

InGaAs/GaAs 应变量子阱中的 激子发光动力学

徐仲英 罗昌平 金世荣* 许继宗 郑宝真

(中国科学院半导体研究所 半导体超晶格国家重点实验室 北京 100083)

摘要 本文详细测量并分析了 InGaAs/GaAs 应变量子阱中的激子发光衰退特性,研究了激子发光寿命与 In 组分和阱宽的关系. 发现 In 组分增大时,激子寿命变短,而发光寿命与阱宽的关系不大. 文章分析了影响发光寿命的诸多因素,指出在 InGaAs/GaAs 量子阱中,由合金无序造成的散射对激子发光寿命有重要的影响.

PACC: 7847, 7855

1 引言

在量子阱材料中,载流子复合发光动力学过程与体材料有明显不同. 由于载流子在阱中的局域化,相应激子玻尔半径减小,振子强度增加,其辐射复合几率大大增加,因此载流子寿命明显减小. 理论和实验研究表明^[1,2]: 激子辐射复合寿命表现为阱宽的函数,阱越窄,载流子在阱中局域化加强,寿命变短. 但对于具体样品来说,实验观测到的发光过程还可能包括各种散射中心的影响. 因此激子发光动力学研究不仅可用于研究量子阱中的一些基本物理过程,同时还可提供许多与器件应用密切相关的信息^[3,4].

迄今为止,许多研究工作都集中在 GaAs/AlGaAs 材料中,很少有 InGaAs/GaAs 材料的有关报道. 最近 Takahashi 等人采用光子计数技术研究了 InGaAs/GaAs 量子阱中的激子发光动力学过程,并研究了荧光衰退时间随温度的变化,指出在 InGaAs/GaAs 量子阱中,合金无序散射对激子寿命的影响大于界面不平整所造成的影响.

本文详细测量分析了不同 In 组分的 InGaAs/GaAs 应变量子阱中的发光衰退特性,发现测得的寿命与样品的 In 组分存在明显的依赖关系,从而直接佐证了合金无序散射对激子发光寿命的影响. 本文还研究了激子发光寿命与阱宽的关系,测得的发光寿命基本与阱宽无关. 理论分析表明,在 InGaAs/GaAs 量子阱中,激子局域化效应对发光寿命的影响明显减弱,这一方面是由于激子准二维特性的退化,另一方面也反映了合金无序

* 西安交通大学电子科学系

徐仲英 男, 1942年生, 研究员, 从事半导体超晶格光学性质研究

金世荣 男, 1964年生, 博士生, 从事半导体超晶格光学性质研究

罗昌平 男, 1967年生, 助研, 从事半导体超晶格光学性质研究

1993年5月21日收到初稿, 1993年8月19日收到修改稿

散射的作用.

2 实验

实验所用 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 应变量子阱样品由 MBE 生长, 不掺杂. 样品分三组: 第一组为三个多量子阱结构(MQW), 阱宽 80 Å, 势垒厚度 250 Å, 三个样品的 In 组分分别为 $x=0.1, 0.15$ 和 0.2 , 它们具有相同的生长条件. 第二组样品为单量子阱结构(SQW), $x=0.05$, 阱宽在 50—180 Å 之间. 第三组样品也为单量子阱结构, In 组分较大($x=0.15$). 后两组样品生长条件接近, 以便比较. 低温光致发光谱用常规方法测得. 所有样品均观测到单一的重空穴激子发光, 并具有较强的发光强度和窄的线宽, 部分样品经光致发光激发谱测量, 具有很小的 Stokes 位移. 所有这些结果表明, 低温下的发光主要是激子的辐射复合发光. 表 1 列出了各个样品的结构参数和实验测得的发光峰光子能量位置(E_{1h})及谱线半高宽(FWHM). 时间分辨光谱实验装置包括 Spectra-Physics 同步泵浦 DCM 染料激光器, J-Y H20 单色仪, Hamamatsu C2909 同步扫描条纹相机. 整个系统的实测时间分辨率小于 40 ps, 激光脉冲 < 10 ps, 重复频率 82 MHz, 激发光子能量为 2.0 eV, 平均激发功率 1 mW, 对应的单脉冲光生载流子浓度为 $10^{15}/\text{cm}^3$, 所用的激发强度不会对发光寿命的本征特性产生影响.

表 1 样品参数和低温光致发光峰值光子能量(E_{1h})及光谱宽度(FWHM)

样 品	$L_z(\text{Å})$	$L_B(\text{Å})$	x	结 构	$E_{1h}(\text{eV})$	FWHM(meV)
第一组	80	250	0.1	MQW	1.436	3.5
	80	250	0.15	MQW	1.390	4.1
	80	250	0.2	MQW	1.340	5.0
第二组	50		0.05	SQW	1.489	1.3
	70		0.05	SQW	1.482	1.4
	100		0.05	SQW	1.474	1.6
	150		0.05	SQW	1.467	1.4
	180		0.05	SQW	1.464	1.5
第三组	60		0.15	SQW	1.405	4.2
	100		0.15	SQW	1.377	5
	120		0.15	SQW	1.370	5.2
	150		0.15	SQW	1.363	5.4
	180		0.15	SQW	1.358	7

3 实验结果和讨论

图 1 是 11 K 时三个不同 x 值样品(第一组)的重空穴激子荧光衰减曲线, 荧光强度用对数坐标表示. 可以看出, 至少在一个数量级范围内, 荧光衰减可以用单一的指数衰减过程来描述: $I(t) = I_0 e^{-t/\tau}$. 这个衰减过程实质上反映了短脉冲激发后处于热平衡状态的激子发光寿命. 最新研究表明^[6], 超短脉冲激发后, 荧光衰减还可以有另一个过程: 即一个时间常数为 17—40 ps 的包括 $K_{//} < K_0$ 激子衰减和与声学声子散射过程在内的快速衰减过程. 但在通常的实验条件下, 我们关心的是热平衡状态的激子发光寿命. 还应

指出,样品受超短激光脉冲激发后,将产生大量非平衡载流子,这些高激发态热电子会迅速失去额外能量,弛豫到导带底,这个过程很短^[7],不应包括在荧光衰减的拟合过程中^[5].从图1的荧光衰减曲线求得的激子寿命为630,300和192 ps,分别对应 $x=0.1$,0.15和 $x=0.2$ 三个 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱结构.很明显,较小的In组分具有较长的

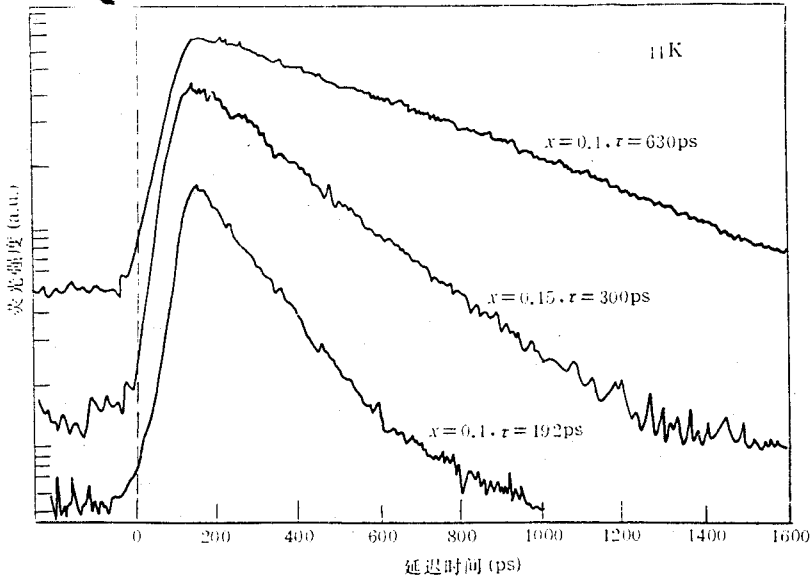


图1 三个不同 x 值的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 多量子阱结构的荧光衰减特性
探测能量位置为基态重空穴激子发光峰,光谱窗口宽度等于荧光峰半高宽

发光寿命,而In含量较高的样品,其荧光衰减过程要快得多.为了进一步证实In组分对荧光寿命的影响.我们又测量比较了两组(第二组和第三组)不同In组分的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱样品的时间分辨光谱.一组样品的 x 值为0.05,另一组为0.15.由于两组样品具有大致相同的生长条件,所以有理由认为样品具有相近的由生长过程引入的非本征特性,例如杂质和界面起伏等.用时间分辨光谱测得的各个样品的重空穴激子发光寿命如图2所示,可以清楚地看出, x 值较大的一组样品具有较短的发光寿命(~ 250 ps),而 x 值较小的一组样品具有较长的寿命(>550 ps).此外,我们还注意

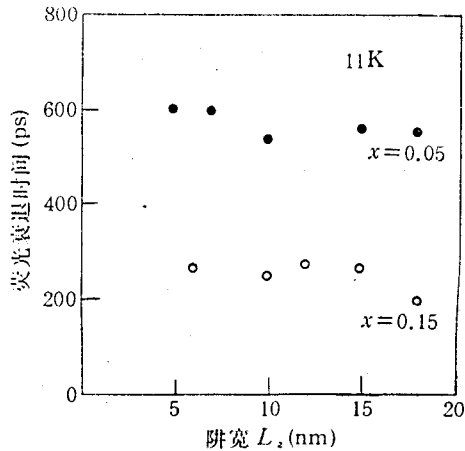


图2 InGaAs/GaAs量子阱中激子发光寿命与阱宽的关系
发光寿命基本不随阱宽而变化,但与In组分有密切的关系

到在InGaAs/GaAs量子阱中,荧光衰减寿命基本不随阱宽的变化而变化,这与GaAs/

GaAlAs 量子阱中的情况明显不同.

从二维激子的振子强度和玻尔半径出发, 量子阱中准二维激子的辐射复合寿命可以用下式表示^[8]:

$$\tau_r \sim |\langle \chi_e | \chi_h \rangle|^{-2} a_B^2 \langle z \rangle \quad (1)$$

其中 $|\langle \chi_e | \chi_h \rangle|^{-2}$ 是量子阱中电子-空穴波函数交叠积分平方的倒数, a_B 是激子玻尔半径, $\langle z \rangle$ 为激子沿 z 方向的尺度. 上述参数, 特别是 $\langle z \rangle$ 与阱宽有关, 这正体现了准二维激子的特性. 对于势阱较深, 载流子在阱中局域化比较理想的情况 (例如 GaAs/GaAlAs 量子阱), 激子有效地束缚在阱内, 准二维特性明显, 以上模型与实验符合较好. 但在 InGaAs/GaAs 中, 尤其是当 In 组分较小时, 激子在量子阱中受限情况大大减弱, 波函数沿 z 方向扩展范围大, 从而使激子的准二维特性退化, 此时激子在生长方向上的尺度 $\langle z \rangle$ 对激子寿命与阱宽依赖关系的影响可不予考虑. 由此我们得出激子限制势较小情况下, 辐射复合寿命的表达式:

$$\tau_r \sim |\langle \chi_e | \chi_h \rangle|^{-2} a_B^3 \quad (2)$$

显然它介于准二维激子(1)和三维激子(3)之间:

$$\tau_r^{3D} \sim a_B^3 \quad (3)$$

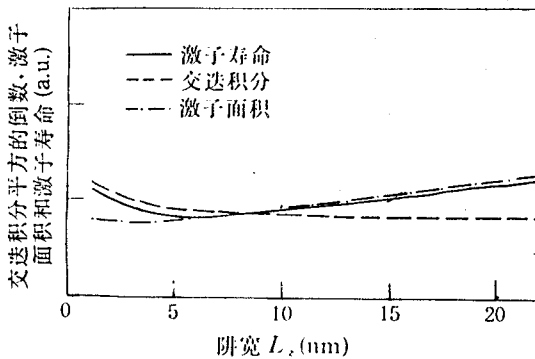


图3 InGaAs/GaAs 量子阱中电子空穴波函数交叠积分平方的倒数、激子面积和计算得到的激子寿命与阱宽的关系
图中各条曲线之间的相对位置是任意的

这样在 InGaAs/GaAs 量子阱中, 激子辐射复合寿命主要由电子空穴波函数的交叠积分和激子玻尔半径决定. 我们具体计算了波函数交叠积分平方的倒数和激子面积与阱宽的关系, 计算结果如图3所示. 图中还画出了不同阱宽时计算得到的寿命. 可以看出, 阱宽较大时, 激子寿命主要由激子面积(玻尔半径)决定, 而波函数交叠积分项只是在阱宽较小时起作用. 此外, 与 GaAs/GaAlAs 量子阱结构相比^[9], 激子寿命随阱宽的变化要平缓得多, 反映了

激子限制势较小情况下准二维特性的退化.

比较图3和图2, 不难看出上述计算结果本身仍无法很好解释观察到的发光寿命与阱宽的关系, 为此我们引入合金无序散射对激子寿命的影响. 在 InGaAs/GaAs 量子阱中, 势垒材料是二元化合物(GaAs), 而势阱材料是三元合金(InGaAs). 当阱较宽时, 电子分布几率主要落在阱内, 因此受到阱内合金无序影响较大, 散射速率增加, 寿命减小. 而当势阱变窄时, 电子波函数将向 GaAs 势垒扩展, 电子阱内分布几率相对减小, 由合金无序造成的散射作用减小, 发光寿命增大. 由此可知, 由合金无序散射引起的激子寿命增减与电子阱内分布几率成反比. 图4是计算得到的电子在阱内相对分布几率的倒数与阱宽的关系. 显然图4和图3所示的计算结果对发光寿命的影响是相反的, 其结果使得激子寿命与阱宽的关系变得不明显.

当然,上述分析只是定性的,要具体计算合金无序对激子的散射作用,需要从激子尺寸范围内观察合金组分涨落对晶体势的影响,用统计的方法求出激子范围内组分涨落发生的几率,及由此产生的散射速率的大小.这是一项很复杂的计算工作.本文不准备详细论述.我们再回到图

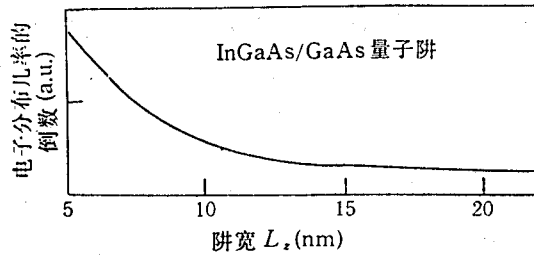


图4 电子在阱内分布几率的倒数与阱宽的关系

1所示的实验结果上,当In组分较大时,其合金无序相应增大,由合金无序造成的散射中心增加,散射速率增大,寿命变短,这与实验结果是一致的.至于具体寿命的长短还取决于样品本身(包括杂质散射的影响等),不同实验数值之间的直接比较往往是很困难的,甚至是不恰当的.

4 结论

我们用微微秒时间分辨光谱研究了InGaAs/GaAs量子阱结构中的激子复合发光动力学特性.理论和实验测量表明,InGaAs/GaAs材料中激子发光衰退特性与GaAs/GaAlAs量子阱结构有显著的差别.激子发光寿命与In组分有密切的关系,In组分较高时,发光寿命变短,反映了合金无序散射对激子发光衰退起了重要的作用.同时,在InGaAs/GaAs量子阱中,激子局域化效应对发光寿命的影响明显减弱,激子寿命与阱宽的关系变得不明显,反映了激子准二维特性的退化.

参 考 文 献

- [1] J. Feldmann, G. Peter, E. O. Gobel, P. Dawson, K. Moore, C. Foxon and R. J. Elliott, *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**: 2337.
- [2] J. Christen, D. Bimberg, A. Steckenborn and G. Weimann, *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **44**: 84; *Superlatt. & Microstruct.*, 1986, **2**: 251.
- [3] M. Colocci, M. Gurioli, A. Vinattieri, C. Deparis, J. Massies and G. Neu, *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**: 783.
- [4] M. Gurioli, A. Vinattieri, M. Colocci, A. Bosacchi and S. Franchi, *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**: 2150.
- [5] K. Takahashi, S. Owa, S. S. Kano, K. Muraki, S. Fukatsu, Y. Shirasaki and R. Ito, *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**: 213.
- [6] B. Sermage, B. Deveaud, K. Satzke, F. Clerot, C. Dumas, N. Roy, D. S. Katzer, F. Mollot, R. Planel, M. Berz and J. L. Oudar, *Superlatt. & Microstruct.*, 1992, **12**: 87.
- [7] Z. Y. Xu and C. L. Tang, *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **44**: 692.
- [8] U. Cebulla, G. Bacher, A. Forchel, G. Mayer and W. T. Tsang, *Phys. Rev.*, 1989, **B39**: 6257.
- [9] Z. Y. Xu, S. R. Jin, C. P. Luo and J. Z. Xu, *Solid State Commun.*, 1993, **87**: 797.

Effect of Alloy Disordering on Exciton Dynamics in InGaAs/GaAs Quantum Wells

Xu Zhongying, Luo Changping, Jin Shirong,
Xu Jizong and Zheng Baozhen

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

Received 21 May 1993, revised manuscript received 19 August 1993

Abstract The dependence of the radiative excitonic lifetime on well width and indium composition in InGaAs/GaAs strained quantum well has been investigated by using time-resolved spectroscopy. It has been shown that the measured lifetimes depend strongly on indium composition, revealing a significant contribution of the alloy scattering to the exciton dynamics. The observed weak well-width dependence of the exciton lifetime has been attributed to the degeneration of quasi two-dimensional behavior of the excitons, and the alloy disordering effect as well.

PACC: 7847, 7855