

# 掺杂 ZnSe/BeTe II 型量子阱结构中带电激子的 的磁场效应\*

冀子武<sup>1)†</sup> 三野弘文<sup>3)</sup> 音贤<sup>-3)</sup> 室清文<sup>3)</sup> 秋本良一<sup>4)</sup> 山正二郎<sup>2)</sup>

1) 山东大学物理学院, 济南 250100)

2) 东京大学物性研究所, 柏 277-8581)

3) 千叶大学大学院理学部, 千叶 263-8522)

4) 产业技术综合研究所超高速光学器件研究实验室, 茨城 305-8568)

(2007 年 12 月 16 日收到, 2008 年 1 月 4 日收到修改稿)

报道了 n 型掺杂 ZnSe/BeTe/ZnSe II 型量子阱 (type-II QW) 在极低温 (5—10 K) 条件下的各种光学性质. 磁场中 (Farada 配置) ZnSe 层的反射光谱展示了一个典型的负的带电激子 ( $X^-$ ) 的跃迁特征. 对于空间间接光致发光 (spacially indirect PL) 光谱, 它的主发光峰显示了一个反玻尔兹曼分布的非对称性, 并且在磁场中 (Voigt 配置) 它的峰值能量随磁场的增加而降低. 这些实验结果显示了该掺杂样品的空间间接 PL 是来自 II 型 QW 结构所特有的带电激子的跃迁.

关键词: 光致发光, 二维电子气, 带电激子, II 型量子阱

PACC: 7855, 7320D, 7135, 6322

## 1. 引 言

一般来说, 激子在半导体复合发光 (recombination PL) 跃迁中是起支配作用的. 一个中性激子 ( $X_0$ ) 是由一个空穴和一个电子通过库仑力相互作用而形成的. 如果这个激子再俘获另外一个电子, 我们就得到了一个带电激子 ( $X^-$ , 或称 trion). 由于结合能 (binding energy) 增加, 使得这个带电激子比中性激子变得更加稳定. 半导体中带电激子的存在最初是由 Lampert 于 1958 年预言的<sup>[1]</sup>. 然而直到 1990 年初期才在有关半导体量子阱 (QW) 的实验中观察到<sup>[2]</sup>. 带电激子这个概念很快便引起了人们浓厚的兴趣, 并且成为理解低维半导体中各种光学过程的重要课题<sup>[3,4]</sup>.

近来随着高质量 ZnSe/BeTe II-VI 族异质结构制备的实现, 这个量子阱构造已经吸引了一些研究者极大的关注. 与 III-V 族 (如 GaAs) 相比, 这个 ZnSe/BeTe 结构有更强的共价结合, 且具有 II 型能带结构和很大的势垒 (对电子和空穴的势垒分别约为 2 和

1 eV), 及界面处很好的晶格匹配等一系列优点<sup>[5-7]</sup>. 这些结构特点, 使得 ZnSe/BeTe QW 结构更适合于由激子-电子相互作用而导致的各种现象的光学研究<sup>[8]</sup>. 然而, 很少有关于这种结构中带电激子的研究, 尤其是对于受激产生的电子和空穴经过空间分离 (即, 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) 后, 所发生的空间间接 (spacially indirect) 复合发光的物理机理, 迄今为止还没有报道.

磁场方法是研究量子结构光学性质的主要手段之一. 为了调查带电激子跃迁的可能性, 本文对 n 型掺杂的 ZnSe/BeTe/ZnSe II 型 QW 进行了空间直接 (ZnSe 层, I 型) 磁性反射光谱, 空间间接 (II 型) 光致发光 (PL) 光谱, 以及该 PL 光谱随面内磁场 (in-plane magnetic field, 即 Voigt 配置) 变化特性的测量. 反射光谱显示了带电激子的存在. PL 光谱呈现了一个反玻尔兹曼分布的非对称性, 并且在面内磁场中它的跃迁能量随磁场的增加而减小. 以上实验结果表明这个空间间接 PL 光谱可能是来自层间带电激子的跃迁. 磁场中它的能量变化被解释为面内磁

\* 国家自然科学基金 (批准号: 10844003) 资助的课题.

† E-mail: jiziwu@gmail.com

场导致这个层间带电激子在动量空间中的分布发生了位移.

## 2. 样品结构及实验方法

本实验所用的 n 型掺杂 ZnSe/BeTe/ZnSe 样品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) GaAs 衬底上生长而成的<sup>[5-7]</sup>. 对称的 ZnSe (28 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). 两个掺杂层 (ZnCl<sub>2</sub>) 被对称地生长在距阱层 (ZnSe 层) 10 nm 处的隔离层  $Zn_{0.77}Mg_{0.15}Be_{0.08}Se$  中, 掺杂层厚度均为 3 nm. 另外, 为了得到质量较高的异质界面并提高空间间接发光效率, 活性层 ZnSe/BeTe/ZnSe 中的两个异质界面被相应地选择形成一种 Zn—Te 或 Te—Zn 化学键结构<sup>[5-7]</sup>. 这种界面结构还可被用来表征界面处所发生的空间间接 PL 的面内各向异性. 最后, 在样品表面生长了 0.7 nm 厚的 Zn 保护层, 以保护样品不受腐蚀.

在空间直接磁性反射光谱测量中, 我们使用了氙光源, 磁场采用了 Faraday 配置. 而在空间间接 PL 光谱测量中, 则使用了脉冲宽度为 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), 磁场为 Voigt 配置, 即磁场方向平行于异质界面并与入射光方向垂直. 上述各种光谱的测量均是在低温 (液态氮温度) 下进行的. 信号检测使用了液态氮冷却的 CCD 阵列.

## 3. 实验结果与讨论

图 1 显示了样品在磁场中的右旋 ( $\sigma^+$ ) 和左旋 ( $\sigma^-$ ) 圆偏振反射光谱. 由图可见, 在重空激子反射峰低能侧的大约 5.5 meV 处出现了一个肩形峰. 随着磁场的增加, 这个肩形峰在  $\sigma^-$  偏振光谱中变得逐渐增强, 但在  $\sigma^+$  偏振光谱中逐渐消失. 这个肩形峰显示了具有一重自旋组态 (a singlet spin configuration) 的带电激子 ( $X^-$ ) 的典型特征. 结合以前的实验结果, 即在所有掺杂样品的吸收或反射光谱中我们都观察到了类似的肩形峰结构, 而没有掺杂的样品却没有显示这种结构<sup>[5,6]</sup>. 这显示了在掺杂样品的阱层 (ZnSe 层) 中已经形成了二维电子气 (2DEG), 并导致了空间直接跃迁中带电激子的形成.

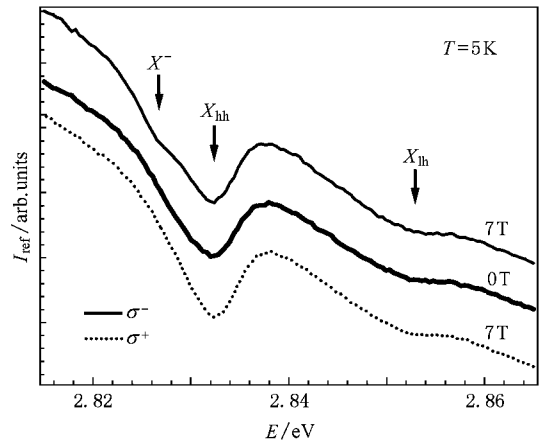


图 1 样品的反射光谱对磁场 (法拉第配置) 的依赖性 (实线为  $\sigma^-$  偏振光谱, 虚线为  $\sigma^+$  偏振光谱,  $T = 5$  K)

对于这个已经形成了二维电子气的掺杂样品, 我们也进行了空间间接发光 PL 的测量. 图 2 显示了该样品在温度为 5 K 时的 PL 光谱. 由图可见, 在这个 PL 光谱里, 在 1.88 eV 的能量位置上显示了一个具有反玻尔兹曼分布的非对称的主发光峰, 因而它具有带电激子型跃迁 (作为基态, 有一个 K-分布) 的典型特征<sup>[9,10]</sup>. 我们曾证明过, 掺杂样品中这个唯一的主发光峰是由掺杂电子 (或者说掺杂电子在 ZnSe 层中形成的二维电子气) 通过屏蔽该结构中的内秉电场而形成的<sup>[5-7]</sup>. 关于这些掺杂电子能够屏蔽内秉电场的物理机理, 根据最近的研究结果表明, 可能是起因于掺杂电子的隧道效应<sup>[11]</sup>. 这个隧道效应导致了两个阱层 (ZnSe 层) 中电子浓度的不同, 形成了类似于极板电容间那样的电场, 从而抵消了该量子结构中的内秉电场. 以上实验结果表明, 这个掺杂样品的空间间接 PL 光谱可能是来自带电激子的复合跃迁. 关于这方面的详细论证, 我们将在后续部分进行.

图 3 显示了该样品在温度为 10 K 下的 PL 光谱对面内磁场的依赖性. 入射光强度为  $P = 1$  W/cm<sup>2</sup>. 由图可见, 随着面内磁场的增加, PL 的峰值能量和强度都显示了降低的趋势. 这个实验结果与 Butov 等人<sup>[12]</sup>有关有限磁场下准二维量子阱中激子行为的报道结果刚好相反. 我们知道, 能够复合发光的激子状态是被限制在一个被称为辐射区 (radiative zone) 的范围内, 而这个辐射区范围则是以  $P = 0$  为顶点, 以纵轴为中心的光子锥形体 (photon cone) 决定的 (如图 4 中的两条虚直线所示). 因此, 当这个次能带 (subband) 的反磁性位移 (diamagnetic shift) 非

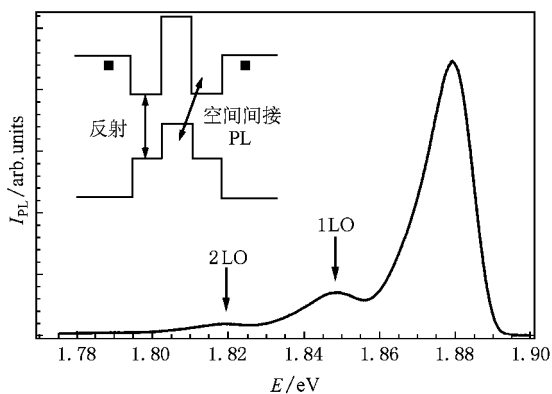


图 2 样品的空间间接 PL 光谱(插图为样品的能带示意图)

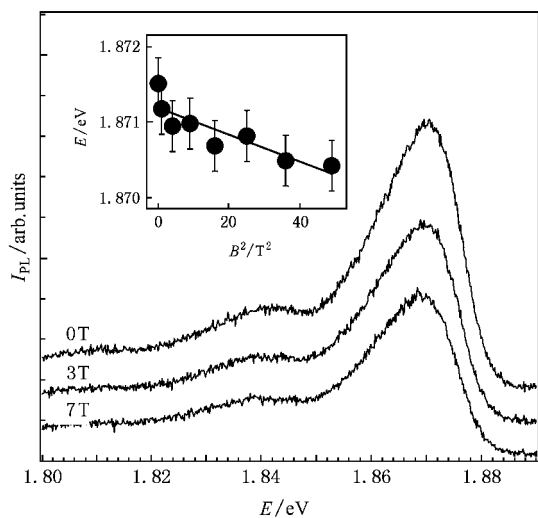


图 3 样品的 PL 光谱对面向内磁场的依赖性(插图显示了 PL 主发光峰能量对面向内磁场  $B^2$  的依赖关系)

常小并且作为一级近似可以忽略的时候,面内磁场中这个阱间激子(interwell exciton)PL 能量应当增加  $E_{p=0} = P_B^2/2M = e^2 d^2 B^2/M_c$  [12]。因此,Butov 等人如实地反映了相应结构中阱间激子的磁场行为。图 4 显示了这个阱间激子在零磁场和有限磁场( $B$ )中的分布示意图。实验里得到了一个与此相反的结果,这是因为在我们的掺杂 ZnSe/BeTe/ZnSe II 型结构中,这个主发光峰可能是来自带电激子的贡献。

对于我们的样品,如果有一个组合为如图 5(a) 所示的带电激子,那么它在面内磁场中将有一个与激子不同的跃迁机理,即从理论上讲,它在整个范围内都可以跃迁发光。这个阱间带电激子在零磁场和有限磁场( $B$ )中的分布被分别显示在图 5(b)中。如图所示,当磁场从零增加到  $B$  时,带电激子在动量空间中的分布将有一个正比于  $dB$  的位移量,其中

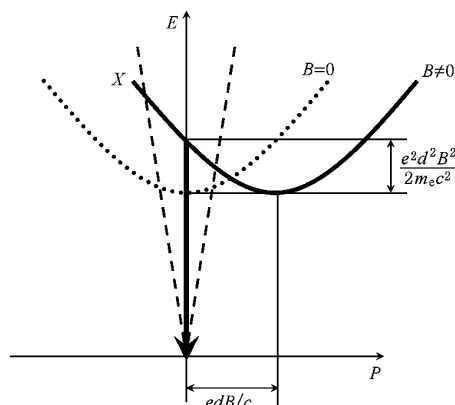


图 4 阱间激子(interwell exciton)在零磁场(虚曲线)和有限磁场( $B$ 实曲线)中的分布(dispersion)示意图。由两条虚直线围成的锥形空间(即光子锥形体,photon cone)为激子的辐射区(radiative zone)。

$d$  为空穴与电子之间在晶体生长方向上的平均距离。这个位移导致了发光峰能量在面内磁场中有一个正比于  $d^2 B^2$  的减小(如图 5(a)中粗体的虚线箭头和实线箭头所示)。这个理论分析结果与我们的实验结果有一个很好的定性一致。并且最近我们也在实验上观察到该样品空间间接 PL 同其他掺杂样品一样,在强磁场(法拉第配置,高达 50T)中展示

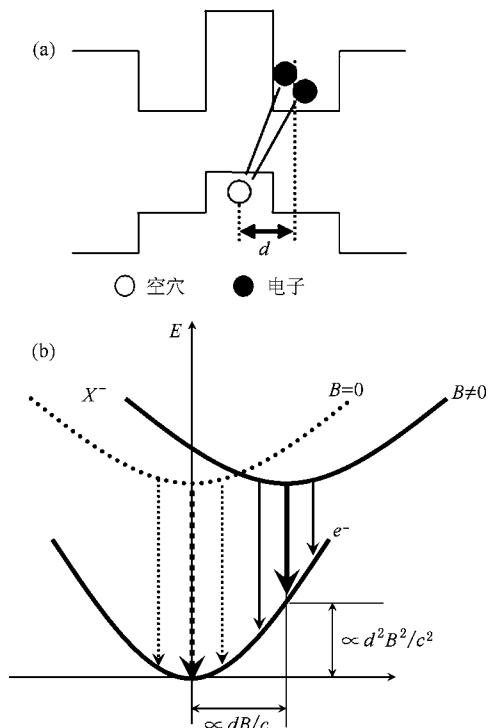


图 5 (a) ZnSe/BeTe/ZnSe II 型量子阱构造中带电激子的结构示意图 (b) 该阱间带电激子在零磁场(虚曲线)和有限磁场( $B$ 实曲线)中的分布(dispersion)示意图

了一个光学 SdH (Shubinkov-de Hass) 振荡<sup>[6]</sup>. 基于以上实验结果我们可以断定, 图 2 中的 PL 主发光峰可能是来自具有图 5(a) 结构的带电激子的跃迁.

## 4. 结 论

为了探明 n 型掺杂 ZnSe/BeTe/ZnSe II 型量子阱空间间接发光的起源, 本文分别测量了空间直接磁

性反射光谱(I 型跃迁, Faraday 配置), 空间间接 PL 光谱及它的面内磁场依赖性(II 型跃迁, Voigt 配置). 反射光谱中带电激子的出现, 反映了阱层中已经形成二维电子气. PL 光谱的反玻尔兹曼分布的线型特征, 以及它的面内磁场依赖性都表明了这个空间间接 PL 光谱主要是来自这个 II 型量子阱所特有的新型带电激子的跃迁.

- 
- [ 1 ] Lampert M A 1958 *Phys. Rev. Lett.* **1** 450
- [ 2 ] Kheng K, Cox R T, Merle d'Aubigne Y, Franck B, Saminadayar K, Tatarenko S 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 1752
- [ 3 ] Finkelstein G, Bar-Joseph I 1995 *Nuovo Cim- ento II* **17D** 1239
- [ 4 ] Cox R T, Huard V 1998 *Acta Phys. Pol. A* **94** 99
- [ 5 ] Ji Z W, Yamamoto H, Mino H, Akimoto R, Takeyama S 2004 *Physic E* **22** 632
- [ 6 ] 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、山正二郎 2008 物理学报 **57** 1214]
- [ 7 ] 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、山正二郎 2008 物理学报 **57** 3260]
- [ 8 ] Nagelstraßer M, Dröge H, Fischer F, Litz T, Waag A, Landwehr G, Steinrück H-P 1998 *J. Cryst. Growth.* **184** 173
- [ 9 ] 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
- [ 10 ] Sanvitto D, Hogg R A, Shields A J, Whittaker D M, Simmons M Y, Ritchie D A, Pepper M 2000 *Phys. Rev. B* **62** 13294
- [ 11 ] Lunz U, Keim M, Reuscher G, Fischer F, Schüll K, Waag A, Landwehr G 1996 *J. Appl. Phys.* **80** 6329
- [ 12 ] Butov L V, Lai C W, Chemla D S, Lozovik Yu E, Campman K L, Gossard A C 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 216804-1

# Magnetic field effect of charged excitons in n-doped ZnSe/BeTe type-II quantum wells<sup>\*</sup>

Ji Zi-Wu<sup>1,2)</sup> Mino Hirofumi<sup>3)</sup> Oto Kenichi<sup>3)</sup> Muro Kiyofumi<sup>3)</sup> Akimoto Ryoichi<sup>4)</sup> Takeyama Shojiro<sup>2)</sup>

<sup>1</sup> *School of Physics, Shandong University, Jinan 250100, China*

<sup>2</sup> *Institute for Solid State Physics, University of Tokyo, Kashiwa 277-8581, Japan*

<sup>3</sup> *Graduate School of Science and Faculty of Science, Chiba University, Chiba 263-8522, Japan*

<sup>4</sup> *AIST, Ultrafast Photonic Devices Laboratory, Ibaraki 305-8568, Japan*

(Received 4 December 2007; revised manuscript received 28 February 2008)

## Abstract

We report results of the reflection (type-I, in ZnSe layer) and photoluminescence (PL) spectra (type-II) measurements performed on n-doped ZnSe/BeTe/ZnSe type-II quantum well structures at low temperature (5–10 K). The reflection spectra show a typical charged exciton ( $X^-$ ) feature. The PL spectra show an asymmetry of the peak, which is a characteristic feature for a charged exciton type transition. The dependence of the PL peak energy on the in-plane magnetic field is considered to be due to the magnetic-field-induced displacement of interlayer negatively charged exciton dispersion in momentum space.

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

**PACC:** 7855, 7320D, 7135, 6322

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10844003).

<sup>†</sup> E-mail: jiziwu@gmail.com