

# 注入 Ga 离子的 GaAs/AlGaAs 量子阱中 界面混合的光荧光研究\*

郑宝真 赛纳<sup>√</sup> 许继宗 张鹏华 杨小平 徐仲英

(中国科学院半导体研究所超晶格国家重点实验室, 北京, 100083)

0471.4  
0472.3

A

**摘要** 用注入 Ga 离子 GaAs/AlGaAs 量子阱在快速热退火中大大加快了异质结界面的互扩散, 表现在 PL 光谱中量子阱峰值能量有 30~90meV 的兰移, 发现兰移大小同注入损伤程度、退火的温度及时间有关, 并得到快速退火中的互扩散系数  $D$  约为  $10^{-15} \sim 10^{-17} \text{cm}^2/\text{s}$ .

**关键词** 光荧光, 量子阱, GaAs/AlGaAs.

镓离子注入 砷化镓

## 引言

GaAs/AlGaAs 量子阱在一般情况下由于加热引起异质结界面上 Ga, Al 原子的互扩散是很小的, 在  $850 \sim 900^\circ\text{C}$ , 它们的互扩散系数只有  $8 \times 10^{-19} \sim 10^{-18} \text{cm}^2/\text{s}$ <sup>[1,2]</sup>. 这样在快速热退火(RTA)中, 界面混合的问题可不考虑. 但在晶体中引入外来因素时, 这种互扩散将大大加快, 在 RTA 后界面混合变得非常显著. 我们在 GaAs/AlGaAs 量子阱中用注入 Ga 离子来增强界面的混合.

② 这方面的研究国外已有一些报道<sup>[3~7]</sup>. 采用外来因素增强量子阱界面 Ga, Al 原子的互扩散, 进一步扩展了量子阱带隙的剪裁范围, 因此对新器件的研制和光电集成都是很有用的. 此外, 在大面积注入的基础上, 加上掩模注入及聚焦离子束注入, 将成为研制量子线, 量子点的一个重要途径.

我们在 GaAs/AlGaAs 量子阱中用注入 Ga 离子来产生大量的 Ga 空位, 在快速热退火中使得异质结界面 Ga, Al 原子的互扩散大大增强, 表现在 PL 谱上激子峰峰值能量有了明显的兰移, 而界面扩散的程度与注入离子的数量及 RTA 的条件都有密切的关系, 我们用实验测得了它们的互扩散系数.

## 1 实验

用 MBE 方法生长实验所用样品, 在掺 Cr 半绝缘 GaAs(100)衬底上, 先生长 GaAs 缓冲层, 然后生长 GaAs/AlGaAs 单量子阱, 再长 5nm 的 GaAs 顶盖层. 单量子阱的 GaAs 阱宽都是 5nm,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  的  $x$  值都是 0.3, 48, 49, 50 三组样品上垒层厚度分别为 70, 140, 175nm.

三组样品在室温下注入 Ga 离子, 能量为 200keV, 剂量为  $3 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ , 注入偏角为

\* 国家自然科学基金资助项目

本文 1995 年 11 月 14 日收到, 修改稿 1996 年 9 月 20 日收到

10°,注入后的样品在不同 RTA 条件下进行快速热退火。

光荧光实验采用常规的实验装置,由 He-Ne 激光器,氦气闭循环低温系统,GaAs 阴极光电倍增管,光子计数器和微机组成。

## 2 实验结果和讨论

三组原始样品在 10K 下测得 PL 光谱,5nm GaAs 阱对应的激子谱线峰值能量约为 1.605eV。在 900°C,退火 20s 后,它们的激子谱线峰值能量的位置没有什么变化,这说明快速退火下,量子阱异质结界面的互扩散可忽略不计。注入后的样品在不同 RTA 条件下进行快速热退火,测得 10K PL 光谱峰值能量有 30~90meV 的明显兰移。

图 1 是样品 48 在不同时间的快速热退火后 10K 下测得的 PL 光谱。低能边的两条谱线是原始样品及注入前 900°C,退火 20s 后测得的;高能边的四条谱线是注入 Ga 离子的样品在 900°C,分别退火 3s,20s,50s,80s 后测得的,可以看到峰值有明显的兰移。

图 2 是 900°C 下快速热退火时间与 PL 谱上峰值能量兰移的关系。图 2 中有 48,49,50 三组样品,由图 2 可见,三组样品在同样条件下经 RTA 后兰移是不同的,但它们似乎都在小于 20s 的退火时间中有较大的兰移值。

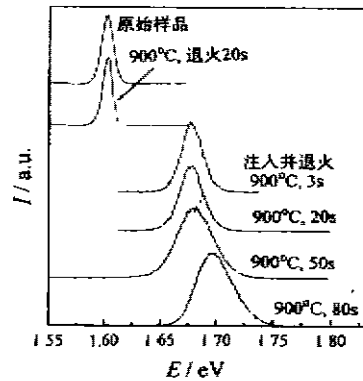


图 1 样品 48(原始样品,注入前 900°C,退火 20s 及注入后退火)的低温光荧光谱。

Fig. 1 PL spectra ( $T=10\text{K}$ ) obtained from sample 48: as-grown, after RTA and after implanted and RTA at 900°C

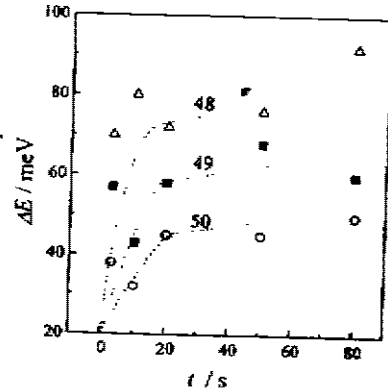


图 2 900°C 快速退火时间与 PL 谱峰值能量兰移的关系

Fig. 2 PL emission peak energy blue shift as a function of annealing time (900°C)

注 Ga<sup>-</sup>前原始样品量子阱的能带见图 3(a),发光能量为  $E_r = E_g + E_e + E_{hh}$ 。在 900°C 快速热退火后光谱基本不变,说明量子阱能带亦无变化。但 Ga 离子注入时产生的晶格损伤,造成大量的缺陷,我们认为主要是产生了大量的空位与间隙原子。在快速热退火中由于空位的存在,大大增强了异质结界面 Ga,Al 原子的互扩散,改变了原来方阱的形状。改变后量子阱能带见图 3(b),发光能量为  $E_r = E_g + E_e + E_{hh}$ 。

我们用简单的一维扩散模型,假定 Al 和 Ga 各向同性的扩散,扩散系数与 Al 的浓度无关,扩散遵循 Fick 定律,这样沿量子阱生长方向 Al 组份的分布为

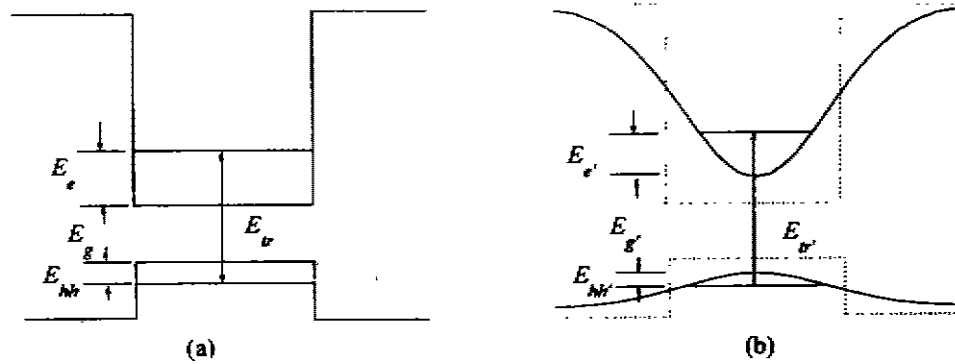


图 3 量子阱的能带示意图

(a) 原始样品的量子阱 (b) 改变后的量子阱

Fig. 3 Quantum well potential energy profiles for conduction band and valence band (a) before intermixing (square-well profile) and (b) after intermixing (error function profile)

$$x(z) = x_0 \left[ 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left( \frac{z + w/2}{2\Delta} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left( \frac{z - w/2}{2\Delta} \right) \right], \quad (1)$$

式(1)中,  $x_0$  为势垒层的原始 Al 组份,  $w$  为阱宽,  $z$  为阱中心在  $z=0$  时沿生长方向的距离,  $\Delta$  为互扩散长度,  $\operatorname{erf}$  为余误差函数.

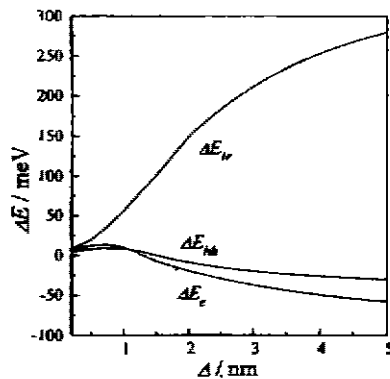


图 4 扩散长度  $\Delta$  对应互扩散后跃迁能量变化的计算结果

Fig. 4 Calculated energy shift vs interdiffusion for the 5nm well. The total energy shift, and change in confinement energy  $\Delta E_{e,h}$  for electrons and heavy holes are shown.

能量漂移最大的贡献为 1.5meV, 所以不予考虑. 这样对一给定的量子阱可以算出不同的扩散长度  $\Delta$  对应互扩散后跃迁能量的变化, 计算结果如图 4 所示.

对式(1)代入不同的  $\Delta$  值就可以得到量子阱的 Al 组份分布  $x(z)$ , 也就能得到互扩散后量子阱的带边结构. 此时带边的表达式为

$$V(z) = [E_g(z) - E_g(0)]Q, \quad (2)$$

式(2)中  $Q$  是导价带不连续比, 而 AlGaAs 带隙为

$$E_g(z) = 1.519 + 1.455x(z) + 0.377x(z)^2, \quad (3)$$

利用式(2), (3)求解 Schrödinger 方程, 得到光跃迁的能量  $E_{tr} = E_g(z) + E_e + E_{hh} - E_x$ ,  $E_x$  为激子束缚能.

我们研究的是互扩散后跃迁能量的兰移. 在计算中假定激子束缚能为常数, 不依赖互扩散. 实际上在互扩散后激子束缚能会有所减小, 在我们的计算中算得它对互扩散

由测得的能量兰移来求得它对应的扩散长度,48,49,50 三组样品的扩散与退火时间关系如图 5 所示.由图 5 可见,扩散长度随着退火时间的增加先是快速上升,到 20s 后上升变慢.我们假设扩散系数与 Al 组分无关,就可用  $\Delta^2 = Dt$  来得到扩散系数.在 20s 前算得三组样品的扩散系数分别为  $D_{48} \sim 1.2 \times 10^{-15} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ,  $D_{49} \sim 6.3 \times 10^{-16} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$  和  $D_{50} \sim 2.7 \times 10^{-16} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ,20s 后它们几乎趋于一致 ( $D \sim 10^{-17} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ).这表明强烈的 Al,Ga 界面互扩散是在很短的时间中进行的,随退火时间的增加,损伤逐渐得到恢复,促进互扩散加强的外来因素随之消除,因而互扩散大大减小.

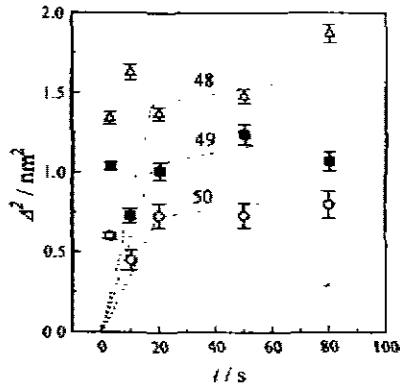


图 5 48,49,50 三组样品的扩散长度与退火时间的对应关系

Fig. 5 Interdiffusion length vs annealing time for samples 48,49,50.

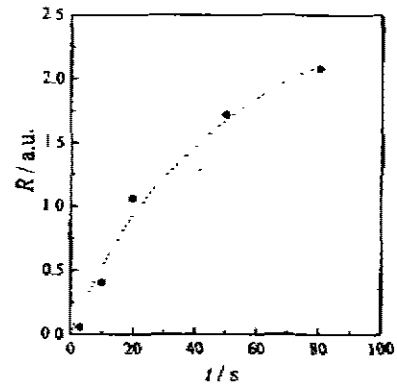


图 6 注入损伤的恢复程度随退火时间的变化关系

Fig. 6 Recovery of implanted damage vs annealing time

在设计样品时,48,49,50 的量子阱位置分别处于盖层下 70,140,175nm 深度处,也就是分别在 200keV 能量注 Ga 离子射程  $R_p$ ,  $R_p + 2\Delta R_p$  及  $R_p + 3\Delta R_p$  位置下,故可看成它们是处在注入离子浓度或损伤程度约为峰值的 1,1/100,1/1000 处,得到的互扩散系数  $D_{48} > D_{49} > D_{50}$  也正好是随注入浓度及损伤的减小而减小,这说明随阱所处的位置加深,注入的损伤减弱,引入 Ga 空位的数量也减小,使互扩散减弱即减弱了界面混合的程度.

若把原始样品光谱强度积分值定为分母,注  $\text{Ga}^+$  后的积分强度定为分子,它们的比值与 900°C 退火时间的关系如图 6 所示.由图 6 可见在退火时间约 20s 时,比值达到 1,这一比值可认为是注入损伤的恢复率  $R$ ,它表明在 900°C 下经过 20s 后的快速退火,注入损伤基本得到恢复,同时强的互扩散也基本完成.由此可见,由于注  $\text{Ga}^+$  引入的损伤如 Ga 空位等,加强了互扩散界面的混合,而这种加强作用又随着注入浓度和损伤程度的减小而减弱.

### 3 结论

用 PL 光谱测得注  $\text{Ga}^+$  的 GaAs/AlGaAs 单量子阱在 RTA 后光谱有显著的兰移,这是由注入  $\text{Ga}^+$  引入的晶格损伤 Ga 空位等增强界面互扩散所造成的.互扩散的增强不仅与损伤程度密切相关,也同 RTA 条件有关,并由此可估算出互扩散系数  $D$ .

## 参考文献

- 1 Petroff P M. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1977, **14**:973
- 2 Fleming R M, Mewhan D B, et al. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**:357
- 3 Leier H., Forch A., et al. *J. Appl. Phys.*, 1990, **67**:1805
- 4 Vien C, Schneider M, et al. *J. Appl. Phys.*, 1991, **70**:1444
- 5 Allard L B, Aers G C, et al. *J. Appl. Phys.*, 1992, **72**:422
- 6 Prims F E, Lehr G, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**:1365
- 7 Piva P G, Poole P J, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**:621

## STUDY ON PHOTOLUMINESCENCE SPECTRA OF GaAs/AlGaAs SINGLE QW INTERMIXED BY Ga ION IMPLANTATION\*

Zheng Baozhen, Sai Na, Xu Jizong, Zhang Penghua, Yang Xiaoping, Xu Zhongying

(National Laboratory for Superlattice & Microstructures, Institute of  
Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract** Ga ion implantation followed by rapid thermal annealing (RTA) was utilized to enhance the interdiffusion in GaAs/AlGaAs single QWs. In low temperature photoluminescence a blue shift of emission energy from 30 to 90meV was observed. The shift was found to be dependent on the implantation damage and as a function of the annealing temperature and time. The interdiffusion coefficient of  $10^{-15}$ - $10^{-17}$ cm<sup>2</sup>/s by RTA was calculated.

**Key words** photoluminescence, quantum well, GaAs/AlGaAs.

---

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China