

InGaAs/GaAs 量子阱中自组装 InAs 量子点的光学性质

孔令民¹, 姚建明¹, 吴正云²

(1. 浙江海洋学院 物理系, 浙江 舟山 316000; 2. 厦门大学 物理系, 福建 厦门 361005)

摘要: 在 InGaAs/GaAs 量子阱中生长了两组 InAs 量子点样品, 用扫描电子显微镜 (SEM) 测量发现, 量子点呈棱状结构, 而不是通常的金字塔结构, 这是由多层结构的应力传递及 InGaAs 应变层的各向异性引起的。采用变温光致发光谱 (TDPL) 和时间分辨谱 (TRPL) 研究了其光致发光稳态和瞬态特性。研究发现, InGaAs 量子阱层可以有效地缓冲 InAs 量子点中的应变, 提高量子点的生长质量, 可以在室温下探测到较强的发光峰。在量子阱中生长量子点可以获得室温下 1 318 nm 的发光, 并且使其 PL 谱的半高宽减小到 25 meV。

关键词: 自组装 InAs 量子点; 量子阱; 时间分辨谱

中图分类号: O472.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5868(2007)02-0198-04

Photoluminescence Characteristics of InAs Self assembled Quantum Dots in InGaAs/GaAs Quantum Well

KONG Ling min¹, YAO Jian ming¹, WU Zheng yun²

(1. Department of Physics Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000 CHN;

2. Department of Physics Xiamen University, Xiamen 361005 CHN)

Abstract: Two types of InAs quantum dots grown in InGaAs/GaAs quantum well (DWELL) were fully investigated by time resolved (TR) and temperature dependent photoluminescence (TDPL). Scanning electron microscopy (SEM) measurements show that the shape of quantum dots is prismatic, but not the common pyramid shape. We consider that it is attributed to stress transition of multi layer structure and anisotropy of InGaAs strained layer. DWELL structures could combine both the effects of InGaAs buffer layer and cap layer and even effectively release the stress between the buffer layer and the QDs, which may greatly improve the QDs quality. Strong PL signal emitting at 1 318 nm can be detected at room temperature and the full width at half maximum of PL spectrum is only 25 meV at some temperature.

Key words: InAs self assembled quantum dots; quantum well; time resolved photoluminescence

1 引言

在失配外延材料的生长中, 由于 SK 模式自组

装生长量子点能够制备无位错结构, 引起了人们普遍重视。到目前为止, 利用这种方法已经制备了 In(Ga)As/GaAs、Ge/Si、GaSb/GaAs、In(Ga)As/InP、InAlAs/AlGaAs 等多种材料体系的量子点结构^[1~9]。其中自组装生长 InAs/GaAs 量子点不仅具有尺寸小、密度高、制备简单等特点, 而且由于

收稿日期: 2006-08-23.

基金项目: 浙江省舟山市科技项目(06110); 浙江海洋学院人才引进项目(211050041)。

InAs 和 GaAs 均为直接带隙半导体,易于制备光电器件,而成为当前研究的热点。采用 SK 生长模式外延生长 InAs 量子点,初始阶段是二维层状生长。随着层厚的增加,外延生长则由二维层状过渡到三维岛状生长。三维岛的生长初期形成的纳米小岛周围是无位错的,一般都是用禁带宽度大的 GaAs 材料将其包围起来,小岛三维受限,形成量子点。如果先用 InGaAs 材料再用 GaAs 材料把 InAs 包围起来,就形成所谓的在量子阱中生长量子点。目前,已经在 InGaAs/GaAs 量子阱材料中生长 InAs 量子点方面进行了大量研究^[1~10]。普遍认为 DWELL 设计的一个好处是能够提高量子点的密度,增加对载流子的俘获能力,从而达到提高激光器性能的目的^[11]。理论计算也表明,增加量子点的尺寸或量子阱的宽度,能够导致能级降低,进而导致发光谱峰波长红移。尽管在实验和理论研究方面取得了一定进展,但对这种结构的载流子传输特性的研究还不甚清楚,本文采用变温 PL 谱和时间分辨 PL 谱来研究这种结构的光致发光稳态和瞬态特性。

2 样品制备与结构分析

量子点生长所用设备为 VG 公司的 V80H MK IIM BE 系统,半绝缘 GaAs(100)衬底经 580 °C 脱氧后,在 600 °C 生长 500 nm 的 GaAs 缓冲层,接着分别生长有源层。样品 QDA 和 QDB 的有源层为 3 个周期,最后覆盖 60 nm 的 GaAs 层。整个生长过程都由高能电子衍射 (RHEED) 进行监测。图 1 为样品结构示意图。样品 A 和样品 B 的 InAs 层厚度分别为 2.5 ML 和 3.5 ML。另外,分别对生长的没有 GaAs 盖层的样品进行 SEM 形貌测试。

光致发光谱的温度测量范围为 10 ~ 300 K,光谱测量系统由 APD 公司的 CSW204 闭环循环制冷系统、波长为 635 nm 半导体激光器和 Edinburgh 公司的 FL920 荧光寿命光谱仪组成。样品装在低温制冷端上,通过变温控制器控制样品的温度。激发光由半导体激光器提供,光致发光稳态信号和瞬态信号用 Hamamatsu R5509 72 NIR PMT 及采用时间相关单光子计数技术 (TCSPC) 测量。

图 2 为样品 A 和 B 的 SEM 图像。可以看出,这两个样品的形状为棱状结构,而不是通常的金字塔结构,这可能是由多层结构的应力传递及 InGaAs 应变层的各向异性引起的。样品 A 量子点的密度

约为 10^{10} /cm², 平均直径约为 70 nm, 高度约为 15 nm; 样品 B 的量子点尺寸与密度都比样品 A 的略大。另外,如箭头所指,这两个样品都有少量较小尺寸的量子点。

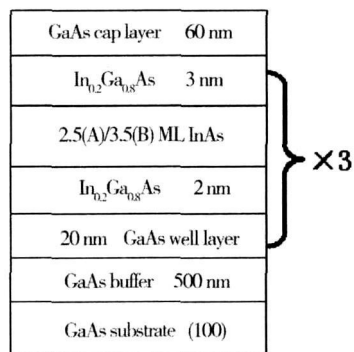


图 1 样品结构示意图

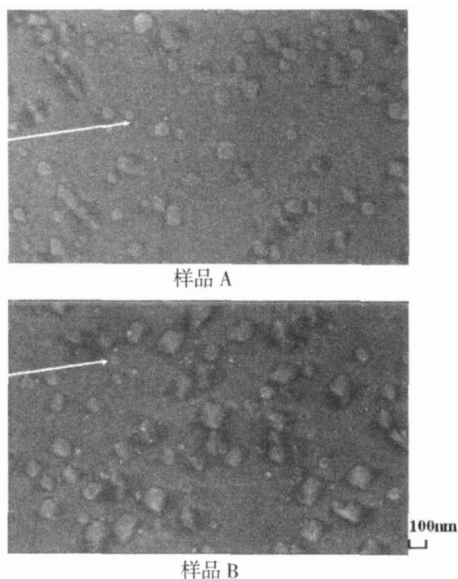
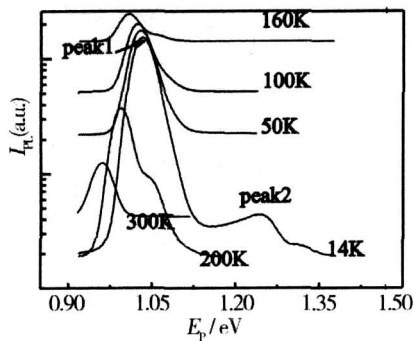


图 2 样品的 SEM 图像

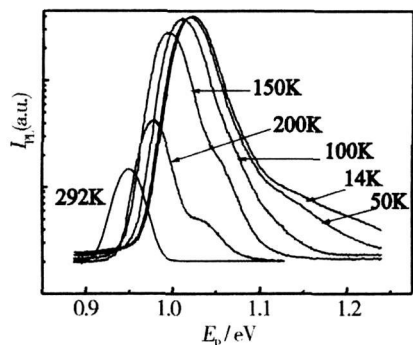
3 结果与讨论

图 3(b)、(b) 分别给出了样品 A 和样品 B 在不同温度下的 PL 谱。温度为 14 K 时,样品 A 和 B 的半高宽较小,分别为 37.4 meV 和 34.4 meV,说明样品的生长质量较好;样品 B 的发光峰值能量 (1.020 1 eV) 比样品 A (1.031 4 eV) 的峰值能量小,这说明增加 InAs 的淀积厚度均能使量子点样品的发光向长波移动。增加 InAs 淀积层的厚度,引起量子点的尺寸的增大,从而导致量子点发光向长波长移动。随着温度的升高,两组样品的 PL 谱峰均向长波移动,发光强度逐渐减小。实验发现,两样品的 PL 谱具有明显的非对称性,可拟合为两个发光峰。低能发光峰和高能发光峰分别标记为 peak1 和

peak2(样品 B 未标出), 显然, peak1 为发光主峰, peak2 峰应该与 InGaAs 层有关^[12]。而且与单层 InAs 量子点不同, 对于多层生长的 InAs 量子点, 如果每一层 InAs 的淀积厚度相等, 相邻两个量子点层的应力传递效应会使得自对直的上一层量子点尺寸略增大; 而在每一量子点层中也有一些没有自对直的小量子点, 这就使整个系统量子点尺寸的范围增大, 从而形成尺寸较大和尺寸较小的两簇量子点。并且由于自对直作用, 尺寸较大的量子点数目相对较多, 其发光强度也相对较强, 样品在室温下的发光峰值波长均在 $1.3 \mu\text{m}$ 附近(其中, 样品 B 的峰值发光波长大于 $1.3 \mu\text{m}$), 这比直接生长在 GaAs 衬底上量子点材料的发光波长要更长。其原因在于: 在这种生长条件下, 得到的应该是 InAs/InGaAs 量子点结构, 而 InGaAs 的晶格常数比 GaAs 更接近于 InAs, 可以缓冲 InAs 岛中的应力, 并且使量子点的尺寸明显变大。这两种因素都导致 InAs 量子点带隙变窄, 使得发光峰红移。另外, 量子阱中的子能级与量子点的子能级交叠可能会增加量子点中载流子的浓度^[13], 实验也发现在量子阱中多层生长量子点结构可以提高量子点的发光强度。



(a) 样品 A



(b) 样品 B

图3 样品 A 和 B 的变温 PL 谱

在图 4 中给出了样品发光主峰的峰值能量、半

高宽与温度的变化关系。低温下, 符合 InAs 带边随温度变化的 Varshini 关系, 并没有出现反常的蓝移现象, 这说明样品的生长质量较好。在 $140 \sim 250 \text{ K}$ 温度区间内, 两样品的光致发光峰均出现反常红移现象, 这反映了在此温度区载流子在不同量子点间的迁移作用增强^[3, 14]。

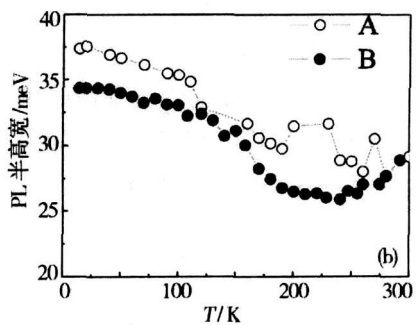
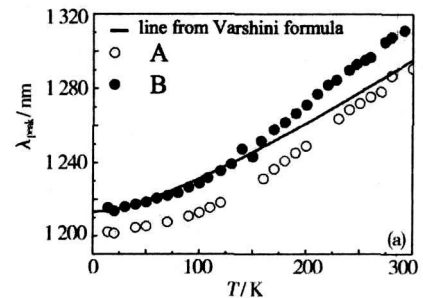


图4 三组样品发光主峰的峰值波长(a)和半高宽(b)与温度的变化关系

低温下(低于 150 K), 样品 A 的半高宽较大。值得注意的是, 随着温度升高(大于 150 K), 样品 B 和样品 A 的 PL 峰的半高宽均逐渐减小。样品 B 的 PL 峰的半高宽最小只有 25 meV 左右。这说明多层生长量子点结构, 由于量子点的高度较高, 而间隔层厚度较小, 载流子在各层之间的迁移效应较为明显。当多层生长的 InAs 量子点的间隔层厚度为 50 nm 时, 各层之间的载流子迁移效应就很不明显, 导致其 PL 峰半高宽较小且变化也很小^[14]。

图 5 给出了样品在不同温度下的发光峰值处的发光寿命 τ_p 。从图中可以看出, 在低温下(小于 50 K), 载流子在不同量子点之间的迁移作用不明显, 因此各个样品的发光寿命变化不大, 这类似于单个量子点的发光特性。随着温度升高, 样品 B 总体比样品 A 的寿命变化大, 这是 InAs 淀积厚度增加引起量子点密度及尺寸增大的结果。在 140 K 左右, 载流子在量子点中迁移速率加快, 导致发光寿命随温度变化而显著变化。与在 GaAs 层或 InGaAs 应

变层上生长的InAs量子点样品相比,在InGaAs量子阱中生长量子点,其寿命随温度变化总体变化不大^[3]。这说明用此方法生长的量子点具有更好的温度稳定性。

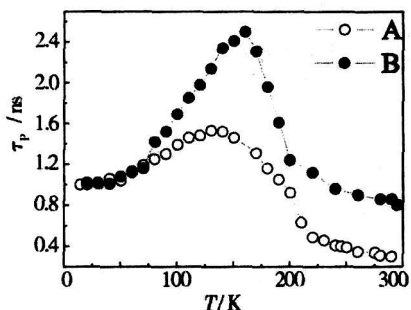


图5 不同温度下各样品在发光峰值处的寿命

4 结论

在InGaAs/GaAs量子阱中生长了两组InAs量子点样品。研究发现,InGaAs量子阱结构可以有效地缓冲InAs量子点中的应变,提高量子点的生长质量。在室温下可以探测到较强的量子点发光信号,室温发光波长达到1318 nm。

参考文献:

- [1] Landin L, Miller M S, Pistol M E. Optical studies of individual InAs quantum dots in GaAs: few particle effects [J]. Science, 1998, 280(5361): 262-264.
- [2] Dekel E, Gershoni D, Ehrenfreund E, et al. Multiexciton spectroscopy of a single self assembled quantum dot [J]. Phys. Rev. Lett., 1998, 80(22): 4991-4994.
- [3] Kong L M, Cai J F, Wu Z Y. Time resolved photoluminescence spectra of self assembled InAs/GaAs quantum dots [J]. Thin Solid Films, 2006, 498(4-2): 188-192.
- [4] Hayne M, Razinkova O, Bersier S, et al. Optically induced charging effects in self assembled GaSb/GaAs quantum dots [J]. Phys. Rev. B, 2004, 70(8): 081302.
- [5] Walter G, Holonyak N, Ryou J H, et al. Room temperature continuous photopumped laser operation of coupled InP quantum dot and InGaP quantum well InP-InGaP-In(AlGa)P-InAlP heterostructures [J].

Appl. Phys. Lett., 2001, 79(13): 1956-1958.

- [6] Dvurechenskii A V, Yakimov A I. Type II Ge/Si quantum dots [J]. Semiconductors, 2001, 35(9): 1095-1105.
- [7] Stintz A, Liu G T, Li H, et al. Low threshold current density 1.3 μm InAs quantum dot lasers with the dots in a well (DWELL) structure [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2000, 12(6): 594-593.
- [8] Liu G T, Stintz A. The influence of quantum well composition on the performance of quantum dot lasers using InAs-InGaAs dots in a well (DWELL) structures [J]. IEEE J. Quantum Electron., 2000, 36(11): 1272-1279.
- [9] Liu G T, Stintz A, Li H, et al. Extremely low room temperature threshold current density diode lasers using InAs dot in In_{0.15}Ga_{0.85}As quantum well [J]. Electron. Lett., 1999, 35: 1163-1165.
- [10] Annalisa C, Luciana C, Gavriella L, et al. Growth interruption to tune the emission of InAs quantum dots embedded in InGaAs matrix in the long wavelength region [J]. J. Cryst. Growth, 2004, 261(4): 458-465.
- [11] Mukai K, Nakata Y, Otsubo K, et al. 1.3 μm CW lasing characteristics of self assembled InGaAs/GaAs quantum dots [J]. IEEE J. Quantum Electron., 2000, 36(4): 472-478.
- [12] Fiore A, Borri P, Langbein W, et al. Time resolved optical characterization of InAs/InGaAs quantum dots emitting at 1.3 μm [J]. Appl. Phys. Lett., 2000, 76(23): 3430-3432.
- [13] Pulizzi F, Kent A J, Patane A, et al. Time resolved photoluminescence of InAs quantum dots in a GaAs quantum well [J]. Appl. Phys. Lett., 2004, 84(16): 3046-3048.
- [14] 孔令民, 蔡加法, 陈厦平, 等. 多层InAs量子点的光致发光研究 [J]. 半导体光电, 2005, 26(6): 519-522.

作者简介:

孔令民(1976-),男,山东人,博士,讲师,主要从事低维半导体的光学性质研究。

E mail: konglm0592@yahoo.com