

# 自组织生长 InAs/GaAs 量子点的退火效应\*

王志明 吕振东 封松林 赵谦 李树英 吉秀江  
陈宗圭<sup>√</sup> 徐仲英 郑厚植

(中国科学院半导体所超晶格国家重点实验室, 北京, 100083)

TN304.23  
0471.1

**摘要** 通过研究 GaAs 衬底上不同厚度 InAs 层光致发光的退火效应, 发现它和应变量子阱结构退火效应相类似, InAs 量子点中的应变使退火引起的互扩散加强, 量子点发光峰蓝移. 量子点中或其附近一旦形成位错, 其中的应变得到释放, 互扩散现象就不明显了, 退火倾向于产生更多的位错, 量子点的发光峰位置不变, 但强度减弱.

**关键词** 量子点, 退火, 应变, 扩散, 位错.

自组织生长  
砷化镓

## 引言

近几年来, 在空间三个维度都受到限制的量子点结构得到越来越多的关注. 利用衬底和外延层之间存在晶格失配, 在 GaAs 衬底上自组织生长的 InAs 量子点结构具有非常高的发光效率, 国外已经利用这种结构制备了发光二极管<sup>[1]</sup>、激光器<sup>[2~4]</sup>等原型器件. InAs 量子点生长温度较低(约 500°C 或更低), 它要在同样的温度下覆盖一层 GaAs, 以防止 In 组份挥发. 生长高质量的 GaAs 需要的温度较高(一般大于 600°C), 否则将产生点缺陷, 提高其质量的一种有效办法就是生长完全后进行退火处理. 另一方面, 制备发光二极管、激光器等, 都需要在较高温度(600~700°C)下生长 AlGaAs 限制层, 这对已经生长完成的量子点而言就是退火处理. 因此, 研究 InAs/GaAs 量子点的退火效应是非常必要的. 但直到目前为止, 这方面的研究还很少. Leon<sup>[5]</sup>等对 4.5 单层(Monlyer ML)的 In<sub>0.49</sub>Ga<sub>0.51</sub>As 进行高温(850~950°C)快速退火处理, 发现量子点的光致发光谱变化很大. Kosogov<sup>[6]</sup>等研究了三层垂直排列 InAs 量子点的退火效应, 700°C 退火量子点发光峰蓝移.

本文利用光致发光测量技术研究了 1ML、1.7ML 和 4ML InAs 层的退火效应, 发现量子点中的应变加强了退火引起的互扩散现象, 量子点中或其附近一旦产生位错, 其中的应变得到释放, 互扩散现象就不明显了, 这种情况下退火倾向于产生更多的位错.

## 1 实验

实验所用样品由 VG 公司 V80H MKII 分子束外延(MBE)设备生长. 样品的基本结构为: 以(100)半绝缘 GaAs 作为衬底, 在 600°C 温度下生长 1 $\mu$ m 的 GaAs 缓冲层, 然后将生长

\* 国家自然科学基金(编号: 69576032)和中国科学院重点资助项目  
稿件收到日期 1997-02-03, 修改稿收到日期 1997-04-23

温度降至 450℃,再生长不同厚度的 InAs 层,最后上面覆盖 20nm GaAs 层.整个生长过程由高能电子衍射监控,当 InAs 的覆盖层为 1ML 时,衍射图形仍为线状,是二维生长;当 InAs 层为 1.7ML 和 4ML 时,图形变为点状,表明量子点已经形成<sup>[7]</sup>.

将 1ML、1.7ML 和 4ML 的样品都解理为三块,一块作为对比片,另外二块清洗后重新进入 MBE 系统,在 As 气氛保护下退火 1h,退火温度分别为 600℃ 和 650℃.光致发光谱测量采用 He~Ne 激光器作为激发光源,激发功率约为 2mW,探测器采用低温 Ge 探测器,测量温度为 12K.

## 2 实验结果及讨论

图 1 是 1ML InAs 薄层结构的光致发光谱,由图 1 可见,未退火时 1ML 的样品光致发光谱与 InAs 相关的发光峰很强,但经 600℃ 退火后,InAs 薄层发光峰消失了.图 1 上还标出了与 GaAs 相关的发光峰.

图 2 是 1.7ML 的量子点样品退火前后的光致发光谱.很显然,退火之后 InAs 量子点的发光强度减弱,发光峰蓝移.600℃ 和 650℃ 退火后量子点发光峰位基本一致.

图 3 是 4ML 量子点的样品退火前后的光致发光谱.600℃ 退火 1h,发光峰位不变,但发光强度显著下降,650℃ 退火后与 InAs 量子点相关的发光峰就消失了.

在研究 Ge/Si 应变超晶格<sup>[6,9]</sup>时,人们发现退火使得结构弛豫,从而使应变能降低,其机制有两种:一种是通过互扩散,整个结构成分均匀是能量最低的状态;另一方式是产生位错,应变能通过位错释放.两种机制相互竞争,如果原来结构中位错密度很低,应变将使互扩散加强,应变越大,互扩散系数越大;如果原来结构中就有不少位错,应变能将通过产生更多的位错而释放.这种现象也同样存在于 InGaAs/GaAs 量子阱系统<sup>[10]</sup>中.1ML InAs 层横向具有和 GaAs 相同的晶格常数,应变大,退火引起的互扩散现象就明显.显著扩散导致 InAs 薄层形成 InGaAs 合金,有效势垒降低,激子波函数更多扩展到 GaAs 垒中,电子与空穴的波函数交叠部分变小,引起发光强度下降.600℃ 退火 1h 后 InAs 薄层的发光峰(1.45eV)就消失了.1.7ML 和 4ML InAs 结构是由一层薄薄的 InAs 浸润层和分布在它上面的 InAs 量子点组成<sup>[7]</sup>,量子点的出现导致 InAs 层中的应变分布不均匀.以前研究应变量子阱结构得到的结论只要考虑到这一点,就可以很好地应用于研究应变量子点结构的退火效应.浸润层和 InAs 单层一样处于完全应变状态,InAs 量子点中的应变相对小些.应变越大,退火引起的扩散系数越大,浸润层首先变成 InGaAs 合金.量子点周围形成更加理想的零维限制. Leon<sup>[5]</sup>等发现退火处理后,与量子点发光相比浸润层的发光峰减弱明显,我们上面的分析可以对此给出一个合理的解释.通过和图中标出的 GaAs 发光峰的比较,我们可以看出 4ML 和 InAs 结构比 1.7ML 结构发光弱很多.透射

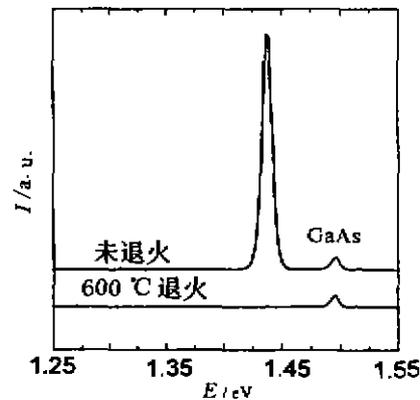


图 1 1ML InAs 薄层结构的光致发光谱  
Fig. 1 Photoluminescence spectra  
of 1ML InAs structures.

电子显微镜测量结果<sup>[7,11]</sup>显示在 4ML 的结构里一些大的量子点中或其附近产生了位错,而 1.7ML 结构中基本上没有位错或位错密度很低。按照上面的分析,应变促使 1.7ML 结构中退火引起的互扩散加强,量子点变小或是形成 InGaAs 合金,导致量子点发光峰从 1.26eV 蓝移到 1.30eV,限制势垒降低后对量子点内载流子的束缚变弱,从而量子点的发光强度减弱。600℃ 和 650℃ 退火后量子点发光峰位一致,则说明互扩散主要是在应变作用下促发的。当 InAs 量子点周围形成 InGaAs 过渡层后,量子点中的应变很小,即使提高退火温度,扩散系数也没有明显的变化。在 4ML 结构中存在大量位错,大部分应变已经通过产生位错释放,相应的量子点中的应变较小,由此诱发的互扩散作用很小,600℃ 退火 1h,量子点发光峰位(1.19eV)不变,和应变量子阱结构中的退火效应相类似,在 4ML 这种已经存在大量位错的结构中退火倾向于产生更多的位错,光致激发的电子空穴对被更多的非辐射中心俘获,发光强度变弱,650℃ 退火 1h 量子点的发光峰淬灭了。

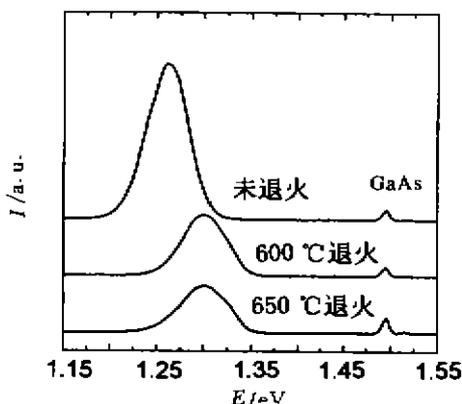


图 2 1.7ML InAs 量子点结构的光致发光谱  
Fig. 2 Photoluminescence spectra of 1.7ML InAs quantum dot structures

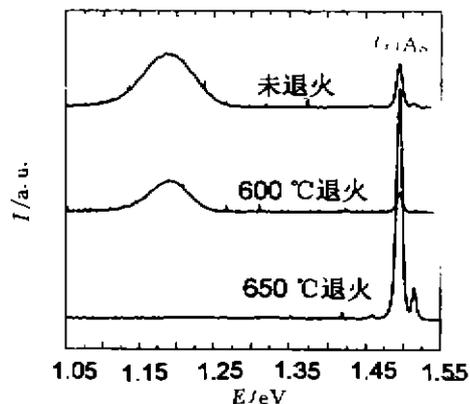


图 3 4ML InAs 量子点结构的光致发光谱  
Fig. 3 Photoluminescence spectra of 4ML InAs quantum dot structures

### 3 结论

我们通过光致发光测量对 1ML InAs 薄层,1.7ML 和 4ML InAs 量子点结构进行退火研究。1ML 薄层发光峰 600℃ 退火 1h 就淬灭了;1.7ML 的量子点发光峰蓝移,同时强度变弱;4ML 的量子点退火后发光峰位不变,但是发光强度减弱。这些结果表明,在位错密度很低的量子点结构中,应变使退火引起的互扩散加强;在位错密度较高的量子点结构中,退火倾向于产生更多的位错。

### 参考文献

- 1 Solomon G S. *et al. Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**:1897
- 2 Alferov Z I. *et al. Semiconductor*, 1996, **30**:194
- 3 Xie Q H. *et al. J. Vac. Sci. Technol.*, 1996, **B13**: 2203
- 4 Bimberg D. *et al. Jpn. J. Appl. Phys.*, 1996, **35**: 1311
- 5 Leon R. *et al. Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**:1888

- 6 Kosogov A O, *et al.* *Appl. Lett.*, 1996, **69**: 3072
- 7 YANG Xiao-Ping, *et al.* *Chin. J. Semiconductors*(杨小平,等,半导体学报), 1996, **17**: 869
- 8 Iyer S S, LeGoues F K. *J. Appl. Phys.*, 1989, **65**: 4393
- 9 Baribeau J M, *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**: 1502
- 10 Ryu S W, *et al.* *Appl Phys. Lett.*, 1995, **67**: 1417
- 11 Sasaki A J. *Crystal Growth*, 1996, **163**: 143

## ANNEALING EFFECTS OF SELF-ASSEMBLED InAs/GaAs QUANTUM DOTS\*

WANG Zhi-Ming LU Zhen-Dong FENG Song-Lin ZHAO Qian LI Shu-Ying  
JI Xiu-Jiang CHEN Zong-Gui XU Zhong-Ying ZHENG Hou-Zhi

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

**Abstract** The annealing effects of InAs layers with different thicknesses in a GaAs matrix were investigated. The diffusion enhancement by strain, which is well established in strained quantum wells, occurs in InAs/GaAs quantum dots(QDs). A shift of the QD luminescence peak towards higher energies results from this enhanced diffusion. When a significant portion of the strain in the structures is relaxed by misfit dislocations, the diffusion becomes negligible, and annealing tends to generate additional dislocations. By these why the QD peak energy is weakly affected and the luminescence intensity decreases could be explained.

**Key words** quantum dots, annealing, strain, diffusion, dislocation.

---

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China  
Received 1997-02-03, revised 1997-04-23