

不同厚度 GaAs 覆盖层对自组织生长 InAs 量子点退火效应的影响*

王志明 吕振东 封松林 赵 谦 李树英
吉秀江 陈宗圭 徐仲英 郑厚植

(中国科学院半导体研究所 超晶格微结构国家重点实验室 北京 100083)

摘要 本文利用光致发光测量了不同厚度 GaAs 覆盖层对自组织生长 InAs 量子点退火效应的影响. 退火使量子点发光峰蓝移, 发光强度减弱. 深埋的量子点承受更大的应变, 应变使退火引起的互扩散加强. GaAs 盖层越厚, 量子点的互扩散越明显, 发光峰蓝移越显著, 并由此导致了发光峰半高宽的不同变化.

PACC: 6885, 6116D, 7855

1 引言

在 GaAs 衬底上自组织生长 InAs 量子点结构, 是一种很有前途的直接生长零维限制结构的新方法, 已经成为当今国际半导体界的研究热点. 国外个别研究小组已经利用这种方法制备了发光二极管^[1]、激光器^[2~4]等原型器件. InAs 量子点生长温度低(约 500℃ 或更低), 而生长高质量的 GaAs、AlGaAs 层则需要较高的生长温度(600~700℃), 这对已经生长完成的量子点而言就是退火处理. 另外, 后退火处理为改变量子点器件性能提供了一种新的自由度. 因此, 研究 InAs 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 等^[5]发现 $In_{0.49}Ga_{0.51}As$ 量子点高温(850~950℃)快速退火处理后, 发光峰蓝移, 同时谱线变窄. Kosogov 等^[6]对 InAs 量子点进行 700℃ 退火, 量子点发光峰蓝移, 强度减弱.

本文利用光致发光测量技术研究了具有 20nm 和 100nm GaAs 覆盖层的 InAs 量子点结构的退火效应. 由于应变使退火引起的互扩散现象加强, 有 100nm GaAs 盖层的量子点中互扩散反而比只有 20nm 盖层的更明显, 从而发光峰蓝移更显著, 并由此导致发光谱线半高宽变小. 而退火则使 20nm 盖层量子点发光谱线变宽.

* 国家自然科学基金和国家攀登计划资助项目

王志明 男, 1969 年生, 博士生 目前从事化合物半导体生长研究
吕振东 男, 1967 年生, 博士生 目前从事低维半导体结构光学研究
封松林 男, 1964 年生, 研究员 目前从事低维半导体物理性质研究
1997 年 1 月 31 日收到初稿, 1997 年 3 月 31 日收到修改稿

2 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℃ 温度下生长 1μm 的 GaAs 缓冲层，然后将生长温度降至 450℃，淀积 3 个单原子层厚度的 InAs，最后上面覆盖不同厚度的 GaAs 层。整个生长过程由高能电子衍射监控，透射电子显微镜分析表明材料具有良好的结构特性。具体的生长过程及结构分析见文献[7]。

将具有不同厚度 GaAs 盖层的量子点样品都解理为三块，一块作为对比片，另外二块清洗后重新进 MBE 系统，在 As 气氛保护下退火 1 小时，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。

3 实验结果及讨论

图 1 是具有 20nm GaAs 盖层的 InAs 量子点结构退火前后的光致发光谱。退火之后，量子点发光峰蓝移，同时发光强度减弱，谱线变宽。但是 650℃ 退火后发光谱线比 600℃ 退火后谱线窄。

图 2 是具有 100nm GaAs 盖层的 InAs 量子点结构退火前后的光致发光谱。退火之后，量子点发光峰也蓝移，而且蓝移幅度更大，发光强度也减弱，发光峰半高度却变小了。

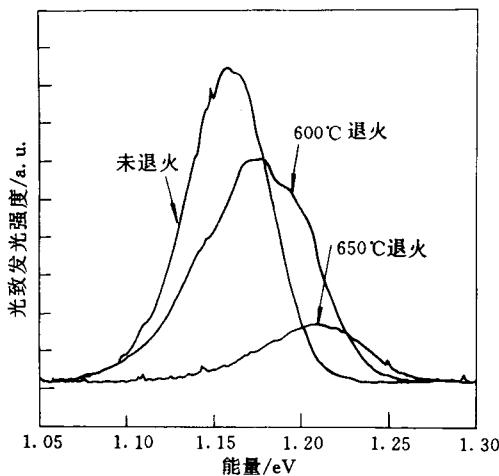


图 1 具有 20nm GaAs 盖层的 InAs 量子点结构的光致发光谱

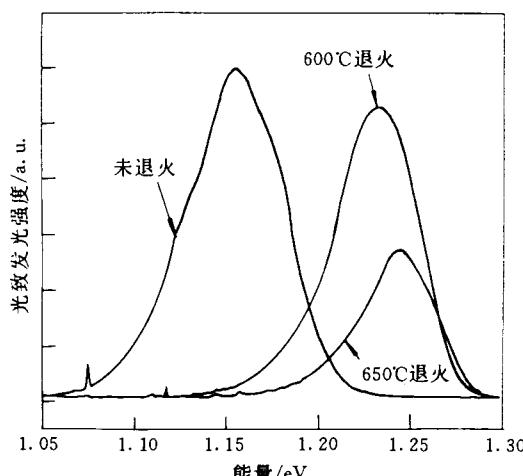


图 2 具有 100nm GaAs 盖层的 InAs 量子点结构的光致发光谱

为了便于讨论，我们将这两种量子点结构发光峰的能量位置、半高宽和积分强度退火前后的变化都列在表 1，把未退火样品发光峰的积分强度归一化进行比较。

表 1 InAs 量子点结构发光峰能量位置、半高度和积分强度

		峰值能量位置/eV	发光谱线半高宽/meV	积分发光强度
20nm 盖层	未退火	1.16	48.2	1.00
	600℃退火	1.17	63.7	0.92
	650℃退火	1.21	59.0	0.22
100nm 盖层	未退火	1.16	53.8	1.00
	600℃退火	1.23	46.3	0.78
	650℃退火	1.24	42.1	0.35

应变使退火引起的互扩散加强,在应变量子阱体系中^[8~10]是一个很普遍的问题。我们相信这一机制也同样适用于研究 InAs 应变量子点的退火行为。具有不同厚度 InAs 的量子点结构的退火研究^[11]表明,量子点中的应变使互扩散系数变大,光致发光峰蓝移。另一方面,当量子点结构中出现大量位错,应变得到释放,退火倾向产生更多的位错,应变使互扩散加强作用很弱,发光峰能量位置不变。

对量子点进行退火处理,引起互扩散,由互扩散所造成最直接的结果既可能是量子点尺寸的减小,也可能使原先的 InAs 量子点转变为具有不同 In 组分的 InGaAs 量子点结构或是 InAs 和 InGaAs 混合的量子点结构。这些情况在光致发光谱上都表现为发光峰蓝移,无法区别。为了分析方便,我们简单地把退火的直接结果理解为量子点尺寸变小,如果考虑其它的可能性,对从光谱研究所能得到最终结论影响不大。

凭直觉很自然可以想到 GaAs 覆盖层越厚,深埋的 InAs 量子点将承受更大的应变。Xie^[12]等发现 InAs 量子点使其上约 40nm 的 GaAs 盖层发生应变。Pistol 等^[13]研究了盖层厚度变化对量子点发光峰的影响,结果表明量子点中的应变直到盖层达 50nm 厚才饱和。所以在我们的样品中,具有 100nm 盖层的量子点承受的应变比 20nm GaAs 覆盖的量子点中的大。按照上面的分析,100nm 盖层的量子点结构因为应变影响,互扩散显著,使 InAs 量子点变小,从而发光峰蓝移幅度大,达 70~80meV。与此同时,600℃退火 1 小时后 20nm 盖层的量子点发光峰只蓝移了 10meV,650℃退火 1 小时后蓝移了 50meV。

自组织生长的 InAs 量子点尺寸不均匀,导致发光谱线很宽,已经成为这一领域进一步发展的最大障碍。透射电镜^[14]和光致发光^[15]研究都发现尺寸大的量子点中的应变大。应变使退火引起的互扩散加强,大量子点尺寸变小更显著,从而退火后量子点尺寸分布趋向均匀,发光谱变窄。另一方面,退火也会引起与应变无关的互扩散,由此引起量子点尺寸(d)的变化(Δd)对大小量子点是一样的。按照简单的量子限制效应,发光能量变化 $\Delta E \propto -\Delta d/d^3$,与尺寸较小的量子点相对应的发光峰高能边蓝移更明显,使得光谱线宽增大。与应变相关和无关的两种互扩散机制相互竞争,100nm 盖层结构量子点中的应变大,尺寸不同的量子点中的应变差别也大,应变使互扩散加强机制起主导作用,量子点发光峰退火后变窄。20nm 盖层结构中应变小,与应变无关的互扩散机制起主导作用,退火后发光峰变宽。但是为什么 20nm 盖层的量子点发光谱线 650℃退火后比 600℃退火窄,还有待于进一步的研究。

伴随着量子点发光峰位和线宽变化,发光强度也都减弱了。这是因为退火引起的互扩散在量子点周围形成 InGaAs 过渡区,有效限制势垒降低,对载流子的束缚变弱。有效势垒对较小的量子点中的电子空穴对的限制更弱,导致较小量子点的发光强度比较大量子点更快变弱。这和量子点发光峰的波形变化是一致的,尤其是 100nm 盖层的结构,退火之后量子点发光峰的高能边比低能边陡峭很多。

4 结论

我们研究了 20nm 和 100nm 不同厚度的 GaAs 覆盖层对自组织生长的 InAs 量子点的退火效应的影响。不同厚度盖层的结构退火后发光峰都蓝移，同时强度减弱。100nm 盖层的量子点承受更大的应变，和应变量子阱退火效应相类似，应变使互扩散加强，盖层厚的量子点发光峰蓝移更明显。退火引起的互扩散系数不同，导致了 100nm 盖层的量子点发光谱线变窄，而 20nm 盖层的量子点发光谱线变宽。

参 考 文 献

- [1] G. S. Solomon *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1996, **69**: 1897.
- [2] Zh. I. Alferov *et al.*, Semiconductor, 1996, **30**: 194.
- [3] Q. H. Xie *et al.*, J. Vac. Sci. Technol., 1996, **B13**: 2203.
- [4] D. Bimberg *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., 1996, **35**: 1311.
- [5] R. Leon *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1996, **69**: 1888.
- [6] A. O. Kosogov *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1996, **69**: 3072.
- [7] 杨小平, 等, 半导体学报, 1996, **17**: 869.
- [8] S. S. Iyer and F. K. LeGoues, J. Appl. Phys., 1989, **65**: 4393.
- [9] J. M. Baribeau *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1990, **57**: 1502.
- [10] S. W. Ryu *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1995, **67**: 1417.
- [11] Z. M. Wang, Z. D. Lu, S. L. Feng *et al.*, (unpublished).
- [12] Q. Xie *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1994, **65**: 2051.
- [13] M. E. Pistol *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1995, **67**: 1438.
- [14] S. Guha, A. Madhukar, K. C. Rajkumar, Appl. Phys. Lett., 1990, **57**: 2110.
- [15] D. Leonard *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1993, **63**: 3203.

Annealing Effects of Self-Assembled InAs Quantum Dots With Different Thick GaAs Cap Layers

Wang Zhiming, Lu Zhendong, Feng Songlin, Zhao Qian, Li Shuying,
Ji Xiujiang, Chen Zonggui, Xu Zhongying and Zheng Houzhi

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

Received 31 January 1997, revised manuscript received 31 March 1997

Abstract We investigate the annealing effects of photoluminescence (PL) from self-assembled InAs quantum dots (QDs) with different thick GaAs cap layers. Annealing induces a blue-shift of the QD PL peak, and a decrease of the intensity. A deeper buried dot will experience a larger strain, and the strain of QDs enhances the interdiffusion. This results in a larger blue-shift of the deeper buried QDs, and a different variance of the half width of PL peak from QDs with different thick cap layers.

PACC: 6885, 6116D, 7855