

② 327-332

HgCdTe 多载流子体系的迁移率谱分析*

桂永胜 郑国珍 郭少令 褚君浩

TN213

(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 通过迁移率谱分析法对 LPE 和 MBE 生长的 n-HgCdTe 样品进行了研究, 获得了样品中体电子、体空穴以及界面电子的迁移率和浓度. 通过迁移率谱分析法获得的样品中体电子和界面电子随温度的变化规律与理论分析完全吻合.

关键词 迁移率谱, 多载流子体系, HgCdTe.

未稿端 红外探测

引言

磁输运测量是一种广泛用于研究 HgCdTe 长波红外探测器材料和器件电学性质的有效手段^[1]. 尽管 HgCdTe 长波红外探测器材料已经有近 40 年的历史, 而固定磁场的霍尔测量一直是获得材料电学参数的常规测试手段. 由于 HgCdTe 材料中往往存在多种载流子, 每种载流子对电导都有一定的贡献, 因此常常会出现一些用单载流子模型无法解释的所谓“反常”霍尔效应. 在这种情况下, 固定磁场的霍尔测量就不能真实地反映样品的电学性质, 甚至会得出错误的结论.

虽然人们早就认识到多载流子体系对输运特性的影响^[2], 但是直到最近, 迁移率谱分析法^[3,4]才从根本上克服了传统方法的缺点. 与传统方法相比, 迁移率谱分析法可以获得更多、更准确的电学信息. 本文利用迁移率谱对 n-HgCdTe 外延材料的变磁场霍尔测量数据进行分析, 研究了样品中体电子和界面电子的电学性质.

1 电导张量

如果认为实验中获得的霍尔系数 R_H 和电阻率 ρ 是磁场强度 B 的函数, 那么电导张量元 σ_{xx} 和 σ_{xy} 与磁场强度 B 有如下关系:

$$\sigma_{xx} = \frac{1}{\rho(B)[R_H(B)B/\rho(B)]^2 + 1} \quad (1)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{R_H(B)B}{\rho^2(B)[R_H(B)B/\rho(B)]^2 + 1} \quad (2)$$

由于不同的载流子的迁移率不同, 它们在不同的磁场下对电导的贡献是不同的, 通过分析电导张量元与磁场强度 B 的依赖关系可以获得样品中电子和空穴的种类, 以及每种电子和空穴的迁移率与浓度.

* 国家自然科学基金(编号 69738020)资助课题
稿件收到日期 1997-10-13, 修改稿收到日期 1997-11-19

人 /

在弛豫时间近似下,通过求解玻尔兹曼方程可以获得电导张量与样品中各类载流子的浓度 n_j 及迁移率 μ_j 的关系,即

$$\sigma_{xx} = \sum_j \frac{en_j\mu_j}{1 + \mu_j^2 B^2}, \quad (3)$$

$$\sigma_{xy} = \sum_j S_j \frac{en_j\mu_j B}{1 + \mu_j^2 B^2}. \quad (4)$$

这里 S_j 为载流子电荷性,电子为 -1 ,空穴为 $+1$. 分析电导张量随磁场强度变化的实验数据,传统上采用的是多载流子拟合方法^[5],由于该方法必须首先确定样品中电子和空穴的种类,以及每种载流子的近似迁移率,所以得到的往往不是唯一结果. 为了克服这个缺点,近几年出现了一些新的研究多载流子体系的方法,这些方法大都以迁移率谱为基础.

2 迁移率谱分析

迁移率谱分析法通过样品电导张量对磁场强度的依赖关系,可以获得样品中电导随迁移率连续变化的谱图,谱图中的每一个峰值对应一种载流子,通过迁移率的正负性就可以判断出载流子的类型^[3].

在迁移率谱分析中,首先假定样品中电子和空穴的迁移率是连续分布的,这样式(3)和(4)的积分形式分别为

$$\sigma_{xx}(B) = \int_0^{\infty} \frac{s^p(\mu) + s^n(\mu)}{1 + \mu^2 B^2} d\mu, \quad (5)$$

$$\sigma_{xy}(B) = \int_0^{\infty} \left[\frac{s^p(\mu) - s^n(\mu)}{1 + \mu^2 B^2} \right] \mu B d\mu. \quad (6)$$

式中空穴和电子的电导密度函数(也就是所谓电导密度函数的迁移率谱) $s^p(\mu)$ 和 $s^n(\mu)$ 分别定义为

$$s^p(\mu) = e p(\mu) \mu, \quad (7)$$

$$s^n(\mu) = e n(\mu) \mu. \quad (8)$$

这里 $p(\mu)$ 和 $n(\mu)$ 分别是电子和空穴的浓度对迁移率的函数. 迁移率谱分析的目的就在于经过一系列的变换获得 $s^p(\mu)$ 和 $s^n(\mu)$ 的值. 式(5)和(6)实际上是一个对无限项的求和,如果用有限的实验数据来求解该方程组,得到的解将不是唯一的. 由于 $s^p(\mu)$ 和 $s^n(\mu)$ 均大于等于零,从这一前提出发,Beck 和 Anderson 推导出数学方程^[3]来计算 $s^p(\mu)$ 和 $s^n(\mu)$ 的包络函数,该包络函数是唯一的. 采用迁移率谱分析多载流子体系的目的并不是为了获得这个包络函数,而是为了判定样品中的载流子种类,以及每种载流子的迁移率和浓度.

3 实验结果与讨论

图 1 为 100K 时, $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.214$) 样品 L9701-1 的迁移率谱,从图中可以发现,样品 L9701-1 的电子迁移率谱中有 3 个尖锐的峰,分别对应体电子 n_0 、界面电子 n_{s1} 和

n_{s2} . 空穴迁移率谱中也有 3 个峰, p_0 对应着体内的少子(空穴). 由于实验存在一定的误差, 因此, 某些对电导贡献很大的载流子, 在迁移率谱中会带来对应其电荷性相反的载流子的峰, 如图 1(b) A 和 B 峰则是电子迁移率谱中峰 n_{s1} 和 n_{s2} 的映象. 将图 1 的迁移率谱对零磁场下获得的电导归一化, 计算所得的电子和空穴浓度随迁移率的分布如图 2 所示. 从图中可以看出样品各种载流子浓度和迁移率. 体电子的浓度在 $10^{13} \sim 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 量级, 迁移率约为 $7 \sim 8 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{Vs}$, 材料中存在两种不同的界面电子, 浓度均为 $10^{13} \sim 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 量级, 迁移率分别约为 $1 \sim 2 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 和 $\sim 5 \times 10^3 \text{cm}^2/\text{Vs}$. 同时, 通过迁移率谱分析法, 我们还发现了本征电离的空穴浓度在 $10^{13} \sim 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 量级, 与体电子浓度相当, 迁移率约为 $1 \times 10^3 \text{cm}^2/\text{Vs}$. 由于它的迁移率远远小于电子的迁移率, 所以在低场下, 空穴对电导张量的作用基本显示不出来. 即使如此, 在迁移率谱上还是能清晰的分辨出空穴的作用. 图 2 表明了迁移率谱不但能获得样品中的载流子种类, 还能得到它们的迁移率和浓度的范围, 的确是一种分析多载流子体系样品的有效方法.

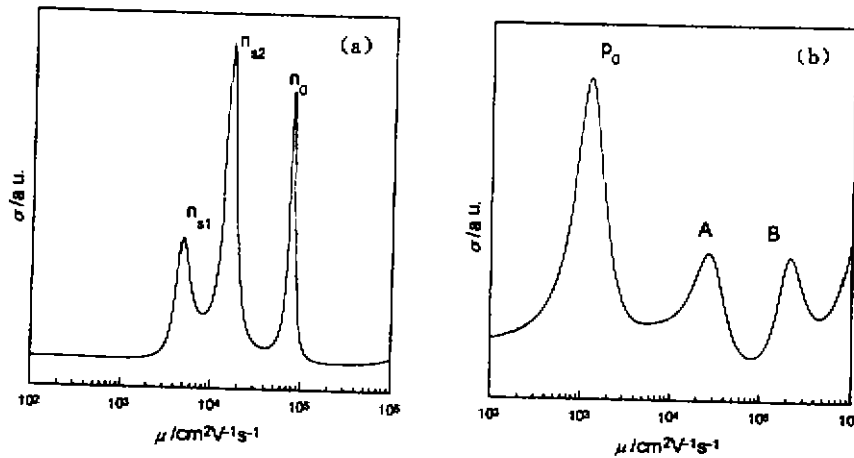


图 1 LPE n-HgCdTe 样品 L9701-1 在 100K 条件下的迁移率谱

(a) 电子迁移率谱, (b) 空穴迁移率谱

Fig. 1 (a) The electron mobility spectrum and (b) the hole mobility spectrum for n-type HgCdTe sample (L9701-1) grown by LPE at 100K

从迁移率谱中获得的载流子迁移率和浓度只是定性的或半定量的, 往往不是材料的真实电学参数. 为了获得精确的结果, 我们将迁移率谱的结果作为初值, 然后通过多载流子拟合过程对实验数据进行处理, 得到了能唯一反映材料真实信息的有关电学参数. 图 3 为利用图 2 的结果对样品 L9701-1 拟合的结果, 点为实验值, 曲线为拟合结果. 样品中体电子的浓度为 $9.7 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$, 迁移率约为 $7.7 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{Vs}$. 材料中两种不同的界面电子, 其浓度分别为 $2.4 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 和 $4.1 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$, 对应的迁移率分别为 $1.62 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 和 $5.6 \times 10^3 \text{cm}^2/\text{Vs}$. 本征电离的空穴的浓度为 $1 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$, 迁移率为 $3 \times 10^2 \text{cm}^2/\text{Vs}$. 我们获得的 $(n_0 p_0)^{1/2} = 9.85 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$, 与 100K 时的本征载流子浓度 ($n_i = 9.5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$) 很接近, 这就说明了拟合结果具有明确的物理意义.

样品 M9608 为 MBE 生长的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0.21$), 衬底材料为 $\text{Zn}_{0.1}\text{Cd}_{0.9}\text{Te}$, 外延厚

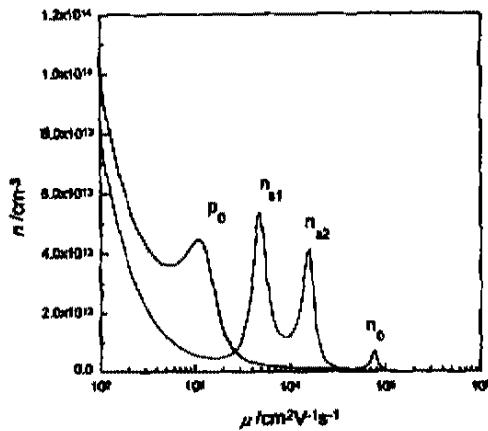


图2 由迁移率谱获得的样品 L9701-1 中载流子浓度随迁移率的分布
Fig. 2 The mobility-dependent concentration obtained by mobility spectrum analysis for sample L9701-1

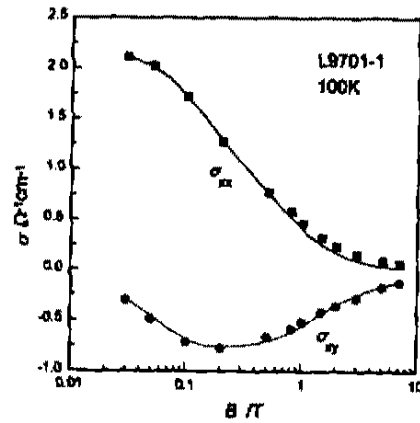


图3 100K时,样品 L9701-1 电导张量与磁场强度的依赖关系
Fig. 3 The fit (curves) to the experimental conductivity tensor components vs magnetic field for sample L9701-1 at 100K

度为 $8.0\mu\text{m}$, 表面是 30nm 的 CdTe. 图4为 70K 和 110K 时, 样品 M9608 的迁移率谱. 在这两种温度下, 迁移率谱均出现两个峰, 可以认为该样品中存在两种不同的载流子 A 和 B. 将迁移率谱中获得的结果作为迁移率的初值, 利用多载流子拟合过程, 就可以获得两种不同载流子的浓度和迁移率. 70K 时, A 载流子的浓度和迁移率分别为 $2.46 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$ 和 $1.52 \times 10^5\text{cm}^2/\text{Vs}$, B 载流子的浓度和迁移率分别为 $1.85 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 和 $1.92 \times 10^4\text{cm}^2/\text{Vs}$; 110K 时, A 载流子的浓度和迁移率分别为 $3.82 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$ 和 $8.71 \times 10^4\text{cm}^2/\text{Vs}$, B 载流子的浓度和迁移率分别为 $2.37 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 和 $1.07 \times 10^4\text{cm}^2/\text{Vs}$.

在 $15 \sim 280\text{K}$ 的范围内, 温度每变化 5K , 进行一次变磁场的运输实验, 利用迁移率谱和多载流子拟合过程, 获得了样品 M9608 中不同载流子浓度和迁移率与温度的关系, 如图5所示. 从图5(a)和(b)可以看出: (1) A 载流子的浓度在 $15 \sim 80\text{K}$ 基本没有变化, 当温度超过 80K , 随温度的升高, 载流子浓度迅速上升, A 载流子的迁移率在低温下, 随温度的上升, 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; (2) B 载流子的浓度基本与温度 T 无关, 迁移率在 $15 \sim 70\text{K}$ 范围内基本与温度无关, 温度高于 70K , 迁移率下降得很快, 这

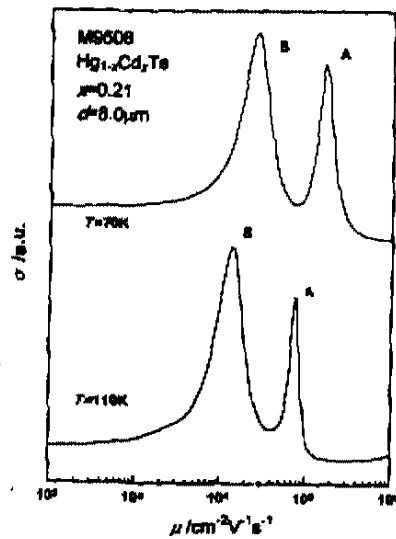


图4 77K 和 110K 时 MBE 样品 M9608 的迁移率谱
Fig. 4 The mobility spectra for sample M9608 grown by MBE at 77 and 110K

与文献[6]报道的 n-HgCdTe 样品中表面电子的行为相吻合, 在 120K 以后, B 载流子对电导的贡献越来越小, 在迁移率谱中基本观察不到它的存在. 从上述的两点可以认为 A 载流子为外延层体电子, 对于窄禁带 HgCdTe 材料, 低温下本征载流子浓度很低, 体电子的浓度基本上就是电离的施主杂质浓度. 本征载流子在 100K 左右开始起作用, 温度再高, 体电子基本都是本征载流子. 图 5(a) 的曲线是利用文献[7]中本征载流子公式对材料电子浓度的计算结果, 实验与理论符合得非常好. 杂质散射和极化光学波散射分别在低温和高温区域限制了体电子的迁移率, 由杂质散射决定的迁移率 $\mu_N \propto T^{3/2}$, 因此, 在低温下体电子迁移率随温度的升高而增大; 而由极化光学波散射决定的迁移率 $\mu_{op} \propto \exp(1/T)$, 在高温下, 体电子的迁移率随温度的升高迅速减小. 图 5(b) 中 A 载流子迁移率变化的趋势符合体电子特性, 一般认为^[8]HgCdTe 表面或界面处的电子浓度与温度基本无关, 所以可以认为 B 载流子为 HgCdTe 与 CdTe 界面处的电子.

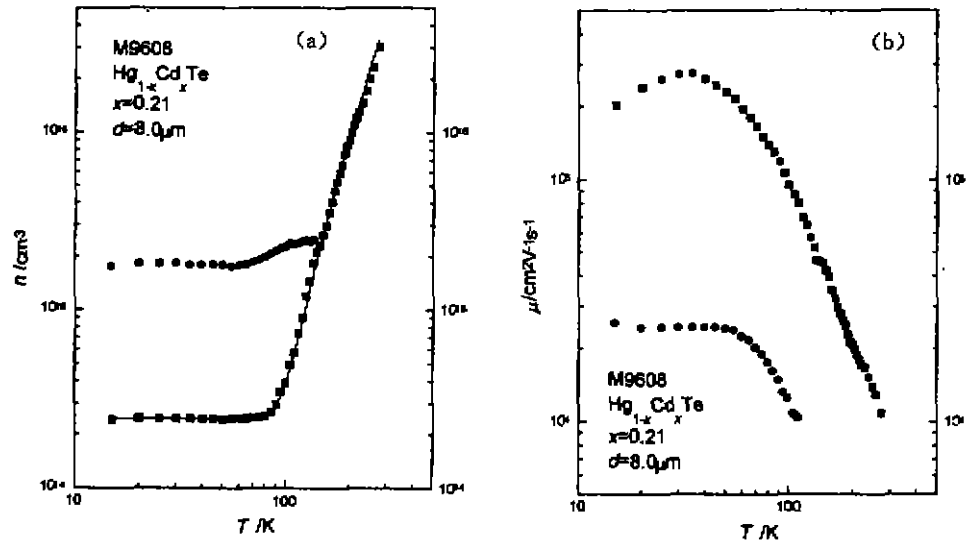


图 5 样品 M9608 的 (a) 载流子浓度和 (b) 迁移率与温度的关系

Fig. 5 (a) Carrier concentration and (b) carrier mobility vs temperature for sample M9608

4 结论

我们采用迁移率谱分析法对外延 HgCdTe 材料的变磁场霍尔实验数据进行了分析, 发现在不同生长条件下生长的样品, 其界面电子的种类会有不同. 因此, 在分析样品电学性质时, 如果简单地假定样品中的载流子数目, 往往不能得到准确的样品信息. 除了外延生长的 HgCdTe 样品外, 我们还对 HgCdTe 体材料制备的探测器级尺寸的和 III-V 族量子阱材料进行了同样的分析过程, 结果与从 Shubnikov-de Hass 振荡获得的结果非常吻合. 所有这些表明迁移率谱分析法可以成为一种半导体材料和器件的常规电学测量手段.

REFERENCES

- 1 Long D, Schmit J L. *Semiconductors and Semimetals*, R K Willardson, A C Beer eds. New York: Academic, 1970, 175
- 2 Putley E H. *The Hall Effect*. London: Butterworth, 1960
- 3 Beck W A, Anderson J R. *J. Appl. Phys.*, 1987, **62**: 541
- 4 Meyer J R, et al. *Semicond. Sci. Technol.*, 1993, **8**: 805
- 5 Gold M C, Nelson D A. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1986, **A4**: 2040
- 6 Reine M B, et al. *Semicond. Sci. Technol.*, 1993, **8**: 788
- 7 Chu J H, Mi Z Y, Tang D Y. *J. Appl. Phys.*, 1992, **71**: 3955
- 8 Parat K K, et al. *J. Crystal Growth*, 1990, **106**: 513

MOBILITY SPECTRUM ANALYSIS OF MULTI-CARRIER
SYSTEM IN HgCdTe *

GUI Yong-Sheng ZHENG Guo-Zhen GUO Shao-Ling CHU Jun-Hao

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

Abstract The concentrations and mobilities of bulk electron, bulk hole and interface electron were obtained, respectively, by the mobility spectrum analysis (MSA) for n-type HgCdTe film grown by MBE and LPE techniques. The changes of concentration and mobility for bulk and interface electrons versus temperature were also derived from the MSA, which agree well with the theoretical analysis.

Key words mobility spectrum, multi-carrier system, HgCdTe.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China
Received 1997-10-13, revised 1997-11-19