

(CdZnTe , ZnSeTe)/ZnTe 复合量子阱中激子隧穿过程^{*}

金 华^{1)†} 刘 舒¹⁾ 张振中²⁾ 张立功²⁾ 郑著宏²⁾ 申德振²⁾

1) 中国人民公安大学安全防范系, 北京 102416)

2) 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激发态物理重点实验室, 长春 130033)

(2008 年 1 月 5 日收到, 2008 年 2 月 2 日收到修改稿)

设计了 (CdZnTe , ZnSeTe)/ZnTe 复合量子阱结构, 并用吸收光谱、室温光致发光光谱和飞秒脉冲抽运-探测方法研究了该复合结构中的激子隧穿过程. 分别测量了该结构中 CdZnTe/ZnTe 量子阱层和 ZnSeTe/ZnTe 量子阱层中激子衰减时间. 观察到从 CdZnTe/ZnTe 量子阱层向 ZnSeTe/ZnTe 量子阱层的快速激子隧穿, 隧穿时间为 5.5 ps.

关键词: (CdZnTe , ZnSeTe)/ZnTe 复合量子阱, 激子, 隧穿, 抽运-探测

PACC: 7865K, 7135, 7340G, 7847

1. 引 言

量子隧穿过程在半导体物理基础理论和光电子器件应用方面有重要的研究价值^[1-5]. 宽带 II-VI 族半导体材料具有大的激子束缚能, 激子效应显著增强, 成为研究激子隧穿过程的理想材料体系. 近年来, 半导体异质结构中隧穿过程的研究主要围绕非对称双量子阱体系展开^[6,7]. 在非对称双量子阱的研究中, 人们利用非对称特性使相邻阱中的电子(空穴)能级彼此错开, 隧穿效应使激子在短时间内由窄阱单向的隧穿到相邻宽阱中^[8-11], 缩短窄阱中激子寿命, 为快速光开关器件的设计提供了基础. 但是非对称量子阱系统有一个不可避免的缺陷: 在外来光子激发窄阱的同时, 宽阱中的载流子也会受到激发, 导致宽阱的相关能态先被占据, 这不仅削弱了隧穿的作用, 降低窄阱的激子衰减速度, 而且会影响到窄阱的光学非线性的大小. 为此, 我们引入了 ZnSeTe/ZnTe II 型量子阱, 用 ZnSeTe/ZnTe II 型量子阱代替双阱结构中的宽阱, 设计了 (CdZnTe , ZnSeTe)/ZnTe 复合量子阱结构. 其中 ZnSeTe/ZnTe 阱为 II 型异质结, ZnSeTe 阱 $n=1$ 的电子能级低于 CdZnTe 阱 $n=1$ 的电子能级, 但其 $n=1$ 的激子吸收能量要高于 CdZnTe, 因此既可以接受 CdZnTe/ZnTe 量子阱中隧穿过来的激子, 又不影响 CdZnTe 量子阱光学非线性

的大小, 从而加快 CdZnTe/ZnTe 阱中激子的衰减, 提高 (CdZnTe , ZnSeTe)/ZnTe 复合量子阱光开关的关断速度.

在本文中, 我们采用吸收光谱、室温光致发光光谱和飞秒脉冲抽运-探测技术研究了 (CdZnTe , ZnSeTe)/ZnTe 复合量子阱结构中的激子隧穿过程, 观察到从 CdZnTe/ZnTe 量子阱向 ZnSeTe/ZnTe 量子阱的快速激子隧穿过程, 并对实验结果进行了拟合.

2. 实 验

(CdZnTe , ZnSeTe)/ZnTe 复合量子阱是用 MOCVD 方法生长在 GaAs(100) 衬底上, 其结构为, GaAs 衬底-55 nm ZnSe 过渡层-[32 nm ZnTe 分隔层-6 nm SeZnTe 阱-8 nm ZnTe 垒-3 nm CdSeTe 阱] $\times 10$ 个周期-90 nm ZnTe 盖层. 将样品贴在石英玻璃上, 用研磨与湿法化学腐蚀的方法去掉 GaAs 衬底, 制备可供飞秒抽运-探测研究的器件结构. 样品的能级结构示意图如图 1 所示. 其中箭头 a 代表 CdZnTe 阱中激子的复合发光, b, c, d 和 e 四个箭头分别代表 CdZnTe 阱中电子向 ZnSeTe 阱中隧穿和 ZnSeTe 阱中电子几种可能的跃迁途径. 该结构可通过 $b-c, b-d$ 和 $b-e$ 过程来加快 CdZnTe 阱中激子的衰减, 从而提高光开关的关断速度.

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60278031, 60176003 和 60376009)资助的课题.

[†] E-mail: jinhua@m165.com

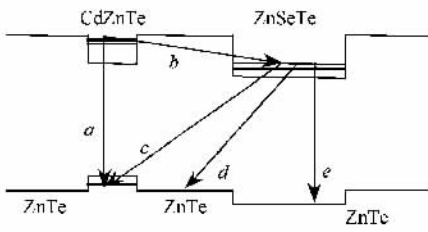


图 1 (CdZnTe/ZnSeTe)/ZnTe 复合量子阱的能级结构示意图

3. 结果与讨论

图 2 为样品的吸收光谱,利用二级导数吸收光谱判断出吸收峰位置在 2.18 和 2.25 eV 处,分别为 ZnSeTe 量子阱和 CdZnTe 量子阱的吸收.可以看到量子阱的吸收边是缓变的,这反映出异质结应变引起平带畸变的存在.而较宽的吸收包络则反映出吸收过程中有声子参与.

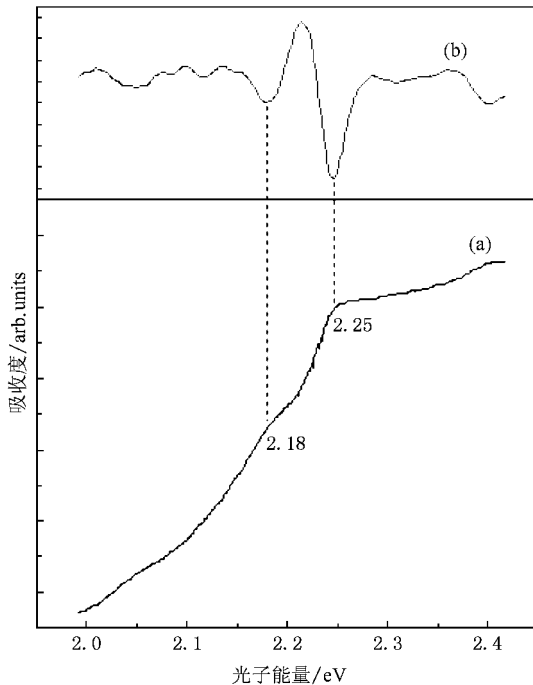


图 2 (CdZnTe/ZnSeTe)/ZnTe 复合量子阱的室温吸收谱(a)和二级导数吸收谱(b)

图 3 给出了样品的室温发光光谱,激发源为氩离子激光器的 488 nm 激光线.从发光谱中可以看到,发光谱是由两个峰值在 2.17 和 2.24 eV 的发光峰叠加而成,分别对应 ZnSeTe 量子阱和 CdZnTe 量子阱的发光.其中 ZnSeTe 的发光比较强,说明大量激子被收集到 ZnSeTe 阱层中并辐射复合(对应这图

1 中的 d 或 e 过程,而 c 过程的复合要穿越实际空间,概率很小).

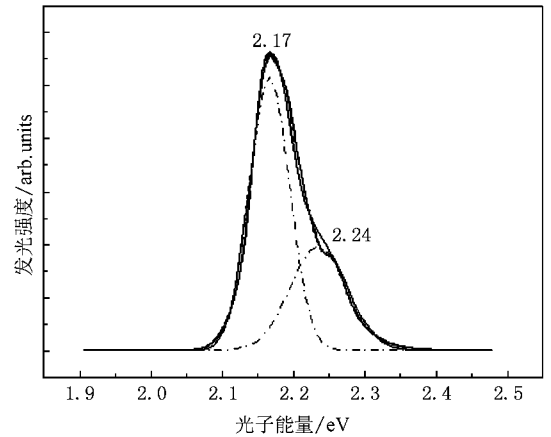


图 3 (CdZnTe/ZnSeTe)/ZnTe 复合量子阱的室温发光光谱

为了研究激子在 (CdZnTe/ZnSeTe)/ZnTe 复合量子阱中的行为,我们在室温下对样品进行了飞秒脉冲白光抽运-探测的测量,分别探测了 CdZnTe 量子阱和 ZnSeTe 量子阱中的激子衰减时间.实验采用 Spectra-Physics 公司生产的钛宝石锁模飞秒激光器,经再生放大器后输出激光脉冲宽度为 130 fs,重复频率为 1 kHz,波长为 800 nm,单脉冲能量为 2 mJ 的超短脉冲.脉冲激光束经分束镜后分成探测光与抽运光,两束光的强度比为 1:15.探测光经可变光学延迟线后聚焦在水盒上,产生白光,抽运光经过 0.5 mm 厚的 BBO 倍频晶体倍频后再与探测光非共线的聚焦到样品上.透过样品的探测光经单色仪分光,由光电倍增管接收.对抽运光进行斩波作为参考信号,由光电倍增管接收的信号通过锁相放大器后可以直接提取抽运光对探测光透射的强度变化的影响.

在低激发强度下,探测光透射强度变化 ΔT 与样品吸收系数一级近似项成线性关系.吸收系数的变化反应了粒子数分布密度的变化,可以获得激子动力学过程的信息.改变延迟时间,探测光相对透射强度的变化可以表示为

$$\Delta T = \Delta T_0 \cdot e^{-t/\tau + \Gamma}, \quad (1)$$

其中 ΔT_0 为 $t = 0$ 时刻相对透射强度, τ 为量子阱中的激子衰减时间, Γ 为抽运光与探测光脉冲宽度之和 (260 fs).

图 4 为 (CdZnTe/ZnSeTe)/ZnTe 复合量子阱的差分透射信号随时间变化的瞬态透射衰减曲线,探测能量在 2.25 eV 处,对应 CdZnTe 量子阱中激子吸收能级位置.可以看出 CdZnTe 量子阱中激子的衰减为

双指数过程.拟合得到.衰减曲线包含一个占优且快的 5.5 ps 的衰减和一个慢的 110.9 ps 的衰减过程,考虑到拟合误差的影响,没有扣除抽运光与探测光脉冲宽度之和.这一结果表明 CdZnTe 阱层中的大部分激子在几个皮秒内迅速离开该能级位置,少量的激子会在 100 ps 左右也离开该能级.慢的衰减时间与 CdZnTe/ZnTe 多量子阱中的激子寿命相当,来自 CdZnTe 阱层的复合(对应图 1 中的 a 过程)^[2].而快至几个皮秒的衰减表明在该复合结构中存在着从 CdZnTe 阱向 ZnSeTe 阱的高效激子隧穿(对应图 1 中的 b 过程).由于在 CdZnTe/ZnTe 量子阱旁引入了 ZnSeTe/ZnTe II 型量子阱使得 CdZnTe 阱中激子的衰减时间大大缩短,大量激子通过隧穿离开 CdZnTe 量子阱,并注入到 ZnSeTe 量子阱中,而后辐射复合,这与前面讨论发光光谱的讨论相一致.

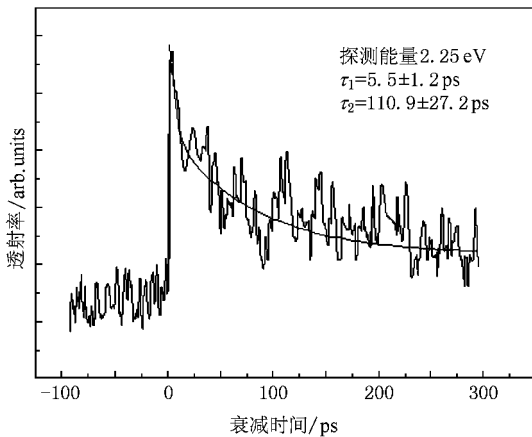


图 4 (CdZnTe/ZnSeTe)/ZnTe 复合量子阱的瞬态透射衰减曲线 (对应探测能量在 2.25 eV)

图 5 为 (CdZnTe/ZnSeTe)/ZnTe 复合量子阱的差分透射信号随时间变化的瞬态透射衰减曲线,探测

能量在 2.18 eV 处,对应 ZnSeTe 量子阱中激子吸收能级位置.从图 5 中看出 ZnSeTe 中的激子衰减为单指数衰减过程.拟合得到衰减时间在 100 ps 左右,这与 ZnSeTe 中载流子的复合相关.

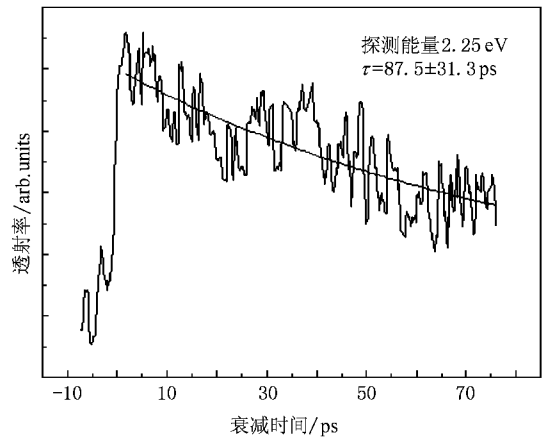


图 5 (CdZnTe/ZnSeTe)/ZnTe 复合量子阱的瞬态透射衰减曲线 (对应探测能量在 2.18 eV)

4. 结 论

本文设计了 (CdZnTe/ZnSeTe)/ZnTe 复合量子阱结构,将 ZnSeTe/ZnTe II 型量子阱引入复合结构中代替对称双量子阱结构中的宽阱,以加快 CdZnTe/ZnTe 阱中激子的衰减,提高光开关的关断速度.通过吸收光谱、室温发光光谱和抽运-探测方法观察到在 (CdZnTe/ZnSeTe)/ZnTe 复合量子阱中存在激子快速隧穿过程,由 CdZnTe 层向 ZnSeTe 层的激子隧穿时间为 5.5 ps.表明该复合结构可以有效的减小 CdZnTe 层中的激子寿命,提高载流子的隧穿时间,对新型超快隧穿器件的研制提供了新思路.

[1] Muto S, Inata T, Tackeuchi A, Sugiyama, Fujii T 1991 *Appl. Phys. Lett.* **58** 2393
 [2] Krol M F, Leavitt R P, Pham J T, McGinnis B P, Peyghambarian N 1995 *Appl. Phys. Lett.* **66** 3045
 [3] Lury S 1988 *Solid State Commun.* **65** 787
 [4] Yang J, Wu W Y, Gong Y C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 448 (in Chinese)[杨 军、武文远、龚艳春 2008 物理学报 **57** 448]
 [5] Wu Z J, Zhu K D, Yuan X Z, Zheng H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3346 (in Chinese)[吴卓杰、朱卡的、袁晓忠、郑 杭 2005 物理学报 **54** 3346]
 [6] Hu Z H, Huang D X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1788 (in Chinese)[胡振华、黄德修 2005 物理学报 **54** 1788]

[7] Hieke K, Heimbrodt W, Pier T, Gumlich H E, Rühle W W, Nicholls J E, Lunn B 1996 *J. Cryst. Growth.* **159** 1014
 [8] Ten S, Krol M F, McGinnis B P, Hayduk M J 1996 *J. Appl. Phys.* **79** 1526
 [9] Krol M F, Ten S, McGinnis B P, Hayduk M J, Khitrova G, Peyghambarian N 1995 *Phys. Rev. B* **52** 14344
 [10] Weil T, Vinter B 1986 *J. Appl. Phys.* **60** 3227
 [11] Ten S, Henneberger F, Rabe M, Peyghambarian N 1996 *Phys. Rev. B* **53** 12637
 [12] Stanley R P, Hegarty J, Fischer R, Feldmann J, Göbel E O, Feldman R D, Austin R F 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 128

Exciton tunnelling in (CdZnTe /ZnSeTe)/ZnTe complex quantum wells^{*}

Jin Hua^{1)†} Liu Shu¹⁾ Zhang Zhen-Zhong²⁾ Zhang Li-Gong²⁾ Zheng Zhu-Hong²⁾ Shen De-Zhen²⁾

¹ *Security and Prevention Department , Chinese People 's Public Security University , Beijing 102416 , China)*

² *Key Laboratory of Excited State Processes , Changchun Institute of Optics , Fine Mechanics and Physics , Chinese Academy of Sciences , Changchun 130033 , China)*

(Received 5 January 2008 ; revised manuscript received 2 February 2008)

Abstract

A new type of (CdZnTe /ZnSeTe)/ZnTe complex quantum wells was designed. Exciton tunneling process was investigated in this complex structure using absorption spectra , photoluminescence (PL) spectra and pump-probe measurements. The exciton decay time was measured in CdZnTe/ZnTe quantum well layers and ZnSeTe/ZnTe quantum well layers , respectively. And a fast exciton tunneling from CdZnTe/ZnTe quantum well to ZnSeTe/ZnTe quantum well was observed by transient differential transmission. The tunneling time is 5.5 ps.

Keywords : (CdZnTe /ZnSeTe)/ZnTe complex quantum wells , exciton , tunneling , pump-probe

PACC : 7865K , 7135 , 7340G , 7847

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60278031 , 60176003 and 60376009).

[†] E-mail : jinhua@m165.com