

超强磁场下非掺杂 ZnSe/BeTe II 型量子阱中激子和带电激子的光学特性*

冀子武^{1)†} 郑雨军¹⁾ 徐现刚²⁾

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)

(2009 年 11 月 14 日收到; 2010 年 7 月 25 日收到修改稿)

报道了液态氮温度 (4.2 K) 下非掺杂 ZnSe/BeTe II 型量子结构中 ZnSe 势阱层内空间直接光致发光 (PL) 光谱的磁场依赖性 (磁场高达 53 T). 实验结果显示, 随着磁场的增加, 激子和带电激子的 PL 强度呈现出相反的振动行为. 当激子的 PL 强度增加时带电激子的 PL 强度减小, 反之, 当激子的强度减小时带电激子的强度却增加. 并且在整个磁场范围内, 这些振动呈现近似等间隔的周期性变化. 这个行为被解释为费米能级与朗道能级的周期性共振, 这个共振导致了处于费米能级上的二维电子气态密度的周期性调制.

关键词: 光致发光, 二维电子气, 带电激子, II 型量子阱

PACS: 78.55.-m, 71.10.Ca, 71.35.Pq, 73.21.Fg, 78.20.Ls

1. 引言

近年来, 随着分子束外延 (MBE) 生长设备与技术的日益完善和成熟, 使得制作超低维、低晶格失配、低无意掺杂浓度的高质量化合物半导体异质结构成为可能^[1-3]. ZnSe/BeTe 作为一种新型的 II-VI 族异质结构已经显示了许多新的特性. 其 II 型能带结构和较大的导带 (或价带) 边能量落差 ΔE_{CB} (或 ΔE_{VB}), 使得势阱层 ZnSe 中受激产生的电子和空穴发生空间分离, 电子被限制在原来的 ZnSe 层内, 而空穴则逃逸到相邻的能量更低的 BeTe 层中^[3-8]. 这种空间分离所造成的 ZnSe 层中电子和空穴浓度的失衡, 使得我们即使在非掺杂的结构中也能在光致发光 (PL) 光谱中同时观察到激子 (X) 和带电激子 (X^-) 的存在^[9,10]. 因此, ZnSe/BeTe II 型量子阱 (QW) 是研究低维半导体中各种光学过程, 特别是高密度凝聚现象的理想结构.

在极限实验条件下测试、研究低维系统的各种光学行为, 是理解、掌握其内部动力学过程的重要

手段之一. 作为极限条件之一的超强磁场, 已经在研究 ZnSe/BeTe II 型 QW 等结构的光学特性中发挥了重要的作用^[4]. 如在超强磁场下, 通过回旋共振 (cyclotron-resonance) 测量已获得阱层 (ZnSe) 中电子的浓度、有效质量、散射时间及迁移率等重要信息; 而在空间间接 PL 测量中, 已观察到多体相互作用 (many-body interaction) 的新型行为等. 然而, 在超强磁场条件下, 对于 ZnSe/BeTe II 型 QW 结构中 X 和 X^- 共存的空间直接 PL 跃迁行为的研究, 据我们所知, 迄今为止还没有详细的报道. 解明 X 和 X^- 对强磁场的不同相应机制, 对于丰富凝聚态理论, 开发新型的光电器件 (如磁控开关、磁触发器件等) 都具有重要意义.

为了探明 ZnSe/BeTe II 型 QW 结构的空间直接 PL 跃迁的内部物理机理, 本文设计并制作了非掺杂、非对称的 ZnSe/BeTe/ZnSe II 型 QW 结构, 并测试了该结构在极低温 (4.2 K) 条件下 PL 光谱的磁场 (磁场高达 53 T) 依赖性. 我们发现了 PL 谱在 X 和 X^- 共存情况下的磁场变化行为, 并详细解释了 X 和 X^- 之间的内在关联和转换机理.

* 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

本研究所用的 ZnSe/BeTe/ZnSe 样品是作者在日本千叶大学留学期间于日本国家产业技术综合研究所(AIST)超高速光学器件研究室(UPDL)用分子束外延(MBE)的方法,在(001)GaAs衬底上生长而成的^[4,5]. 非对称非掺杂的 ZnSe (40 ML)/BeTe (10 ML)/ZnSe (28 ML) QW 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 (ML: monolayer, 单分子层). 有关本样品的生长过程和其他结构参数请参阅文献[3—5].

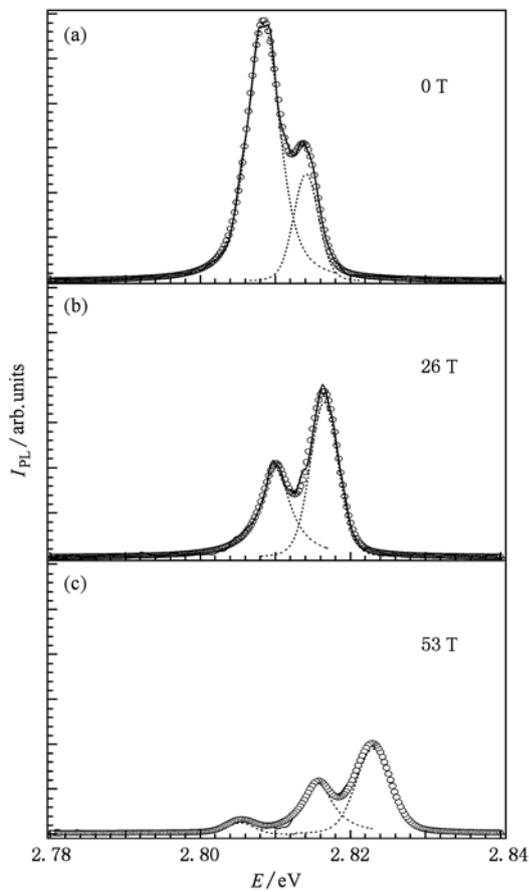


图1 不同磁场时的光谱(实线为实验结果,虚线分别表示 X 和 X⁻ 在光谱中的分量,空心圆表示它们的和)

上述样品的磁性 PL (magneto-PL) 测量是作者作为研究员在日本东京大学物性研究所国际超强磁场研究中心工作期间进行的. 所用的脉冲磁场 (高达 53 T) 是通过电容器放电产生的. 磁场的方向与量子阱的生长方向相同 (即, 法拉第配置). 一个连续波 (cw) He-Cd 激光器 (325 nm) 被用作激发光

源. 样品表面的激发密度为 $P = 10 \text{ W/cm}^2$. 上述光谱测量是在低温 (液态氮温度, 4.2 K) 下进行的. 信号检测使用了 ANDOR TECHNOLOGY 公司的 ICCD 探测器.

3. 实验结果与讨论

图 1 分别显示了连续变化磁场 (0—53 T) 中相应于 0, 26, 和 53 T 时样品结构中 ZnSe 层的空间直接 PL 谱的情形. 测量温度 $T = 4.2 \text{ K}$, 激发密度 $P = 10 \text{ W/cm}^2$. 在零磁场时 (如图 1(a) 所示), 峰值处在能量为 2.815 eV 的发光峰为 40 ML ZnSe 层的 X 跃迁, 而位于该发光峰的低能端约 6 meV 处的较强的发光峰为 X⁻ 的跃迁^[9,10]. 然而, 来自 20 ML ZnSe 层的跃迁却没有被观察到, 这是由于该层的厚度太窄所致^[9—12]. 为了调查 X 和 X⁻ 的发光强度和峰值能量随磁场的变化规律, 对整个磁场范围内的所有 PL 谱我们用双 Voigt 线型 (double voigt line-shape) 函数进行了反卷积^[10,13]. 图 1 显示了磁场强度为 0, 26 和 53 T 时的拟合结果. 其中, 实线表示实验结果, 虚线分别表示分离的 X 和 X⁻ 的发光峰, 而空心圆则代表它们的和. 图 2 显示了 X 和 X⁻ 的 PL 强度和峰值能量在整个磁场范围内 (0—53 T) 对磁场 B 的依赖性.

如图 2 所示, 当 B 大于约 12 T 时, X⁻ 的 PL 强度 I_{X^-} 和峰值能量 E_{X^-} 显示了一个明显的振动行为. 然而, 对于 X, 我们只观察到了其 PL 强度 I_X 的振动行为. 同时还发现, 在 X 和 X⁻ 的 PL 强度之间存在着一个明显的竞争行为. 即, 当 I_{X^-} 减小时 I_X 增加, 反之, 当 I_X 增加时 I_{X^-} 减小. 类似的振动行为在其他样品 (如对称结构的 ZnSe/BeTe/ZnSe II 型量子阱) 的实验测量中也已经被观察到. 上述振动行为被认为是与光生 (photo-excited) 空穴和处在费米能级上的电子有关. 在磁场存在的情况下, 二维电子气 (2DEG) 系统的费米面总是处在被电子占有的最高朗道能级 (Landau level) 上 (如图 3 所示). 根据公式 $N_L = eB/h$ (N_L 为每个朗道能级上的态密度, e 为电子的电量, h 为普朗克常数), 随着 B 的增加, 每个朗道能级上的态密度也增加. 因为激发强度是恒定的 ($P = 10 \text{ W/cm}^2$), 所以一般来说电子的浓度 (N_e) 应近似为常数. 基于上述分析, 随着 B 的增加, 当被电子占有的最高朗道能级变为全空时, 费米面就会移动到下一个较低的朗道能级上. 这

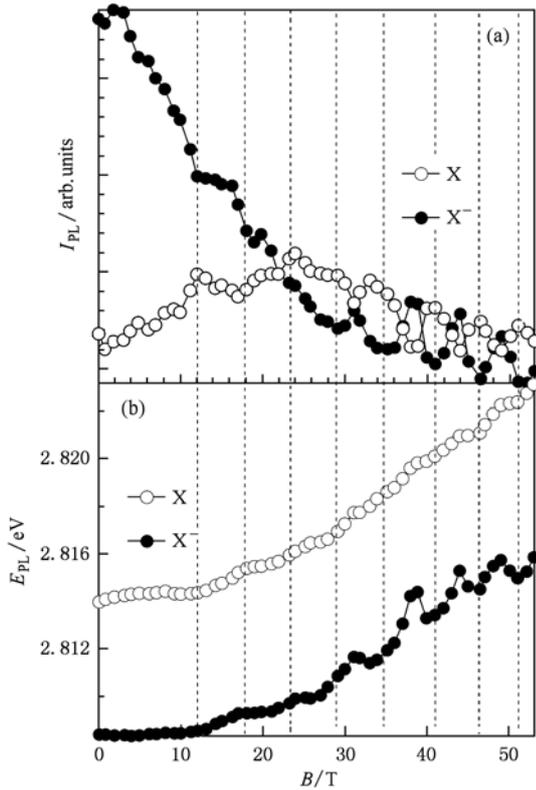


图2 X 和 X⁻ 的 PL 积分强度(a) 和峰值能量(b) 与磁场的关系 (竖直虚线显示了 I_{X⁻} 极小值和 I_X 极大值所处的磁场位置) (a) I_{PL}-B; (b) E_{PL}-B

样,朗道能级与费米面的周期性共振导致了 2DEG 系统态密度的周期性调制. 当 2DEG 的浓度增加时, I_{X⁻} 增加,同时,由于来自电子的屏蔽作用也相应增强,结果导致 I_X 减小,反之亦然. 因此,在连续变化的磁场中, I_{X⁻} 和 I_X 的上述竞争行为被认为是起因于由费米面与朗道能级周期性共振造成的 2DEG 浓度的周期性变化. E_{X⁻} 的振动主要是起因于 2DEG 系统费米面的起伏(如图 2(b) 所示).

我们也注意到,在整个磁场范围内,本实验所用样品以及其他相近样品都展示了一个类似的变化行为,即, I_{X⁻} 展示了一个显著的降低,同时 E_{X⁻} 和 E_X 则显示了一个非线性增加(如图 2(a) 所示). 前者是由磁场产生的有效限制(effective confinement)导致 X⁻ 的相干体积(coherence volume)减小造成的^[14],而后者则是起因于激子的反磁性位移(excitonic diamagnetic shift). 另外,我们还发现, I_{X⁻}, I_X 及 E_{X⁻} 的这些振动所产生的极大值(或极小值)对于 B 来说几乎是等间隔的(如图 2 中的竖直虚线所示). 综合其他样品的实验结果,我们发现这个振动间隔

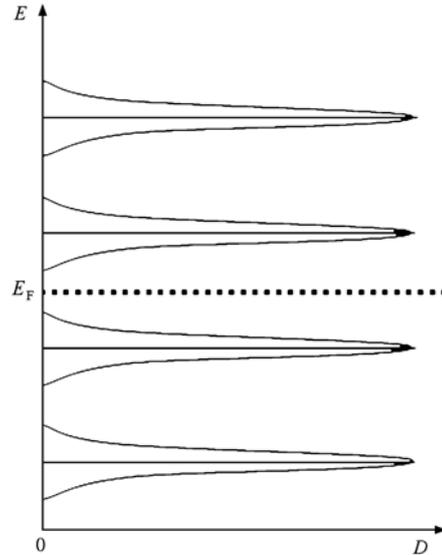


图3 朗道能级与态密度关系示意图. 其中, E, D 和 E_F 分别表示能量, 态密度和费米面

一般来说是非规则的,并与多种因素有关(如,样品结构,实验温度,激发强度等). 这个非规则的振动间隔反映了在磁场变化过程中,结构内的电子浓度并不是一个恒量,因此我们无法根据公式 $\nu = N_e h / eB$ 来求解填充因子 ν . 这可能是强磁场下的一个独特现象,即在连续变化的强磁场中,该结构中的电子浓度随磁场的变化有一定的起伏. 我们之前的有关该类结构的 II 型 PL 研究成果也支持这一观点^[15-17]. 这一点不同于其它的一些研究报告,如, Lemaître^[18], Yamashita^[19], Nomura^[20] 等人的研究报告. 因为这些报道所涉及的都是低磁场范围(一般小于 7 T,最大也不会超过 12 T)下的光学行为,在这种情况下,电子浓度可以被看作是一个常数,所以可以用公式 $\nu = N_e h / eB$ 来求解填充因子. 当然,要完全探明、解释该结构中的各种光学现象,还有待于进一步的理论和实验探讨.

4. 结 论

本文在极低温、超强磁场条件下调查了非对称、非掺杂 ZnSe/BeTe/ZnSe II 型 QW 结构的直接 PL 跃迁的光谱特性. 结果发现, X 和 X⁻ 共存的 PL 光谱在连续变化的磁场中展示了一个有趣的振荡行为:当 I_X 增强时 I_{X⁻} 则减小,反之,当 I_X 减小时 I_{X⁻} 则增强. 这个竞争行为被解释为起因于朗道能级与费米面的周期性共振,这个共振导致了 2DEG

浓度的周期性调制. 当 2DEG 浓度增加时, I_{x-} 增加, 同时 X 因受到来自电子的屏蔽增加而导致其强度 I_x 减小, 反之亦然. E_{x-} 的振动行为反映了费米面随变化磁场的起伏过程.

感谢日本千叶大学光物性量子传导研究室的各位老师
在数据处理、理论分析过程中所给予的大力支持和帮助.

- [1] Song Y X, Zhang W M, Liu J, Chu N N, Li S M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6471 (in Chinese) [宋迎新、郑卫民、刘静、初宁宁、李素梅 2009 物理学报 **58** 6471]
- [2] Cai C F, Wu H Z, Si J X, Sun Y, Dai N 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3560 (in Chinese) [蔡春锋、吴惠楨、斯剑霄、孙艳、戴宁 2009 物理学报 **58** 3560]
- [3] 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]
- [4] Ji Z W, Mino H, Oto K, Akimoto R, Ono K, Takeyama S 2006 *Semicond. Sci. Technol.* **21** 87
- [5] Ji Z W, Yamamoto H, Mino H, Akimoto R, Takeyama S 2004 *Physica E* **22** 632
- [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] 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]
- [8] Mino H, Fujikawa A, Akimoto R, Takeyama S 2004 *Physica E* **22** 640
- [9] Ji Z W, Takeyama S, Mino H, Oto K, Muro K, Akimoto R 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 093107
- [10] Ji Z W, Mino H, Oto K, Akimoto R 2009 *Semicond. Sci. Technol.* **24** 095016
- [11] Maksimov A. A, Tartakovskii I I, Yakovlev D R, Bayer M, Waag A 2006 *JETP Lett.* **83** 141
- [12] Haetty J, Lee E H, Luo H, Petrou A, Warnock J 1998 *Solid State Commun.* **108** 205
- [13] Manassen A, Cohen E, Ron Arza, Linder E, Pfeiffer L N 1996 *Phys. Rev. B* **54** 10609
- [14] Homburg O, Sebald K, Michler P, Gutowski J, Wenisch H, Hommel D 2000 *Phys. Rev. B* **62** 7413
- [15] Ji Z W, Enya Y, Mino H, Oto K, Muro K, Akimoto R, Takeyama S 2006 *J. Phys.: Conf. Seri.* **51** 427
- [16] Ji Z W, Mino H, Oto K, Akimoto R, Ono K, Takeyama S 2006 *Semicond. Sci. Technol.* **21** 87
- [17] Enyal Y H 2007 Graduate School of Engineering Faculty of Engineering, the University of Tokyo Master Paper p116 (in Chinese) [塩谷陽平 2007 东京大学大学院工学系研究科物理工学专攻硕士论文 p116]
- [18] Lemaître A, Testelin C, Rigaux C, Wojtowicz T, Karczewski G 2000 *Phys. Rev. B* **62** 5059
- [19] Yamashita K, Kita T, Matsuura Y, Wada O, Geng C, Scholz F, Schweizer H, Oe K 2002 *Phys. Rev. B* **66** 195317
- [20] Nomura S, Nakanishi T, Aoyagi Y 2001 *Phys. Rev. B* **63** 165330

Optical properties of exciton and charged exciton in undoped ZnSe/BeTe type-II quantum wells under high magnetic fields*

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

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

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

(Received 14 November 2009; revised manuscript received 25 July 2010)

Abstract

We report on the magnetic field (up to 53 T) dependence of photoluminescence (PL) spectra occurring as a spacially direct optical transition of the ZnSe layer in undoped ZnSe/BeTe/ZnSe type-II quantum structures at a low temperature (4.2 K). With magnetic field increasing, the PL intensity (I_X) of exciton (X) shows an oscillation feature opposite to the PL intensity (I_{X^-}) of charged exciton (X^-). As I_{X^-} increases, I_X decreases, but as I_{X^-} decreases, I_X increases. In all fields, the oscillation behaviour shows a periodic change approximately with magnetic field interval. The results are attributed to the periodic resonance of the Fermi level with the Landau level, which results in the modulation of the density of states of the 2DEG system at the Fermi energy.

Keywords: luminescence, two-dimensional electron gas, charged exciton, type-II quantum well

PACS: 78.55.-m, 71.10.Ca, 71.35.Pq, 73.21.Fg, 78.20.Ls

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 1084403, 10874101), the Shandong Natural Science Foundation of China (Grant No. Y2008A10), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2009CB30503).

† E-mail: jiziwu@gmail.com