

HgCdTe 光导探测器的磁阻特性

桂永胜 褚君浩 郑国珍 郭少令 汤定元

(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)

蔡毅

(昆明物理研究所, 云南, 昆明, 650223)

TN215

摘要 测量了 3 个 HgCdTe 光导器件和一块液相外延生长 HgCdTe 薄膜材料的磁阻. 用两种载流子模型的约化电导张量(RCT)过程对实验数据进行了分析, 拟合结果与实验值符合得很好.

关键词 HgCdTe, 光导探测器, 磁阻.

秉编第 RCT
红外探测器

引言

光导探测器由于工艺简单、技术成熟等优点, 已被广泛用于通讯、航空、航天等领域^[1]. 但由于材料本身的不稳定性^[2], 暴露在空气中的 HgCdTe 表面, 极易被氧化, 形成一层高电导的 n^+ 型积累层或反型层, 影响了器件的性能. 为降低表面复合速度和 $1/f$ 噪声而采用的阳极氧化等工艺, 光导探测器表面也同样存在一层高电导的 n^+ 型积累层^[3]. 因此, 在 HgCdTe 光导探测器中, 除了体电子对电导有重要贡献外, 了解器件表面电子的电学性质, 对提高器件性能也有重要意义.

光导探测器是一个两端器件, 不能满足普通的 Hall 测量至少需要四个电极的要求, 很多用于分析多载流子体系的方法, 比如多载流子拟合过程, 混合电导分析法^[4,5]以及最新的定量迁移率谱分析^[6,7,8], 都不适用于分析光导探测器中体电子和表面电子的特性. 磁阻测量被认为是一种研究复杂能带半导体的有效方法^[9], 可以用来估计载流子的迁移率. 但由于磁阻表达式非常复杂, 所以, 传统的方法只能对单载流子体系进行分析, 对多载流子体系的过程则异常复杂, 而且往往不能求解. J. S. Kim 等^[10,11]改进了磁阻测量, 发展为 RCT (Reduced Conductivity Tensor), 使之成为一种简单、实用的方法, 并可以方便地分析多载流子体系的输运过程.

本文利用 RCT 方法对光导探测器的变磁场数据进行处理, 理论计算与实验结果非常吻合, 同时给出了光导探测器中体电子和表面电子的浓度和迁移率随温度的变化关系.

1 RCT 方法

文献[10,11]给出了利用 RCT 方法处理变磁场数据的基本方法. 本文只讨论在光导探

测器中存在对电导贡献较大的表面电子和体电子的 RCT 方法.

首先定义磁阻 M , 它是磁场强度 B 的函数,

$$M(B) = \frac{\rho(B) - \rho(0)}{\rho(B)}, \quad (1)$$

式(1)中 $\rho(B)$ 是样品的电阻率, $\rho(0)$ 是未加磁场下的电阻率. $\rho(B)$ 与电导张量的纵向分量 σ_{xx} 和横向分量 σ_{xy} 有如下关系:

$$\rho(B) = \frac{\sigma_{xx}}{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{xy}^2}. \quad (2)$$

通过方程(1)和(2), 可以得到磁阻 $M(B)$ 用电导张量来表示的解析式. 与其它方法相比, RCT 似乎并不有效, 但对光导探测器而言, 它却是唯一可以获得迁移率和载流子浓度的方法, 因为光导探测器是两端器件, 只能测量电阻随磁场的变化, 无法获得 Hall 电压.

在 RCT 分析过程中, 考虑一个具有 J 种载流子的体系, $X(B)$ 和 $Y(B)$ 分别为电导张量纵向和横向分量的相对值, 定义为:

$$X(B) = \sigma_{xx}(B)/\sigma_{xx}(0) = \sum_{j=1}^J X_j, \quad Y(B) = \sigma_{xy}(B)/\sigma_{xx}(0) = \sum_{j=1}^J Y_j, \quad (3)$$

对于两种载流子的体系, $J=2$. 一般情况下, 样品中载流子的种类不会超过 3 种, 一个均匀性很差的样品, 也可以认为体系中存在无限多种载流子.

方程(3)中的 X_j 和 Y_j 满足:

$$X_j = \frac{f_j}{1 + (\mu_j B)^2}, \quad Y_j = \frac{f_j \mu_j B}{1 + (\mu_j B)^2}, \quad f_j = \frac{s_j \mu_j N_j}{\sum s_j \mu_j N_j} = \frac{q s_j \mu_j N_j}{\sigma_{xx}(0)}, \quad (4)$$

式中 s_j 代表载流子的电荷性, 它与迁移率 μ_j 同号; $s_j = -1$ 代表电子, $s_j = 1$ 为空穴, f_j 是一个无单位的量, 它表示未加磁场下第 j 种载流子对电导的贡献; N_j 和 μ_j 分别是第 j 种载流子的浓度和迁移率; q 是电子的电荷量. 在 RCT 过程中, N_j 是一个隐含变量, 知道了 $\mu_j f_j$, 则 $N_j = f_j \sigma_{xx}(0) / q s_j \mu_j$.

对于单载流子体系, $f_j = 1$, $X = 1/[1 + (\mu B)^2]$, $Y = \mu B/[1 + (\mu B)^2]$. 对多载流子体系, 在计算过程中, 必须满足 $0 \leq f_j \leq 1$ 和 $\sum f_j = 1$, 因为不存在对电导贡献为负值的载流子.

由方程(1)~(4)可得:

$$M(B) = \frac{X}{X^2 + Y^2} - 1. \quad (5)$$

磁阻被定义为磁场的函数, 并且与一系列载流子的 (f_j, μ_j) 有关. 在一个只有两种载流子的体系中:

$$M(B) = \frac{(\alpha \Delta B)^2}{1 + (\beta \Delta B)^2}, \quad (6)$$

式(6)中 $\alpha = \sqrt{f_1(1-f_1)}$, $\beta = \mu_1/\Delta - f_1$, $\Delta = \mu_1 - \mu_2$.

当磁场很低时, $M(B) = (\alpha \Delta B)^2 \propto B^2$. 当磁场很高时, $M(B) = (\alpha/\beta)^2$, $M(B)$ 是一个与磁场强度 B 无关的常数, 只与系统中载流子的迁移率及浓度有关. 在这儿定义磁阻从弱场到强场的转变区为 $B_1 < B < B_2$ ($B < B_1$ 为低场区, $B > B_2$ 为高场区), 转变宽度 $W = \log_{10}(B_2/$

$B_1)=0.954$, 其中 $M(B_1)=0.1(\alpha/\beta)^2$ 和 $M(B_2)=0.9(\alpha/\beta)^2$.

2 实验结果与讨论

普遍认为 HgCdTe 光导探测器中主要存在两种载流子: 体内电子和表面钝化引起的表面电子. 探测器一般工作在 77K 下, 此时表面电子对器件的电学性质有着重要影响, 表面电子的迁移率在 $10^4\text{cm}^2/\text{Vs}$ 量级, 虽然比体电子的迁移率低一个量级, 但是由于它的浓度很高, 约在 $10^{11}\sim 10^{12}\text{cm}^{-2}$ 量级, 所以综合考虑起来, 表面电子对电导的贡献还是可以与体电子的贡献相比.

器件 D685-6, D685-2 和 D684-5 为山体材料制备的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光导探测器 ($x=0.214$), 尺寸为 $888\times 290\times 8\mu\text{m}^3$, 表面经过了钝化处理. 图 1 为 1.2K 时, 器件 D685-7 和 D684-5 的磁阻 $M(B)$ 和 B 的关系. 图 1 中点为实验数据, 曲线为采用两种载流子模型对磁阻数据进行拟合的结果, 两者符合的很好. 拟合结果如表 1 所示. μ_1 和 N_1 为体电子的迁移率和浓度, μ_2 和 N_2 为表面电子的迁移率和浓度.

表 1 1.2K 时磁阻数据两种载流子的拟合结果

Table 1 The fitting results of magnetoresistance data by two-carrier model at 1.2K

样品号	μ_1 (cm^2/Vs)	μ_2 (cm^2/Vs)	N_1 (cm^{-3})	N_2 (cm^{-3})	B_1 (T)	B_2 (T)
D685-7	-2.65×10^5	-3.12×10^4	7.70×10^{14}	2.44×10^{15}	0.034	0.3
D684-5	-2.23×10^5	-2.18×10^4	8.10×10^{15}	5.08×10^{15}	0.06	0.54

在 RCT 法中, 二维电子被认为在整个厚度范围内是均匀分布的, 因此将表 1 中的表面电子浓度除以厚度就可以换算为面密度, 器件 D685-7 和 D684-5 的电子浓度分别为 $1.92\times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ 和 $4.03\times 10^{12}\text{cm}^{-2}$. 器件 D685-7 和 D684-5 中表面电子对电导的贡献分别为 27% 和 14%, 说明表面电子对器件的性能有着重要的影响.

实际的 HgCdTe 探测器中除了表面电子和体电子外, 还存在其它的多种载流子, 比如: 轻空穴、重空穴; 由于 HgCdTe 材料本身的不均匀性, 每种载流子的迁移率并非唯一, 而是有一定的展宽效应; 另外能带的非抛物型也增加了材料的复杂性, 所有这些原因导致了图 1 中实验数据与拟合结果仍存在一些误差.

磁阻测量除了可以对光导探测器进行分析外, 同样可以用来分析制造光伏器件用的 p 型 HgCdTe 材料. 用来制造光伏器件的 LPE HgCdTe 材料, 表面往往存在二维电子气, 在霍尔测量中, 往往会将性能优良的 p 型 LPE 材料错误地当成质量低劣的 n 型材料. 图 2 为采用两种载流子 RCT 模型对样品 LPE-1 在 77K 时 $M(B)\sim B$ 数据的拟合结果, 图 2 中的曲线为拟合结果. 样品 LPE-1 外延材料为性能优良的 p 型材料, 由于表面电子的存在, 体内空穴对电导的贡献仅为 7.5%, 材料呈现 n 型. 通过 RCT 分析, 就可以获得材料较为真实的信息.

在 1.2K~300K 的范围, 对器件 D685-2 进行一次变磁场的输运实验, 利用 RCT 分析方法, 观察器件中不同载流子浓度和迁移率与温度的关系, 结果如图 3 所示, 图 3 中曲线由实验数据平滑所得. 从图 3(a) 和 (b) 可见: 体电子的浓度在 1.2K~100K 范围内, 基本没有变化, 当温度超过 100K, 随温度的升高, 载流子浓度迅速上升; 体电子的迁移率在低温下, 随

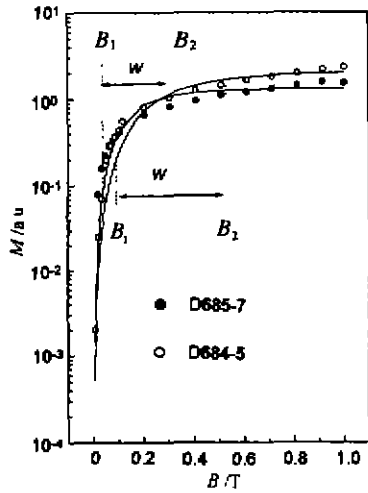


图 1 1.2K 时, HgCdTe 光导探测器的磁阻曲线
Fig. 1 Magnetoresistance plots for HgCdTe photoconductive detectors at 1.2K

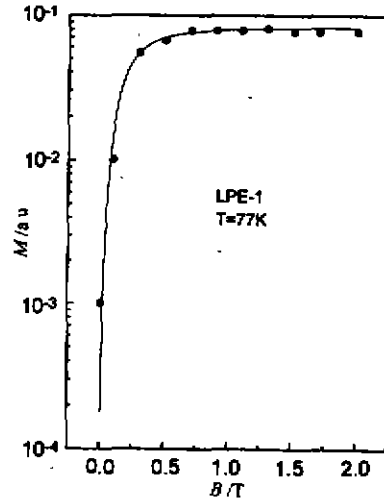
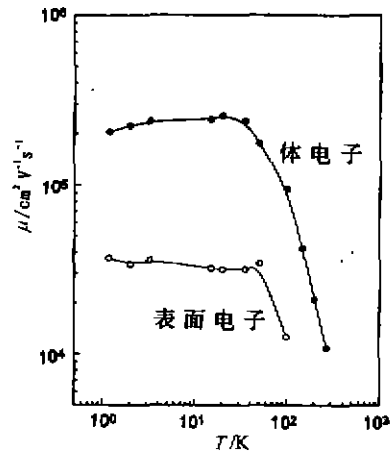
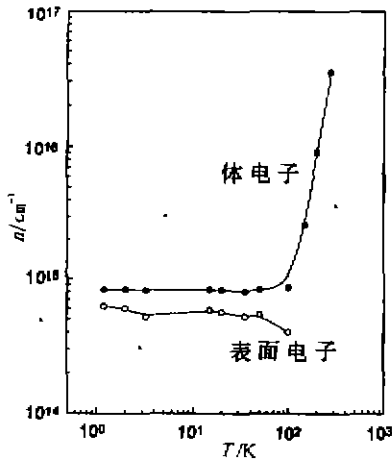


图 2 77K 时, 样品 LPE-1 实验值 (实点) 与两载流子拟合结果 (虚线)
 $\mu_1 = 330 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_2 = -5.03 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$,
 $f_1 = 0.075$
Fig. 2 Two-carrier fit (dashed and solid) of experimental data (dots) for LPE-1 film at 77K



(a) (b)
图 3 样品 D685-2 中不同载流子的浓度和迁移率与温度的关系
(a) 载流子浓度与温度的关系 (b) 迁移率与温度关系

Fig. 3 Temperature dependence of the carrier concentration (a) and mobility (b) for sample D685-2

温度的上升, 缓慢增加, 在 35K 左右达到最大值, 温度再升高, 迁移率迅速下降, 表面电子的浓度和迁移率在 1.2K~100K 范围内基本与温度无关, 这与文献[12]报道的 n 型 HgCdTe 样品中表面电子的行为相吻合. 温度高于 100K, 体电子的浓度迅速增加, 表面电子对电导的

贡献相对体电子的贡献越来越小,几乎可以忽略表面电子的存在,此时采用该方法拟合实验数据,得到的表面电子浓度和迁移率将与实际情况相差较大。

3 结论

我们采用 RCT 方法对 HgCdTe 光导探测器的磁输运特性进行了分析,结果表明:它克服了以往 Hall 测量方法的缺点(即不能对两端器件进行测量),可以提供较为准确的多种载流子的浓度及迁移率。采用 RCT 方法对反常的 LPE 样品进行分析,获得了较精确的材料信息。该方法有可能成为一种常规地用来研究其它一些材料、器件和结构电学特性的手段。

参考文献

- 1 Broudy R M, Mazurizyk. *Semiconductors and Semimetals vol 18. edited by R K Willardson and A C Beer, New York: Academic, 1981, 157~199*
- 2 Nimtz G, Slicht B, Dornhaus R. *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **34**:410
- 3 Lowney J R, et al. *J. Electron. Mater.*, 1993, **22**(8):985
- 4 Meyer J R, et al. *Semicond. Sci. Technol.*, 1993, **8**: 805~823
- 5 Antoszewski J, Faraone L. *J. Appl. Phys.*, 1996, **80**(7):3881
- 6 Sziuba Z, Gorska M. *J. Phys. ■ France*, 1992, **2**:99
- 7 Antoszewski J, et al. *J. Electron. Mater.*, 1995, **24**(9):1255
- 8 Meyer J R, et al. *Advanced Magneto-Transport Characterization of LPE-Grown Hg_{1-x}Cd_xTe by QM-SA*, 1995, MCT Workshop
- 9 Putley E H. *The Hall Effects and Semiconductor Physics*. New York: Dover, 1960
- 10 Kim J S, et al. *J. Appl. Phys.*, 1993, **73**:8324
- 11 Kim J S, et al. *J. Electron. Mater.*, 1995, **24**(9):1305
- 12 Reine M B, Maschhoff K R. et al. *Semicond. Sci. Technol.*, 1993, **8**:788

THE MAGNETORESISTANCE PROPERTIES OF HgCdTe PHOTOCONDUCTIVE DETECTORS

Gui Yongsheng Chu Junhao Zheng Guozhen Guo Shaoling Tang Dingyuan

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

Cai Yi

(Kunming Institute of Physics, Kunming, Yunnan 650223, China)

Abstract The magnetoresistance of three HgCdTe photoconductive detectors and one liquid phase epitaxially grown HgCdTe film was measured. The fitting results analyzed by a two-carrier model of reduced conductivity tensor (RCT) scheme agree well with the experimental data.

Key words HgCdTe, photoconductive detectors, magnetoresistance