

高温区 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光导器件的 温度-电阻关系

桂永胜 蔡毅^{*} 郑国珍 褚君浩 郭少令 汤定元

TN215

(中国科学院上海技术物理所, 红外物理国家实验室, 上海, 200083)

A

摘要 在 200~300K 范围内测量了 n-HgCdTe 的电学参数, 并推导了载流子浓度、迁移率、电阻和组分的关系表达式, 所得结果与红外光谱测量数据符合. 利用 HgCdTe 光导器件的电阻-温度特性确定组分, 不需要电阻的精确值, 是一种判断器件均匀性和性能的有效方法.

关键词 碲镉汞, 电阻-温度关系, 光导探测器.

红外探测

引言

①

光导型 HgCdTe 探测器具有探测灵敏度高, 噪声小等特点, 已越来越受到重视. 为提高器件探测性能, 必须了解制成器件后材料参数的改变. 由于制备探测器的体材料很薄, 需要粘在衬底上增加强度, 为降低表面复合速度, 表面大都经过处理形成钝化层^[1,2], 所以反射或透射等光学方法基本上不能使用. 另外, 光导器件一般情况下只是两端器件, 不能满足霍尔测量至少 4 个电极的要求. 唯一能测量的电学参数只有电阻. 如何从器件的电阻得到材料的信息, 便成为一个很有意义的课题.

我们研究了高温区 (200~300K) $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光导探测器电阻-温度特性与器件材料组分之间的关系. 由电阻-温度关系推导材料组分的方法, 可以用于分析 HgCdTe 光导探测器的组分及探测率的均匀性.

1 实验结果

实验所用的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 样品主要是用固态再结晶 (少数用碲溶剂) 法生长的单晶. 晶体切片后经低温热处理得到电学性质均匀的低电子浓度的 n 型样品, 样品经研磨抛光后, 焊上 In 电极进行电学测量.

常规的霍尔测试系统由微机、Solartron 公司的 7081 数控电源、Keithley 公司的 220 程控电流源、电磁铁、Janis 公司的 CCS-300ST 氮循环制冷机组组成, 磁场强度固定在 0.08T, 温度范围 10~300K, 将样品放入样品架, 采用范德堡法可以得到材料不同温度下的迁移率和载流子浓度. 选用组分均匀的样品, 利用 PE983 双光路红外光谱仪分光获得材料的红外透射谱, 根据褚君浩等对禁带宽度的定义^[3,4], 可得到材料的组分.

* 昆明物理研究所, 云南, 昆明, 650223

本文 1995 年 11 月 9 日收到, 修改稿 1996 年 1 月 18 日收到

2 理论计算

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光导探测器的总电阻由材料的电阻率、器件几何尺寸、温度和电极等情况决定. 电极电阻来源于金属-半导体的接触电阻, 对于小组分 n 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料, 金属和半导体材料是良好欧姆接触. $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料的表面电导是由表面重积累层引起的, 积累层的厚度为 $0.1\mu\text{m}$ 左右^[5], 虽然它的电子浓度比体内的高一个数量级左右, 但由于二维电子气中散射作用的加强, 其迁移率要比体内低一个数量级, 所以, 由表面重积累层引起的表面电导对整个器件电阻的贡献相对很小. 如果忽视表面电导的影响, 考虑采用扩展电极后, 电极对电流在器件中的分布有影响. 此时, 器件的总电阻 R 与光敏区 HgCdTe 材料的有效电阻 R_{eff} 有如下关系:

$$R = \alpha \cdot R_{eff} = \alpha \cdot \rho(x, T) \frac{L}{Wd}, \quad (1)$$

式中 L 、 W 和 d 分别为光敏区的长度、宽度和厚度, α 是一个与器件电极结构有关的常数, 当器件的长度与光敏区长度之比大于 3 时, $\alpha=1.85$ ^[6].

对式(1)两边取对数, 得

$$\log R = \log \frac{\alpha \cdot L}{W \cdot d} + \log \rho(x, T). \quad (2)$$

式(2)中第一项是一个只与器件结构有关的常数, 与温度、组分无关, 所以器件的电阻-温度关系可以认为就是电阻率-温度关系. 即使在高温区, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 中电子的迁移率还是远远大于空穴的迁移率, 如果忽略表面电导, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光导探测器的电阻率 ρ 由材料的电子迁移率 μ_e 和热平衡电子浓度 n_0 决定, 即

$$\rho(x, T) = 1/en_0(x, T)\mu_e(x, T). \quad (3)$$

在高温区, 小组分 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 中 $n_i \geq N_D + N_A$, 热平衡电子浓度 n_0 近似等于材料的本征载流子浓度 n_i . 在高温区, 极性光学声子散射^[7,8]是 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料的主要散射机制, 它决定了电子的迁移率, 有 $\mu_e \approx \mu_{ep}$. 这样, 高温区的电阻-温度关系就可以分解为本征载流子浓度-温度关系和由极化光学声子散射决定的迁移率-温度关系.

由褚君浩等^[9]利用 Kane 的非抛物能带模型以及费密-狄拉克统计推得 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 的本征载流子浓度公式, 可得在高温区, $\log n_i$ 与 $1000/T$ 呈线性关系, 并满足

$$\log n_i = (0.4699 - 4.0974x)(1000/T) + A, \quad (4)$$

式(4)中 A 是与温度无关的常数.

由极性光学波散射决定的电子迁移率 μ_{ep} 只与 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料中声子温度 T_D 、低频介电常数 ϵ_0 和高频介电常数 ϵ_∞ 有关^[10], 而 T_D 、 ϵ_0 和 ϵ_∞ 均由组分 x 决定^[11], 所以只要知道组分 x , 其高温区的电子迁移率随温度的变化关系就确定了.

图 1 为不同组分下, $150\sim 300\text{K}$ 范围内的迁移率-温度关系图, 实验数据取自文献^[12], 对 $\log \mu_e - 1000/T$ 曲线进行线性拟合, 可得

$$\log \mu_e = (0.3726 - 0.9638x + 0.8534x^2)(1000/T) + B, \quad (5)$$

式中 B 是与温度无关的常数.

由(3)~(5)式, 可得

$$\log \rho = (-0.81 + 5.0612x - 0.8534x^2)(1000/T) - A - B. \quad (6)$$

利用式(6)对实验数据进行拟合时发现, 仅用线性回归得到的组分往往与光学测量得到的材料参数有一定的误差, 这一方面是因为 HgCdTe 材料中存在多种尚未从理论上搞清楚物理机制, 另一方面也可能是因为采用式(4)和(5)拟合过程中误差积累所致, 因此, 我们尝试采用形如

$$\log \rho = C_0 + C_1(1000/T) + C_2(1000/T)^2 \quad (7)$$

的二次多项式进行拟合, 结果与实验点符合得较好. 式(7)中 $(1000/T)^2$ 项远小于 $(1000/T)$ 项, 说明 $\log \rho - 1000/T$ 关系基本上还是线性的, 参照式(6)可以近似认为

$$C_1 = -0.81 + 5.0612x - 0.8534x^2.$$

3 结果与讨论

图 2 是 150~300K 范围内得到的不同组分 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料的高温区载流子浓度, 图中离散点为实验数据, 实线为采用式(1)的计算结果, 样品厚度在 7~10 μm 之间. 在载流子浓度的对数和温度倒数的坐标中, 实验数据近似为直线. 通过线性拟合并利用式(4)得到的材料组分为: 0.187、0.202、0.217、0.231 和 0.240; 用红外透射光谱测量得到的组分分别为: 0.19、0.20、0.216、0.231 和 0.25, 两种方法得到的组分很相近, 说明公式(4)能较好地反映材料性质.

图 3 为样品 L9402 的对数迁移率-温度倒数关系, 图中实点为实验数据, 直线为式(5)的拟合结果, 样品厚度为 0.4mm. 线性拟合过程中的相关系数大于 0.99, 说明迁移率对数和温度倒数的关系可以用直线描述. 利用式(6)计算得到组分 $x=0.418$, 由红外光透射光谱得到的组分为 0.395, $\Delta x=0.03$, 两者相差 0.023, 可见, 通过拟合迁移率测量确定的组分在误差范围内.

图 2 和 3 的意义还在于: 可以不需要载流子浓度或迁移率的精确值, 而仅需知道它们随温度的变化趋势, 就可以较为精确地得到材料组分. 由于霍尔测量中引入误差的因素较多, 准确的电学参数难以获得, 这一方法就显得很有价值.

图 4 是 33 元线列 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 长波光导探测器中几个探测器单元的电阻-温度曲线^[13], 实线是通过对实验数据的平滑得到的. 制成探测器前的材料参数为: 组分 $x=0.207\sim 0.212$ (红外透射光谱测量值), 77K 时, 少子体寿命为 2 μs , 载流子浓度 $n_0=2.5\times 10^{14}\text{cm}^{-3}$, 电子迁移率 $\mu_e=2.5\times 10^5\text{cm}^2/\text{Vs}$.

利用式(7)对图 4 所示的 33 元 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光导探测器的温度-电阻关系进行拟合, 计算所得的材料组分直方图如图 5 所示, 可见其范围在 0.201 和 0.212 之间, 比未制成器件时的组分略有减小, 这可能是由于电学方法和光学方法对禁带宽度的定义有所不同, 也可能是

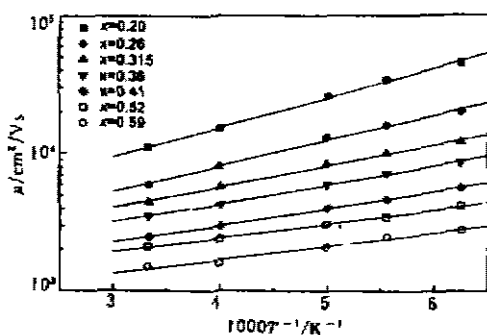


图 1 不同组分 n 型 HgCdTe 材料在高温区的迁移率-温度关系

Fig. 1 The temperature dependence of mobility at high temperature region for n-HgCdTe with various compositions

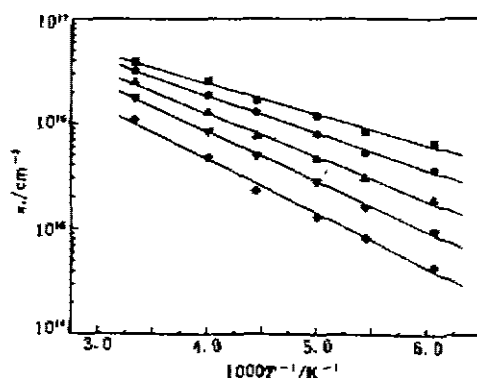


图 2 不同组分 n-Hg_{1-x}Cd_xTe 的载流子浓度-温度关系

Fig. 2 The temperature dependence of carrier concentration for n-HgCdTe with various compositions.

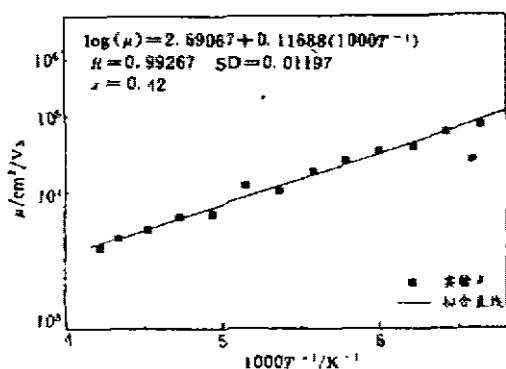


图 3 样品 L9402 在高温区的迁移率-温度关系

Fig. 3 The temperature dependence of mobility for sample L9202 at high temperature region

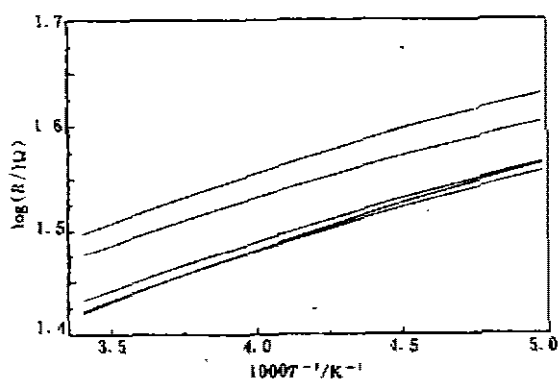


图 4 33 元 Hg_{1-x}Cd_xTe 光导探测器中几个探测器单元的电阻-温度关系

Fig. 4 The resistance-temperature relationship for some elements in 33-element HgCdTe PC detector

在器件制备过程中,外加的应力损伤使带尾增宽,带隙减小所致. 图 6 为探测器黑体电压响应率 $R_{v\lambda}$ 的直方图,实验数据取自文献[13],与图 5 相比较,可以发现组分偏低的探测器响应较低,而组分正常的器件响应接近正常值,因此通过拟合探测器高温区温度-电阻关系可以判断器件性能的优劣.

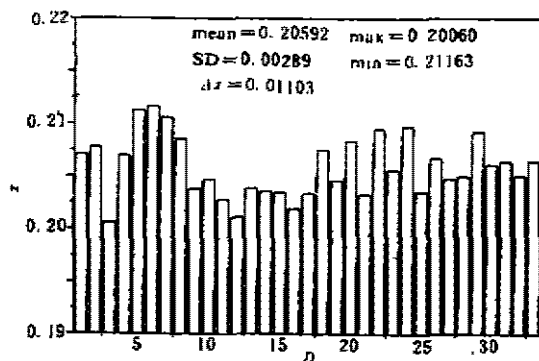


图5 33元 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光导探测器
材料组分的直方图
Fig. 5 The histogram of composition
for 33-element HgCdTe PC detector

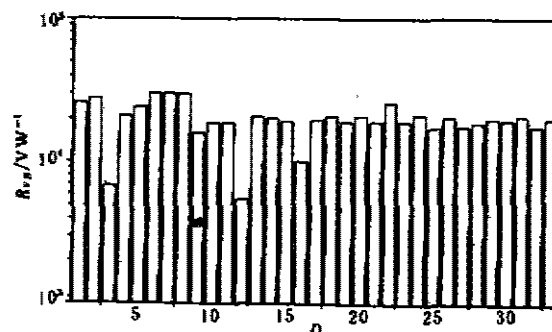


图6 实验测定的33元 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$
光导探测器电压响应率直方图
Fig. 6 The histogram of voltage
response measured for 33-element
 HgCdTe PC detector

4 结语

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光导探测器一般都是两端器件,不能用霍尔方法得到器件的材料参数.实际上, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 两端器件的电阻率-温度关系(也就是电阻-温度关系)综合了热平衡载流子浓度和迁移率对电导的贡献,因此,利用 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 器件的电阻率-温度特性来确定组分,是一种判断器件均匀性和性能的有效方法.

参考文献

- 1 Wager J P, Rhiger D R. *J. Vacuum Sci. Technol.*, 1985, A3, 1325
- 2 Nemirovsky Y, Finkman E. *J. Electrochem. Soc.*, 1979, 126, 212
- 3 褚君浩,等. *科学通讯*, 1982, 27, 403
- 4 褚君浩,等. *红外研究*, 1985, 4, 255
- 5 Lowney J R, et al. *J. Electron. Mater.*, 1993, 22(8), 985
- 6 梁宏林. *红外与激光技术*, 1992, (5), 47
- 7 Dubowski J J, Dietl T, Szymanska W, et al. *J. Phys. Chem. Solids* 1981, 42, 351
- 8 Gorokhovskii I R, Laurinavichyus A K, Rashevskaya E P, et al. *Sov. Phys. Semicond.*, 1987, 21, 1211
- 9 褚君浩,等. *红外研究*, 1983, 2, 241
- 10 Bate R T, Baxter R D, Reid F J, et al. *J. Phys. chem. Solids*, 1965, 26, 1205
- 11 Yadava R D S, Gupta A K, Warriar A V R. *J. Electron. Mater.*, 1994, 23(12), 1359
- 12 Willardson R K, Beer A C. *Semiconductors and Semimetals*, Vol 18, New York, Academic Press, 1981, 15
- 13 蔡毅. 博士论文, 中国科学院上海技术物理研究所, 1995

THE RELATIONSHIP BETWEEN RESISTANCE AND TEMPERATURE
AT HIGH TEMPERATURE REGION FOR
 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ PHOTOCONDUCTORS *

Gui Yongsheng Cai Yi* Zheng Guozhen

Chu Junhao Guo Shaoling Tang Dingyuan

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

Abstract The expressions for carrier concentration, mobility and resistance versus composition were derived for n-HgCdTe and the electrical parameters measured at 200~300K. The results are consistent with that from infrared transmission measurement. To determine the composition from the relationship between resistance and temperature without knowing precise values of resistance seems to be a useful method to characterize the performance and uniformity of HgCdTe photoconductive detectors.

Key words HgCdTe, resistance-temperature relationship, photoconductors.

* Kunming Institute of Physics, Kunming, Yunnan 650223, China