

碲镉汞杂质缺陷的红外磁光电导谱

刘普霖 陆卫 陆晓峰 陈张海 石晓红 史国良

(中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家实验室, 上海, 200083)

龚海梅¹ 胡晓宁 徐国森 沈杰

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

TN213

TN211

A **摘要** 测量了 $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.2-0.3$) 在 4.2K 下的磁光电导光谱, 观察到与杂质、缺陷有关的光电导峰, 研究了它们随磁场的变化, 并对这些光导峰发生的物理机制及杂质和缺陷可能的由来作了讨论.

关键词 碲镉汞, 杂质, 缺陷, 红外磁光电导谱.

引言

碲镉汞中的杂质、缺陷行为不仅取决于合金组分、温度等物理因素, 还与晶体生长、热处理工艺条件有关. 由于它们对材料的电学、光学性质和红外探测器的性能影响很大, 一直受到人们的关注^[1,2].

8 研究碲镉汞杂质、缺陷使用最多的物理实验方法是电流磁效应及与结的空间电荷有关的测量, 但两者只能分别提供浅、深能级的信息, 局限性较大, 采用磁光电导光谱的工作仅有少数报道^[3-5], 这种测量需要复杂的实验系统, 但兼有电学的高灵敏性和光学的高精确性, 可给出较多信息. 我们测量了碲镉汞的傅里叶变换红外磁光电导光谱, 观察到与杂质、缺陷有关的光电导峰及其随磁场的变化, 本文对测量结果加以说明和讨论.

1 实验

磁光测试系统由光源、磁场、样品、数据采集和处理等几个分系统组成^[6]. 我们用一组反射镜把 Bruker IFS-113V 型傅里叶变换红外光谱仪的干涉光束引导至样品架上端的窗口, 再用光导管、光锥把光束投射到样品上; 样品架安装在一台 Oxford 螺线管型的超导磁体-低温杜瓦内, 样品置于超导磁体中央, 光敏面和磁场及非偏振的入射光构成 Faraday 位形.

样品是用改进了的移动加热器法从碲溶剂中生长的、未故意掺杂的碲镉汞单晶体材料, 在 230°C、退火 28 天条件下热处理成 n-型. 为了得到较高的光电导信号, 单晶锭经切片后用 X-光形貌像、红外透射光谱、Hall 系数和电阻率测量等方法选择结构好、组份均匀的样品, 并按制备碲镉汞光导器件的工艺流程仔细地加以切、磨、抛, 然后用钢做上电极, 装进样品架. 就本文测量结果来看, 光电导信号大, 信噪比高, 实验结果相当接近, 说明材料质量是好的.

本文报导了两个样品 MCT-31 和 MCT-22, 标称合金组份分别为 $x=0.31$ 和 $x=0.22$, 按褚君浩^[7]等的经验公式, 相应禁带宽度在 77K 温度下是 $E_g=276\text{meV}$ 和 127meV , 4.2K 时为 $E_g=262\text{meV}$ 和 105meV . 从霍尔系数测量得到液氮温度下的自由载流子浓度、迁移率分别是 $n=7.5\times 10^{13}\text{cm}^{-3}$, $\mu=2.5\times 10^4\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 和 $n=3.0\times 10^{14}\text{cm}^{-3}$, $\mu=9.0\times 10^4\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. 取相应组份的导带电子有效质量为 $m_0^*/m_0=2.0\times 10^{-2}$ 和 $m_0^*/m_0=9.5\times 10^{-3}$ ^[8] 及上述载流子浓度, 可推算出两个样品在深低温下的费密能级大约在 $E_f-E_c=0.5\text{meV}$ 和 1.4meV 处, 非常接近导带底.

2 结果

图 1 和图 2 是样品 MCT-31 在 4.2K 和不同磁场强度下测得的红外光电导光谱, 由于本征与非本征的信号强度相差约两个数量级, 我们把整个光谱分成两部分给出. 这些光谱都已借助于用热释电得到的参考谱加以规一化. 从上述图中可以看到, 光电导在某光子能量附近急剧上升, 零磁场下的阈值为 2146cm^{-1} (266meV), 加外磁场后阈值随磁场增强移向高能方向, 另一样品 MCT-2 也有同样现象, 零场阈值为 941.8cm^{-1} (116.8meV), 都与前面给出的 E_g 值接近, 说明这里是本征跃迁开始发生的地方.

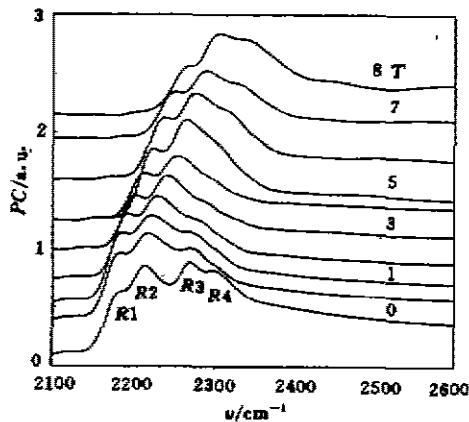


图 1 样品 MCT-31 在 4.2K 和不同磁场强度下的本征光电导光谱

Fig. 1 Intrinsic PC spectra for the sample MCT-31 under different magnetic field at 4.2K.

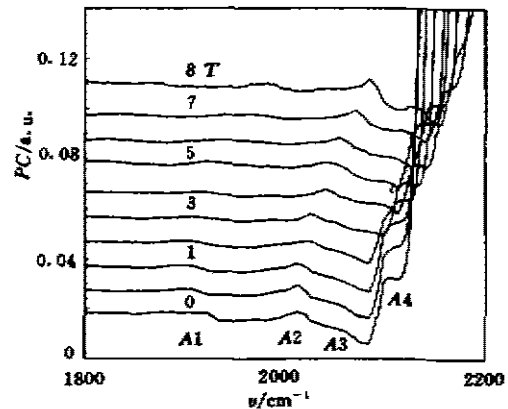


图 2 样品 MCT-31 在 4.2K 和不同磁场强度下的非本征光电导光谱

Fig. 2 Extrinsic PC spectra for the sample MCT-31 under different magnetic field at 4.2K.

从图 1 可看到本征区有 4 个光导峰, 零磁场下分别为 $R1(2176\text{cm}^{-1})$, $R2(2208\text{cm}^{-1})$, $R3(2256\text{cm}^{-1})$, $R4(2283\text{cm}^{-1})$; 在非本征光谱区也可观察到光导峰(见图 2): MCT-31 有 $A1(1926\text{cm}^{-1})$, $A2(2023\text{cm}^{-1})$, $A3(2070\text{cm}^{-1})$, $A4(2113\text{cm}^{-1})$; MCT-22 有 $a1(725\text{cm}^{-1})$, $a2(815\text{cm}^{-1})$, $a4(910\text{cm}^{-1})$. 这些峰的能量都随外磁场的增强而增加.

图 3 给出 MCT-31 的光电导峰(实点)随磁场的变化, 图 3 中直线仅是联接各点, 圆圈取自各光导谱中急剧升高的本征阈值, 虚线是理论计算出的禁带宽度与磁场强度的关系, 我们将在下面说明. 值得注意的是图 3 表明, 光导峰 $R1, R2, R3$ 和 $A2, A3, A4$ 随磁场的变化趋势几乎都与本征阈值相同, 只是 $A1$ 在低磁场区比较平坦, $R4$ 则变弱使得难以辨认.

3 讨论

(1) 为了说明实验结果,我们设计了如图4所示的能谱,其中几组虚线是用“三带模型”计算出的磁能级^[6],旁边符号中的 $c, +, -$ 分别代表导带、重空穴价带、轻空穴价带,括号中的数字是 Landau 能级量子数, a, b 表示自旋向上和向下. 导带最低磁能级和价带最高磁能级,即导带底、价带顶分别是 $a^-(0)$ 和 $a^+(0)$,两者随磁场变化的速率为 1.1meV/T 和 0.06meV/T ,后者远远小于前者,因此禁带宽度的增加主要取决于导带底的上升. 为使 $E_g(H)$ 的理论值与实验结果达到最佳符合,我们取了以下一组能带参数值: $E_g = 265\text{meV}$, $\Delta = 1000\text{meV}$, $E_p = 19\text{eV}$, $r_1 = -18$, $r_2 = -8.3$, $r_3 = 8.3$, $k = -10.5$, $F = -0.5$. 如前所述,费密能级紧靠导带底(在图4没标出).

(2) 鉴于本文报道的两个样品都是弱简并的 n -型材料,又考虑到 $A1, A2, A3, A4$ (见图2)和 $a1, a2, a4$ 这些光导峰的能量略低于本征光导,而随磁场变化的趋势与本征光导大体一致,所以都可认为是从受主至导带的跃迁引起的(见图4). 受主电离能相当于本征光导阈值与非本征光导峰值之差,由测量的光谱可求得: $E_{A1} \sim 27\text{meV}$, $E_{A2} \sim 15.5\text{meV}$, $E_{A3} \sim 9.5\text{meV}$, $E_{A4} \sim 4.1\text{meV}$ 和 $E_{a1} \sim 26.9\text{meV}$, $E_{a2} \sim 15.1\text{meV}$, $E_{a4} \sim 4.0\text{meV}$,两个不同样品的值在实验误差范围内对应相等. 由于这些能级钉扎在价带顶,所以由此至导带底的跃迁能量随磁场的增加基本上与禁带宽度随磁场变化相同; E_{A1} 与磁场的关系在弱场区变化较平坦,可能是因为该能级较深的缘故.

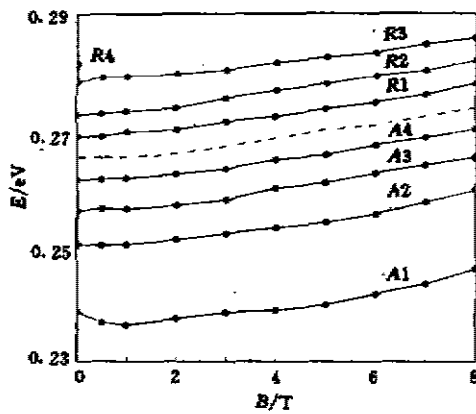


图3 样品 MCT-31 的光导峰值和本征阈值与磁场强度的关系

Fig. 3 Dependence of the energy positions of PC peaks and fundamental absorption edge on magnetic field for the sample MCT-31

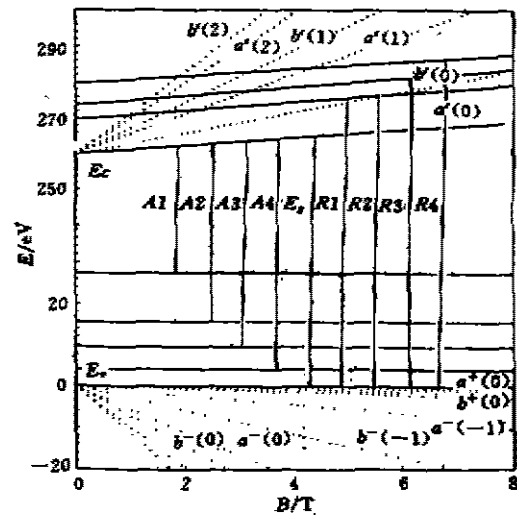


图4 样品 MCT-31 的能谱和光跃迁示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the energy levels and the electronic transitions for the sample MCT-31

(3) 由于碲镉汞的复杂性,对不同文献报道的结果进行比较并推测杂质、缺陷能级的起源是困难的,但我们仍然看到: Littler^[3] Seiler^[4]用激光磁光导测量观察到的 15meV 和 9.8meV 两个能级与我们的 E_{A2} 、 E_{A2} 和 E_{A3} 是相同的. Kucera^[5]用傅里叶变换磁光导测量观察到的 7meV 能级接近我们的 E_{A3} . 参照 Capper^[1]和 Brice^[10]等对碲镉汞非本征掺杂的杂质、缺陷能级所做的评述,可以推测 E_{A3} 、 E_{A4} 和 E_{A4} 可能起源于金属离子,如金(Au)、铜(Cu)、银(Ag). 它们在碲镉汞晶格中占据金属位置,起受主作用; E_{A2} 、 E_{A2} 约 15meV 左右,已被很多文献报道^[11],通常把它归结为彼此无相互作用的点缺陷-汞空位. 汞空位有不同的荷电状态 V_{Hg}^0 、 V_{Hg}^+ , 产生不同的能级, $A2$ 可能对应于汞空位较深的能级.

按照有效质量近似及简单的类氢模型,取碲汞镉重空穴有效质量为 $m^* \hbar h / m_0 = 0.5$, 介电常数 $\epsilon = 16$ ^[9], 可以计算出受主电离能 $E_i \sim 27\text{meV}$, 它与实验值 $E_{A1} \sim 27.3\text{meV}$ 、 $E_{A1} \sim 26.9\text{meV}$ 很接近. 严格计算,不仅须考虑受主浓度、合金组份的影响,还要考虑杂质、缺陷中心的元胞势作用. 从硅等半导体看,这种作用引起受主基态的“化学移动”是很大的.

(4) 如图 1、图 3 所示,本征区的光导峰 $R1$ 、 $R2$ 、 $R3$ 、 $R4$ 在零磁场下已经出现,并且随磁场的变化有着与禁带宽度相同的趋势和速率,因而不可能是导带与价带两主带朗道能级间的跃迁,只能是价带至某些共振态中心的跃迁(见图 4). 这些共振能级与导带共振,而且钉扎在导带底,从上述光谱可确定它们分别位于导带底之上 3.7meV、7.6meV、13.6meV 和 17.0meV 处.

有关碲化汞、碲镉汞中共振态的实验和理论研究已有很多报道^[12,13]. 通常占据晶格金属位的氧、氮、氟等阴离子都会产生与导带共振的束缚态,其束缚能随组份增加而减小,直至进入禁带,如:在组份 $x=0.21$ 的碲镉汞中替代汞中性氧原子 O_{Hg}^0 的类 S -能级约为 50meV, 一价氧离子 O_{Hg}^- 为 20meV. 本文 MCT-31 的 $E_{R4} \sim 17.0\text{meV}$, 稍低于 O_{Hg}^- 能级,这或许是由于合金组份较大的缘故. 其它三个更浅的共振态可能起源于碲空位,尚待证明.

4 结论

测量了 $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.2-0.3$) 的磁光电导光谱,观察到与杂质、缺陷有关的光导峰,分析了这些光导峰随磁场的变化,并把它们归结为受主至导带和价带至导带共振态之间的跃迁,由此获得了相应受主能级、共振能级的位置,此外,还将结果与有关文献作了比较,对这些残留杂质和缺陷的可能物理化学起源作了讨论. 深入的工作在进行中. 总之,实验表明磁光电导光谱是研究碲镉汞杂质和缺陷的一个有效方法.

参考文献

- 1 Capper P. *Prog. Crystal Growth and Charact.*, 1989, **19**:295
- 2 Cheng D T. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1985, **A3**(1):128
- 3 Littler C L, Maldonado E, Soog X N, et al. *Vac. Sci. Technol.*, 1992, **B10**(4):1466
- 4 Seiler D G, Loloee M R, Milazzo S A, et al. *Solid State Communication*, 1989, **69**(7):757
- 5 Kucera Z, Hlildek P, Hoschl P, et al. *Phys. Stat. Sol. (b)*, 1990, **158**:K173
- 6 Liu Pulin, Shi Guoliang, Wang Peigang, et al. *J. Infrared Millimeter Waves*, 1993, **12**(4):271
- 7 Chu J, Xu S, Tang D. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43**:1064
- 8 Weiler M H, in *Semiconductors and Semimetal* Vol. 16, Ed, by R. K. Willardson, A. G. Beer, New York:

- Academic Press, 1981, P. 119
- 9 Tuchendler J, Grynberg M, Couder Y, *et al. Physical Review B*, 1973, **8**(8), 3884
 - 10 Jones C L, in *properties of mercury cadmium telluride* Datareviews Series No. 3, Editors: John Brice and Peter Capper, An [INPEC] Publication, 1987, P151
 - 11 Scott W, Steizer E L, Hager R J. *J. of Appl. Phys.*, 1978, **47**(4), 1408
 - 12 Kobayashi A, Sankey O F, Dow J H. *Phys. Rev. B*, 1982, **25**(10), 6368
 - 13 Chu J H, Mi Z Y, Sizmann R, *et al. J. Vac. Sci. Technol. B*, 1992, **10**(4), 1569

INFRARED MAGNETO-PHOTOCONDUCTIVITY SPECTRA RELATED WITH IMPURITIES AND DEFECTS IN $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$

Liu Pulin Lu Wei Lu Xiaofeng Chen Zhanghai Shi Xiaohong Shi Guoliang

(National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Gong Haimei Hu Xiaoning Xu Guosen Shen Jie

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract The infrared magneto-photoconductivity (PC) spectra of n-type $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0.2 \sim 0.3$) were measured. Several PC peaks related with impurities and defects were observed at 4.2K under different magnetic field. The physical mechanism of these PC peaks and the chemical origins of some acceptor levels and resonance states in the conduction band were discussed.

Key words $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, impurities, defects, IR magneto-PC spectrum