

快速热退火对 GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器的修饰*

李 宁 刘兴权 李 娜 陈效双 陆 卫 徐文兰 袁先璋 沈学础

(中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室 上海 200083)

黄 绮 周均铭

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

摘要 应用快速热退火的方法将 GaAs/AlGaAs 多量子阱红外探测器的峰值响应波长从 $7.7\mu\text{m}$ 移动到 $8\sim 14\mu\text{m}$ 大气窗口内. 通过测量单元器件的光电流谱、响应率和 $I-V$ 特性, 分析了快速热退火对 GaAs/AlGaAs 多量子阱红外探测器性能的影响.

关键词: 量子阱, 红外探测器, 快速退火, 光电流谱

PACC: 6865, 7320, 7340L, 0762

文章编号: 0253-4177(2000)03-0264-04

Modification of GaAs/AlGaAs Quantum Well Infrared Photodetectors by Rapid Thermal Annealing*

LI Ning, LIU Xing-quan, LI Na, CHEN Xiao-shuang, LU Wei,
XU Wen-lan, YUAN Xian-zhang and S. C. Shen

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

HUANG Yi and ZHOU Jun-ming

(Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Received 26 December 1998, revised manuscript received 11 June 1999

Abstract The post grown tuning of response wavelength of GaAs/AlGaAs quantum well infrared

* 国家自然科学基金、中澳合作项目[Project Supported by National Natural Science Foundation of China and by Cooperation Plan Between China and Australia].

李 宁 男, 1968 年出生, 博士生, 目前从事红外光电器件研究.

刘兴权 男, 1967 年出生, 副研究员, 主要从事 III-V 材料分子束外延生长和材料物理特性研究.
1998-12-26 收到, 1999-06-11 定稿

photodetectors (QWIP) by rapid thermal annealing is reported. Initial response wavelength $7.7\mu\text{m}$ is successfully shifted to $8.4\mu\text{m}$. Important properties of QWIP including spectral response, responsibility and dark current are also modified.

Key Words: Quantum Well, Infrared Photodetectors, Rapid Thermal Annealing, Photocurrent Spectrum

PACC: 6865, 7320, 7340L, 0762

Article ID: 0253-4177(2000)03-0264-04

1 引言

最近几年, GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器由于工作在 $8\sim 14\mu\text{m}$ 这一大气窗口而引起广泛的兴趣^[1,2]. 相对于 HgCdTe 红外探测器, GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器具有工艺成熟、材料均匀性好等特点, 特别适合于低成本、大面积的焦平面阵列^[3]. 通过改变阱宽和势垒组分将峰值响应波长调整到 $8\sim 14\mu\text{m}$, 也可以通过材料生长后势阱层和势垒层的界面混合来调整峰值波长. 现在已经发展了一系列方法来改变量子阱结构的光学和电学特性, 例如离子注入诱导界面混合^[4,5]、阳极氧化诱导界面混合^[6]、热退火诱导界面混合^[7]、激光退火等^[8]. 其中激光退火方法已成功地应用于量子阱红外探测器性能的修饰, 激光诱导界面混合有很强的各向异性特征. 热退火诱导的界面混合具有较好的均匀性, 因此是均匀的处理大片材料的有效手段. 基于此考虑, 本文报道应用快速热退火的方法实现对 GaAs/AlGaAs 多量子阱红外探测器特性的修饰.

2 实验

制备量子阱红外探测器用的材料是采用分子束外延系统外延生长的. 在半绝缘的 GaAs(100) 衬底上生长 50 个周期的 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 多量子阱, 其中垒宽 50nm, 阱宽 5nm, 阱中 Si 掺杂浓度为 $1\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$, 量子阱的上下电极层厚度分别为 $2\mu\text{m}$ 和 $1\mu\text{m}$, 电极层的 Si 掺杂浓度为 $1\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$.

为了便于比较, 将分子束外延生长的样品(as-grown) 切成 4 小块, 其中 3 块分别放在 800°C 、 850°C 和 900°C 下快速热退火(RTA) 30s. 在退火过程中, 样品表面紧贴在一片新鲜的绝缘 GaAs 片上以防止 As 从样品表面逃逸. 退火样品与未退火样品都制备成单元器件, 单元面积为 $200\times 280\mu\text{m}^2$, 通过湿法腐蚀刻出台面, 再蒸发 AuGeNi/Au 形成上下电极, 合金化后引出电极, 器件制备好以后, 放在杜瓦瓶中进行测量, 量子阱红外探测器采用 45° 入射光耦合.

在材料性能表征方面, 应用 Bruker 113 傅里叶变换光谱仪测量了器件在 77K 下的光电流谱. 同时在自制的器件性能测量系统上测量了器件的暗电流特性和不同偏压下的黑体响应率.

3 结果和分析

图 1 为器件的光电流谱, 未退火、 800°C 、 850°C 和 900°C 快速热退火器件响应的峰值波长分别为 $7.7\mu\text{m}$ 、 $7.8\mu\text{m}$ 、 $8.0\mu\text{m}$ 和 $8.4\mu\text{m}$. 为保证器件性能之间的可比性, 所有器件的偏置电压均为 6V. 850°C 和 900°C 快速热退火器件的峰值响应波长有明显红移, 最大移动量达 $0.7\mu\text{m}$, 将未退火器件的峰值响应波长从 $7.7\mu\text{m}$ 移进到大气窗口波段内($8\sim 14\mu\text{m}$).

通常可用 Al 组分的误差分布函数表达异质界面混合效果. 在量子阱的异质结构界面处的 Al 组分 $x(z)$ 为^[9]:

$$x(z) = x_0 \left[1 - \frac{1}{2} \left| \operatorname{erf} \left[\frac{L_z + 2z}{4L_d} \right] + \operatorname{erf} \left[\frac{L_z - 2z}{4L_d} \right] \right| \right] \quad (1)$$

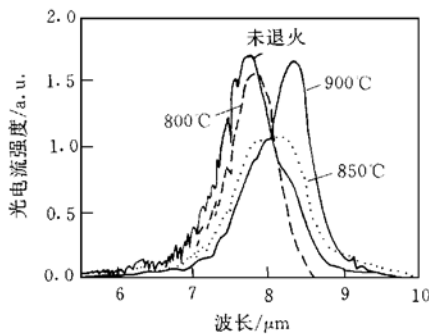


图 1 器件的光电流谱
FIG. 1 Photocurrent Spectrum of Detectors

远小于实验上观测到的变化量. 如图 1 所示, 我们观察到的能量移动较大, 900°C 热退火条件下达到 13meV. 我们认为实验观测到较高的能量移动是由于量子阱中的 Si 掺杂增强了界面混合效应, 量子阱中高浓度 Si 掺杂对量子阱界面附近 Al-Ga 混合有贡献. 这是一种典型的杂质诱导扩散增强效应, 根据跃迁能量 E 的移动, 通过比较理论值和实验值, 我们可以估计经 800°C、850°C、900°C 热退火器件后, 实际扩散长度 L_{d-Si} 分别为 0.3nm、0.45nm、0.6nm, 并且分别是理论计算未退火器件扩散长度 L_{d0} 的 30、10、4 倍, 如图 3 所示.

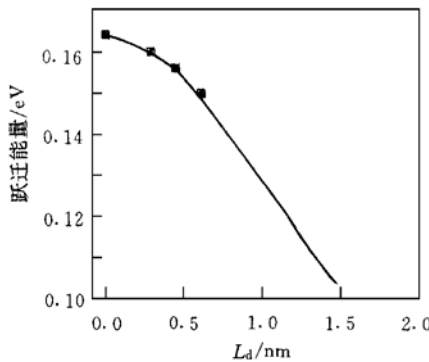


图 2 跃迁能量与扩散长度的关系
FIG. 2 Jumping Energy Versus Diffusion Length

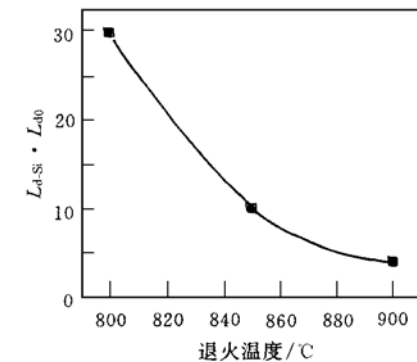


图 3 扩散长度与退火温度的关系
FIG. 3 Diffusion Length Versus Annealing Temperature

图 4 为未退火器件和 900°C 快速热退火器件的暗电流特性, 在正常工作偏压下, 900°C 热退火器件暗电流为未退火器件的一半左右. 暗电流发生这样明显的变化是由于 Si 杂质扩散所致. 在向势垒区 AlGaAs 材料扩散时, 有部分 Si 杂质不再具有浅施主的特性, 从而降低了量子阱中的电子浓度. 由此导致热激发电流的下降.

绝对响应率用标准的 500K 黑体来测量, 黑体出射孔直径为 0.6cm, 器件封装在杜瓦瓶中, 用液氮制冷到 80K, 入射光采用 45° 入射耦合. 从图 5 可以看出, 与未退火器件比较, 900°C 热退火器件的峰值响应率下降了两倍, 这是由于 Si 的扩散引起的量子阱中基态上电子浓度的下降, 使量子阱对红外光的吸收系数有所下降, 从而降低了器件的量子效率. 另外, 界面混合引起界面的破损也在一定程度上使器件性能有所下降.

其中 $L_d = \sqrt{Dt}$, D 为扩散系数, 为退火温度的函数: $D = D_0 \exp(-\Delta E/kT)$, $D_0 = 10^{17} \text{cm}^2/\text{s}$, $\Delta E \approx 5.6 \text{eV}$, t 为退火时间. 根据方程 (1), 可得到量子阱的参数. 导带电子势函数为:

$$U(z) = Q_c [E_g(z) - E_g(z=0)] \quad (2)$$

这里, E_g 为禁带宽度, Q_c 为能带分裂补偿. 由方程 (2) 给定的势函数可以计算出含界面混合效应的量子阱中电子能级. 图 2 为电子从基态跃迁到激发态的光跃迁能量随扩散长度 L_d 变化曲线, 实线为理论计算值. 在单纯的 Al 组分扩散模型下, 对于 800°C、850°C、900°C 快速热退火, Al 扩散系数分别为 $4.2 \times 10^{-20} \text{cm}^2/\text{s}$ 、 $6.9 \times 10^{-19} \text{cm}^2/\text{s}$ 、 $7 \times 10^{-18} \text{cm}^2/\text{s}$, 相应扩散长度为 0.01nm、0.045nm、0.15nm. 根据这些扩散长度值通过有效质量理论计算得到的电子跃迁能量

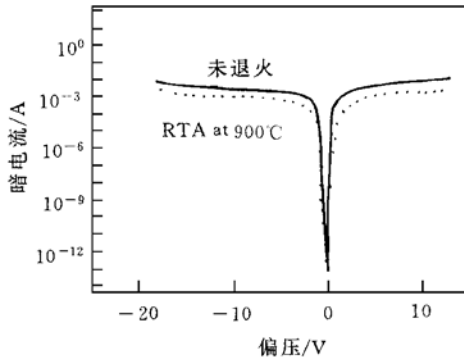


图 4 器件暗电流特性

FIG. 4 Dark Current of Detector

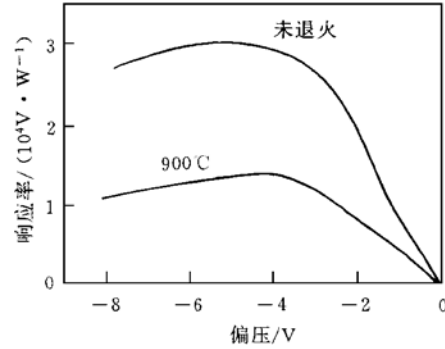


图 5 不同偏压下器件的黑体响应率

FIG. 5 Responsibility of Dark Body at Different Biases

4 结论

与常规引入杂质或缺陷的表面镀膜或离子注入方法不同,我们用快速热退火诱导界面混合的方法使多量子阱红外探测器的峰值响应波长从未退火时的大气窗口波段外移动到了 $8\sim 12\mu\text{m}$ 这一大气窗口波段内,相对于未退火器件, 900°C 快速热退火器件峰值波长红移量达到 $0.7\mu\text{m}$. 用误差函数计算了界面混合效果. 我们认为产生较大的界面混合是由于 Si 掺杂的增强效应. 快速热退火器件的暗电流较未退火器件有较大的降低主要是由于量子阱中 Si 杂质的消耗.

参 考 文 献

- [1] B. F. Levine, J. Appl. Phys., 1993, **74**: R1~ R81.
- [2] W. Lu, H. J. Ou, M. H. Chen, X. L. Huang, S. C. Shen, R. H. Gu and L. B. Ye, Int. J. Infrared Millim. Waves, 1994, **15**: 137.
- [3] 李宁, 李娜, 陆卫, 红外与毫米波学报, 1999, 将发表[LI Ning, LI Na, LU Wei, Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1999, to be Published].
- [4] B. Elman, Emil S. Koteles, P. Melman, C. A. Armiento, J. Appl. Phys., 1989, **66**: 2104.
- [5] H. H. Tan, J. S. Williams, C. Jagadish, P. T. Burke and M. Gal, Appl. Phys. Lett., 1996, **68**: 2401.
- [6] Shu Yuan, Yong Kim, C. Jagadish, P. T. Burke, M. Gal, J. Zou, D. Q. Cai, D. J. H. Cockayne and R. M. Cohen, Appl. Phys. Lett., 1997, **70**: 1269.
- [7] P. J. Hughes, E. H. Li and B. L. Weiss, J. Vac. Sci. Technol. B, 1995, **13**: 2276.
- [8] D. K. Sengupta, T. Horton, W. Fang, A. Curtis, J. Li, S. L. Chuang, H. Chen, M. Feng, G. E. Stillman, A. Kar, J. Mazumder, L. Li and H. C. Liu, Appl. Phys. Lett., 1997, **70**: 3573.
- [9] E. Herbert Li, Bernard L. Weiss and K. S. Chan, Phys. Rev. B., 1992, **46**: 15181.