

# 高组分稀磁半导体 $Cd_{1-x}Mn_xTe/CdTe$ 超晶格的荧光谱研究

陈辰嘉<sup>1</sup>, 王学忠<sup>1</sup>, Bellani V<sup>2</sup>, Stella A<sup>2</sup>

1. 北京大学物理学院, 北京 100871

2. Dipartimento di Fisica "A. Volta" and INFM, Università degli Studi Pavia, 27100 Pavia, Italy

**摘要** 报道用分子束外延(MBE)技术生长的  $x=0.4, 0.8$  的高组分稀磁半导体  $Cd_{1-x}Mn_xTe/CdTe$  超晶格低温和室温荧光谱研究结果。基态激子跃迁能级荧光谱实验结果显示高组分超晶格中具有高量子效率 and 高质量光发射。对激子能级随温度的变化进行了详细研究, 给出激子跃迁能量的温度系数。激子能级线型的展宽随温度变化关系可用激子-纵向光学声子耦合模型解释。与光调制反射谱实验结果进行了比较。

**关键词** 荧光谱; 超晶格; 稀磁半导体; 光学声子; 激子跃迁

**中图分类号**: O433.5 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-0593(2006)03-0396-03

## 引言

由于最近半导体 II-VI 族化合物的分子束外延生长工艺技术方面的进展, 使生长高质量的稀磁半导体  $Cd_{1-x}Mn_xTe/CdTe$  超晶格和量子阱成为可能, 在光电器件和最近发展的自旋电子学器件(Spintronics)方面具有广泛的应用前景<sup>[1-3]</sup>。由于  $Cd_{1-x}Mn_xTe/CdTe$  超晶格样品势阱与势垒之间晶格常数相差较大, 当组分为  $x=0.8$  时, 晶格失配达 1.8%, 存在很大的应力效应, 应力效应对电子和空穴子能级的影响必须加以考虑。我们曾报道<sup>[4,5]</sup>通过光调制反射谱(Photoreflectance-PR)对高组分的  $Cd_{1-x}Mn_xTe/CdTe$  超晶格中子能级间激子跃迁结构进行了实验和理论的研究结果, 计及应力和限定效应, 用包络函数近似计算, 给出了轻和重空穴激子跃迁能量。国际上用荧光谱方法研究稀磁半导体超晶格和量子阱的报道很多, 但多是低组分的<sup>[6-7]</sup>。本文着重报道用荧光谱(Photoluminescence-PL)方法在室温和低温下对  $x=0.4, 0.8$  的高组分稀磁半导体  $Cd_{1-x}Mn_xTe/CdTe$  超晶格的实验研究结果, 并与光调制反射谱结果进行了比较。

## 1 实验

样品在复旦大学应用表面物理实验室完成的。采用分子束外延技术生长, 衬底为 CdTe, 厚度约为  $0.5 \mu m$ , 典型样品 A:  $x=0.4, L_b(\text{垒宽})=L_w(\text{阱宽})=14 \text{ nm}$ ; 样品 B:  $x=0.8, L_b=L_w=10 \text{ nm}$ ; 周期均为 20。

荧光谱测量在低温和室温下进行, 样品置于低温杜瓦瓶中。用 Jobin-Yvon LABRAM 全自动系统完成。激发光由 He-Ne 激光器 632.8 nm 谱线提供。功率为 3~30 mW。荧光讯号由 1024 单元组成的 CCD 相机接收。

## 2 结果和讨论

### 2.1 样品的荧光谱

对样品 A 和 B 的荧光谱(PL)在室温和低温下进行了研究。样品 A 在室温下的 PL 谱如图 1 所示: 主峰在能量位置  $E=1.524 \text{ eV}$  处, 其半宽  $\sim 30 \text{ meV}$ , 在高端肩膀处的能量位于  $E=1.564 \text{ eV}$ , 此外在更高能量方向有一个很小的峰, 其能量位置  $E=1.621 \text{ eV}$  处。与调制反射谱 (PR) 在室温下的结果相比较, 主峰对应于  $11H$ , 肩膀对应于  $22H$ , 而小峰则可能对应于  $33H$  的激子跃迁。其中  $11H, 22H, 33H$  分别代表从第一、二、三个(基态)导带子能级到第一、二、三个(基态)重空穴子能级间的激子跃迁。没有观察到轻空穴激子的跃迁。样品 A 在低温下的 PL 谱( $T=13 \text{ K}$ )只观察到对应于  $11H$  的激子主峰, 位于能量值  $E=1.607 \text{ eV}$ , 半宽仅为  $9 \text{ meV}$ , 如图 2 所示。图中低能端的宽峰对应于 CdTe 缓冲层结构。

样品 B 在室温下的 PL 谱中观察到位于能量  $E=1.540 \text{ eV}$  处的主峰以及能量  $E=1.625 \text{ eV}$  的小峰, 与 PR 谱相比对应于  $11H$  和  $22H$  的激子跃迁。低温下样品 B 的 PL 谱( $T=8 \text{ K}$ )也只观察到位于  $E=1.625 \text{ eV}$  处对应于  $11H$  激子跃迁的主峰, 虽然组分高达 0.8, 半宽也仅为  $10 \text{ meV}$ , 与样品

收稿日期: 2004-12-10, 修订日期: 2005-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(19874005)资助项目

作者简介: 陈辰嘉, 女, 1935 年生, 北京大学物理学院教授

A 相似, 没有观察到更高能级重空穴的跃迁, 这可能是由于低温下载流子没有布居在这些子能级上。

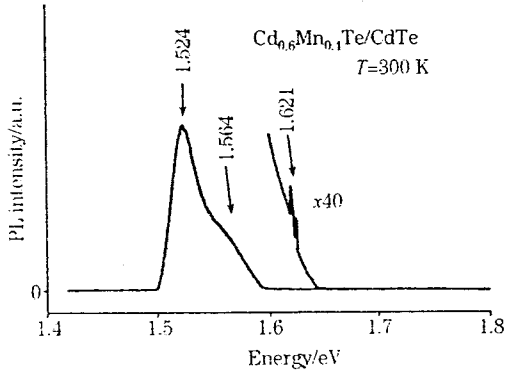


Fig. 1 Room-temperature PL spectrum of  $\text{Cd}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}/\text{CdTe}$  SLs (sample A). The exciton transitions are observed at 1.524, 1.564, and 1.621 eV as identified by arrows

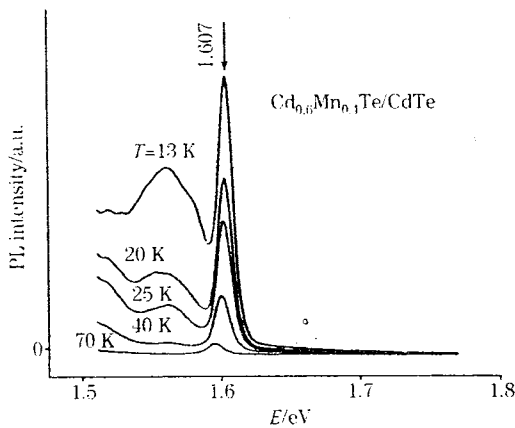


Fig. 2 PL spectra of  $\text{Cd}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}/\text{CdTe}$  SLs (sample A) at low temperatures from 70 K to 13 K. The exciton transition is observed at 1.607 eV ( $T=13$  K) as identified by the arrow

样品 A: 11H 归一化强度后 PL 谱能量位置随温度从 80, 90, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280, 290 K 的变化如图 3 所示。在液氮到室温温度范围内, 激子能级位置与温度的关系呈线性关系。样品 B: 11H 归一化强度后 PL 谱能量位置随温度从 77, 90, 115, 140, 165, 190, 215, 240, 265, 300 K 的变化与样品 A 结果类似。激子能级位置与温度的关系也呈线性关系。低温下低能部分小峰对应 CdTe 缓冲层, 从样品 B 变温曲线上还观察到主峰在 140 K 到室温与另一小峰重叠, 对应于 11L 轻空穴的跃迁, 可用 Lorentz 线型拟合。

在液氮到室温温度范围内, 激子能级位置与温度的关系如图 4 所示: 11H 激子能量位置与温度呈线性关系。样品 A 其温度系数为:  $-0.33 \text{ meV} \cdot \text{K}^{-1}$ 。对  $x=0.7$  和 B 样品, 实验结果 11H 激子跃迁能量的温度系数均为  $-0.33 \text{ meV} \cdot \text{K}^{-1}$ 。对比  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $x=0.2$ ) 薄膜样品, 其能隙的温度系数为  $-0.37 \text{ meV} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

### 2.2 激子线型展宽

实验测量的荧光线型由两部分组成: 非均匀部分  $\Gamma$  和与温度有关的均匀部分  $\Gamma_b$ 。低温下通过纵向声学声子散射是主要的与温度有关项, 然而, 在量子阱结构中可忽略其贡献。由于声子布居随温度升高而增加, 当温度上升时, 通过纵向光学(LO)声子散射就成为均匀展宽的主要部分。

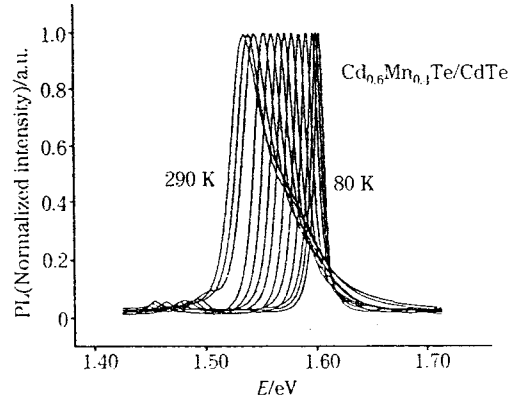


Fig. 3 11H energy positions of PL normalized intensity (sample A) for temperatures of 80, 90, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280, and 290 K

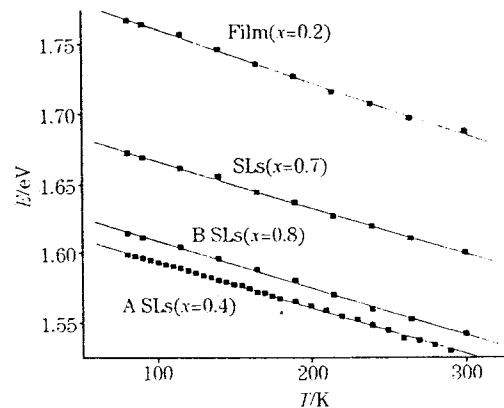


Fig. 4 11H energy positions of SLs ( $x=0.4, 0.7, 0.8$ ) and energy gap of thin film ( $x=0.2$ ) as a function of temperature

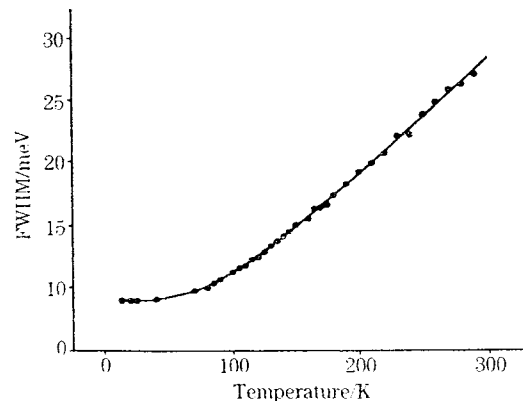


Fig. 5 The FWHM of luminescence peak (sample A, 11H) as a function of temperature. The solid line is the fitting results by using exciton-LO phonon model

自由激子被 LO 声子散射由下列式表达

$$\Gamma = \Gamma_i + \Gamma_h$$

$$\Gamma_h = \Gamma_c [\exp(\hbar\omega_{LO}/K_B T) - 1]^{-1}$$

其中  $\Gamma_i$  主要由于多量子阱中界面粗度, 合金无序, 阱宽波动等因素影响。  $K_B$  为波尔兹曼常数,  $T$  为样品的温度,  $\Gamma_c$  是由激子声子耦合的测量确定, CdTe 的 LO 声子能量:  $\hbar\omega_{LO} = 21.3$  meV。拟合结果:  $\Gamma_i = 9.0$  meV,  $\Gamma_c = 25.0$  meV。

A 样品的 11H 激子荧光峰的半宽随温度变化如图 5 中园点所示。曲线为采用激子-LO 声子耦合模型拟合结果。激子能级线型随温度的展宽可以用激子与纵向光学声子的耦合模型来解释, 实验结果与模型符合得很好。

样品 B 的激子声子耦合常数  $\Gamma_c$  略微小于 25 meV。与文献[6]结果相比, Shen 等报道在 CdTe/Cd<sub>0.633</sub>Mn<sub>0.367</sub>Te 单量子阱中激子与纵向光学声子的耦合极强, 激子声子耦合常数  $\Gamma_c$  为 44.0 meV。Neill 等报道[7] 在 CdTe/Cd<sub>0.85</sub>Mn<sub>0.15</sub>Te 多量子阱中激子与纵向光学声子的耦合常数  $\Gamma_c$  为 16.0 meV。

### 3 结 论

本文报道了用荧光光谱法研究 Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te/CdTe 的性能, 得到一些有意义的结果。

### 参 考 文 献

- [1] Alleysson P, Cibert J, Feuillet G, et al. *Journal of Crystal Growth*, 1996, 159: 672.
- [2] Prinz G A. *Science*, 1998, 282: 1660.
- [3] Ohno Y, Young D K, Beschoten B, et al. *Nature*, 1999, 402: 792.
- [4] Chen Chenjia, Wang Xuezhong, Liang Xiaogan, et al. *J. Appl. Phys.*, 2002, 92(9): 5169.
- [5] LI Hai-tao, LI Xiao-li, CHEN Xi, et al(李海涛, 李晓莅, 陈 晞, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 1998, 18(2): 129.
- [6] Shen W Z, Shen S C. *J. Appl. Phys.*, 1996, 80(10): 5941.
- [7] Neill M O, OesTreich M, Ruhle W W, et al. *Phy. Rev. B*, 1995, 48(12): 8980.

## Study on Photoluminescence Spectra of Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te/CdTe Diluted Semiconductor Superlattices with High Mn Compositions

CHEN Chen-jia<sup>1</sup>, WANG Xue-zhong<sup>1</sup>, Bellani V<sup>2</sup>, Stella A<sup>2</sup>

1. Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

2. Dipartimento di Fisica "A. Volta" and INFM, Università degli Studi Pavia, 27100 Pavia, Italy

**Abstract** The electronic properties of Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te/CdTe semiconductor superlattices (SLs) with high Mn concentrations ( $x$  up to 0.8) were studied by means of low and room temperature photoluminescence(PL). The samples were grown by MBE on GaAs substrates with CdTe buffers. PL allowed the investigation of the optical emission from the fundamental 11H excitonic transition, revealing the high quantum efficiency and quality of the SLs. The temperature dependence of the excitonic PL energy position and excitonic line-shape broadening were studied. An exciton-longitudinal optical phonon couple model can be used to explain the experimental results very well. Photoreflectance (PR) spectra were also performed in order to compare with the authors' photoluminescence results. The combined use of PL and PR allowed a full understanding of the electronic states and optical emission characteristics of the authors' SLs. The authors' results indicate that high quality Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te/CdTe SLs with high Mn concentrations can be grown using MBE on GaAs substrates. The possibility to have magnetic semiconductor nanostructures opens the way to applications in the field of spintronics toward devices based on new concepts.

**Keywords** Photoluminescence spectra; Superlattices; Diluted semiconductor; Optical phonon; Exciton transition

(Received Dec. 10, 2004; accepted Apr. 20, 2005)