

CdTe/Cd_{1-x}Mn_xTe:In 应变层量子阱 的光荧光光谱

姜 山 张家明 沈学础

(中国科学院上海技术物理研究所, 红外物理国家重点实验室, 上海, 200083)

摘要 报道了 MBE 生长的 CdTe/Cd_{1-x}Mn_xTe:In 调制掺杂应变层多量子阱材料的光荧光光谱, 低温下观察到一个由多电子-单个空穴散射引起的很强的费密边奇异的发光现象, 对应于费密边能量位置发光峰有一个很强的增加, 使整个发光峰具有明显的非对称性. 分析讨论了引起费密边奇异现象的物理机制, 测量了 77 K 下 CdTe/Cd_{1-x}Mn_xTe:In 样品的调制光谱, 与荧光光谱进行了比较, 结果进一步支持了本文的结论. 还测量了费密边奇异随温度的变化, 结果表明此现象在 II-VI 族半导体多量子阱材料中比 III-V 族材料强得多.

关键词 光荧光, 费密边奇异, II-VI 族量子阱, 电子-空穴散射.

引言

随着分子束外延 (MBE) 和金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 等外延技术的不断发展和完善, 目前已能制备多种高质量的调制掺杂异质结构. 由于在调制掺杂多量子阱结构中杂质和载流子在实空间是分离的, 因此可以获得多电子-单个空穴 (或多空穴-单个电子) 的费密海体系, 这种体系不仅有重要的理论意义, 而且有重要的应用前景.

最早在半导体材料中考虑多电子-单个空穴费密海体系相互作用的是 Mahan^[1,2], 他利用终态电子-空穴散射理论讨论了体材料半导体中多电子-单个空穴相互作用, 结果表明由于存在陡峭的费密边, 泡利不相容原理限制了参与散射的电子, 只有费密边附近的电子可以产生散射. 因此, 尽管存在电子屏蔽作用, 只要电子密度不是太高, 仍然可以存在类似激子的电子-空穴相互作用, 使得在靠近费密能级的地方出现一个束缚态 (该束缚态现被称做 Mahan 激子). 之后 P. Nzieres 和 S. Schmitt-Rink 等人进一步讨论了 Mahan 激子的存在条件等^[3,4].

最早观察到 Mahan 激子效应的是在金属软 X 射线发射谱和吸收谱中, 如 Na、Al、Mg 等^[5,6]. 在这些实验中, Mahan 激子效应被称做多体 X 射线边奇异, 但这种多体费密边奇异 (FES) 现象 (即 Mahan 激子效应) 在半导体中是很难观察到的, 主要是各种加宽机制如光生空穴的寿命、温度、空穴的局域性和激子束缚能的大小等都会使 Mahan 激子

峰展宽, 使之消失.

到目前为止, FES 现象只有 M. S. Skolnick^[7]和 W. Shen^[8]等在 III - V 族半导体量子阱中观察到, 但由于体系激子束缚能比较小, 空穴局域性差, FES 现象只有在很低的温度下才能观察到. 本文首次报道了在 II - VI 族 (Cd, Mn)Te 量子阱体系中的 FES 现象, 我们的结果表明在 (Cd, Mn)Te 体系中 FES 效应比 III - V 族中强得多, 甚至在 77 K 温度下仍然可以观察到.

1 实验及结果

实验所用样品是由 MBE 生长的 CdTe/Cd_{1-x}Mn_xTe:In 多量子阱, 首先在 CdTe 衬底 (001) 方向生长了未掺杂的厚约 1 μm 的 Cd_{1-x}Mn_xTe 缓冲层, 组份 $x = 0.14$. 然后生长 100 个周期的 Cd_{0.72}Mn_{0.28}Te:In/CdTe 多量子阱, 垒宽和阱宽都是 12 nm. 在 Cd_{0.72}Mn_{0.28}Te 垒中用 In 进行重掺杂, 掺杂浓度约为 $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$.

图 1 给出了 12.5 K 的光荧光光谱, 从图 1 可见荧光由一个从 1.59 eV 开始慢慢增加的部分和一个位于 1.64 eV 左右的强的极大值组成, 高能端发光峰有陡峭的下降, 荧光峰形具有明显的非对称性, 整个峰宽在 40 meV 以上.

图 2 给出了 77 K 的光荧光光谱, 可以看到温度升高后发光峰高能部分的增强现象明显减弱, 但整个发光峰的非对称性仍然明显可见, 图 3 给出 12.5、40、77 和 150 K 的光荧光光谱, 从图 3 可以看到当温度从 12.5 K 增加到 40 K 时, 发光峰高能部分的增强减弱, 宽度增加, 但仍然可以清楚地看到这种增强效应. 随着温度进一步升高到 77 K, 高能端发光峰增强现象基本消失, 但整个峰的非对称性仍然可以看到. 当温度增加到 150 K 之后, 高能端峰增强效应和非对称性消失.

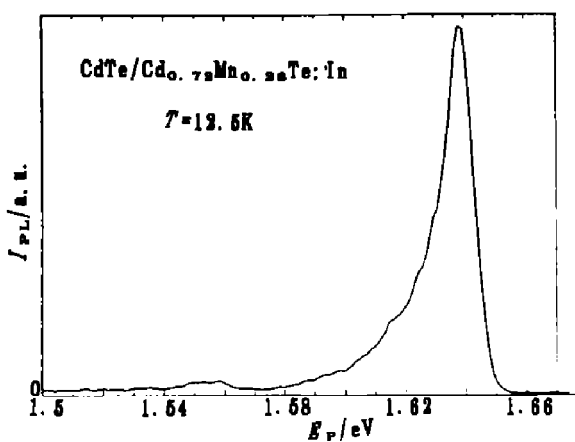


图 1 CdTe/Cd_{0.72}Mn_{0.28}Te:In 多量子阱样品在 12.5 K 的光荧光光谱

Fig. 1 The photoluminescence spectrum of CdTe/Cd_{0.72}Mn_{0.28}Te:In MQW's at 12.5 K

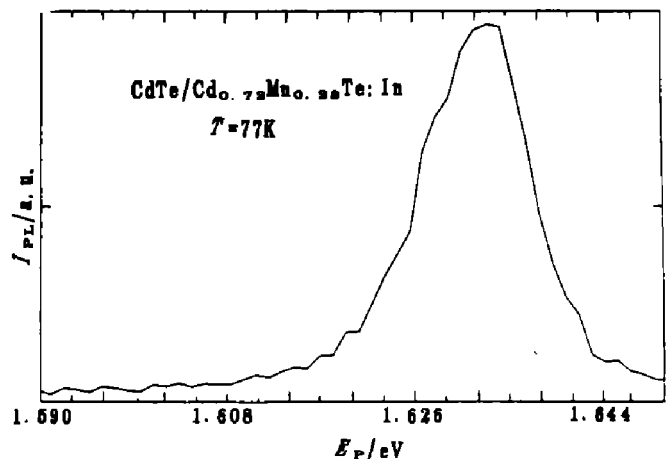


图 2 CdTe/Cd_{0.72}Mn_{0.28}Te:In 多量子阱样品在 77 K 的光荧光光谱

Fig. 2 The photoluminescence spectrum of CdTe/Cd_{0.72}Mn_{0.28}Te:In MQW's at 77 K

2 分析和讨论

我们用包络函数方法, 结合考虑晶格应力引起的价带分裂和激子束缚能等, 计算了 CdTe/Cd_{0.72}Mn_{0.28}Te:In 多量子阱的能带结构, 结果表明对应于第一重空穴子带到第一电子带的跃迁能量约为 1.59 eV. 从图 1 和 2 可见, 1.59 eV 仅位于发光峰的低能带尾处, 而发光峰峰值能量位于 1.64 eV, 两者有着明显的差别, 为了证明我们计算结果的正确性, 我们又在 77 K 下测量了样品的光调制光谱, 结果如图 4 所示. 从图 4 可以清楚地看到 11H 的跃迁在 1.59 eV 附近, 与我们的计算结果一致, 因此我们认为位于 1.64 eV 处的荧光峰不是由 11H 跃迁引起的, 根据下面的讨论我们认为此结构是由 FES 现象引起的.

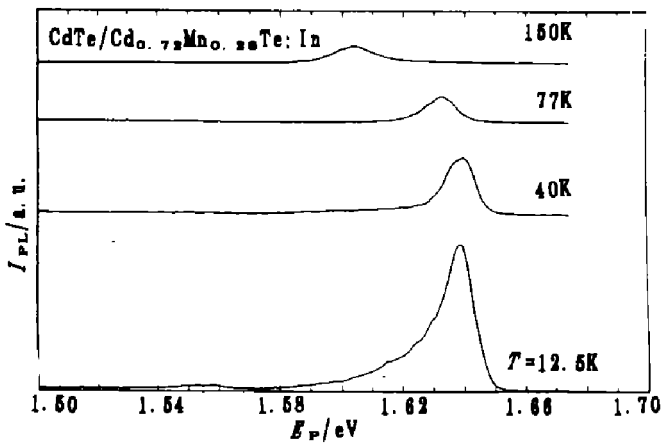


图 3 CdTe/Cd_{0.72}Mn_{0.28}Te:In 多量子阱样品在不同温度下的光荧光光谱
Fig. 3 The photoluminescence spectra of CdTe/Cd_{0.72}Mn_{0.28}Te:In MQW's at different temperatures

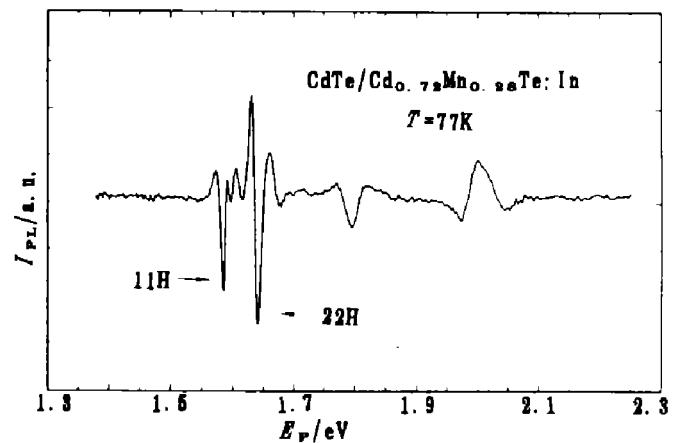


图 4 CdTe/Cd_{0.72}Mn_{0.28}Te:In 多量子阱样品在 77 K 的光调制光谱
Fig. 4 The photomodulation spectrum of CdTe/Cd_{0.72}Mn_{0.28}Te:In MQW's at 77 K

FES 现象是由费密面附近的电子-空穴散射引起的, 对于等量的电子和空穴体系, S. Schmitt-Rink 等人的计算^[4]表明在低温下会出现费密能级附近电子空穴散射增强效应(即 FES 效应). 这是因为动量 K 位于费密面附近的电子和空穴比较容易参与散射, 而 $K \ll K_F$ 的电子和空穴在低温下很难参与散射 (K_F 为费密动量). 另外, 我们知道二维体系中由于量子限制效应使电子-空穴对的涨落增加, 载流子屏蔽效应减小, 因此在二维系统中 FES 效应比在 3 维系统中强得多, 但在我们的实验中, 240 K 以上的温度才能有足够的空穴分布来实现充分的空穴-电子在费密面的直接复合, 而这是不可能的, 因为我们的实验温度只有 12.5 K. 所以我们现在的系统不是等电子空穴的系统, 而是高密度的电子与低密度的空穴系统. 通常情况下, 以在 $K=0$ 处电子空穴的直接复合过程为主, 而对应于 K_F 的电子与对应于 K_h 的空穴 ($K_F \gg K_h$) 之间的复合过程是禁戒的, 很难观察到, 这就是为什么在一般实验中很难观察到 FES 现象, 而只能观察到直接复合过程.

要理解为什么在我们的实验中会出现强的 FES 现象, 必须考虑我们实验中所用的

CdTe/Cd_{1-x}Mn_xTe:In 样品的材料特性. 我们知道, 在 Cd_{1-x}Mn_xTe 材料中, 合金无序性和杂质缺陷的浓度要比 III - V 族材料大得多, 因此光生空穴可以在合金无序的地方或者在杂质和缺陷处被束缚. 特别是在界面处, 由于 CdMnTe 和 CdTe 界面晶格失配比较大, 应力的存在会产生大量缺陷对空穴产生强烈的束缚, 这样空穴在实空间的局域会引起空穴波函数在 K 空间的扩展, 使 K_h 增加到足以产生 $K_h = K_F$ 的电子 - 空穴直接复合, 也就使 FES 效应大大增强, 因此我们可以清楚地看到这一效应.

J. M. Rorison^[9]曾经对我们这种系统 (即空穴被束缚的多电子 - 单个空穴体系) 进行了理论计算, 它的结果表明发光强度可以表示为

$$I(\omega) = I_0(\omega) \left[\frac{I - \Lambda_2(P)}{1 + \Lambda_1(P)} \right]^2 \quad (1)$$

式中 $I_0(\omega)$ 为不考虑 FES 效应时的发光强度随能量的变化, 而

$$\Lambda_1(P) = \sum_k I_s(P, K) f(k, P) \frac{1 - f_e(k)}{E_p - E_k + i\delta} \quad (2)$$

$$\Lambda_2(P) = \sum_k I_s(P, P) f(k, P) \frac{1 - f_e(k)}{E_p - E_k + i\delta} \quad (3)$$

这里 I_s 函数对应于电子的库仑相互作用势, f 函数是费密分布函数.

从式 (2) 和 (3) 可见, 如果 $E_p = E_F$, 那么 $\Lambda_2 \gg \Lambda_1$, 将此结果代入式 (1), 会发现 $I(\omega)$ 在 E_F 处有一个很强的增加, 这样, J. M. Rorison 的计算结果可以很好地解释我们实验观察到的强 FES 现象.

FES 效应也已经在 III - V 族半导体量子阱材料中观察到^[7,8], 但由于在 III - V 族材料中空穴局域性差 (主要是晶格质量一般远好于 II - VI 族), 激子束缚能低, 在一般情况下很难观察到 FES 现象, 据我们所知, 本文是首次报道在 II - VI 族材料中的 FES 效应.

从图 3 可以看到, FES 现象在 12.5~40 K 温度范围内是非常强的, 即使在 77 K 仍然能清楚看到此效应 (从发光峰的明显不对称). 与参考文献 [7,8] 比较表明, 我们材料中的 FES 效应要比 III - V 族强得多. 我们认为该系统 FES 效应增强的原因主要有两个: (1) 在 CdTe/Cd_{1-x}Mn_xTe:In 材料中, 合金无序和杂质缺陷要比 III - V 族材料中大得多, 因此可以引起比较强的空穴局域性. (2) 在 CdTe/Cd_{1-x}Mn_xTe:In 材料中, 激子束缚能约为 20 meV, 比 III - V 族材料大得多 (在 III - V 族材料中约为 5 meV).

3 结论

本文结合光荧光光谱和光调制光谱的实验结果, 首次报道了在 II - VI 族半导体量子阱 CdTe/Cd_{1-x}Mn_xTe:In 材料中的 FES 现象, 结果表明, 由于在 II - VI 族半导体量子阱中存在比较多的杂质和缺陷、比较高的合金无序性及大的激子束缚能, 因此 FES 效应比较强, 是研究 FES 现象的比较理想的材料. 另外, 利用 J. M. Rorison 的理论结果定性讨论

了本文的实验结果, 发现此理论可以很好地解释本文实验结果.

参考文献

- 1 Mahan G D. *Phys. Rev.*, 1967,**153**:882
- 2 Mahan G D. *Phys. Rev. Lett.*, 1967,**18**:448
- 3 Nzieres P, Dominicis C T De. *Phys. Rev.*, 1969,**178**:1097
- 4 Schmitt-Rink S, Ell C, Hang H. *Phys. Rev.*, 1986,**B33**:1183
- 5 Callcott T A, Arakawa E T, Eaeer D L. *Phys. Rev.*, 1978,**B18**:6622
- 6 Senemaud C, Hague C. *J. Phys.*, 1971,**32**:C4
- 7 Skolnick M S, Rorison J M, Nash K J, *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1987,**58**:2130
- 8 Chen W, Fritze M, Nurmikko A V, *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1990,**64**:2434
- 9 Rorison J M. *J. Phys.*, 1987,**C20**:L311

PHOTOLUMINESCENCE SPECTRA OF CdTe/Cd_{1-x}Mn_xTe:In STRAINED LAYER MULTIPLE QUANTUM WELLS

Jiang San Zhang Jiaming Shen Xuechu

(National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract The photoluminescence (PL) spectra of CdTe/Cd_{1-x}Mn_xTe:In strained layer multiple quantum wells, which were prepared by MBE, are reported. A strong enhancement of the photoluminescence intensity towards the electron Fermi energy, which is caused by multiple electron-hole scattering processes, and a strong asymmetry of the PL peak were observed. The physical mechanism of the Fermi edge singularity is analyzed and discussed. The photomodulation (PR) spectrum of the sample at 77 K was measured and the PR spectral results, considering the PL spectra together, give further support to the discussions. In addition, the temperature dependence of the Fermi-edge singularity was measured and the results show that the Fermi-edge singularity is much stronger than that in III-V semiconductors.

Key words photoluminescence, Fermi-edge singularity, II-VI quantum wells, electron-hole scattering.