

Hg_{0.6}Cd_{0.4}Te 的激子光电导谱

陈张海 刘普霖 石晓红 史国良 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 Hg_{0.6}Cd_{0.4}Te 红外光电导谱, 在本征吸收边的低能侧观察到束缚激子引起的分立光电导响应.

关键词 碲镉汞, 激子, 光电导.

TN304.26

引言

人们对 HgCdTe 合金已进行了广泛的研究^[1]. 当 HgCdTe 中 Cd 组分 x 从 1 变到 0.2 时, 其禁带宽度的变化达 1.6eV, 它的吸收边附近的光学性质亦从以激子效应为主变为以带-带跃迁为主^[2], 一般认为发生这种变化的临界组分约为 0.4^[3]. 由于该组分的 HgCdTe 可用于制备注入型激光器^[4], 因此, 对其光电性质的深入研究十分必要.

Herrmann 等人对 $x=0.4$ 的 p 型 HgCdTe 作了光致发光(PL)、透射、稳态光电导等测量, 他们在低温下的 PL 谱中观察到与束缚激子和自由激子对应的峰, 然而在透射和光电导谱中并未观察到相应结构^[5]. 本文报道 n 型 Hg_{0.6}Cd_{0.4}Te 的低温光电导谱, 观察到某些分立结构, 研究其温度关系, 并讨论了物理机制, 认为它们起源于受主束缚激子.

1 实验

本工作采用的样品是用移动加热器法 (THM) 生长的、非有意掺杂的 HgCdTe 体单晶材料, 组分 $x=0.40$. 样品经退火而成 n 型, 并按制备 HgCdTe 光导器件的工艺程序仔细地进行切割、研磨和抛光, 然后用 In 做电极. 由 Hall 效应测得 77K 和 300K 下的自由载流子浓度和迁移率分别是 $1.5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 、 $2 \times 10^4 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ 和 $1 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 、 $1.0 \times 10^3 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$.

光电导谱测量在 Bruker IFS-113V 型傅里叶变换红外光谱仪上进行. 样品置于变温杜瓦中, 温度从 4.2~300K 连续可调. 光电导信号由低噪声、高输入阻抗前置放大器放大后送至光谱仪中进行傅里叶变换, 并利用光源光谱分布进行归一化.

图 1 给出样品在 4.2K 下 2500~4000 cm^{-1} 范围内的光电导谱, 可看出本征吸收边较为陡峭, 在低温下未观察到表面复合引起的光电导峰, 这说明样品质量较好. 在本征吸收边的低能侧出现 2 个小分立结构, 图 2 为这 2 个谱峰随温度的变化行为. 很明显, 在 4.2K 温度下, 能量稍低的光电导峰 A 具有较高的强度和较大的半高宽, 随着温度升高, 其能量位置逐渐蓝移, 强度逐渐减弱, 当温度高于 40K 时, 该峰已不可分辨, 并表现为 Urbach 边的一部分. 而能量较高的光电导峰 B 的位置则基本上不随温度的升高而移动, 并且, 其强度随着温度升高略有增大而后减小, 当温度高于 45K 时, 该结构消失. 实验结果重复性很好.

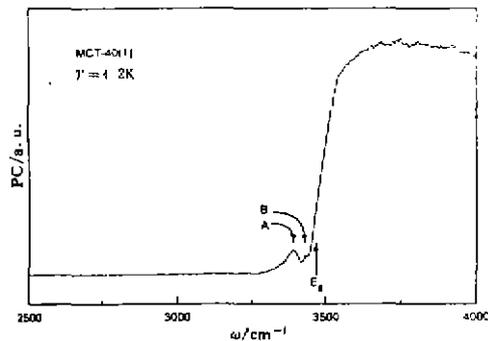


图1 $Hg_{0.5}Cd_{0.5}Te$ 的低温光电导谱
Fig. 1 PC spectrum of $Hg_{0.5}Cd_{0.5}Te$ at low temperature

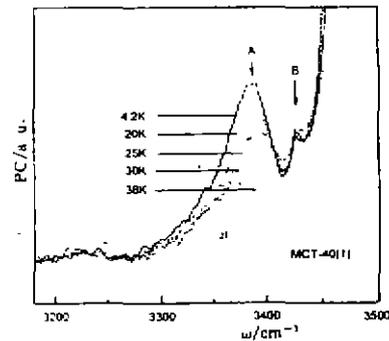


图2 不同温度下 $Hg_{0.5}Cd_{0.5}Te$ 本征吸收边低能侧的光电导结构
Fig. 2 PC structures at the low energy side of the absorption edge of $Hg_{0.5}Cd_{0.5}Te$

2 讨论

如果认为导带电子和价带空穴的迁移率、寿命以及样品的光反射率在吸收边附近不随入射光子能量的不同而变化,并且忽略 Burstein-Moss 移动等因素的影响^[2,5,6],则由样品光电导谱对能量的一阶微分的峰值位置,可以测量 $HgCdTe$ 材料的禁带宽度^[7].

图3给出用这种简单方法确定的不同温度下的 E_g 值,与利用 Chu 等人经验公式计算的结果相当符合^[8].图中同时给出了 A、B 两光电导峰能量位置的温度关系.

图4为可以本征吸收边低能侧引起光电导谱峰结构的5种可能机制.它们分别对应于(1)离化浅受主到导带;(2)价带到离化浅施主;(3)价带到中性深受主;(4)中性深施主到导带;(5)价带到激子能级的电子跃迁.下面结合样品的具体情况,分别讨论以下几种跃迁机制,并对实验观察到的光电导峰进行初步指认.

首先,考察电子从离化浅受主到导带的跃迁情形(图4(a)).对于 n 型样品,其费密能级

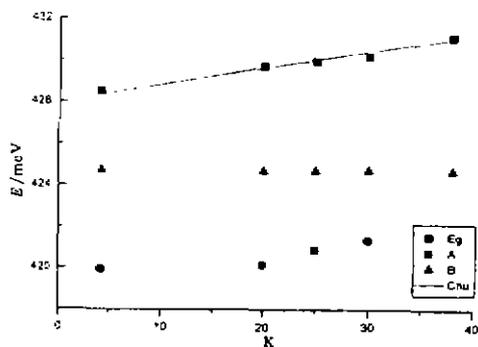


图3 禁带宽度 E_g 、光电导峰 A 和 B 的能量位置随温度的变化关系
Fig. 3 Temperature dependence of E_g and energy positions of peak A and peak B

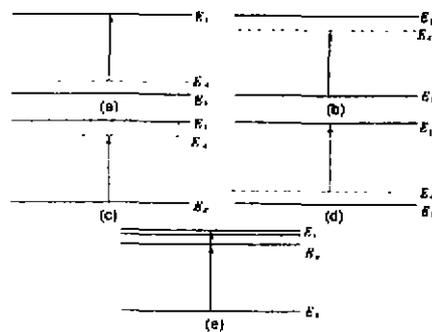


图4 可在本征吸收边低能侧引起光电导峰的5种可能的跃迁机制
Fig. 4 Five possible transition mechanisms which can induce the PC peaks at the low energy side of the intrinsic absorption edge

E_f 在 4.2~300K 温度范围内均位于浅受主能级 E_A 之上, 即浅受主处于电离状态. 电子从电离浅受主到导带跃迁引起的光电导峰应该在较高甚至室温下都能观察到^[9], 这显然与我们的实验结果不一致. 图 1 和 2 所示的光电导峰不可能起源于这种跃迁机制.

考虑第二种可能机制. 如果认为光电导峰 A、B 对应于电子从价带到离化浅施主的跃迁(图 4(b)), 则由图 3 给出的样品禁带宽度 E_g 以及 A、B 两个光电导结构的能量位置随温度的变化关系可知, 有关的浅施主电离能大于 4meV, 而在 4.2K 低温下, kT 大约为 0.4meV, 因此, 大部分浅施主尚未电离. 随着温度的升高, 离化施主的数目增多, 上述跃迁引起的光电导响应也应随之增大. 然而实验结果并非如此.

考虑图 4(c)所示的电子从价带到中性深受主的跃迁机制, 则对于 n 型材料, 如果费密能级 E_f 位于深受主基态能级 E_A 之上, 那么, 受主大部分已经离化; 如果 E_f 位于 E_A 之下, 则这样的跃迁可以发生, 但考虑到受主能级的深度, 应该在相当宽的温度范围内均可观察到这样的光电导响应. 这同样与我们的实验结果不符. 同样的理由, 图 1 和 2 中的 A、B 光电导峰也不可能是中性深施主到导带的电子跃迁(图 4(d))引起.

综上, 图 1 和 2 所示的分立光电导结构不可能由上述 4 种机制引起. 图 4(e)为由激子效应引起的光电导响应的两步过程. 在一般情况下, 价带电子吸收光子能量而跃迁到禁带中的某个激子能级而形成的电中性激子对电导率并没有贡献. 如果通过热激发、电场电离等方法解离激子, 则可以形成剩余自由电子和空穴, 从而产生光电导效应^[5], 这种机制类似于杂质的光热电离^[10]. 虽然激子吸收系数可以比带间吸收过程更高, 但考虑到这样的光电导效应是一种二级过程, 因此, 其谱峰强度比本征光电导响应小得多. 随着温度升高, 束缚激子复合体逐渐解离, 形成相互孤立的自由激子和杂质或缺陷, 使得其引起的光电导响应减小. 根据 A、B 两个光电导峰强度随温度的变化行为, 可以认为它们起源于低温下的激子效应.

对于 4.2K 下的 $\text{Hg}_{0.6}\text{Cd}_{0.4}\text{Te}$, 其电子和空穴的有效质量分别为 $m_e^* = 0.03m_0$ ^[11]、 $m_h^* = 0.33m_0$ ^[11], 取静态介电常数 $\epsilon_r(0) = 15.3$ ^[12], 则由类氢模型, 其自由激子束缚能为

$$E_x = \frac{\mu^*}{\epsilon_r^2(0)} \times 13.6\text{eV} \approx 1.6\text{meV}.$$

其中 $\mu^* = m_e^* m_h^* / (m_e^* + m_h^*)$. 由图 3 可知, A、B 两个光电导峰对应的能级在 4.2K 温度下分别位于导带底以下 9meV 和 4meV 处, 显然, 它们都不是自由激子引起. 同时, 考虑到测量样品为非有意掺杂的 n 型材料, 可同样由类氢模型估计其施主电离能为 $(1 + m_e^* / m_h^*) E_x \approx 1.8\text{meV}$ ^[13]. 而根据 Sharam 等人的变分方法计算, 可以得到束缚于中性浅施主和离化浅施主上的激子基态分别位于导带底以下 1.9meV 和 2meV 处^[14,15], 因此, A、B 两峰只能起源于束缚在受主杂质或缺陷上的激子.

Lüsson 等人系统地研究了不同组分 HgCdTe 中束缚于混晶无序引起的势能涨落的激子 PL 谱, 观察到其谱峰位置随着温度的升高而逐渐接近导带底的现象^[16]. 从图 3 可明显看到, A 峰的能量位置随温度的变化趋势与 E_x 的行为基本一致. 由此, 可以确认 A 峰并非来自束缚于混晶无序引起的势能涨落的局域激子. 文献[3]由 PL 谱测得 5K 下 $\text{Hg}_{0.6}\text{Cd}_{0.4}\text{Te}$ 中杂质束缚激子的基态在导带底以下约 9.5meV 处. 这与我们实验结果中的 A 峰能量位置相当一致, 并且, 其温度关系亦与图 3 所示的 A 峰的温度行为相符, 因此, 可以认为二者可能有着同样的物理起源. 但由于 HgCdTe 中杂质和缺陷行为的复杂性, 要具体判断与 A 光

电导峰相联系的杂质缺陷则相当困难。

前文已经提到,低温下B峰强度较A峰小很多,其能量位置钉扎在4meV处,根据激子吸收系数的一般理论计算,激子吸收光谱中的分立谱线强度将随着对应的量子数增大而减小^[17],因此,B峰可能对应于价带到上述与A峰相联系的束缚激子激发态的跃迁,其强度的温度关系可以由激子能态的热分布得到大致的说明,但B峰能量位置的钉扎现象尚待进一步研究。

3 结束语

我们报道了n型Hg_{0.6}Cd_{0.4}Te的低温光电导谱,清楚地观察到两个分立结构,根据它们的能量位置及其温度变化关系,认为它们对应于价带电子到束缚激子能级的跃迁。

参考文献

- 1 Dornhaus R. *et al.* *Narrow-Gap Semiconductors*, *Springer Tracts in modern Physics*, 1983, **98**:119
- 2 Camassel J, *et al.* *Phys. Rev.* 1988, **80**:3948
- 3 Herrmann K H, *et al.* *Semicond. Sci. Technol.* 1992, **7**:578
- 4 Arias J M, *et al.* 1991 *5th Int. Conf. on I-VI Compounds*, Tamano, Japan, 1991
- 5 沈学础. *半导体光学性质*. 北京:科学出版社,1992
- 6 Herrmann K H. *et al.* *Phys. Sol A*, 1989, **114**:K249
- 7 Ariel V. *et al.* *Appl. Phys. Lett.* 1995, **6**:2101
- 8 Chu J H. *Chin. J. IR Res.* 1983, **2**:25
- 9 Liu P L, *et al.* *Chin. J. IR Millim. Waves.* 1996, **15**:358
- 10 Taniguchi M, *et al.* *Solid State Commun.* 1976, **20**:131
- 11 Yadava R D S. *et al.* *J. Electron. Mater.* 1994, **23**:1359
- 12 Brice J C. *in Properties of Mercury Cadmium Telluride*, *EMIS Datareviews Series No. 3, INSPEC, IEE*, 1987, **29**
- 13 Jones C L. *in Properties of Mercury Cadmium Telluride*, *EMIS Datareviews Series No. 3, INSPEC, IEE*, 1987, **150**
- 14 Sharma R R, *et al.* *Phys. Rev.* 1967, **159**:649
- 15 Sharma R R, *et al.* *Phys. Rev.* 1967, **153**:823
- 16 Lüsson A, *et al.* *J. Crystal Growth*. 1990, **101**:673
- 17 Elliott R J. *Theory of Excitons*, 1. *in Polarons and Excitons*, ed by C G whitfield, 269, New York Plenum Press, 1972

EXCITON PHOTOCONDUCTIVITY SPECTRA OF Hg_{0.6}Cd_{0.4}Te

Chen Zhanghai Liu Pulin Shi Xiaohong Shi Guoliang Shen Xuechu

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

Abstract Photoconductivity (PC) spectra of Hg_{0.6}Cd_{0.4}Te were reported. Discrete PC structures of bound excitons at the low energy side of absorption edge were observed for the first time.

Key words HgCdTe, exciton, photoconductivity.