ 的电流响应率 $R_i = 0.4 \text{A/W}$ 。此数值与国际上报道的最高水平相当。另外,由表1看出,我们研制的GaAs/AlGaAs

表1 量子阱红外探测器性能参数

样品 编号	峰值波长 $\lambda(\mu\text{m})$	黑体电压响应率 $R_b(\text{V/W})$	电压响应率 $R_v(\text{V/W})$	黑体探测率 $D_{b,b}^*(\text{cm}\sqrt{\text{Hz}}/\text{W})$	峰值探测率 $D_{b,p}^*(\text{cm}\sqrt{\text{Hz}}/\text{W})$
G094	6.9	1.6×10^3	2.3×10^4	8.2×10^7	1.2×10^9
G122	6.9	1.2×10^4	2.8×10^5	7.6×10^8	1.8×10^{10}
G123	6.9	5.6×10^3	4.0×10^5	3.9×10^9	2.8×10^{11}
G236	9.2	2.3×10^4	9.7×10^5	1.5×10^9	6.2×10^{10}
G237	9.1	5.5×10^3	3.3×10^5	2.7×10^9	1.3×10^{11}

多量子阱长波长红外探测器的最主要指标,即 77K 温度下峰值探测率 D^* ,已超过 $10^{11}\text{cm}\sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$, 优于目前国际上报道的最好水平^[7].

4 结语

多量子阱红外探测器是近几年发展起来的一种新型红外探测器,是目前红外传感技术的发展方向之一.它具有响应速度快、量子效率高、热稳定性和均匀性好的许多优点,已成为国际上极为重视的高技术研究前沿课题.

本文报道了高探测率低暗电流的 GaAs 量子阱长波长红外探测器的制备和特性.通过量子阱结构的精心设计和器件工艺的改进使红外探测器的性能进一步提高,在 77K 温度下的峰值探测率 D^* ,已超过 $1 \times 10^{11}\text{cm}\sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$,暗电流小于 $0.1\mu\text{A}$, 优于目前国际上报道的最好水平.

参 考 文 献

- [1] L. C. West and S. J. Eglash., Appl. Phys. Lett., 1985, 46: 1156.
- [2] B. F. Levine, R. J. Malik, J. Walker *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1987, 50: 273.
- [3] B. F. Levine, K. K. Choi, C. G. Bethea, *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1987, 50: 1092.
- [4] B. F. Levine, C. G. Bethea, G. Hasnain *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1988, 53: 296.
- [5] G. Hasnain, B. F. Levine, C. G. Bethea *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1989, 54: 2515.
- [6] B. F. Levine, G. Hasnain, C. G. Bethea *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1989, 54: 2704.
- [7] B. F. Levine, C. G. Bethea, G. Hasnain *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1990, 56: 851.
- [8] A. Zussman, B. F. Levine, J. M. Kuo *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1991, 70: 5101.
- [9] J. Y. Andersson, L. Lundqvist and Z. F. Paska, Appl. Phys. Lett., 1991, 58, 2264.
- [10] M. Kobayashi, M. Nakanishi, Y. Notani *et al.*, SPIE, 1990, 1341: Infrared Technology XVI, 46.
- [11] L. J. Kozlowski, G. M. Williams, G. J. Sullivan *et al.*, IEEE Transactions on Electron Devices 1991, 38: 1124.
- [12] C. G. Bethea, B. F. Levine, V. O. Shen *et al.*, IEEE Transactions on Electron Devices, 1991, 38: 1118.
- [13] 汤定元,糜正瑜等,光电器件概论,上海科学技术文献出版社,1989.

High Sensitivity Low Dark Current GaAs Quantum Well Infrared Photodetectors

Zhong Zhantian¹, Zhou Xiaochuan¹, Du Quangang¹, Zhou Dingxin³,
Wu Ronghan², Wang Sen², Li Chengfang², Yu Meiyun³,
Xu Junying² and Zhu Qinsheng¹

(1 *Laboratory for Surface Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

(2 *Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*)

(3 *Shanghai 803 Research Institute, the Ministry of Aero-Space Industry, Shanghai 200233*)

Abstract Long wavelength GaAs quantum well infrared detectors have been demonstrated and evaluated. The detector comprised 50 GaAs quantum wells and $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$ barriers. The detectors were fabricated by etching a $320\text{ }\mu\text{m}$ -diam mesa. We have achieved a detector responsivity $R_s = 9.7 \times 10^5 \text{ V/W}$ and a high-detectivity at peak wavelength excess of $1 \times 10^{11} \text{ cm}\sqrt{\text{Hz/W}}$ at $9.2\text{ }\mu\text{m}$ and the device dark current is lower than $0.1\text{ }\mu\text{A}$, operating at temperature of $T = 77\text{K}$.

EEACC: 7230C