

# GaAs/AlGaAs 多量子阱红外 探测器材料研究\*

杜全钢 钟战天 周小川 牟善明

徐贵昌 蒋 健 段海龙 王昌衡

(中国科学院表面物理国家重点实验室 北京 100080)

**摘要** 本文报道GaAs/AlGaAs多量子阱长波长红外探测器材料的制备及其性能。这种材料由GaAs阱和AlGaAs势垒组成,阱内n型掺杂,具有50个周期。利用分子束外延技术成功地生长出了大面积( $\phi 2$ 英寸)均匀(厚度 $\Delta t_{\max}/t \leq 3\%$ ,组分 $\Delta x_{\max}/x \leq 3.4\%$ ,掺杂浓度 $\Delta n_{\max}/n \leq 3\%$ ,椭圆缺陷 $\leq 300\text{cm}^{-2}$ )的外延材料。分析了暗电流的成因,通过加厚势垒( $L_b \geq 300\text{\AA}$ )、控制掺杂( $n \leq 1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ )、精确设计子带结构,将暗电流降低了几个数量级,同时使电子的输运得到了改善。由此得到了高质量的多量子阱红外探测器材料。

**PACC:** 0762, 7340L, 8115G

## 1 引言

1985年L. C. West等人<sup>[1]</sup>首次观测到GaAs/AlGaAs多量子阱材料由子带跃迁引起的红外吸收现象。由此导致了一种新型的利用量子阱内子带跃迁的红外探测技术的发展。它的探测波长范围根据需要通过改变GaAs阱宽和 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 垒高(由Al组分 $x$ 确定)可以任意设计,既可使其适用于 $3-5\mu\text{m}$ 的大气窗口,又可设计在 $8-12\mu\text{m}$ 的大气窗口。与传统的HgCdTe相比,GaAs/AlGaAs材料具有生长技术、工艺过程更为成熟、价格低、大面积均匀性好,热稳定性好、响应速度快(ps量级),量子效率高等显著优点,从而使得这种新型量子阱材料非常适合制作大面积红外焦平面多元阵列,显示出它的巨大潜力。这方面工作的先驱Levine及其合作者从结构设计、器件研制及其性能的提高等方面做了大量研究<sup>[2-5]</sup>。目前,这种材料已成功地应用到 $128 \times 128$ 阵列红外热像仪中<sup>[2,6]</sup>。

这种红外探测技术实现的基础和先导乃是量子阱材料的研究,外延材料的质量是制成高性能红外探测器的关键因素之一。本文旨在对GaAs/AlGaAs材料的生长、设计进行研究,通过精心设计、准确进行生长控制等来提高这种量子阱材料的质量。从理论上综合分析暗电流形成机制,使得材料能大幅度降低暗电流,再考虑到电子的输运,得到比较合理的结构参数,为高性能红外探测器的应用打下基础。

\* 国家自然科学基金资助课题  
本文 1992年6月17日收到

## 2 材料制备

### 2.1 结构计算及设计

本文采用阱内 n 型掺杂的矩形 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构作为探测器材料, 根据探测波长的需要, 用 Kronig-Penney 模型计算出相应的阱宽及势垒高度从而确定 GaAs 层厚度及 AlGaAs 层组分。典型的量子阱结构如图 1 所示, 它由 50 个周期组成, GaAs 阱宽  $57 \text{ \AA}$ ,  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  垒厚  $300 \text{ \AA}$ , GaAs 阱中 Si 掺杂 ( $n = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), 衬底为半绝缘 GaAs, 其中多量子阱的顶部和底部分别生长  $0.5 \mu\text{m}$  和  $1.0 \mu\text{m}$  的 Si 掺杂 ( $n^+ = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) 的 GaAs 接触层作电极用。

### 2.2 分子束外延 (MBE) 生长

我们使用了英国 VGV80H 分子束外延系统进行多量子阱材料的生长。为了降低材料本底杂质含量, 采用所能得到的最高纯度 Al(6N)、Ga(7N)、As(7N) 源并进行了严格的真空系统烘烤程序, 生长室的本底真空度保证在  $5 \times 10^{-11} \text{ mbar}$  以下, 半绝缘 GaAs 衬底材料经过严格挑选和清洗。为了制成大面积焦平面阵列, 我们进行了生长大面积均匀外延片的努力, 通过合理配置坩锅, 精确控制炉位等, 已成功地生长出了无 In 两英寸多量子阱外延材料, 生长时衬底温度为  $600\text{--}630^\circ\text{C}$ 。考虑到炉子的热平衡与生长质量有很大关系, 我们对部分束源进行了调整和改进, 从而明显地改善了生长速率的稳定性并显著降低了表面缺陷密度。具体生长 GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  红外探测器材料时, 有两个关键, 一是严格控制阱宽, 这需要保证快门的可靠性; 二是严格控制组分  $x$ , 这需要准确定标。另外, 为了防止阱中掺杂向势垒扩散, 只在阱中心进行掺杂, 而在两边各留一个单层的本征 GaAs。满足这些环节的要求使得我们得到了高质量的外延片。

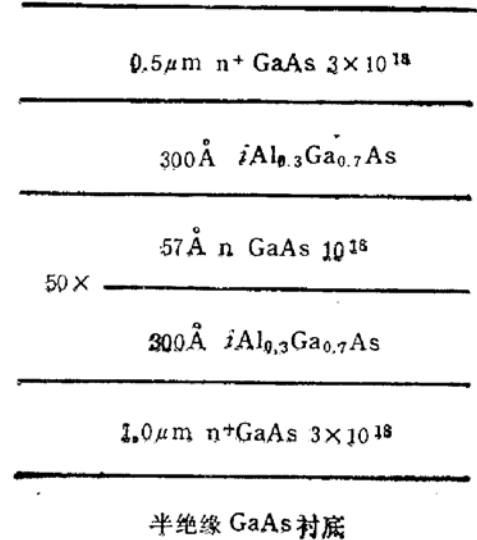


图 1 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构示意图

## 3 结果及分析

### 3.1 MBE 外延层性能

表 1 列出了我们的 MBE 材料部分性能数据。

表 1 MBE 外延层性能

本征 GaAs 外延材料:

测量温度 (K)	300	77
体浓度(n 型) ( $\text{cm}^{-3}$ )	$1.2 \times 10^{14}$	$1.7 \times 10^{14}$
迁移率 ( $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ )	6850	92000

两英寸外延材料均匀性及缺陷密度:

膜厚 $\Delta t_{\max}/t$	$\pm 3.0\%$
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 组分 $\Delta x_{\max}/x$	$\pm 3.4\%$
掺杂 $\Delta n_{\max}/n$	$\pm 3.0\%$
椭圆缺陷 ( $\text{cm}^{-2}$ )	$\leq 300$

可以看出,材料的质量是很好的.

### 3.2 暗电流分析

表征探测器性能的一个重要参数是探测率  $D^*$ ,  $D^* = R \sqrt{A\Delta f}/i_n$ , 其中  $i_n$  为噪声电流. 由此可知探测器性能的提高很大程度上取决于对噪声的抑制. 为了降低探测器的噪声, 需要使暗电流降到尽量低的水平. 在阱中  $n$  型掺杂的多量子阱结构中, 在较低电场下, 暗电流的形成可主要归结为共振隧穿电流 ( $I_{rt}$ )、热离化激发电流 ( $I_{th}$ ) 和声子辅助隧穿电流 ( $I_{pt}$ )<sup>[3]</sup>, 其中  $I_{pt}$  只在  $T = 120\text{K}$  附近很小范围起作用, 这里不考虑它.

$$I_{rt} = \frac{eA}{\hbar d^2} D_0 K T \ln \left( \frac{1 + e^{E_F/KT}}{1 + e^{(E_F - e\Delta_1)/KT}} \right), \quad (1)$$

$$I_{th} = \frac{e^2 m^*}{\pi \hbar^2} \frac{A \bar{v}_D}{d} \Delta_1 \exp[-(H - e\Delta_2 - E_F - E_1)/KT], \quad (2)$$

其中  $A$  是探测元面积,  $d$  是阱宽,  $D_0$  是隧穿系数,  $\Delta_1$  为一个势垒上的电势降,  $E_F$  为与温度  $T$  相关的费米能级,  $m^*$  为 GaAs 有效质量,  $\bar{v}_D$  为势垒顶部的有效迁移率,  $\Delta_2$  为一个阱中的电势降落,  $H$  为势垒高度,  $E_1$  为基态能量. 隧穿系数可表示为:

$$D_0 = \exp \left\{ \frac{-4L_b}{3e\hbar\Delta_1} (2m_b^*)^{1/2} [(H - e\Delta_2 - E_1)^{3/2} - (H - eV_p - E_1)^{3/2}] \right\}, \quad (3)$$

其中  $L_b$  为垒厚,  $m_b^*$  为垒中电子有效质量,  $V_p$  为每周期上的电势降 ( $= \Delta_1 + \Delta_2$ ).

由式(1)及式(3)可以看出共振隧穿电流 ( $I_{rt}$ ) 与势垒厚度 ( $L_b$ ) 成负指数关系, 所以通过增加  $L_b$  可以大幅度降低  $I_{rt}$  对暗电流的贡献, 但  $L_b$  的增加却会影响光电子的输运, 我们将第二子带设计在阱口处, 这样既可以抑制暗电流, 又易于电子输运. 由式(2)可知降低热离化激发电流则需提高势垒高度、降低基态及费米能量. 而这些参量的改变需与光电子输运的难易及探测器的量子效率进行综合考虑. ①提高势垒及降低基态能级的同时必须考虑激发态子带在阱中的相对位置, 如果使激发态子带落入阱中较深的位置, 则将造成激发后的电子输运困难(因为它需要穿越势垒), 导致探测器响应率  $R$  的降低. ②降低掺杂量可降低基态上的电子填充从而降低热激发电流. 但子带跃迁量子效率正比于阱中基态上的电子密度, 所以降低阱中的掺杂量也会同时降低探测器的量子效率, 同样也

表 2 势垒厚度对暗电流的影响 (77K)

样 品	$L_b(\text{\AA})$	$V(\text{V})-I(\mu\text{A})$		$V(\text{V})-I(\mu\text{A})$	
		3	0.18	4	0.42
G097	150	3	0.18	4	0.42
G122	300	3	0.0035	4	0.009

会导致探测器响应率的降低。考虑以上各因素我们在加厚势垒 ( $L_b \geq 300 \text{ \AA}$ ) 的同时将激发电子带放置在阱口处并将阱中掺杂量控制在不高于  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  的水平。表 2 给出了一组实验结果,它表明势垒厚度 ( $L_b$ ) 确为控制暗电流的一个主要因素。

### 3.3 红外吸收光谱

对材料的测试除上述性能外,最主要的就是进行红外吸收光谱的实验,它是对结构设计的合理性及质量可靠性的检验之一,也是决定探测器的探测性能的因素之一。

将多量子阱外延片用机械方法研磨、抛光成长度为 4mm,两端面为  $45^\circ$  斜面的波导式样品,光沿斜面射入,图 2 为 G236 号样品的红外吸收谱。

从图中可以看到明显的子带跃迁现象。峰值位置为  $1092 \text{ cm}^{-1}$  ( $9.1 \mu\text{m}$ ), 吸收峰的半高全宽为  $36 \text{ cm}^{-1}$ , 是个窄带吸收。表 3 为一组样品的吸收峰值。可以看出理论与实验基本吻合,它表明结构的理论设计是合理的、生长控制是成功的。

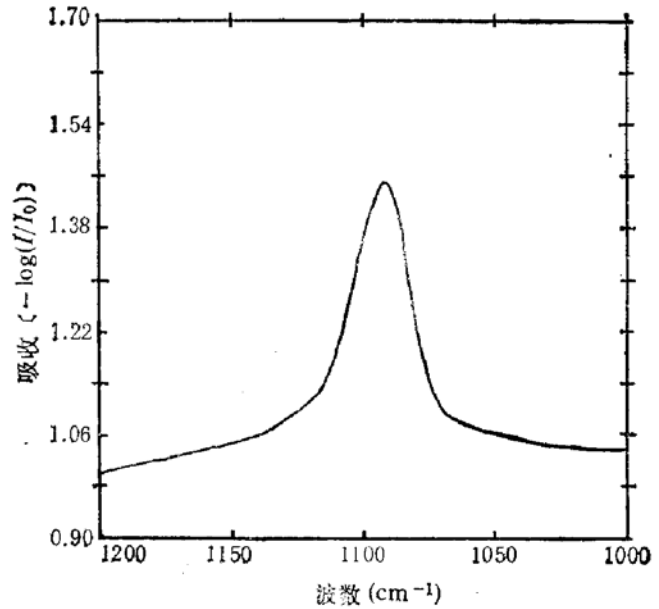


图 2 室温下 G236 号多量子阱材料的红外吸收谱

表 3 峰值波长的比较

样 品	G094	G122	G123	G236	G237
$\lambda_{\text{理论}} (\mu\text{m})$	6.97	8.06	8.17	10.16	10.04
$\lambda_{\text{实验}} (\mu\text{m})$	6.9	6.9	6.9	9.1	9.2

## 4 结论

本文利用简单的量子理论设计出 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构并采用分子束外延系统进行生长。通过各步骤的准确控制成功地生长出大面积均匀的外延材料,并通过加厚势垒,准确设计子带结构,得到了暗电流低、电子输运容易的性能良好的红外探测器材料。

## 参 考 文 献

- [1] L. C. West and S. J. Eglash, Appl. Phys. Lett., 1985, 46:1156.
- [2] L. J. Kozlowski, G. M. Williams, G. J. Sullivan, C. W. Farley, R. J. Anderson, J. Chen and R. E. Dewames, IEEE Trans. Elec. Dev., 1991, 38:1124.
- [3] B. F. Levine, K. K. Choi, C. G. Bethea, J. Walker, and R. J. Malik, Appl. Phys. Lett., 1987, 56:1092.
- [4] B. F. Levine, C. G. Bethea, G. Hasnain, V. O. Shen, E. Pelve and R. R. Abbott, Appl. Phys.

Lett., 1991, 56:851.

- [5] K. K. Choi, B. F. Levine, C. G. Bethea, J. Walker and R. J. Malik, Appl. Phys. Lett., 1987, 50:1814.
- [6] C. G. Bethea, B. F. Levine, V. O. Shen, R. R. Abbott, and S. J. Hsieh, IEEE Trans. Elec. Dev., 1991. 38:1118.

## Study of GaAs/AlGaAs Multiquantum Well Infrared Detector Material

Du Quangang, Zhong Zhantian, Zhou Xiaochuan, Mou Shanming, Xu Guichang,  
Jiang Jian, Duan Hailong and Wang Changheng

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

**Abstract** This paper describes the growth and performance of GaAs/AlGaAs MQW infrared detector material. The material was grown by molecular beam epitaxy (MBE) with large area ( $\phi 2$  inches), good uniformity (thickness  $\Delta t_{\max}/t \leq 3\%$ , composition  $\Delta x_{\max}/x \leq 3.4\%$ , doping concentration  $\Delta n_{\max}/n \leq 3\%$ ). By increasing the thickness of the barriers, controlling doping concentration and exactly designing the subband, the dark current has been reduced dramatically by several orders of magnitude and thereby significantly increased the detectivity and eased the transportation of the excited electrons.

**PACC:** 0762, 7340L, 8115G