

# 快速热退火对高应变 InGaAs/ GaAs 量子阱的影响 \*

苗振华 徐应强 张石勇 吴东海 赵 欢 牛智川

(中国科学院半导体研究所 半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 用固态分子束外延技术生长了高应变  $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$  量子阱材料. 研究了快速热退火对高应变  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱材料光学性质的影响. 本文采用假设  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱中的  $\text{In-Ga}$  原子扩散为误差函数扩散并解任意形状量子阱的薛定谔方程的方法, 对不同退火温度下  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱室温光致发光峰值波长拟合, 得到了  $\text{In}$  原子在高应变  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱中的扩散系数以及扩散激活能 (0.88eV).

**关键词:** 分子束外延; 高应变  $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$  量子阱; 快速热退火; 室温光致发光

**PACC:** 8115G; 8140G; 7855E

**中图分类号:** TN305.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0253-4177(2005)09-1749-04

## 1 引言

高应变  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱 (QW) 材料具有较窄的带隙和较高的电子迁移率, 因而在光电器件及电子器件领域有着广泛的应用. 最近, 高应变  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱材料已经被制成工作波长在  $1.3\mu\text{m}$  左右的边发射激光器、面发射激光器、光探测器等器件<sup>[1~3]</sup>. 所有这些应用都要求生长  $\text{In}$  组分达到 40% 左右的高质量  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱材料. 但是对于高应变的  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱材料, 其优化生长温度必须在 400 左右, 如此低的生长温度会在量子阱中引入大量的位错和缺陷, 从而降低材料质量, 影响器件性能<sup>[4]</sup>. 许多研究表明快速热退火 (RTA) 是一种有效去除材料中的位错和缺陷, 提高材料质量及器件性能的工艺, 如 Yamada 等人<sup>[5]</sup> 就用快速热退火的方法使  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱激光器的阈值电流降低了 5~7 倍. 但是到目前为止, 还没有报道关于快速热退火对  $\text{In}$  组分高于 40% 的高应变  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱的影响.

本文主要利用室温光致发光 (PL) 谱研究不同的退火温度对于高应变  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱光学性质的影响. 随着退火温度的提高, 量子阱 PL 谱峰值波长出现蓝移. 在 700 以下, 量子阱的 PL 谱峰

值强度随退火温度的提高而提高, 当进一步升高退火温度, 量子阱的 PL 谱峰值强度会随之下降. 通过拟合不同退火温度下的量子阱 PL 谱峰值波长, 本文中给出了  $\text{In}$  组分大于 40% 的  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱中  $\text{In}$  原子的扩散系数与扩散激活能.

## 2 实验

实验所用的样品由 Veeco Mod Gen MBE 系统在半绝缘 (100)  $\text{GaAs}$  上生长. 外延结构包括 300nm 的  $\text{GaAs}$  缓冲层, 7nm 的  $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$  量子阱层以及 20nm 的  $\text{GaAs}$  盖层. 其具体的生长过程在文献[4]中有报道. 快速热退火实验由国产 RTP-300 快速热退火装置完成. 样品表面覆盖一块  $\text{GaAs}$  盖片以防止表面  $\text{GaAs}$  盖层分解. 样品退火时间为 10s, 退火温度分别为 600, 650, 700, 750, 800, 850 和 900. 样品的室温光致发光谱测量由工作波长为 514.5nm 的  $\text{Ar}^+$  激光器激发, 信号通过一台冷却到 77K 的 Ge 探测器采集.

## 3 结果和分析

图 1 为未退火和分别在 700 及 900 下退火 10s 后的  $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$  单量子阱室温光致发

\* 国家自然科学基金资助项目 (批准号: 90201026)

苗振华 男, 1976 年出生, 硕士研究生, 从事  $\text{GaAs}$  基长波长光电材料及器件研究. Email: yingqxu@red.semi.ac.cn  
2005-01-27 收到, 2005-04-21 定稿

光 (RTPL) 谱. 当退火温度为 700 时,  $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$  单量子阱 RTPL 谱峰值强度提高了 3 倍, 而峰值半宽 (FWHM) 由 31nm 减小到 30nm. 当退火温度为 900 时,  $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$  单量子阱 RTPL 谱峰值强度下降了 6.5 倍, 而 FWHM 从 31nm 上升到了 41nm. 700 和 900 下退火 10s 分别使  $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$  单量子阱 RTPL 谱峰值波长蓝移了 25nm 和 90nm.  $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$  单量子阱通常是在 400 左右的温度下生长以避免  $\text{InGaAs}$  凝聚成岛. 但是如此低的生长温度会在  $\text{InGaAs}$  层中引入大量的缺陷和位错, 这些缺陷和位错在  $\text{InGaAs}$  层中充当非辐射复合中心的角色, 从而降低 PL 谱峰值强度. 700 时退火会将这些非辐射复合中心从  $\text{InGaAs}$  层和  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  界面处除去<sup>[6]</sup>, 从而提高  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱 PL 谱峰值强度. 当退火温度为 900 时,  $\text{In}$  原子向量子阱外迅速扩散而引起的量子阱量子限制降低是导致 PL 谱峰值强度降低和峰值半宽增加的主要原因<sup>[6]</sup>.

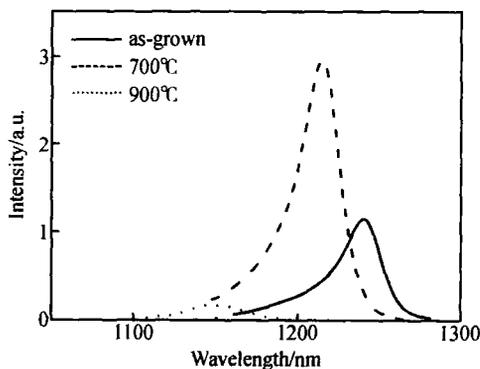


图 1 未退火和分别在 700 和 900 下退火 10s 的  $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$  量子阱室温光致发光谱

Fig. 1 Room temperature PL spectra of a  $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$  quantum well annealed at 700 and 900

The spectrum of as-grown sample is also shown for reference.

为了进一步说明退火温度对  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱光学性质的影响, 我们在图 2 中给出了  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱 RTPL 谱峰值强度和峰值半宽与退火温度的关系曲线. 当退火温度由 600 增大到 750 时,  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱 RTPL 谱峰值强度逐渐增大. 当退火温度为 700 时,  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱 RTPL 谱峰值强度增大了 3 倍, 而量子阱的峰值半宽基本保持不变. 这说明当退火温度小于

700 时, 退火主要消除  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱内及界面上的缺陷和位错, 从而提高了  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱材料质量. 当退火温度进一步升高时,  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱 RTPL 谱峰值强度迅速下降, 而峰值半宽逐渐增加. 当退火温度达到 900 时, 样品 RTPL 谱峰值强度比未退火样品 RTPL 谱峰值强度下降了 6.5 倍. 同时峰值半宽由 30nm 增加到了 40nm. 这说明当退火温度大于 700 时, 由于退火过程而引起的  $\text{InGaAs}$  量子阱中  $\text{In}$  原子向阱外扩散的效应变得非常明显. 由于  $\text{In}$  原子扩散所引起的量子阱量子限制的降低成为影响材料质量的主要原因.

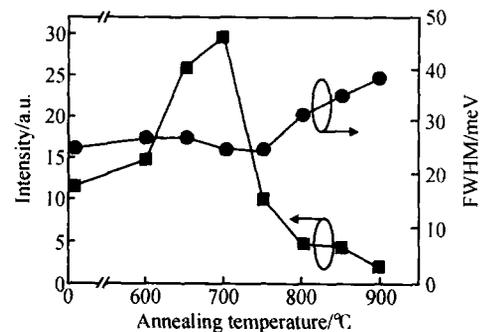


图 2 退火时间为 10s 时,  $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$  量子阱室温光致发光峰值强度和峰值半宽与退火温度的关系曲线

Fig. 2 Room temperature PL peak intensity and FWHM of  $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$  QW annealed for 10s as a function of annealing temperature

图 3 中给出了  $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$  量子阱材料 RTPL 谱峰值波长蓝移量随退火温度的关系曲线. 当退火温度在 600 ~ 750 之间时,  $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$  量子阱 RTPL 谱峰值波长的蓝移较弱, 其 RTPL 谱峰值波长蓝移量约为 20meV. 随着退火温度的进一步增加, 样品的 RTPL 谱峰值波长的蓝移明显增强. 当退火温度从 750 增加到 850 时, 样品 RTPL 谱峰值波长从 30meV 迅速增加到 80meV. 对于  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱, 其 RTPL 谱峰值波长的蓝移主要是由于在量子阱异质界面上的  $\text{In-Ga}$  原子互扩散所造成的<sup>[7]</sup>. 而较高的退火温度下的  $\text{In-Ga}$  原子互扩散速度比在较低退火温度下的互扩散速度要快得多. 这应该是造成  $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$  量子阱材料 RTPL 谱峰值波长蓝移量随着退火温度增加而迅速增加的主要原因.

利用不同退火温度下的  $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$

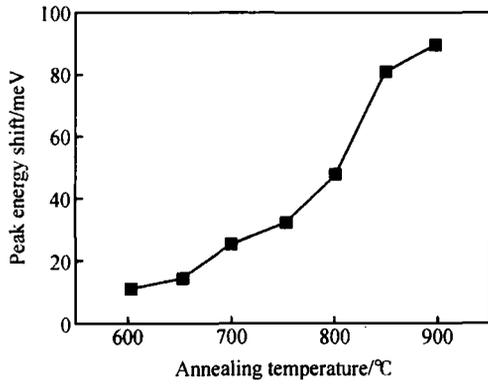


图 3 退火时间为 10s 时, In<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>As/GaAs 量子阱室温光致发光峰值波长蓝移量与退火温度的关系曲线  
 Fig. 3 Room temperature PL peak energy shift of In<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>As/GaAs QW annealed for 10s as a function of annealing temperature

量子阱 RTPL 谱峰值波长蓝移量, 我们可以拟合出不同退火温度时的 In-Ga 原子扩散系数. 首先假设 In 原子的扩散系数与 In 组分无关, 那么退火后沿生长方向上的量子阱 In 组分分布  $x(z)$  可以写成  $x(z) = x_0 [1 + \frac{1}{2} \operatorname{erf}(\frac{L_z/2 - z}{2\sqrt{Dt}}) - \frac{1}{2} \operatorname{erf}(\frac{L_z/2 + z}{2\sqrt{Dt}})]$ , 其中  $z$  是生长方向上某一点离量子阱中心的距离,  $L_z$  是退火前阱宽,  $t$  是退火时间,  $D$  是 In 原子扩散系数,  $\operatorname{erf}(x)$  是误差函数. 然后我们采用传输矩阵法解上述形状的量子阱就可以得到退火后量子阱 PL 谱峰值能量移动与扩散系数  $D$  值之间的关系<sup>[8]</sup>. 利用这种关系拟合图 3 中给出的不同退火温度下的 In<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>As/GaAs 量子阱 RTPL 谱峰值波长蓝移量就可以得到不同退火温度时的 In-Ga 原子扩散系数. 图 4 给出了 In-Ga 原子扩散系数与退火温度的倒数的关系曲线. 扩散系数  $D$  可以写成  $D = D_0 \exp(-E_a/kT)$ , 其中  $E_a$  为 In 原子扩散激活能,  $T$  为退火温度,  $k$  是玻耳兹曼常数,  $D_0$  为一常数. 通过拟合不同温度时的扩散系数, 我们得到高应变 In<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>As/GaAs 量子阱中的 In-Ga 原子扩散激活能为 0.88eV. 这一值明显小于文献[7]中所报道的 In 组分在 20% 左右的 InGaAs/GaAs 超晶格中的 In-Ga 原子扩散能 (1.22eV). 说明高应变 In-GaAs/GaAs 量子阱中的 In 原子比低应变 InGaAs/GaAs 量子阱中的 In 原子更容易扩散到阱外. 最近有文献报道在 GaInNAs/GaAs 量子阱中由低温生长和应变弛豫所引入的缺陷会促进 In-Ga 原子在量子阱界面处的扩散<sup>[9]</sup>. 我们认为同样的机理可能是

造成高应变 InGaAs/GaAs 量子阱中 In 原子比低应变 InGaAs/GaAs 量子阱中的 In 原子更容易向阱外扩散的原因.

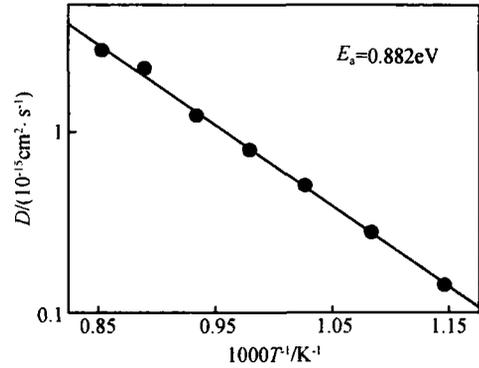


图 4 In<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>As/GaAs 量子阱 In-Ga 原子扩散系数与退火温度的倒数之间的关系曲线  
 Fig. 4 Estimated interdiffusion coefficients of In-Ga atoms as a function of inverse temperature in In<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>As/GaAs QW

### 4 结论

本文研究了快速热退火对固态分子束外延技术生长的高应变 In<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>As/GaAs 量子阱材料光学性质的影响. 当退火温度小于 750 时, 随着退火温度的升高, 高应变 InGaAs/GaAs 量子阱的 RTPL 谱峰值强度逐渐增强, 峰值半宽基本保持不变. 这主要是因为 700 以下的退火过程可以除去 InGaAs/GaAs 量子阱中由于低温生长所引入的缺陷从而改善材料质量. 而当退火温度进一步升高时, 高应变 InGaAs/GaAs 量子阱的 RTPL 谱峰值强度迅速下降, 峰值半宽逐渐增加. 这主要是因为高温退火时量子阱界面处的 In-Ga 原子快速扩散而引起的量子阱量子限制降低而造成的. 在 600 ~ 900 之间, 随着退火温度的上升, 高应变 InGaAs/GaAs 量子阱的 RTPL 谱峰值波长蓝移越来越明显. 通过拟合不同退火温度下样品的 RTPL 谱峰值波长, 我们得到了不同退火温度下的 In-Ga 原子扩散系数和扩散激活能. 高应变 InGaAs/GaAs 量子阱中 In-Ga 原子扩散能 (0.88eV) 明显小于低应变 InGaAs/GaAs 量子阱中 In-Ga 原子扩散能 (1.22eV). 这主要是因为 InGaAs/GaAs 量子阱中的内部缺陷辅助 In-Ga 原子扩散所造成的.

## 参考文献

- [ 1 ] Pan Zhong, Li Lianhe, Xu Yingqiang, et al. Highly-strained InGaAs/ GaAs single-quantum-well lasers grown by molecular beam epitaxy. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(9) :1097
- [ 2 ] Sundgren P, Von Wurtemberg R M, Berggren J, et al. High-performance 1.3 $\mu$ m InGaAs vertical cavity surface emitting lasers. Electron Lett, 2003, 39(15) :1128
- [ 3 ] Levine B F. Quantum-well infrared photodetectors. J Appl Phys, 1993, 74(8) :R1
- [ 4 ] Ni H Q, Niu Z C, Xu X H, et al. High Indium content In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/ GaAs quantum wells with emission wavelengths above 1.25 $\mu$ m at room temperature. Appl Phys Lett, 2004, 84(25) :5100
- [ 5 ] Yamada N, Roos G, Harris J S Jr. Threshold reduction in strained InGaAs quantum well lasers by rapid thermal annealing. Appl Phys Lett, 1991, 59(9) :1040
- [ 6 ] Pan Z, Li L H, Zhang W, et al. Effects of rapid thermal annealing on GaInNAs/ GaAs quantum wells grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy. Appl Phys Lett, 2000, 77(9) :1280
- [ 7 ] Kothial G P, Bhattacharya P. Optical properties and stoke shifts in lamp-annealed InGaAs/ GaAs strain layers superlattice. J Appl Phys, 1988, 63(8) :2760
- [ 8 ] Li L H, Pan Z, Zhang W, et al. Effects of rapid thermal annealing on the optical properties of GaNAs/ GaAs single quantum well structure grown by molecular beam epitaxy. J Appl Phys, 2000, 87(1) :245
- [ 9 ] Li L H, Pan Z, Xu Y Q, et al. Effects of rapid thermal annealing and SiO<sub>2</sub> encapsulation on GaNAs/ GaAs single quantum wells grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy. Appl Phys Lett, 2001, 78(17) :2488

## Effect of Rapid Thermal Annealing on Highly Strained InGaAs/ GaAs Quantum Well \*

Miao Zhenhua, Xu Yingqiang, Zhang Shiyong, Wu Donghai, Zhao Huan, and Niu Zhichuan

*(State Key Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)*

**Abstract:** A highly strained In<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>As/ GaAs quantum well is grown by solid source molecular beam epitaxy (MBE). The effect of rapid thermal annealing on the optical properties of the highly strained InGaAs/ GaAs quantum well is studied. By fitting the room temperature photoluminescence peak wavelength of the highly strained InGaAs/ GaAs quantum well, we obtain the diffusion coefficients and the activation energy of In-Ga atoms interdiffusion (0.88eV).

**Key words:** molecular beam epitaxy; highly strained In<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>As/ GaAs quantum well; rapid thermal annealing; room temperature photoluminescence

**PACC:** 8115G; 8140G; 7855E

**Article ID:** 0253-4177(2005)09-1749-04

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 90201026)

Miao Zhenhua male, was born in 1976, master candidate. He is engaged in research on GaAs-based long wavelength optoelectronic materials and devices. Email: yingqxu@red.semi.ac.cn

Received 27 January 2005, revised manuscript received 21 April 2005

© 2005 Chinese Institute of Electronics