

HgCdTe 多载流子体系的 定量迁移率谱分析*

桂永胜 郑国珍 张新昌 褚君浩

(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 本文利用定量迁移率谱分析技术,通过研究样品霍尔系数和电阻率对磁场强度的依赖关系,获得了样品中参与导电的电子和空穴的浓度和迁移率,结果表明了定量迁移率谱分析方法具有很高的准确性和可靠性,并且它对样品中少子的贡献非常敏感。该方法可以成为一种分析半导体材料和器件的电学特性常规的测试手段。

PACC: 7280E, 7320, 7215G

1 前言

在 HgCdTe 长波红外探测器的发展过程中,磁输运测量一直是一种有效的手段,被广泛地用于研究探测器材料和器件的电学性质^[1]。尽管 HgCdTe 长波红外探测器材料已经有近四十年的发展历史,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。但是由于 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,此时如采用常规的固定磁场测量,只能给出了一个综合了各种载流子作用的平均结果,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往往不能真实地反映样品的电学性质,甚至会得出错误的结论,因此,有必要对传统的固定霍尔测量方法进行改进,使之适合分析复杂的多载流子体系。

人们早就认识到多载流子体系对输运特性的影响^[2],直到最近迁移率谱分析法^[3,4]的出现,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。但是迁移率谱分析给出的结果只是定性的或半定量的,因此,我们引入了迭代算法,将迁移率谱和迭代算法结合起来,发展了定量迁移率谱分析^[5],它的结果不但物理意义明显,而且直接给出了样品中各种载流子的浓度和迁移率。本文利用定量迁移率谱对 n-HgCdTe 和 p-HgCdTe 外延材料的变磁场霍尔测量数据进行分析,研究了样品中各种载流子的电学参数。

* 国家自然科学基金资助课题,编号为 69738020

桂永胜 男,博士,目前从事半导体材料和器件的电子输运特性研究
郑国珍 女,研究员,长期从事半导体材料和器件的电子输运特性研究
1997-10-14 收到,1998-01-15 定稿

2 电导张量

霍尔系数 R_H 和电阻率 ρ 均是磁场强度 B 的函数, 电导张量元 σ_{xx} , σ_{xy} 与磁场强度 B 有如下关系:

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

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

由于不同种类的载流子具有不同的迁移率, 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 的依赖关系就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

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浓度 n_j 和迁移率 μ_j 有如下关系:

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

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

通常用多载流子拟合法分析电导张量随磁场强度变化的实验数据^[6], 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, 所以得到的结果往往并非唯一. 为了克服这个缺点, 我们利用在迁移率谱基础上建立起来的定量迁移率谱技术, 用来分析样品的变磁场数据

3 迁移率谱分析

迁移率谱分析法是通过样品电导张量对磁场强度的依赖关系, 获得样品中电导随迁移率连续变化的谱图, 在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, 这样方程(3)和(4)可以写成积分形式

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

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

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 $s^n(\mu)$ 定义为:

$$s^p(\mu) = ep(\mu)\mu \quad (7)$$

$$s^n(\mu) = en(\mu)\mu \quad (8)$$

$p(\mu)$ 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. 方程(7)和(8)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. Beck 和 Anderson 通过没有任何载流子对电导的贡献为负这一前提条件, 发展了一种精确的数学过程^[3], 得到了 $s^p(\mu)$ 和 $s^n(\mu)$

的唯一包络函数,而是为了判定样品中的载流子种类,以及每种载流子迁移率和浓度的近似值

4 定量迁移率谱分析

为了获得准确而且有明确物理意义的结果,我们将迭代算法和迁移率谱结合起来,发展了定量迁移率谱。在整个分析过程中,首先用迁移率谱作为初值,然后用迭代算法获得精确解,并且在每一步迭代过程中保证 $s^p(\mu_i)$ 和 $s^n(\mu_i)$ 为正,这样一方面可以提供算法的效率和结果的精度,另一方面也确保了结果有明确的物理意义。在定量迁移率谱分析中迁移率的范围为 $10^2 \sim 10^6 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$,我们感兴趣的绝大部分载流子的迁移率都处在这个范围里

将方程(3)和(4)变形为如下形式

$$S_i^{xx} = (1 + \mu_i^2 B_i^2) \left[\sigma_{xx}^{\text{exp}}(B_i) - \prod_{j=0}^{i-1} \frac{S_j^{xx}}{1 + \mu_j^2 B_j^2} - \prod_{j=i+1}^m \frac{S_j^{xx}}{1 + \mu_j^2 B_j^2} \right] \quad (9)$$

$$S_i^{xy} = \frac{(1 + \mu_i^2 B_i^2)}{\mu B_i} \left[\sigma_{xy}^{\text{exp}}(B_i) - \prod_{j=0}^{i-1} \frac{S_j^{xy} \mu B_j}{1 + \mu_j^2 B_j^2} - \prod_{j=i+1}^m \frac{S_j^{xy} \mu B_j}{1 + \mu_j^2 B_j^2} \right] \quad (10)$$

式中 $S_i^{xx} = s^p(\mu_i) + s^n(\mu_i)$, $S_i^{xy} = s^p(\mu_i) - s^n(\mu_i)$ 。为了加快速度,我们采用了超级松弛法求解形如(9)和(10)的线性方程组

$$S_i^{xx}(k+1) = (1 - \omega_x) S_i^{xx}(k) + \omega_x (1 + \mu_i^2 B_i^2) \left[\sigma_{xx}^{\text{exp}}(B_i) - \prod_{j=0}^{i-1} \frac{S_j^{xx}(k+1)}{1 + \mu_j^2 B_j^2} - \prod_{j=i+1}^m \frac{S_j^{xx}(k)}{1 + \mu_j^2 B_j^2} \right] \quad (11)$$

$$S_i^{xy}(k+1) = (1 - \omega_y) S_i^{xy}(k) + \omega_y \frac{(1 + \mu_i^2 B_i^2)}{\mu B_i} \left[\sigma_{xy}^{\text{exp}}(B_i) - \prod_{j=0}^{i-1} \frac{S_j^{xx}(k+1) \mu B_j}{1 + \mu_j^2 B_j^2} - \prod_{j=i+1}^m \frac{S_j^{xy}(k) \mu B_j}{1 + \mu_j^2 B_j^2} \right] \quad (12)$$

$S_i^{xx}(k)$ 和 $S_i^{xy}(k)$ 分别是 S_i^{xx} 和 S_i^{xy} 第 k 步迭代结果。式中收敛系数 ω_x 和 ω_y 决定了迭代过程的收敛速度,当 $\omega_x = \omega_y = 1$ 时,收敛速度最快,但是最初的迁移率谱形状很快被破坏,结果很容易发散; $\omega_x = \omega_y = 0$ 时,收敛速度最慢,最终结果还是最初的迁移率谱。为了兼顾收敛性和收敛速度,通过大量的实际计算,我们发现 $\omega_x = 0.05$, $\omega_y = 0.01$ 为最优选择。另外为了尽可能全面准确的反映材料的电学性质,我们对数据进行了平滑插值,使得在迭代过程中迁移率取值的密度为每个数量级中有 100 个点

5 实验结果与讨论

实验所采用的设备与传统的霍尔测量系统基本相同,所用的制冷机可以达到 10K,电磁铁的磁场强度最高为 2T。如果选用超导磁体,则温度可以降到 1.2K,磁场强度可达 12T,这对测量迁移率较低的空穴,将是非常有利的。采样该系统,我们对大量的 III-V 族、II-VI 族样品进行了测试,其中对单载流子样品(如 δ 掺杂样品)的分析与常规方法很吻合,并且通过谱中峰的展宽获得了样品中载流子的散射机制。本文将主要报道利用迁移率谱对多载流子体系的分析结果,我们对 LPE 和 MBE 生长的样品进行了变磁场的霍尔测量,磁场强度从 $3 \times 10^{-2} \text{ T}$ 到 7T,温度从 1.2K 变化到 300K。

图 1 为 100K 时, n-Hg_{1-x}Cd_xTe (x = 0.214) 样品 L 9701-1 的迁移率谱, 从图中可以发现, 样品 L 9701-1 的电子迁移率谱中有三个尖锐的峰, 对应者三种电子: 分别是体电子 n_0 ,

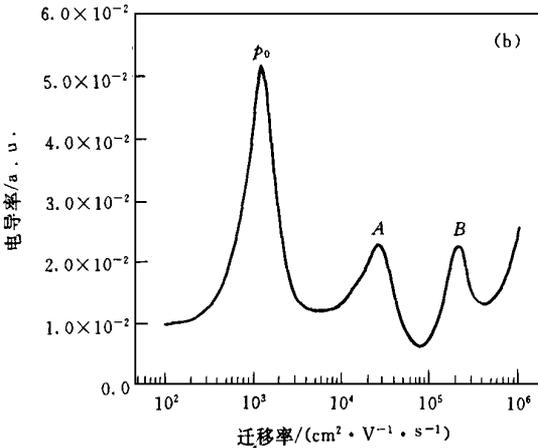
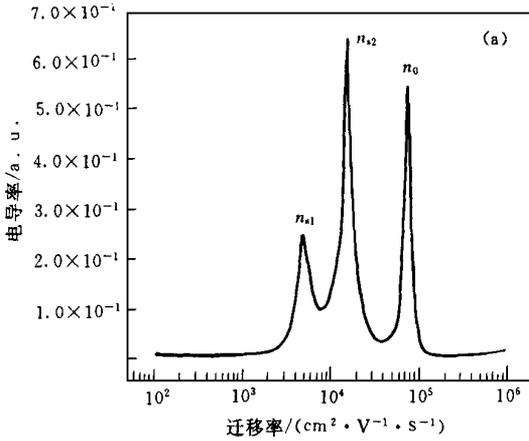


图 1 LPE 生长的 n-HgCdTe 样品 L 9701-1 在 100K 条件下的迁移率谱
(a) 电子迁移率谱; (b) 空穴迁移率谱

界面电子 n_{s1} 和 n_{s2} ; 空穴迁移率谱中也有三个峰, p_0 对应体内的少子(空穴), 而 A 和 B 峰则是电子迁移率谱中 n_{s2}, n_0 峰的映象^[3], 它们来源于实验中的测量误差, 从谱中可以发现它们的强度远远低于 n_{s1}, n_{s2} 峰 在迁移率谱中, 整个曲线覆盖的面积就是各种载流子对电导的贡献, 将图 1 的迁移率谱对电导归一化, 我们得到了样品中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 $7 \sim 8 \times 10^4 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 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, 迁移率分别为 $1 \sim 2 \times 10^4 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 和 $\sim 5 \times 10^3 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 同时还发现了本征电离的空穴, 它的浓度在 $10^{13} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 量级, 与体电子浓度相当, 迁移率约为 $\sim 1 \times 10^3 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 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, 我们还是能清晰的分辨出空穴的作用 虽然迁移率谱有上述的优点, 但是它的结果只是定性的或半定量的, 为了获得样品中各载流子电学参数的精确值, 就必须作进一步的定量分析, 比如定量迁移率谱分析

图 2 为 100K 时, n-Hg_{1-x}Cd_xTe 样品 L 9701-1 的定量迁移率谱, 谱中每种载流子的浓度 $n = \sum_i \sigma_i / (e\mu_i)$, \sum_i 表示对峰内的所有载流子加权求和 从定量迁移率谱中, 可得体电子的浓度为 $9.7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, 迁移率约为 $1.2 \times 10^5 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 材料中两种不同的界面电子, 浓度分别为 $1.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 和 $4.8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 对应的迁移率分别为 $2.4 \times 10^4 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 和 $6.5 \times 10^3 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 本征电离的空穴, 它的浓度为 $9.6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, 迁移率为 $5.0 \times 10^2 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 图中出现的 p 峰如图 1 中的 A 和 B 峰, 也只是一个映象峰, 没有任何物理意义 我们获得的 $(n_0 p_0)^{1/2} = 9.65 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 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

图 3 显示了样品 L 9701-1 在 100K 条件下, 不同磁场强度下电导张量的实验值(实点)

和定量迁移率谱分析的拟合值(曲线),可见两者符合得非常好

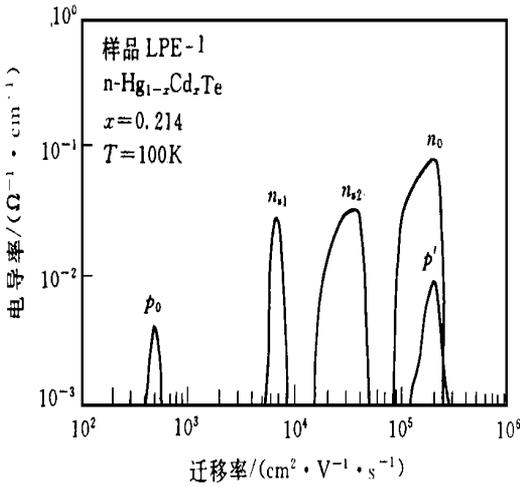


图 2 LPE 生长的 n-HgCdTe 样品 L 9701-1 在 100K 条件下的定量迁移率谱

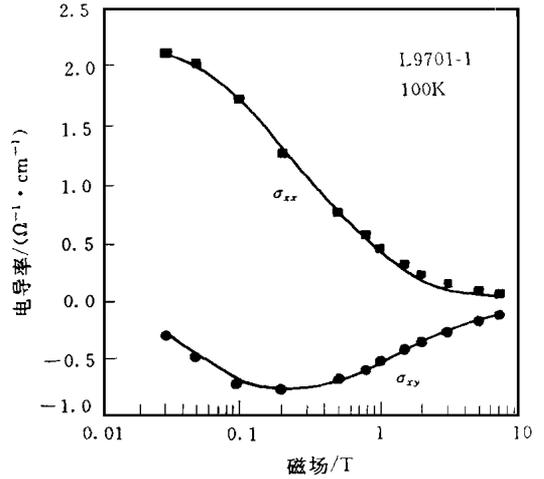


图 3 100K 时, 样品 L 9701-1 电导张量与磁场强度的依赖关系 图中实点为实验数据, 曲线为拟合结果

p-HgCdTe 材料中, 由于电子迁移率要比空穴迁移率高几个数量级, 极易出现各种“反常”的霍尔效应, 这些现象往往不能用传统的理论来解释。我们利用定量迁移率谱对 MBE 生长的 HgCdTe 样品进行了研究, 结果表明, 材料中存在多种载流子是这些反常效应出现的原因。图 4 为 55K 和 100K 时样品 G9702 的定量迁移率谱。55K 时谱中的表面电子表现出复杂的状况, 它对应的峰展宽得很利害。随着温度的升高, 空穴的浓度也大大提高, 在定量迁移率谱中出现了两个空穴峰, 空穴 p_1 的浓度比 p_2 高出了近三十倍, 55K 时, 空穴 p_1 的迁移率为 $8.1 \times 10^2 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$, p_2 为 $7.6 \times 10^3 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ 。在 100K 时我们发现了对应于体电子的峰 n_0 , 它的浓度约为 $2.1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 。

图 4 中出现了令人困惑的 p_2 峰, 该空穴的迁移率远远大于体空穴的迁移率, 最高值可达 $10^4 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ (33K), 这么高迁移率的空穴有两种可能的来源: 一是轻空穴, 由于它的

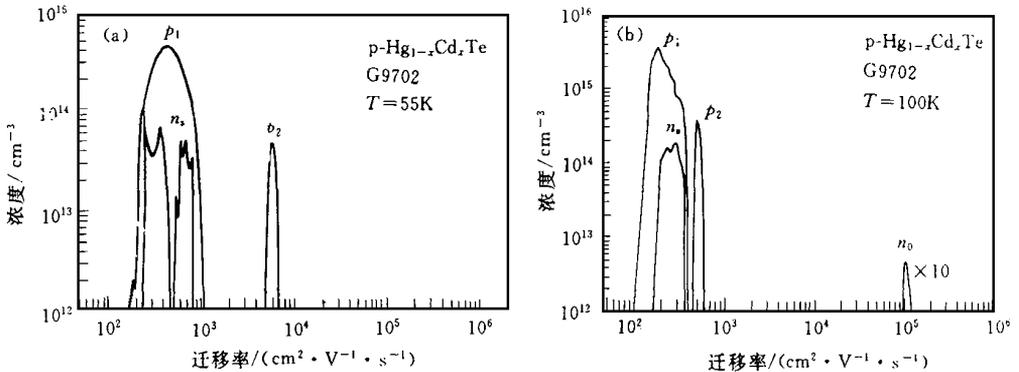


图 4 (a) 55K 和 (b) 100K 时, p-Hg_{1-x}Cd_xTe 样品 G9702 的定量迁移率谱

有效质量远远小于重空穴的有效质量,从理论上讲由于载流子的迁移率 $\mu \propto (m^*)^{-1}$,载流子的浓度 $n \propto (m^*)^{3/2}$,所以轻空穴应当具有比重空穴高得多的迁移率和低得多的载流子浓度,我们的实验结果能定性地满足这个条件,另一种可能就是材料中界面处的二维空穴,要确定 p_2 的来源,还需要大量的实验和理论计算来确认,在这儿,我们只能给出实验结果,以后将会对这个问题进行更深入的研究

6 结 论

我们进行了大量的实验,对包括 HgCdTe 在内的多种样品进行了定量迁移率谱分析,其结果除了有很高的精确性外,还具有明确的物理意义,另外,定量迁移率谱分析还对样品中少子浓度具有很高的敏感性,在 p-HgCdTe 样品中获到了浓度仅为 10^{12}cm^{-3} 的少数电子的峰,我们编制的自动测试程序和定量迁移率谱分析程序,使结果输出完全图形化,非常直观,使该方法可能成为一种取代传统固定磁场测量的常规霍尔测量手段

参 考 文 献

- [1] D. Long and J. L. Schmit, *Semiconductors and Semimetals*, Vol 5, edited by R. K. Willardson and A. C. Beer (New York: Academic, 1970) p. 175
- [2] E. H. Putley, *The Hall effect*, London: Butterworth, 1960
- [3] W. A. Beck and J. R. Anderson, *J. Appl Phys*, 1987, **62**: 541
- [4] J. R. Meyer *et al*, *Semicond Sci Technol*, 1993, **8**: 805
- [5] Y. S. Gui *et al*, *J. Appl Phys*, 1997, **82**: 5000
- [6] M. C. Gold and D. A. Nelson, *J. Vac Sci Technol*, 1986, **A4**: 2040

Quantitative Mobility Spectrum Analysis on Multi-Carrier System in HgCdTe

Gui Yongsheng, Zheng Guozhen, Zhang Xinchang, Chu Junhao

*National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,
The Chinese Academy of Science, Shanghai 200083)*

Received 14 October 1997, revised manuscript received 15 January 1998

Abstract By using quantitative mobility spectrum analysis (QMSA) technique, the free electron and hole concentrations and mobilities are determined from field-dependent Hall and resistivity data. The results confirm that the QMSA yields accurate and reliable concentrations and mobilities for all classes of carrier in the sample, and also has greater sensitivity to minority carrier concentrations. The QMSA is found to be a suitable standard tool for the routine electrical characterization of semiconductor materials and devices.

PACC: 7280E, 7320, 7215G