

文章编号 : 0253-2239(2002)01-0114-04

# CdSe/CdZnSe 超晶格的激子光学性质的研究<sup>\*</sup>

张希清 梅增霞 段 宁 徐 征 王永生 徐叙

(北方交通大学光电子技术研究所信息存储、显示与材料开放实验室,北京 100044)

Tang Z K

(香港科学技术大学物理系,香港)

摘要: 用分子束外延法在 GaAs 衬底上生长了 CdSe/Cd<sub>0.65</sub>Zn<sub>0.35</sub>Se 超晶格结构。利用 X 射线衍射(XRD) 77 K 下变密度激发的光致发光光谱和变温度光致发光光谱研究了 CdSe/CdZnSe 超晶格结构和激光复合特性,在该材料中观测到激子-激子散射发射峰,变密度激发光致发光光谱和变温度光致发光光谱证实了这一现象。激子发射峰的线宽随着温度的升高而展宽,低温时发光峰的宽度主要是由合金组分和阱垒起伏引起的,高温时激子线宽展宽是由于激子与纵光学声子和离化的施主杂质间的散射作用引起的,光致发光的强度随着温度的升高而降低,这主要是由激子的热离化造成的,也就是说,热激发使得电子或空穴由阱中跃迁至垒上。

关键词: 激子;超晶格;CdSe/CdZnSe

中图分类号: TN304 文献标识码: A

## 1 引 言

半导体量子阱和超晶格具有大的激子结合能、大的光学非线性和快的非线性响应速度,在光电子器件中具有广泛的应用,因而引起了许多科学家的极大兴趣。然而到目前为止,对 III-V 族化合物半导体异质结构的研究远比 II-VI 族化合物半导体结构广泛。实际上,II-VI 族化合物半导体材料的带隙覆盖紫外到远红外区域。而且 II-VI 族体材料中自由激子结合能也比 III-V 族材料的大,如在 II-VI 族中比较小结合能的 CdTe 中的激子结合能为 10 meV (ZnSe:20 meV, CdSe:15 meV),而在 GaAs 中为 4.2 meV。激子半径也比 III-V 族的小,CdTe 激子半径为 6 nm,ZnSe 中激子半径为 4 nm,而 GaAs 中为 16 nm。再加上量子阱和超晶格准二维结构使激子结合能增加 2~4 倍,以至于 II-VI 族量子阱和超晶格结构中的激子结合能大于纵光学(LO)声子能量,使此类材料的器件可能有效地在室温下工作。

CdTe/CdMnTe 多量子阱和超晶格结构已有一些报道<sup>[1-4]</sup>,但大部分研究集中在 Zn 的组分小于 0.2 范围。而对 CdSe/CdZnSe 多量子阱和超晶格结

构的研究较少。由于各类光电子器件的制备要求最好在室温工作,这就要求量子阱和超晶格的价带偏差和导带偏差都比较大,对 CdSe/CdZnSe 量子阱就要求有大的 Zn 组分。另一方面,半导体量子阱和超晶格材料制备的光电子器件的运行机制都是由激子性质决定的,因而深入研究量子阱和超晶格的激子传输和复合,了解量子阱和超晶格中激子运行机理,对半导体量子阱和超晶格光电子器件的设计及制备是非常重要的。本文报道了用分子束外延法在 GaAs 衬底上生长的大组分 Zn 的 CdSe/CdZnSe 超晶格结构,并利用 X 射线衍射(XRD)变温光致发光光谱和变密度激发的光致发光光谱研究了该量子阱结构和激子的复合特性及其激子的光学性质。

## 2 实验结果和讨论

### 2.1 CdSe/CdZnSe 超晶格结构

CdSe/CdZnSe 超晶格结构是用分子束外延(MBE)生长在 GaAs 衬底上,过渡层 CdZnSe 厚度为 1 μm,周期为 20。Zn 的组分为 0.35,势阱和势垒厚度均为 2.6 nm,覆盖层 CdZnSe 厚度为 70 nm。

CdSe/CdZnSe 超晶格的 X 射线衍射谱如图 1 所示,由图可以看到该量子阱和 GaAs 衬底的(400)衍射峰,超晶格的卫星峰出现了 -4、-3、-2、-1、0 阶衍射峰。大家知道,卫星峰出现数目的多少反映

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金、高等学校骨干教师资助计划基金资助课题。

了量子阱、超晶格组分的均匀性、界面的好坏以及各层厚度的一致性,对材料质量评估是重要的。对于如此大的组分、薄的势阱和势垒组成的超晶格出现了这么多峰,这表明我们的样品具有较高的质量。

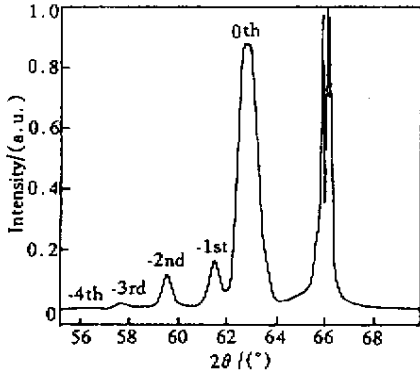


Fig.1 XRD spectrum of CdSe/CdZnSe superlattices

2.2 CdSe/CdZnSe 超晶格激子复合特性

在发光光谱测量中,是用 YAG:Nd 锁模激光器的三倍频激发的,激发波长为 355 nm,激光脉冲宽度为 35 ps,重复频率为 10 Hz,发射光用光栅光谱仪和光电倍增管接收,光电倍增管输出的微弱信号经 Boxcar 平均放大转化为数字信号,由计算机进行控制、数据记录和处理。

在 77 K 温度下 CdSe/CdZnSe 超晶格的变密度激发的发光光谱如图 2 所示,其中曲线 a 的激发密度为 0.16 MW/cm<sup>2</sup>、曲线 b 的激发密度为 0.32 MW/cm<sup>2</sup>、曲线 c 的激发密度为 0.4 MW/cm<sup>2</sup>、曲线 d 的激发密度为 0.8 MW/cm<sup>2</sup>。由曲线 a 可以看到,在 588 nm 和 661 nm 附近出现两个发光峰,由过渡层 CdZnSe 中 Zn 的组分和阱垒的厚度可知,588 nm 的发光峰 S 是由覆盖层和过渡层发光引起的,661 nm 的发光峰 F 是量子阱的自由激子产生

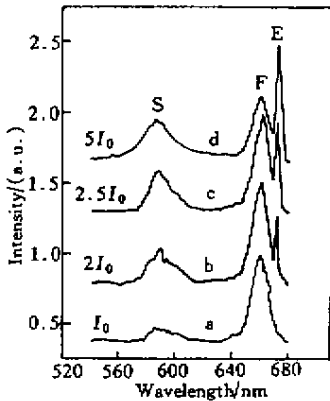


Fig.2 Photoluminescence spectra of CdSe/CdZnSe superlattices under diferent excitation power at 77 K

的。当激发密度增加时,在低能位置出现一个窄带发光峰 E,发光峰位置是 673 nm,随着激发密度增强,该发光峰迅速增加,而发光峰位置不变,如曲线 b、c、d 所示。一般地说,增强激发光强,杂质发光峰相对自由激子峰应减弱,这一性质说明了 674 nm 发光峰 E 不是杂质发光。发光峰 F 与 E 之间的间隔是 13 nm(34 mV),它与该量子阱的激子结合能相符合。以上特性与激子-激子散射<sup>[5,6]</sup>完全相同,我们认为在高密度激发下出现的新的发光峰 E 可能主要是由激子-激子散射所致。

为了研究 CdSe/CdZnSe 超晶格的激子复合特性,我们测量了 CdSe/CdZnSe 超晶格的变温度光致发光光谱,如图 3 所示。由图可以看出,随着温度升高,激子-激子散射引起的发光峰 E 比自由激子发光峰 F 减弱得快,直至消失。这是因为温度越高,激子越容易离化,激子密度越低,而激子-激子散射引起的发光与激子密度平方成正比,自由激子发光与激子密度成正比,所以随着温度升高发光峰 E 比发光峰 F 减弱得快。这一结果与发光峰 E 起源于激子-激子散射的结论相符合。由图还可以看出,随着温度升高,发光峰 S、F、E 红移和展宽,且发光强度减弱。低温时发光峰的宽度主要是由合金组分和阱垒起伏引起的,高温时激子线宽展宽是由于激子与杂质、声子散射引起的。在较低温度下,声学声子(LA)的散射作用主导着与温度有关的均匀展宽,但对线宽的贡献较小<sup>[7-10]</sup>。随着温度的升高,声子数迅速增多,纵光学波声子散射作用导致激子线型展宽。随温度升高,杂质离化与激子散射也导致线型展宽,即高温时晶格结构中的线形展宽主要是由于与温度有关的均匀展宽引起的。温度升高,发光强度减弱是由于垒对阱内电子限制作用减弱,使无

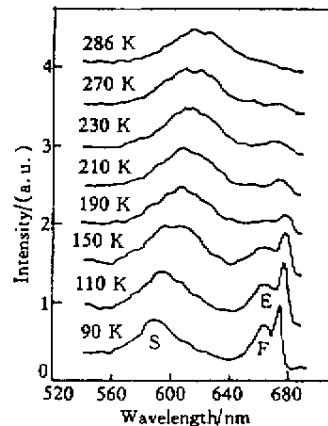


Fig.3 Photoluminescence spectra of CdSe/CdZnSe superlattices under diferent temperature

辐射复合增强而导致的热猝灭过程。较高温度下,载流子辐射复合和无辐射复合对量子阱和超晶格光电子器件是一个相当重要的物理过程,近来一般认为载流子的陷阱作用<sup>[11,12]</sup>以及热载流子热激发出势阱,并伴随着势垒中的无辐射复合<sup>[13~15]</sup>是量子阱和超晶格中辐射复合效率降低的两种主要机制。此样品的发光强度在低温下降低不很大,这也说明我们的样品中陷落在失配位错上的激子不可能是主要的发光猝灭机制。这种发光猝灭机制是材料的本征特性,与材料的质量无关。为了提高高温下的发光效率,必须阻止载流子热激发出势阱,提高限制能,即提高势垒的高度,对 CdSe/CdZnSe 超晶格结构而言,即增加 Zn 的组分,这也是我们研究高组分 Zn 的 CdSe/CdZnSe 超晶格结构的目所在。

结论 用分子束外延法在 GaAs 衬底上生长出高质量的大组分 Zn 的 CdSe/CdZnSe 超晶格结构,并利用 X 射线衍射(XRD)变温光致发光光谱和变密度激发的光致发光光谱研究了该量子阱结构和激子复合特性。在低密度激发下观测到两个峰,认为分别是由过渡层的发光和量子阱的自由激子发光产生的。当激发光强增加时,在低能位置出现一个新的窄带发光峰 E,随着激发光强增加,该发光峰迅速增加,而发光峰位置不变。发光峰 F 与 E 之间的间隔是 13 nm(34 mV),它与该量子阱的激子结合能相符合。我们认为,在高密度激发下出现的新的发光峰 E 主要是由激子-激子散射所致。随着温度的升高,激子-激子散射引起的发光峰 E 比自由激子发光峰 F 减弱得快是由于温度升高的激子密度减弱所致。随着温度升高,各个发光峰红移和展宽,低温时发光峰的宽度主要是由合金组分和阱垒起伏引起,高温时激子线宽展宽是由于激子与杂质、纵光学波声子散射引起的。温度升高,发光强度减弱是由于垒对阱内电子限制作用减弱,使无辐射复合增强而导致的热猝灭过程。

### 参考文献

[1] Zhang X C, Chang S K, Nurmikko A V. Time-resolved exciton recombination in CdTe/CdMnTe multiple quantum

- wells. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **47**(1):59~61
- [2] Polhmann A, Hellmann R, Gobel E O. exciton lifetimes in CdTe/CdMnTe single quantum wells. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(24):2929~2931
- [3] Oneill M. Exciton radiative decay and homogeneous broadening in CdTe/CdMnTe multiple quantum wells. *Phys. Rev. (B)*, 1993, **48**(12):8980~8985
- [4] Godlewski M. Low temperature mobility limiting defects in CdTe/CdMnTe multiple quantum well structures. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(17):2168~2170
- [5] Saito H, Sionoya S. Luminescence of high density exciton in CdS, CdSe and ZnSe in the 4.2~90 K temperature range. *J. Phys. Soc. Jpn.*, 1974, **37**(2):423~430
- [6] Catala L M, Cingolani A, Ferrarand M *et al.*. Stimulated photoluminescence of ZnSe. *Sol. Stat. Commun.*, 1982, **43**(5):371~373
- [7] Lee J, Koteles E S, Vassel M O. luminescence linewidths of excitons in GaAs quantum wells below 150 K. *Phys Rev.*, 1986, **B33**(8):5512~5516
- [8] Shen W Z, Tang W G, Shen S C. Absorption spectroscopy studies of strained InGaAs/GaAs single quantum wells. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(21):2728~2730
- [9] Shen W Z, Shen S C. Photoluminescence studies of strained CdTe/CdMnTe single quantum wells. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**(2):1178~1182
- [10] Ye Hai, Chen Yunliang, Li Ailian *et al.*. Raman spectra of  $Zn_{1-x}Cd_xSe/ZnSe$  superlattices grown by MBE. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 1995, **15**(6):693~696(in Chinese)
- [11] Pickin W, David J P. Carrier decay in GaAs quantum wells. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(3):268~270
- [12] Ding Y J, Guo C L, Li S *et al.*. Continuous-wave photoluminescence excitation spectra of multiple narrow-stepped quantum wells; Evidence for saturation of interface traps. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(2):154~156
- [13] Ding Y J, Guo C L, Li S *et al.*. Characterization of recombination processes in multiple narrow asymmetric coupled quantum wells based on the dependence of photoluminescence on laser intensity. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(17):2051~2053
- [14] Lambkin J D, Dunstan D J, Homewood K P *et al.*. Thermal quenching of the photoluminescence of In GaAs/GaAs and InGaAs/AlGaAs trained-layer quantum wells. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**(19):1986~1988
- [15] Michler P, Hanhleiter A, Moser M *et al.*. Influence of barrier height on carrier lifetime in  $Ga_{1-x}In_xP/(Al_xGa_{1-x})_{1-y}In_yP$ . *Phys. Rev.*, 1992, **B46**(11):7280~7286

## Exciton Optical Properties of CdSe/CdZnSe Superlattices

Zhang Xiqing Mei Zengxia Duan Ning Xu Zheng Wang Yongsheng Xu Xurong

( *Open Laboratory for Information Storage , Display and Materials , Institute of Optoelectronic Technology , Northern Jiaotong University , Beijing 100044* )

Tang Z K

( *Department of Physics , The Hong Kong University of Science and Technology , Hong Kong* )

( Received 18 October 2000 ; revised 11 December 2000 )

**Abstract :** CdSe/Cd<sub>0.65</sub>Zn<sub>0.35</sub>Se superlattices were grown by molecular beam epitaxy on substrate GaAs. The structure and exciton optical properties in high quality CdSe/CdZnSe superlattices are investigated by means of XRD spectra , photoluminescence spectra with different excitation power at 77 K and photoluminescence spectra with different temperature. The emission peak from exciton-exciton scattering is observed in CdSe/CdZnSe superlattices. It is validated by photoluminescence spectra with different excitation power and different temperature. The linewidth of the exciton emission becomes broader with increasing temperature. The linewidth at low temperature is due to the alloy composition and well thickness fluctuations , and the linewidth broadening at high temperature is contributed by the interactions among the exciton and LO phonons and ionized donor impurities. The photoluminescence intensities are reduced with increasing temperature , which is mainly due to the thermal dissociation of excitons , i. e. , the electrons or holes jump from the wells into the barriers by thermal excitations.

**Key words :** exciton ; superlattices ; CdSe/CdZnSe