

室温下 ZnCdSe-ZnSe 组合超晶格的子带跃迁*

于广辉 范希武 关郑平 张吉英 申德振 郑著宏

(中国科学院长春物理研究所, 长春 130021)

(中国科学院激发态物理开放研究实验室, 长春 130021)

胡德宝

(吉林大学电子科学系, 长春 130023)

摘要 通过在室温下对 ZnCdSe-ZnSe 组合超晶格结构的电调制反射谱的测量, 观测到分别来自两组超晶格的激子跃迁, 由曲线拟合出的跃迁能量与由包络函数近似计算得到的能量相符合.

关键词 ZnCdSe-ZnSe 组合超晶格, 电调制反射谱

1 引 言

近年来, 随着 ZnSe 基超晶格蓝绿波段半导体激光器室温连续工作的实现, 人们对 - 族半导体材料的研究十分活跃. ZnCdSe-ZnSe 超晶格和量子阱结构具有宽禁带和大的激子束缚能以及较小的晶格失配, 是很好的发光及电光材料, 因此研究它的激子性质, 特别是室温下的激子特性具有十分重要的意义^[1,2].

电场调制反射光谱(ER)^[3], 作为研究固体能带结构的有效手段, 它的光谱结构实质上是材料的介电函数的微商谱, 所以其无结构的光谱背景被有效抑制, 突出了临界点带间跃迁和相应的激子跃迁的贡献, 测量的结果具有良好的分辨率. 特别是将此技术应用在量子阱超晶格结构以后, 由于势阱中激子的准二维特性, 观测到的信号有时比体材料更强, 即使在室温下也能观察到其中的激子跃迁.

这里报道了对 ZnCdSe-ZnSe 组合超晶格的激子跃迁的电调制反射谱的研究, 在实验中观察到了分别来自两组超晶格的激子跃迁, 由公式拟合出的跃迁能量与用包络函数法计算出的结果相吻合.

2 实 验

ZnCdSe-ZnSe 超晶格样品采用低压 MOCVD 系统生长, 它由两组结构参数不同的超晶格结构, 我们称之为组合超晶格, 这主要是为以后作电光调制器件作准备. 样品生长在 n^+ 型 GaAs 的 (100) 面上, 以二甲基锌(DMZn)、二甲基镉(DMCd)和硒化氢(H_2Se) 分别作为锌源、镉源和硒源, 生长温度为350 , 整个生长过程均未故意掺杂. 我们先在 GaAs 衬底上生长 $1.5\mu m$ 厚的 ZnSe 缓冲层, 然后生长第一组 $Zn_{0.8}Cd_{0.2}Se-ZnSe$ 超晶格 30 周期(区), 它的阱宽为 9nm, 垒宽为 14.2nm, 接着生长一层 80nm 的 ZnSe 隔离层, 再生长第二组 $Zn_{0.84}Cd_{0.16}Se-ZnSe$ 超晶格(区), 它的阱宽和垒宽及周期数与 区相同, 最后生长一层 100nm 的 ZnSe 盖层. 由于两组超晶格的参数不同, 因此能级位置也不相

* 国家攀登计划项目, 国家自然科学基金重大基金, 国家自然科学基金

同,其能级结构见图1.

为了测量 ER 谱,在 GaAs 衬底上烧钢作欧姆接触,同时在 ZnSe 盖层上蒸发一层纯金半透膜作肖特基势垒.测量时在样品上加355Hz 的交流电压,同时将此电压送至锁相放大器作为参考信号;测量的光源为一150W 的卤素灯,经过44W 型光栅光谱仪分光后照射到样品上,其反射光用可冷却到 ~ 30 的 C31034型光电倍增管接收,然后将光电倍增管的交流输出送至锁相放大器,输出得到了调制反射信号 R/R ,整个测量过程均在室温下进行,测试框图见图2.

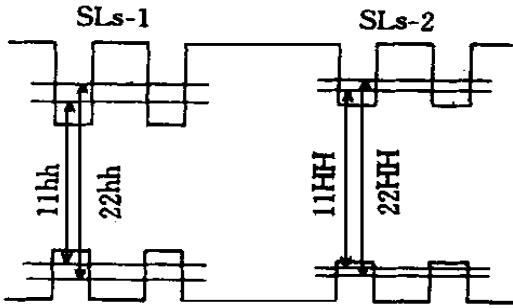


图1 ZnCdSe/ZnSe 组合超晶格能级结构简图

Fig. 1 Energy bands diagram of the ZnCdSe/ZnSe compound superlattices.

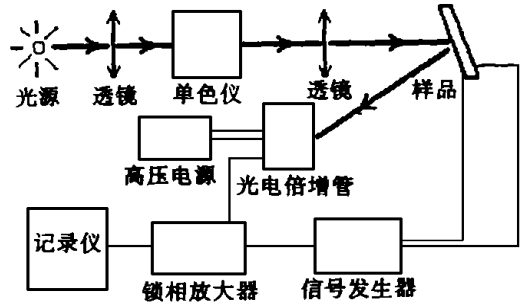


图2 ER 测试装置图

Fig. 2 Schematic of ER measurement equipment.

3 实验结果及讨论

图3中的离散点为实验测得的调制反射谱,图上方箭头所指为理论计算的能级位置,其中 $mnhh$ 为第一组超晶格中第 m 个电子子带到重空穴第 n 个子带的跃迁. $mnHH$ 中的 mn 对应于第二组超晶格的相应跃迁.由图可见,ER 谱中共包含了三个结构,分别标示为 $11hh$ 和 $11HH$ 、 $22HH$,下面将分别通过函数曲线拟合和由包络函数近似计算得到的能量加以确认.

3.1 曲线拟合

由于在测量中我们没有给样品施加直流偏压,且所用的样品外延层较厚,因此只存在内建电场,属于弱场范围,根据调制场理论^[3],采用下面的线形函数公式拟合低能部分的实验曲线:

$$\Delta R/R = \text{Re}[C e^{i\theta} (E - E_g + i\Gamma)^{-n}] \quad (1)$$

式中 C 和 θ 为随能量变化很慢的振幅和位相, E_g 代表临界点的能量, Γ 代表展宽参数, Re 代表取右边括号中函数的实部, n 反映临界点的类型,与体材料的调制机制不同,考虑样品为超晶格结构,且周期较长,电调制反射谱的线形主要由临界点能量的 Stark 移动的调制决定,因此线形为一阶微商线型^[4,5].为此取 $n=2$,计算得到的拟合曲线见图3中实线,拟合得到的数据见表1.另外,由于在长波长处的结构不太清晰,所以没有进行拟合,可能来源与杂质有关的吸收或者噪声.高能端的振荡来源于较厚的 ZnSe 层,近似于体材料的性质,它的调制谱属于三阶微商线型^[6],我们没有进行讨论和拟合.

3.2 能级的计算

为了明确实验中观察到的跃迁的性质, 我们在有效质量的近似下, 考虑了量子限制效应和应变的影响, 分别计算了两组超晶格的能级位置.

首先求出无应变时的 $Zn_{1-x}Cd_xSe$ 合金的禁带宽度 $E_{gw}^{[1]}$:

$$E_{gw} = E_{g\ CdSe} + (E_{g\ ZnSe} - E_{g\ CdSe} - b) + bx^2 \quad (2)$$

其中 $b = 0.301$ 为弯曲参量, $E_{g\ ZnSe}$ 和 $E_{g\ CdSe}$ 分别为 ZnSe 和 CdSe 两种体材料的禁带宽度.

室温下由于 ZnSe 和 CdSe 的晶格常数分别为 5.667\AA 和 6.021\AA , 因此 ZnCdSe 层在 $[001]$ 生长方向受到双轴应变压应力的作用, 引起晶格畸变, 导致原来二重简并的轻重空穴态分离, 应变引起的重空穴和轻空穴态的移动分别为^[7]:

$$\Delta E_{hh} = -2a\epsilon(c_{11} - c_{12})/c_{11} + b\epsilon(c_{11} + 2c_{12})/c_{11} \quad (3)$$

$$\Delta E_{lh} = -2a\epsilon(c_{11} - c_{12})/c_{11} - b\epsilon(c_{11} + 2c_{12})/c_{11} \quad (4)$$

式中 a 为价带的流体静压形变势, b 是剪切形变势, c_{11} 和 c_{12} 是弹性常数, ϵ 是应变张量元. 计算得到的轻重空穴移动 ΔE_{hh} 和 ΔE_{lh} 由表1给出.

由于量子限制效应引起的能级移动 e 由包络函数法计算:

$$\cos(kl) = \cos(k_w l_w) \cos(k_b l_b) - 1/2(x + 1/x) \sin(k_w l_w) \sin(k_b l_b) \quad (5)$$

其中 $l = l_w + l_b$, $x = (k_b m_w / k_w m_b)$, $hk_w = (2m_w e)^{1/2}$, $hk_b = [2m_b b(v - e)]^{1/2}$, l_w 和 l_b 分别为阱宽和垒宽, m_w 和 m_b 分别为阱中和垒中的有效质量, v 为限制能量, 计算中所用参数参考文献[8]. 在计算过程中有两个参量即导带偏移 Q_c 和激子束缚能对计算的结果影响很大, 因此它的选择很重要, 下面分别加以讨论.

对于 Q_c 在以前的工作中曾给出过一些结果^[9], 但差别很大, 根据 Vittorio^[9] 的分析, 在计算中选择了 $Q_c = 0.67$, 由(5)式可分别求出由于限制效应引起的电子和重空穴态的带偏移.

由于我们所用的超晶格结构阱宽较宽, 因此具有准二维特性, 根据^[10]中的计算结果, 通过简单的插值估算得到 Γ 区和 Γ 区中基态重空穴激子的束缚能 E_b 见表1.

综合应变和量子限制两种效应引起的能级移动, 加上无应变时的合金禁带宽度, 再减去激子束缚能, 即可求出最终的激子跃迁能级位置. 计算结果见表2.

比较计算得到的能级位置与由调整曲线拟合得到的能量, 发现两者基本相等, 其差异可能与样品的组分及厚度涨落有关, 由于轻空穴的限制能量较小, 因此未观测到与其相应的跃迁, 另外在室温下能够观测到 $n = 2$ 的子能级吸收, 也反映出调制光谱方法在分析精细结构时具有较高的分辨率.

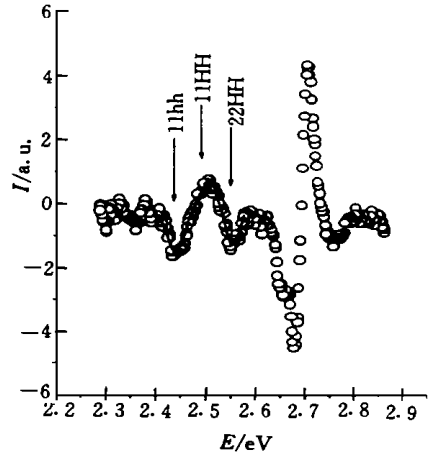


图3 ZnCdSe/ZnSe 组合超晶格 ER 谱及拟合曲线(实线)

Fig. 3 ER spectra of the ZnCdSe/ZnSe compound superlattices and its fitting curves (solid curve).

表1 计算得到的电学参数(所有数值单位均为 meV), 其中 E_{gw} 为合金体材料的禁带宽度, ΔE_{hh} 和 ΔE_{lh} 分别为由于应变引起的能量移动, V_e 、 V_{hh} 和 V_{lh} 分别为考虑了应变以后阱中电子、重空穴和轻空穴的限制能量, E_b 为重空穴激子束缚能.

Table 1 Electronic parameters calculated for the QW (all the values are in meV). ΔE_{hh} and ΔE_{lh} are the heavy- and light-hole band gaps of the well, V_e , V_{hh} and V_{lh} the confinement energies for the electron, heavy-hole and light-hole levels, and E_b the heavy-exciton binding energies.

内 容	E_{gm}	ΔE_{hh}	ΔE_{lh}	V_e	V_{hh}	V_{lh}	E_b
区 (Cd= .20)	2433.8	9.4	81.6	151.9	78.4	2.5	25
区 (Cd= .16)	2479.1	7.7	66.2	122.7	60.4	2.0	23

表2 调制光谱结果及采用包络函数近似计算得到的激子能级位置

Table 2 ER spectra results and the energy levels obtained by envelope function approximate.

	跃迁	计算能量 (meV)	调制光谱结果	
			E (meV)	Γ (meV)
区 (Cd= .20)	1 _{hh}	2442	2445	34
	2 _{2hh}	2509		
	3 _{3hh}	2630		
区 (Cd= .16)	1 _{hh}	2486	2491	26.5
	2 _{2hh}	2550	2554	35.1

4 结 论

通过在室温下对组合超晶格结构的电调制反射谱测量, 观察到分别来自两组超晶格的激子跃迁, 经曲线拟合得到的能量与采用包络函数近似计算得到的能量值相符.

参 考 文 献

- [1] Lozykowski H J, Shastri V K. J. Appl. Phys., 1991, **69**: 3235.
- [2] Tournie E, Morhain C, Leroux M *et al*, Appl. Phys. Lett., 1995, **67**: 103.
- [3] Aspnes D E, Froya A. Phys. Rev. B, 1970, **2**: 1037.
- [4] Tang Y S. Semi. Sci. Technol., 1989, **4**: 871.
- [5] Klipstein P C, Apsley N. J. Phys. C, 1986, **19**: 6461.
- [6] Aspnes D E. Phys. Rev. Lett., 1972, **28**: 168.
- [7] Asai H, Oe K. J. Appl. Phys., 1983, **54**: 2052.
- [8] Anedda A, Casu M B, Serpi A. J. Appl. Phys., 1996, **79**: 6995.
- [9] Vittorio Pellegrini, Alessandro Tredicucci, Fabio Beltram *et al*, J. Appl. Phys., 1996, **79**: 929.
- [10] Cingolani R, Prete P, Greco D *et al*, Phys. Rev. B, 1995, **51**: 5176.

SUBBAND TRANSITIONS IN ZnCdSe-ZnSe COMPOUND SUPPERLATTICES AT ROOM TEMPERATURE

Yu Guanghui Fan Xiwu Guan Zhengping

Zhang Jiying Shen Dezhen Zheng Zhuhong

(Changchun Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021)

(Laboratory of Excited State Processes, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021)

Hu Debao

(Department of Electronic Engineering, Jilin University, Changchun 130023)

Abstract

The transitions from two groups superlattices was observed, by measuring its electro-modulated reflectance spectra, the transition energies obtained by the curve fitting are coincide with the results obtained by calculating from envelope functuin approximate including strain.

Key words ZnCdSe-ZnSe compound superlattices, electro-modulated reflectance spectra