

ZnSe/BeTe II 型量子阱中界面结构 对发光特性的影响*

冀子武^{1)†} 郑雨军¹⁾ 徐现刚²⁾ 鲁云³⁾

1) (山东大学物理学院, 济南 250100)

2) (山东大学晶体材料国家重点实验室, 济南 250100)

3) (千叶大学大学院工学研究科, 千叶 263-8522, 日本)

(2010 年 2 月 9 日收到; 2010 年 2 月 22 日收到修改稿)

报道了具有特殊界面结构(界面包含三个 Zn—Te 或 Te—Zn 化学键)的非掺杂 ZnSe/BeTe II 型量子阱在低温(5—10 K)条件下的空间间接光致发光(PL)光谱的实验结果. PL 光谱显示了一个较弱的双峰结构和较低的线性偏振度,并且这两个峰的线性偏振度相反. 此外,这个 PL 光谱也强烈地依赖于一个外加电场的变化. 这些结果表明样品的两个发光峰是分别来自两个界面的发光跃迁,并且特殊界面结构降低了空间间接 PL 的发光效率和线性偏振性,以及界面附近的内秉电场. 随着激发强度的增加,PL 谱的高能端发光峰显示了一个快速的增长. 这个行为被解释为与该发光峰对应的异质界面两侧已形成电荷高密度,并导致了费米边异常(Fermi-energy edge singularity)效应的发生.

关键词: II 型量子阱, 光致发光, 界面结构

PACC: 6322, 7855, 7200

1. 引 言

ZnSe/BeTe II 型量子阱(quantum wells, QWs)作为一种新型的异质结构与传统的 I 型 QWs 结构相比具有许多优点^[1-6]. 它的导带(或价带)边所具有的较大的能量落差(offset)使得 ZnSe 层中受激产生的电子和孔穴很容易发生空间分离,并分别处在各自的势阱中(即电子被限制在原来的 ZnSe 层中,而孔穴则逃逸到相邻的 BeTe 层中). 电子和孔穴的波函数彼此向相邻层中渗透,并通过界面发生空间间接复合发光^[5-8]. 由于空间间接跃迁有一个较长的复合发光寿命,所以 ZnSe/BeTe II 型 QWs 结构非常适合观察二维激子的凝聚现象^[9,10].

目前,有关 ZnSe/BeTe II 型 QWs 结构中的空间直接发光和空间间接发光的研究已有一些报道^[5,6,8-14]. 对于前者,由于它的短发光寿命,人们

已经在实验上观察到了一个很强的复合发光^[5,6,11-13]. 而对于后者,由于它是通过界面的空间间接跃迁,发光寿命较长,因此被认为应该有一个较弱的发光. 然而,在低温条件下该空间间接跃迁却显示了一个非常强的复合发光,并且每个界面处的空间间接发光光谱都有一个较高的线性偏振度^[10,14,15]. 可以断定,这些空间间接发光的光学特性与界面结构状况密切相关. 换言之,界面处化学键的排列组合方式会极大地影响空间间接发光的光谱特性. 然而,迄今为止有关 ZnSe/BeTe II 型 QWs 发光特性的研究中,很少有涉及界面结构变化对 PL 光谱特性影响的报道. 为了解明界面结构对空间间接发光跃迁的影响机理,我们特意制作了与传统样品界面结构(即界面结构只含有一个 Zn—Te 或 Te—Zn)不同的具有特殊界面结构的 ZnSe/BeTe II 型 QWs(界面处含有三个 Zn—Te 或 Te—Zn 化学键),以探讨界面结构对空间间接发光特性的影响.

* 国家自然科学基金(批准号:10844003,10874101),山东省自然科学基金(批准号:Y2008A10),国家重点基础研究发展计划(批准号:2009CB930503)资助的课题.

† E-mail: jiziwu@gmail.com

2. 样品结构及实验方法

本实验所用的非掺杂样品 ZnSe/BeTe/ZnSe 是在日本国家产业技术综合研究所(AIST)用分子束外延(MBE)的方法,在(001)n-GaAs 衬底上生长而成的^[14,15]. 对称的有源层 ZnSe (28 ML)/BeTe (10 ML)/ZnSe (28 ML) QWs 结构被夹在两个 200 nm 厚的 Zn_{0.77}Mg_{0.15}Be_{0.08}Se 隔离层之间(这里, ML: monolayer, 单分子层). 有源层 ZnSe/BeTe/ZnSe 中的两个异质结界面被相应地选择形成一种 Zn—Te—Zn—Te(或 Te—Zn—Te—Zn)形式的三化学键结构,如图 1 所示. 有关本样品的其他结构参数与我们已经报道过的具有传统界面结构的样品相同,请参阅文献[14]和[15].

PL 光谱测量是在日本千叶大学的光物性·量子传导研究室完成的. 光谱测量使用了脉冲宽度为 100 fs, 重复频率为 76 MHz 的倍频锁模 Ti 蓝宝石激光器作为激发光源, 激发波长为 370 nm (3.35 eV). 上述各种光谱的测量均是在低温下进行的(5—10 K), 信号接收器为液态氮冷却的 Triax1024 型 CCD (1024 × 1024 阵列). 对于 PL 光谱的电场效果测量, 半透明的 NiCr 薄膜作为一个门电极 (gate electrical contact) 被真空蒸镀在样品的表面层. 将导电性衬底 n-GaAs 一侧接地, 而表面一侧分别施加正、负电压. 本实验施加电压范围为 +6 V 至 -11 V.

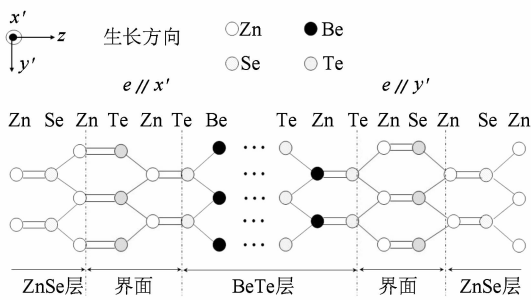


图1 ZnSe/BeTe/ZnSe 异质结构示意图

3. 实验结果与讨论

图 2 显示了样品在的 [110] 方向 (实线) 和 [110] 方向 (虚线) 的空间间接跃迁直线偏振 PL 光谱. 点线分别表示它们的拟合曲线. 三条短划

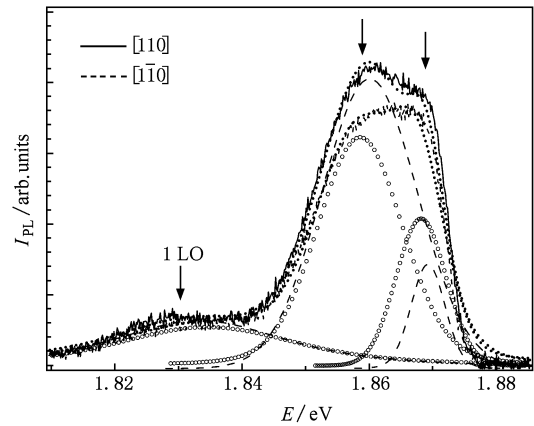


图2 样品在[110]方向(实线)和[110]方向(虚线)的空间间接直线偏振 PL 光谱(点线分别表示它们的拟合曲线. 三条短划

线表示[110]方向 PL 光谱中的分量, 而三条空心圆线则表示[110]方向 PL 光谱中的分量. 由图可见, 样品在[110]方向和[110]方向上的偏振 PL 谱都是由峰值能量处在约 1.859 eV 和 1.869 eV 的两个成分组成的. 换言之, 样品的总 PL 谱(即不使用线性偏振片的情况下所获得的 PL 谱)是由峰值能量处在约 1.859 eV 和 1.869 eV 的两个发光峰组成的(如图 2 中两个箭头所示), 每个发光峰都包含了[110] 方向和[110]方向的两种偏振成分. 由于这两个发光峰具有相反的线性偏振度 P_l , 因此被认为是分别来自两个界面的空间间接跃迁发光^[5,6,14]. 这里, P_l 被定义为

$$P_l = (I_{1\bar{1}0} - I_{110}) / (I_{1\bar{1}0} + I_{110}), \quad (1)$$

其中, $I_{1\bar{1}0}$ 和 I_{110} 分别为在[110]和[110]偏振方向上 PL 成分的强度^[14,15]. 我们也发现这两个发光峰的能量分离只有约 10 meV, 远小于传统界面结构样品的能量分离(约 30 meV)^[5,6,14]. 此外, 图 2 还显示了一个较弱的标有 1 LO 的峰, 这是来自主发光峰的声子伴线(LO-phonon replicas). ZnSe 的 LO 声子能量为 31 meV^[14,16].

我们曾经报道过传统界面结构样品(界面只有一个 Zn—Te 或 Te—Zn 化学键外, 其他外延层结构参数与当前样品相同)的 PL 光谱特性^[14,15]. 在以前的报道里, 被研究样品的 PL 光谱显示了一个很强的发光强度和很大的峰值分离, 同时分离的两个发光峰都具有很强的线性偏振. 然而对于当前的实验样品, PL 光谱仅显示了一个较弱的发光强度和较

小的峰值分离,同时在 $[1\bar{1}0]$ 和 $[110]$ 轴线方向上也显示了一个较小的直线偏振(如图2所示).对于上述差异,我们解释如下.由于本实验所用样品的异质界面包含了 Zn—Te—Zn—Te(或 Te—Zn—Te—Zn)形式的三化学键结构,使得处于界面两侧的电子和空穴波函数的相互渗透变得较为困难,交叠区域减小,因此导致空间间接发光效率明显变低.同时,在构成每个界面的三个化学键中,由于相邻化学键的排列方向互相垂直(如图1所示),这种排列的总体效果导致了空间间接 PL 的线偏振特性的显著下降.对于 PL 光谱中很小的峰值分离,我们认为这是起因于该样品结构内部较弱的内秉电场,这个内秉电场导致了有源层能带结构的倾斜(即斯塔克效应).与传统界面结构的样品相比^{[[5,6,14]},这个内秉电场变弱的原因,是由于该样品的三化学键界面结构加大了界面两侧蓄积电荷之间的距离,从而导致了内秉电场的降低.

为了证明上述内秉电场的存在,我们测量了该样品 PL 光谱对外加电场的依赖性.如图3所示,在一个正的电压范围内(+6—0 V),随着电压的降低峰值分离现象明显减小,当电压约为+1 V时两个发光峰几乎重合.然而当外加电压为零时,发光峰又发生分裂.随着增加负的外加电压(0—-11 V),这个分裂则进一步加强.显然,PL 光谱的这个变化行为是由外加电场所引起的斯塔克效应所致.即随着外加电压的变化,能带排列也相应地发生倾斜.因此,该样品中确实存在着内秉电场,并且它的电场方向应与样品表面施加负电压时的电场方向一致.

图4显示了样品的 PL 光谱随激发强度的依赖性.由图可见,随着激发强度的增强,PL 的强度也逐渐增加.但当激发强度超过约 $20I_0$ 时,发现处于 PL 谱高能端的发光峰呈现出急剧增加的趋势.这是由于该样品具有如图4中的插图所示的倾斜能带结构(即无外电场时的能带排列状态),当激发强度逐渐增加时,受激产生的电子和空穴更容易聚集在高端异质界面(即图4插图中右侧的异质界面)的两侧,因为对于电子和空穴来说,处于这个界面两侧时其能量更低.因此,相对于低能端异质界面,该高端界面两侧有更多的电荷聚集.同时,由于高端异质界面具有 Te—Zn—Te—Zn 形式的三化学键特殊结构,通过该界面的跃迁发光寿命要比具有传统界面结构(即界

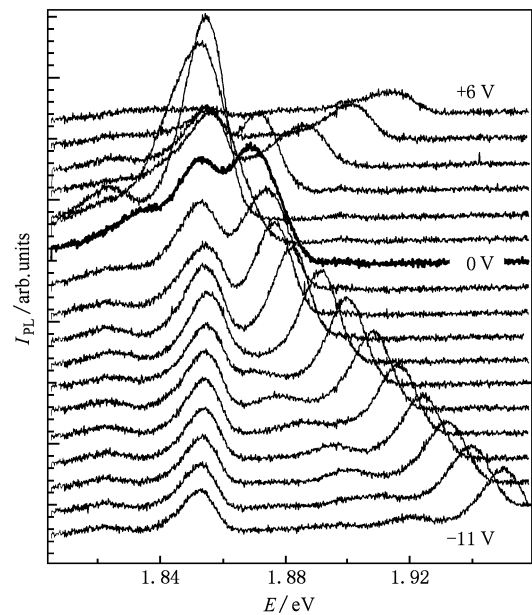


图3 样品的空间间接 PL 光谱对外加电压的依赖性(电压范围 +6 V—-11 V, $P = 38.2 \text{ W/cm}^2$, $T = 10 \text{ K}$)

面结构只含有一层 Zn—Te 或 Te—Zn) 的样品要长,因此,受激产生的载流子更容易达到高密度,并形成二维电子气.所以,当激发强度进一步增加时(即当激发强度 $P \geq 20I_0$ 时),很容易导致费米边异常(Fermi-energy edge singularity)效应的出现^[17].而传统界面结构的非掺杂样品则没有观察到这个现象^[5,6,14].这个费米边异常效应的出现被认为是导致高能端发光峰随激发强度的增加而急剧增强的重要原因.

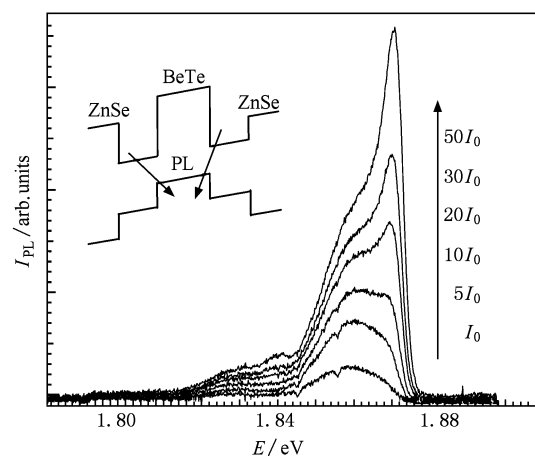


图4 空间间接 PL 光谱对激发强度的依赖性($I_0 = 1.27 \text{ W/cm}^2$, $T = 5 \text{ K}$. 插图为具有内秉电场的样品结构的能带示意图)

4. 结 论

本文研究了具有三化学键特殊界面结构的非掺杂 ZnSe/BeTe/ZnSe II 型 QWs 在低温条件下的发光特性. 与传统结构的样品相比, 该样品的 PL 光谱显示了一个较弱的发光强度和较小的峰值分离, 以及较低的线性偏振. 这些结果是由于三化学键界面

结构加宽了界面两侧载流子的空间距离, 从而导致了发光效率降低和内秉电场减小所致. 同时, 相互垂直的三化学键结构也削弱了 PL 的线偏振特性. 内秉电场的存在为外加电压实验测量所证实. 由内秉电场诱发的斯塔克效应, 使得处于高能端的异质界面两侧更容易积蓄受激产生的电荷而形成高密度, 并导致费米边异常效应的产生, 从而使发光效率显示一个急剧的增强.

-
- [1] Xing Y H, Han J, Liu J P, Deng J, Niu N H, Shen G D 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7295 (in Chinese) [邢艳辉、韩军、刘建平、邓军、牛南辉、沈光地 2007 物理学报 **56** 7295]
- [2] Ji Z W, Mino H, Oto K, Muro K, Akimoto R, Takeyama S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6609 (in Chinese) [冀子武、三野弘文、音贤一、室清文、秋本良一、嶽山正二郎 2008 物理学报 **57** 6609]
- [3] Waag A, Fisher F, Lugauer H J 1996 *J. Appl. Phys.* **80** 792
- [4] Yakovlev D R, Ivchenko E L 2000 *Phys. Rev. B* **61** 2421
- [5] Ji Z W, Lu Y, Chen J X, Mino H, Akimoto R, Takeyama S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1214 (in Chinese) [冀子武、鲁云、陈锦祥、三野弘文、秋本良一、嶽山正二郎 2008 物理学报 **57** 1214]
- [6] Ji Z W, Mino H, Kojima E, Akimoto R, Takeyama S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3260 (in Chinese) [冀子武、三野弘文、小映二、秋本良一、嶽山正二郎 2008 物理学报 **57** 3260]
- [7] Maksimov A A, Zaitsev S V, Tartakovskii I I, Kulakovskii V D, Gippius N A, Yakovlev D R, Ossau W, Euscher G, Waag A, Landwehr G 2000 *Phys. Status Solidi B* **221** 523
- [8] Zaitsev S V, Maksimov A A, Kulakovskii V D, Tartakovskii I I, Yakovlev D R, Ossau W, Hansen L, Landwehr G, Waag A 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 652
- [9] Butov L V, Filin A I 1998 *Phys. Rev. B* **58** 1980
- [10] Mino H, Fujikawa A, Akimoto R, Takeyama S 2004 *Physica E* **22** 640
- [11] Ji Z W, Takeyama S, Mino H, Oto K, Muro K, Akimoto R 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 093107
- [12] Ji Z W, Mino H, Oto K, Akimoto R 2009 *Semicond. Sci. Technol.* **24** 095016
- [13] Mino H, Ji Z W, Kano A, Oto K, Muro K, Akimoto R, Takeyama S 2006 *J. Phys: Conf. Seri.* **51** 399
- [14] Ji Z W, Mino H, Oto K, Akimoto R, Ono K, Takeyama S 2006 *Semicond. Sci. Technol.* **21** 87
- [15] Ji Z W, Yamamoto H, Mino H, Akimoto R, Takeyama S 2004 *Physica E* **22** 632
- [16] Yakovlev D R, Platonov A V, Ivchenko E L, Kochereshko V P, Sas C, Ossau W, Hansen L, Waag A, Landwehr G, Molenkamp L W 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 257401
- [17] Skolnick M S, Rorison J M, Nash K J, Mowbray D J, Tapster P R, Bass S J, Pitt A D 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2130

Interface structure effects on optical property of undoped ZnSe/BeTe type-II quantum wells *

Ji Zi-Wu^{1)†} Zheng Yu-Jun¹⁾ Xu Xian-Gang²⁾ Lu Yun³⁾

1) (*School of Physics, Shandong University, Jinan 250100, China*)

2) (*State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100, China*)

3) (*Graduate School and faculty of Engineering, Chiba University, Chiba 263-8522, Japan*)

(Received 9 February 2010; revised manuscript received 22 February 2010)

Abstract

The results are reported of the spatially indirect photoluminescence (PL) spectrum measurements performed on undoped ZnSe/BeTe type-II quantum wells with special interface structures at low temperatures (5—10 K). The PL spectra have two main peaks that show a weak PL intensity and a low linear polarization degree and that their linear polarizations are contrary to each other, And the PL spectra are strikingly dependent on an applied external electric field perpendicular to the layers. The results show that the special interface structures reduce spatially indirect radiative recombination efficiency and linear polarization degree, and that a weak built-in electric field exists in the heterostructure. With the increase of excitation intensity, the PL peak on high energy side shows a rapid increase. This is explained by the formation of high charge density on both sides of the high energy side interface.

Keywords: II quantum wells, photoluminescence, interface structures

PACC: 6322, 7855, 7200

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10844003, 10874101), the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant No. Y2008A10), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2009CB930503).

† E-mail: jiziwu@gmail.com