

HgCdTe 热辅助下的微分调制光谱*

奚红飞 陆卫 陈效双 戴宁 李宁 史国良 杨建荣 刘普霖 沈学础

(中科院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 上海, 200083)

TN304.26

摘要 用热辅助下的微分调制光谱方法研究了 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 本材料和液相外延材料的 E_1 和 $E_1 + \Delta_1$ 临界点, 并用三维临界点各向异性线性分析了实验光谱结构, 通过拟合获得了相应能带参数。

关键词 HgCdTe, 热梯度, 微分调制光谱

半导体

引言

3~5 μm 和 8~15 μm 光谱范围的合金半导体 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 材料是当今半导体材料继 Si 和 GaAs 后的又一关键性功能材料, 在红外焦平面阵列方面的应用是十分重要的. 红外探测器件的应用要求准确确定材料的基本参数, 同时对材料质量提出较高的要求, 例如材料的均匀性等. 对 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 的 E_1 能态已有了一些研究, 如通过反射光谱^[1]、波长调制光谱^[2]、电解液中的电场调制光谱^[3], 或者在样品表面制作金属/绝缘体接触形成 MIS 结构, 测量其电场调制光谱^[4]等, 得到 E_1 的能量位置. 在电场调制光谱中通常采用关于能量的三阶微分线形, 由于机理的复杂性, 文献[4]中, 在能量 E_1 附近需通过 2 个光跃迁能量才能较好地拟合实验曲线, 但是其中 E_1 的物理意义不明确, 并且对于采用三维临界点、二维临界点拟合, 两种拟合与实验结果线性差别较小, 从而得到 E_1 能量位置与电场调制光谱线性对临界点的维数不敏感.

热调制光谱发展近 30 年来, 对半导体体材料进行了系统的研究^[5]. 由于热调制光谱的线性是能量的一次微分线形, 机理简单清晰, 从而能量位置的确定比较方便, 而且有助于材料临界点性质的理解. 但是, 目前还没有利用这种方法对三元合金半导体 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 进行研究.

本文利用热辅助的微分调制光谱手段研究了 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 体材料和液相外延材料的 E_1 和 $E_1 + \Delta_1$ 的能带特性, 并用三维临界点的一次微分对光谱进行拟合, 拟合曲线与实验符合良好.

与电场调制光谱方法和通常的热调制方法相比, 本实验采用的热辅助的微分调制光谱方法无需对样品特殊处理和制作电极, 也无需对样品减薄, 具有无损伤的特点. 与光调制方法相比, 不受激光光子能量的限制, 其光谱测试范围较宽.

1 实验

实验中所用的体材料 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 为单面抛光的晶体材料, 组分 $x = 0.2$, 厚度为

* 国家自然科学基金(编号: 69776018)和上海市科技启明星计划资助项目
稿件收到日期 1998-08-14, 修改稿收到日期 1999-04-06

0.5mm, 外延 $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$, 采用 LPE 方法生长的, 厚度为 $10.2\mu\text{m}$, 组分为 $x=0.23$, 晶向为 $\langle 111 \rangle$.

测量系统是: 从单色仪出射的单色光经透镜照射在振动的平面镜上, 然后反射到样品上, 导致光束在样品上来回摆动, 从样品上反射的光经透镜照射在探测器上, 其中, 探测器的信号由锁相放大器检测, 镜面的振动频率作为参考信号输入到锁相放大器中, 锁相放大器的采集和单色仪的扫描由计算机控制, 样品的一端由电阻加热, 另一端放置在散热片上, 这样在样品上形成热场梯度, 探测光谱在样品上扫描, 形成热调制光谱, 具体的测量系统见文献 [6].

测量的热辅助微分调制光谱如图 1 和图 2 所示, 其中点表示实验光谱, 与常规的实验热调制光谱相似, 光谱的线形表现出一阶微分光谱特性. 图 1 是体材料 $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ 的光谱结果, 在低能方向 2.250eV 的峰值结构为 $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ 的 E_1 能态, 高能方向 2.830eV 附近的峰值为 $E_1 + \Delta_1$. 比较二者的 $\Delta R/R$ 的强度, 如图 1 所示, 能态 E_1 的强度约为 $E_1 - \Delta_1$ 的 2 倍. 图 2 为液相外延 $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ 薄膜的光谱, 其 E_1 位置为 2.275eV , $E_1 + \Delta_1$ 的能量位置为 2.813eV . 比较这两个能态的光谱结构强度, 如图 2 所示, 能态 E_1 的 $\Delta R/R$ 强度约是 $E_1 + \Delta_1$ 的 6 倍, 这与图 1 中的体材料明显不同, 另外, 图 1 和图 2 还显示能带自旋分裂值体材料的 Δ_1 约为 581meV , 薄膜材料的 Δ_1 为 539meV , 它们明显不同.

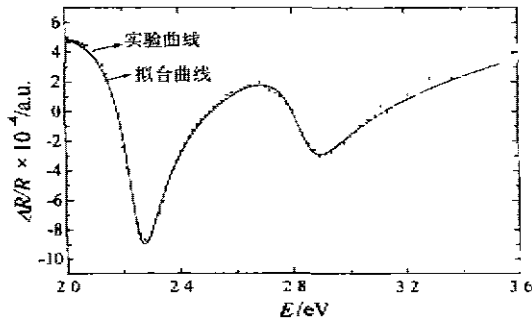


图 1 体材料 $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ 热辅助的微分调制光谱及拟合曲线

Fig. 1 The differential spectrum and its fitting curve for bulk $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ assisted by the thermal gradient

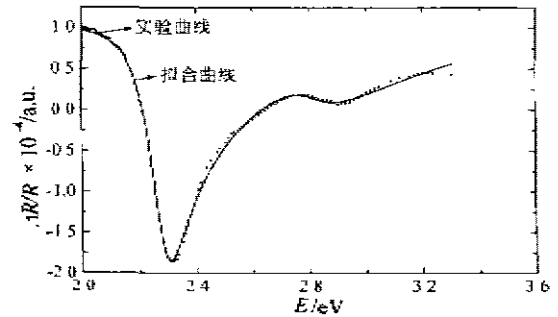


图 2 外延材料 $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ 热辅助的微分调制光谱及拟合曲线

Fig. 2 The differential spectrum and its fitting curve for epilayer $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ assisted by the thermal gradient

2 讨论

探测光在有温度梯度的样品上周期性摆动时, 形成温度梯度调制光谱, 温度梯度使得样品上不同位置的 E_g 不同, 其介电函数也发生相应的变化, 当光点在样品上周期性摆动时, 样品上的反射光的反射率发生变化, 即在空间上被调制, 由于在临界点附近介电函数变化较大, 因此, 我们可以观察到与材料的临界点相关的光谱结构.

通常材料的介电函数可表示为

$$\epsilon = C - A(E - E_g - i\Gamma)^{-2}, \quad (1)$$

式(1)中,当临界点为三维时, $n=1/2$,当临界点为二维时, $n=0$; E 为入射光子的能量, E_c 为材料某一带的带宽, Γ 为线宽. 外加热场调制时,介电函数的变化可以表示为

$$\Delta\epsilon = \left[\frac{\partial\epsilon}{\partial E} \frac{\partial E}{\partial T} + \frac{\partial\epsilon}{\partial \Gamma} \frac{\partial \Gamma}{\partial T} \right] \Delta T. \quad (2)$$

热调制反射光谱与介电函数关系的一般表达式为

$$\Delta\epsilon = \alpha\Delta\epsilon_1 + \beta\Delta\epsilon_2. \quad (3)$$

式(3)中 $\Delta\epsilon_1$ 和 $\Delta\epsilon_2$ 分别对应于实部和虚部的变化量, α, β 是塞拉芬(Seraphin)系数. 对于体材料在临界点附近 $\beta \approx 0$. 由式(1)~(3)可以推导出:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= \alpha\Delta\epsilon \\ &= Re \left[\frac{\kappa - A(E - E_c + i\Gamma)^n}{\partial E_c} \frac{\partial E_c}{\partial T} - \frac{\kappa - A(E - E_c + i\Gamma)^n}{\partial \Gamma} \frac{\partial \Gamma}{\partial T} \right] \Delta T. \end{aligned} \quad (4)$$

简化式(4)得到:

$$\frac{\Delta R}{R} = Re [P e^{i\theta} (E - E_c + i\Gamma)^n], \quad (5)$$

式(5)中 P 为强度, θ 为位相. 将 E_1 能态所处的能带结构的布里渊区位置 Δ 视为三维临界点, $n=1/2$. 利用式(5)对实验曲线进行拟合,结果如图 1 和图 2 中所示的实线,与实验符合良好. 将体材料和薄膜材料的拟合结构列于表 1.

表 1 体材料 $Hg_{0.8}Cd_{0.2}Te$ 和薄膜材料 $Hg_{0.77}Cd_{0.23}Te$ 的拟合结果
Table 1 The fitting results of bulk $Hg_{0.8}Cd_{0.2}Te$ and epilayer $Hg_{0.77}Cd_{0.23}Te$

材料	E_1/eV	Γ_{11}/meV	$E_1 - \Delta_1/\text{eV}$	$\Gamma_{L_1 + \Delta_1}/\text{meV}$
体材料, $n=0.2$	2.2505	57.5	2.8323	89.3
薄膜材料, $n=0.23$	2.2748	60.5	2.8231	115.0

利用式(5),将 E 视为二维临界点时,拟合曲线与实验结果同样符合良好,得到与文献[3]和[4]相似的结果, $HgCdTe$ $\langle 111 \rangle$ 方向布里渊区的 Δ 临界点对其维数不敏感.

本实验中采用热辅助的微分调制光谱测量 E 的能量位置并采用三维临界点一阶线形拟合,其精度为 0.3meV . 通过能量 E_1 与组分的关系,可以精确测量组分在 0.2% 之间的变化. 这对于红外焦平面器件的应用,检验 $HgCdTe$ 材料的均匀性很重要. 将入射光聚焦于样品,测试样品的基本带隙. 由于其基本带隙在红外范围内,其聚焦光斑的极限较可见光的光斑大. 则测试样品不同点的光谱,在可见光范围内可以得到较小的探测光点. 通过测量 E_1 , 结合 E_1 的实验精度,热调制光谱可作为检测 $HgCdTe$ 样品均匀性的一种方法.

REFERENCES

- 1 Rodzik A, Kisiel A. *J. Phys. C*, 1985, **16**:203
- 2 Koppel P. *J. Appl. Phys.*, 1985, **57**:1705
- 3 Berlouis L E A, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**:502
- 4 Ksendzov A, et al. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**:5528
- 5 Matagui E, et al. *Phys. Rev.*, 1968, **176**:959
- 6 DOU Hong-Fei, LU Wei, et al. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, (窦红飞, 陆卫等, 空间热梯度辅助的热调制反射光谱, 红外与毫米波学报), 1999, **18**(1):93

DIFFERENTIAL SPECTRUM OF HgCdTe ASSISTED BY THERMAL GRADIENT*

DOU Hong-Fei LU Wei CHEN Xiao-Shuang DAI Ning LI Ning
SHI Guo-Liang YANG Jian-Rong LIU Pu-Lin SHEN Xue-Chu

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

Abstract The energy bands E_1 and $E_1 + \Delta_1$ of bulk crystal $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.2$) and LPE-epilayer $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ were investigated by new differential spectroscopy assisted by the thermal gradient. The experimental results were fitted by the Lorenz lines. The fitting lines agreed with the experimental results well. The parameters of E_1 , $E_1 + \Delta_1$ and their HM were gotten.

Key words HgCdTe, thermal gradient, differential spectrum.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China and the Qimingxing Plan of Shanghai Municipality

Received 1998-08-14, revised 1999-04-06