

ZnCdSe 量子阱/CdSe 量子点耦合结构中的激子复合*

金 华^{1,†} 卜凡亮¹ 李丽华¹ 王 蓉¹ 张振中² 张立功² 郑著宏² 申德振²

(1 中国人民公安大学安全防范系, 北京 102416)

(2 中国科学院 激发态物理重点实验室, 长春 130033)

摘要: 采用 MOCVD 方法制备了 ZnCdSe 量子阱/CdSe 量子点耦合结构, 利用低温(5K)光致发光光谱和变密度发光光谱研究了该结构中的激子隧穿和复合. 观察到在该结构中存在由量子阱到量子点的激子隧穿现象. 改变垒层厚度会对量子阱和量子点的发光产生显著影响. 在垒层较薄的阱/点耦合结构中, 隧穿效应可以有效地抑制量子阱中的带填充和饱和效应.

关键词: ZnCdSe 量子阱/CdSe 量子点; 光致发光; 复合; 隧穿

PACC: 7865K; 7855D; 7220J

中图分类号: D47 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2008)11-2252-04

1 引言

由于量子点具有分立的能级结构并且其态密度呈 δ 函数, 半导体量子点及其构成的光电器件引起了人们的极大兴趣并被广泛研究^[1,2]. 人们期望在量子点激光器中可以获得比量子阱、量子线更好的激射特性, 并实现低的阈值电流密度、高的特征温度、高的发光效率和微分增益、窄的光谱线宽^[3~5]. 然而, 由于量子点尺寸、形状及密度的随机分布以及缺陷的存在, 量子点中的载流子收集和电荷再分布受到限制, 从而限制了增益, 为此人们设计了各种结构来增加载流子收集层和载流子注入层. 近年来, 一种新型的量子点/量子阱耦合结构的激光器得到人们的关注. 该结构在量子点的附近附加一量子阱层, 载流子通过薄的垒层由量子阱隧穿注入到量子点中, 从而提高量子点中的载流子收集、量子点间载流子的横向传输及量子点的热稳定性. 然而这种结构的研究主要集中在 III-V 族半导体中^[6~11], 对 II-VI 族材料体系的研究较少. 其中, CdSe 量子点的发光在可见波段的蓝绿黄范围, 可通过调节量子点的尺寸, 调节发光波长, 是探索蓝绿色激光器的理想材料.

本文采用 MOCVD 方法制备了 ZnCdSe 量子阱/CdSe 量子点耦合结构, 通过低温光致发光光谱研究了不同垒层厚度和不同激发密度对该结构中 CdSe 量子点和 ZnCdSe 量子阱发光的影响, 发现在薄垒结构中隧穿效应可以有效地抑制量子阱中的带填充和饱和效应.

2 实验

实验所用 ZnCdSe 量子阱/CdSe 量子点样品采用 MOCVD 方法生长在(100)方向的 GaAs 衬底上, 样品

结构如图 1 所示. 我们曾在类似的阱/点耦合结构中观察到从量子阱到量子点的明显的隧穿现象^[12], 为研究激子在量子阱和量子点中的复合, 我们对结构参数进行修改, 具体为: $1\mu\text{m}$ ZnSe 缓冲层, 6 个周期的 CdSe 浸润层/CdSe 量子点层/ZnSe 垒层/ 3nm $\text{Zn}_{0.72}\text{Cd}_{0.28}\text{Se}$ 量子阱层/ 8nm ZnSe 垒层, 60nm ZnSe 覆盖层. CdSe 量子点采用 1.35nm 的沉积厚度, 即 4, 5 个原子层. 在沉积适当厚度以后, 给予 120s 的中断时间, 通过表面原子迁移来弛豫掉高晶格失配情况下沉积过程中累积的应力, 形成量子点. 原子力显微镜显示量子点密度约为 $30\sim 40\mu\text{m}^{-2}$, 底面直径在 80nm 左右, 平均高度在 4nm 左右, 呈圆盘岛状. 具有上述结构的样品 A 和 B 的 ZnSe 垒层厚度分别为 2 和 0.8nm .

3 结果与讨论

我们测量了样品 A 和 B 的低温光致发光谱(5K), 如图 2 所示. 激发源为掺 Ti 蓝宝石激光器产生的超短

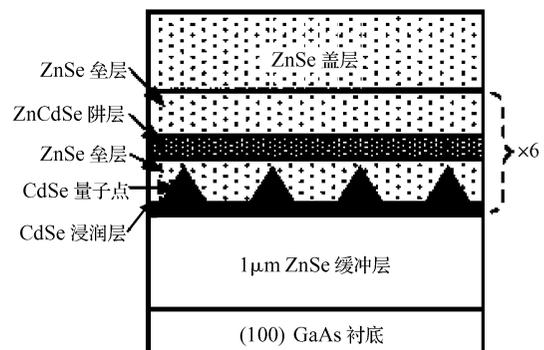


图 1 ZnCdSe 量子阱/CdSe 量子点样品的结构示意图

Fig.1 Schematic of the ZnCdSe quantum wells / CdSe quantum dots structure

* 国家自然科学基金资助项目(批准号:60278031, 60176003 和 60376009), 国家科技支撑计划(批准号:2006BAK07B04), 公安部应用创新计划(批准号:2007YYCXGADX101)及公安大学科研基金(批准号:08LG01)资助项目

† 通信作者. Email: jinhua@m165.com

2008-06-30 收到, 2008-07-18 定稿

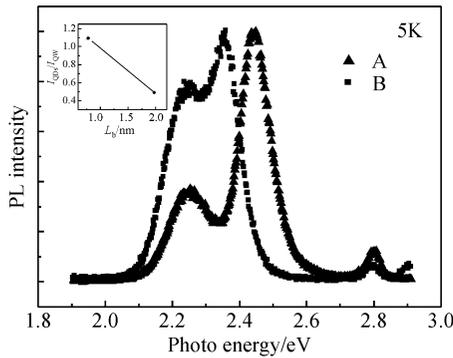


图 2 ZnCdSe 量子阱/CdSe 量子点样品 A 和 B 在 5K 温度下的发光光谱 插图为量子点与量子阱的发光积分强度比随垒宽的变化关系.

Fig.2 Normalized PL spectra of samples A and B at the temperature of 5K The inset shows the ratio of the integrated intensity I_{QDs}/I_{QW} as a function of the barrier width L_b .

脉冲激光, 激光频率为 1kHz, 脉冲宽度 130fs, 波长为 400nm 的倍频光.

在样品 A 的发光谱中, 2.25eV 的发光来自量子点, 其高能侧 2.44eV 强的发光峰来自 ZnCdSe 量子阱的发光. 2.8eV 处的发光对应 ZnSe 垒层的发光. 样品 B 的发光谱中, 2.24eV 处的发光为 CdSe 量子点的发光, 但 ZnCdSe 量子阱的发光峰位红移到 2.36eV. 考虑到样品 B 的制备过程中, ZnSe 垒层的厚度为 0.8nm, 仅为 3 个原子层厚. 因此, 可能由于垒层的减薄, 对量子阱和量子点限制减弱, 使发光峰位出现红移. 同时, 也可能存在 ZnCdSe 量子阱与 CdSe 层形成 Cd 组分更高的 ZnCdSe 混晶量子阱, 从而导致量子阱的发光红移. 我们对量子阱的发光强度进行了归一化处理. 图 2 插图为 CdSe 量子点与 ZnCdSe 量子阱的发光积分强度比随垒层厚度的变化关系. 随着垒层厚度的减小, 量子点与量子阱的激子发光积分强度比明显增强. 这表明激子密度在量子阱与量子点中重新分配, 激子从 ZnCdSe 量子阱隧穿到 CdSe 量子点.

为进一步研究激子隧穿对量子阱和量子点中激子复合的影响, 我们改变激发光功率, 在 5K 温度下测量了样品 A 和 B 的发光光谱, 分别如图 3 和图 4 所示. 随着激发功率的增加, 量子点和量子阱的发光强度增加且

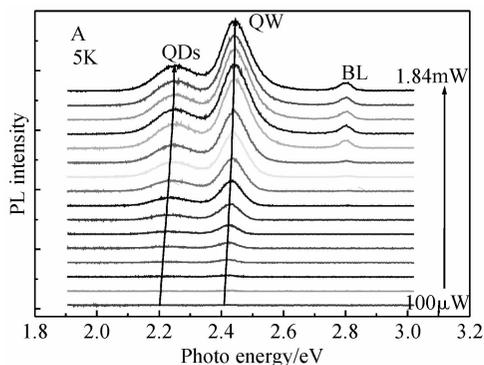


图 3 激发光功率在 $100\mu\text{W}\sim 1.84\text{mW}$ 范围, ZnCdSe 量子阱/CdSe 量子点样品 A 在 5K 温度下的发光光谱

Fig.3 PL spectra of sample A at the temperature of 5K with the excitation light power from $100\mu\text{W}$ to 1.84mW

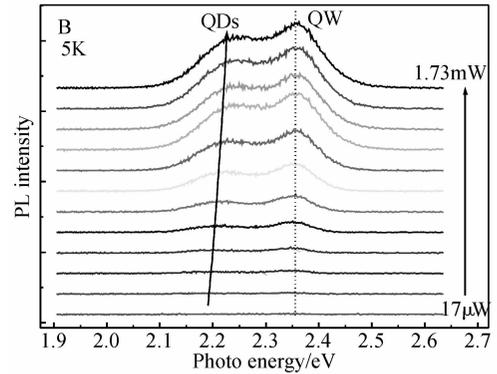


图 4 激发光功率在 $17\mu\text{W}\sim 1.73\text{mW}$ 范围, ZnCdSe 量子阱/CdSe 量子点样品 B 在 5K 温度下的发光光谱

Fig.4 PL spectra of sample B at the temperature of 5K with the excitation light power from $17\mu\text{W}$ to 1.73mW

发光峰位出现蓝移.

图 5 为样品 A 和样品 B 中量子阱和量子点的发光峰位随激发光功率变化的关系. 对于样品 A, 观察到随着激发光功率增加, 发光峰位出现明显蓝移, 量子阱峰位蓝移能量为 29meV, 量子点发光峰位蓝移 30meV. 这是由于激发光功率增加, 导致带填充效应造成的. 但与样品 A 明显不同, 样品 B 中量子阱的发光峰位蓝移很小, 只有 9meV, 而量子点峰位蓝移却增加为 37meV. 这表明当样品被激发后, 在垒层较薄(样品 B)的样品中, 由于隧穿效应量子阱中的激子迅速离开, 使得阱中激子不会产生大量的积累, 同时这部分激子被注入到量子点中, 导致激子对量子点填充的增强, 使量子点的发光峰位明显蓝移. 注意到, 在样品 B 中当激发功率大于 0.5mW 时, ZnCdSe 量子阱发光峰的蓝移仍不明显, 而量子点的发光峰位出现迅速蓝移, 表明隧穿过程进一步占据主导地位.

图 6 为样品 A 和样品 B 中量子阱和量子点的发光积分强度随激发光功率变化的关系. 对于样品 A, 随着激发光功率的增加, 量子点和量子阱发光强度增加, 但增加幅度逐渐减小, 当激发光功率增加到 1.4mW 时,

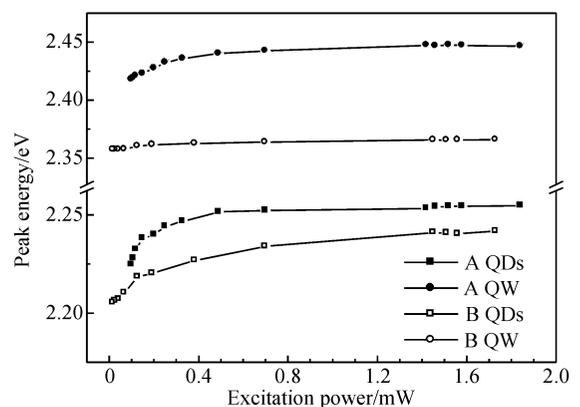


图 5 样品 A 和样品 B 中量子阱和量子点发光峰位随激发光功率变化的关系

Fig.5 Excitation light power dependence of the peak position of QDs (square) and QW (circle) for sample A and sample B

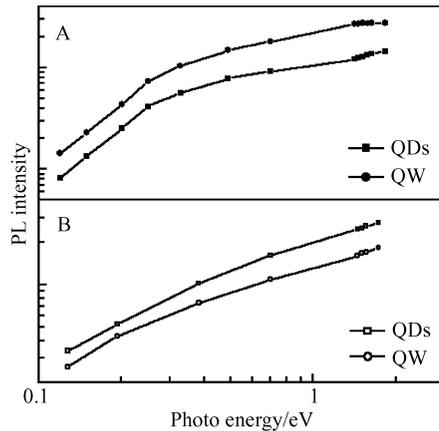


图 6 样品 A 和样品 B 中量子阱和量子点发光积分强度随激发光功率变化的关系

Fig.6 Excitation light power dependence of the PL-integrated intensity of QDs (square) and QW (circle) for sample A and sample B

量子阱的发光强度趋于饱和,不再随激发功率增加而变化,这是由于大量激子填充造成的.而量子点的发光并未出现饱和,这是由于量子点的态密度为 δ 函数,对激子容纳能力极强.与样品 A 不同,在样品 B 的量子阱和量子点的发光积分强度随激发光功率变化的关系中,没有观察到量子阱和量子点的发光出现饱和.这表明隧穿效应使大量激子在产生后就迅速离开量子阱,从而避免了量子阱的饱和效应,而量子点由于激子容纳能力强,也没有出现饱和.这与上面的讨论相一致,证实了这种新型的点/阱耦合结构可以提高量子阱对激子收集的能力,对提高量子点的发光是有帮助的.

4 结论

本文采用 MOCVD 方法制备了 ZnCdSe 量子阱/CdSe 量子点耦合结构,利用低温光致发光谱证实在该结构中存在由量子阱到量子点的激子隧穿现象.通过改变激发光密度进一步研究了垒层厚度对量子阱和量子点发光的影响,发现较高密度激发下,隧穿可以有效地缓解量子阱中的带填充和饱和效应.

参考文献

- [1] Su Xiyu, Quan Xiumei, Guo Dejun. Dynamic behavior of excitons in coupled double quantum dots driven by DC-AC electric fields. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2007, 28(3): 404 (in Chinese) [苏希玉, 全秀梅, 郭德军. DC-AC 驱动下耦合双量子点分子中激子的动力学行为. *半导体学报*, 2007, 28(3): 404]
- [2] Zhang Daoli, Zhang Jianbing, Wu Qiming, et al. Synthesis and spectral properties of InP colloidal quantum dots. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, 27(7): 1213 (in Chinese) [张道礼, 张建兵, 吴启明, 等. InP 胶体量子点的合成及光谱性质. *半导体学报*, 2006, 27(7): 1213.]
- [3] Arakawa Y, Sakaki H. Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current. *Appl Phys Lett*, 1982, 40(11): 939
- [4] Smowton P M, Johnston E J, Dewar S V, et al. Spectral analysis of InGaAs/GaAs quantum-dot lasers. *Appl Phys Lett*, 1999, 75(15): 2169
- [5] Markus A, Chen J X, Paranthoën C, et al. Simultaneous two-state lasing in quantum-dot lasers. *Appl Phys Lett*, 2003, 82(12): 1818
- [6] Walter G, Holonyak N Jr, 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. *Appl Phys Lett*, 2001, 79(13): 1956
- [7] Walter G, Holonyak N Jr, Ryou J H, et al. Coupled InP quantum-dot InGaP quantum well InP-InGaP-In (AlGa) P-InAlP heterostructure diode laser operation. *Appl Phys Lett*, 2001, 79(20): 3215
- [8] Walter G, Chung T, Holonyak N Jr. Coupled-stripe quantum-well-assisted AlGaAs-GaAs-InGaAs-InAs quantum-dot laser. *Appl Phys Lett*, 2002, 80(17): 3045
- [9] Walter G, Elkow J, Holonyak N Jr, et al. Visible spectrum (645 nm) transverse electric field laser operation of InP quantum dots coupled to tensile strained $\text{In}_{0.46}\text{Ga}_{0.54}\text{P}$ quantum wells. *Appl Phys Lett*, 2004, 84(5): 666
- [10] Koike K, Li S, Yano M. Molecular beam epitaxial growth and characterization of the vertically aligned InAs quantum dots embedded in $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$. *Jpn J Appl Phys*, 2000, 39: 1622
- [11] Kim E T, Chen Z, Madhukar A. Tailoring detection bands of InAs quantum-dot infrared photodetectors using $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ strain-relieving quantum wells. *Appl Phys Lett*, 2001, 79(20): 3341
- [12] Jin Hua, Zhang Ligong, Zheng Zhuhong, et al. Exciton tunneling in ZnCdSe quantum well/CdSe quantum dots. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(9): 3211 (in Chinese) [金华, 张立功, 郑著宏, 等. ZnCdSe 量子阱/CdSe 量子点耦合结构中的激子隧穿过程. *物理学报*, 2004, 53(9): 3211]

Exciton Recombination in the Coupling Structure of a ZnCdSe Quantum Well and CdSe Quantum Dots*

Jin Hua^{1,†}, Bu Fanliang¹, Li Lihua¹, Wang Rong¹, Zhang Zhenzhong², Zhang Ligong²,
Zheng Zhuhong², and Shen Dezhen²

(1 *Department of Security and Prevention, Chinese People's Public Security University, Beijing 102416, China*)

(2 *Key Laboratory of Excited State Processes, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: Coupling structures for a ZnCdSe quantum well and CdSe quantum dots (QDs) with different thickness of barrier layer were fabricated by metal organic chemical vapor deposition (MOCVD). The recombination and tunneling of excitons in the ZnCdSe QW/CdSe QDs structure were investigated using photoluminescence (PL) spectra at 5K. The tunneling process of the exciton from QW to QDs was observed. The excitation light power dependence of PL peak position and PL-integrated intensity were also investigated, respectively. The results reveal that in this structure with thinner barrier layer, the absorption saturation in ZnCdSe quantum well can be restrained.

Key words: ZnCdSe QW/CdSe QDs; photoluminescence; recombination; tunneling

PACC: 7865K; 7855D; 7220J

Article ID: 0253-4177(2008)11-2252-04

* Project support by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60278031, 60176003, 60376009), the National Science and Technology Supporting Plan (No. 2006BAK07B04), the Applied Innovation Plan of the Public Security Department of China (No. 2007YYCXGADX101), and the Scientific Research Foundation of the Chinese People's Public Security University (No. 08LG01)

† Corresponding author. Email: jinhua@m165.com

Received 30 June 2008, revised manuscript received 18 July 2008

©2008 Chinese Institute of Electronics