

分子束外延生长的 $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 的磁输运特性

桂永胜 郑国珍 褚君浩 郭少令 汤定元

(中国科学院红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

(1996 年 10 月 8 日收到)

采用迁移率谱和多电子拟合过程相结合的混合电导分析法, 对分子束外延(MBE)生长的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料的变磁场实验数据进行了处理. 该方法可以将外延层中体电子对电导的贡献与界面电子的贡献区分开, 通过对不同温度下变磁场数据的分析, 表明该方法是准确和可靠的, 可以成为一种半导体材料和器件的常规电学测试和分析手段.

PACC: 7280E; 7320; 7215G

1 引 言

在 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 等窄禁带半导体材料中, 往往存在多种载流子: n 型和 p 型掺杂区域电离杂质提供的多数载流子, 界面和表面处的两维电子气或空穴气, 另外热激发形成的少数载流子对电导也有贡献. 用于测量电阻率和霍尔系数的常规磁输运测量方法, 一般是固定磁场测量, 它不能提供参加导电的每种载流子的迁移率和浓度, 只能给出一个综合了多种载流子作用的平均值. 由于材料中存在不同种类电子和空穴, 它们在不同磁场下对电导的贡献是不同的, 所以通常采用的定磁场测量往往会导致错误的结论. 比如在未被钝化的外延层表面往往有一层两维电子气, 通过定场得到的数据指出材料是低迁移率的 n 型材料, 而实际上外延本身是电学特性优良的 p 型材料. 如果认为电阻率和霍尔数据是磁场的函数^[1], 那么可以同时获得样品中不同种类电子和空穴(比如: 表面电子、多数载流子和少数载流子)的迁移率和浓度.

分析变磁场获得的霍尔数据, 以往多采用多载流子拟合过程. 这一方法必须首先假定电子和空穴的种类, 同时给出它们迁移率的近似值, 如果假定的载流子种类以及迁移率不同, 对同一数据的处理往往会得出矛盾的结果. 为了克服传统方法这一不可避免的缺点, Beck 和 Anderson^[2] 首先提出了“迁移率谱”的概念, Meyer 等将这一方法发展为混合电导分析方法, 利用从迁移率谱获得的结果, 初始化载流子的种类和迁移率, 然后采用多载流子拟合过程得到载流子迁移率和浓度的准确值. 迁移率谱只能给出某一迁移率下, 载流子浓度最大的卷积, 而我们采用的这种混合电导分析方法可以获得与实验结果符合得很好的载流子浓度和迁移率.

本文首先给出多载流子导电体系的电导张量表达式和多载流子拟合过程, 较详细地给出了“迁移率谱”的概念和变磁场的混合电导分析方法. 最后对分子束外延(MBE)生长

的样品采用上述分析方法进行了分析和讨论.

2 混合电导分析方法

电导张量 σ_{xx} 和 σ_{xy} 与实验测量得到的电阻率 ρ 和霍尔系数 R_H 有如下关系:

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

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

B 是磁场强度. 如果样品中存在的载流子种类不止一种, 那么在存在 m 种载流子的样品中, 电导张量 σ_{xx} 和 σ_{xy} 可以表示为

$$\sigma_{xx}(B) = \sum_{i=1}^m \frac{en_i\mu_i}{1 + \mu_i^2 B^2}, \quad (3)$$

$$\sigma_{xy}(B) = \sum_{i=1}^m S_i \frac{en_i\mu_i^2 B}{1 + \mu_i^2 B^2}, \quad (4)$$

式中 n_i 和 μ_i 分别是第 i 种载流子的浓度和迁移率, S_i 是第 i 种载流子的电荷极性. 传统的多载流子拟合过程中, n_i 和 μ_i 均是调节参数, 以便使电导张量 σ_{xx} , σ_{xy} 和 B 的关系与实验结果符合最好. 由于在拟合之前, 必须假定电子和空穴的种类, 以及它们迁移率的近似值, 然后再近似求得载流子的浓度和迁移率, 所以该方法的解并非唯一.

采用迁移率谱的方法, 对多电子体系进行分析的第一步, 就是假定载流子浓度是迁移率的连续函数, 迁移率谱中的每个峰代表了一类电子或空穴.

我们对过程(3)和(4)进行一般性的描述, 将它们变成对正迁移率(对应于空穴)和负迁移率(对应于电子)的积分

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

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

式中空穴和电子的电导密度函数 $s^p(\mu)$ 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. 我们的目的在于经过一系列的变换获得 $s^p(\mu)$ 和 $s^n(\mu)$ 的值.

因为方程(5)和(6)实际上是一个对无限项的求和, 所以用有限的实验数据来求解该方程组, 得到的解不是唯一的. 迁移率谱的概念首先由 Beck 和 Anderson 提出, 他们发展了一种精确的数学过程, 得到了与数据一致对应于包络函数最大值的 $s^p(\mu)$ 和 $s^n(\mu)$ 的上界. Beck 和 Anderson 近似不需要任何初始假设, 并且整个过程由计算机完成, 最后提供一种可视输出. 由于从迁移率谱得到的 $s^p(\mu)$ 和 $s^n(\mu)$ 并不是电导张量的拟合值, 所以结果并非定量的, 而只是定性的, 只能粗略估计各种类载流子的迁移率. 混合电导分析方

法则是利用迁移率谱的结果对多载流子拟合过程进行初始化, 然后进行多载流子拟合, 得到定量的结果能真实地反映材料的情况, 并且该结果是唯一的。

3 结果与讨论

样品 M9602 为 MBE 生长的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.218$), 衬底材料为 $\text{Zn}_{0.04}\text{Cd}_{0.96}\text{Te}$, 外延厚度为 $10.1\ \mu\text{m}$, 表面是 $30\ \text{nm}$ 的 CdTe 。图 1(a) 为 70 和 110 K 时, 样品 M9602 的迁移率谱。在这两个温度下, 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, 70 K 时, A 载流子的浓度和迁移率分别为 $1.00 \times 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$ 和 $1.65 \times 10^5\ \text{cm}^2/\text{Vs}$, B 载流子的浓度和迁移率分别为 $4.76 \times 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$ 和 $1.27 \times 10^4\ \text{cm}^2/\text{Vs}$, 110 K 时, A 载流子的浓度和迁移率分别为 $1.03 \times 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$ 和 $7.51 \times 10^4\ \text{cm}^2/\text{Vs}$, B 载流子的浓度和迁移率分别为 $4.82 \times 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$ 和 $1.20 \times 10^4\ \text{cm}^2/\text{Vs}$ 。图 1(b) 为 110 K 时, 电导张量与磁场的关系, $\bullet$ (σ_{xx}) 和 $\blacksquare$ (σ_{xy}) 为实验数据, 曲线为采用混合电导分析方法计算的结果, 两者符合得很好。如果在多载流子拟合过程中, 假定载流子的数目为 3 或 4, 一样可以获得与实验数据符合得很好的结果, 但是这些结果并不能反映样品的真实情况。迁移率谱给出的结果真实地反映样品性质, 指明了材料中参与导电的载流子种类以及它们迁移率的计算值, 是定量计算的前提。

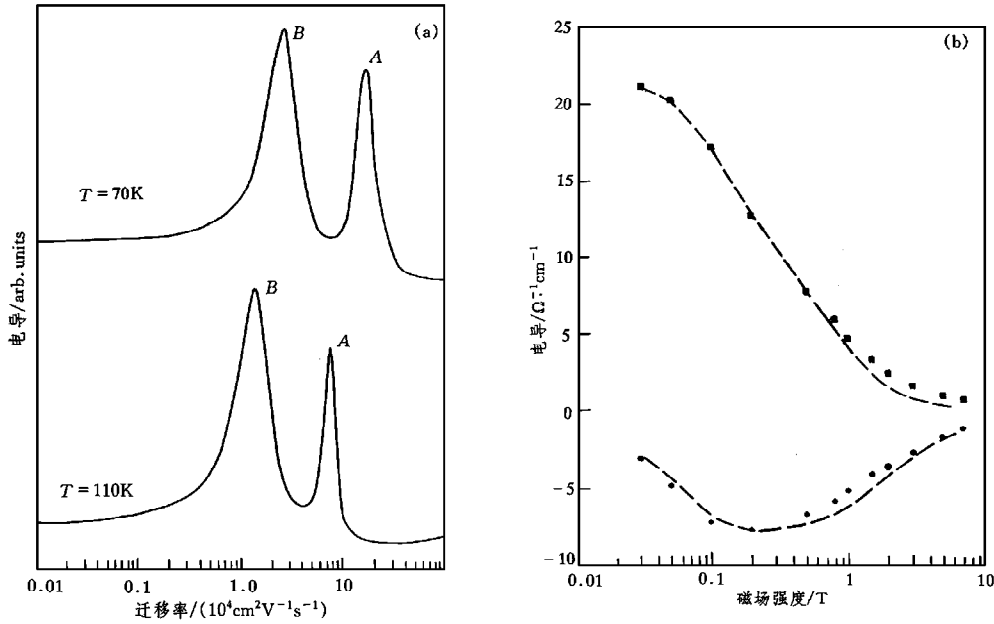


图 1 (a) 为 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.218$) 样品在 77 和 110 K 时, M9602 的迁移率谱; (b) 为 110 K 时, M9602 的电导张量与磁场的关系 $\bullet$ (σ_{xx}) 和 $\blacksquare$ (σ_{xy}) 为实验值; --- 为 $\sigma_{xx}\text{-fit}$ 和 $\sigma_{xy}\text{-fit}$, 它是采用混合电导分析法的计算结果

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 $\text{Zn}_{0.04}\text{Cd}_{0.96}\text{Te}$, 外

延厚度为 $8.0\ \mu\text{m}$, 表面是 $40\ \text{nm}$ 的 CdTe . 在 $15\text{--}280\ \text{K}$ 范围, 温度每变化 $5\ \text{K}$, 进行一次变磁场的输运实验, 利用混合电导分析方法, 观察样品 M9608 中不同载流子浓度和迁移

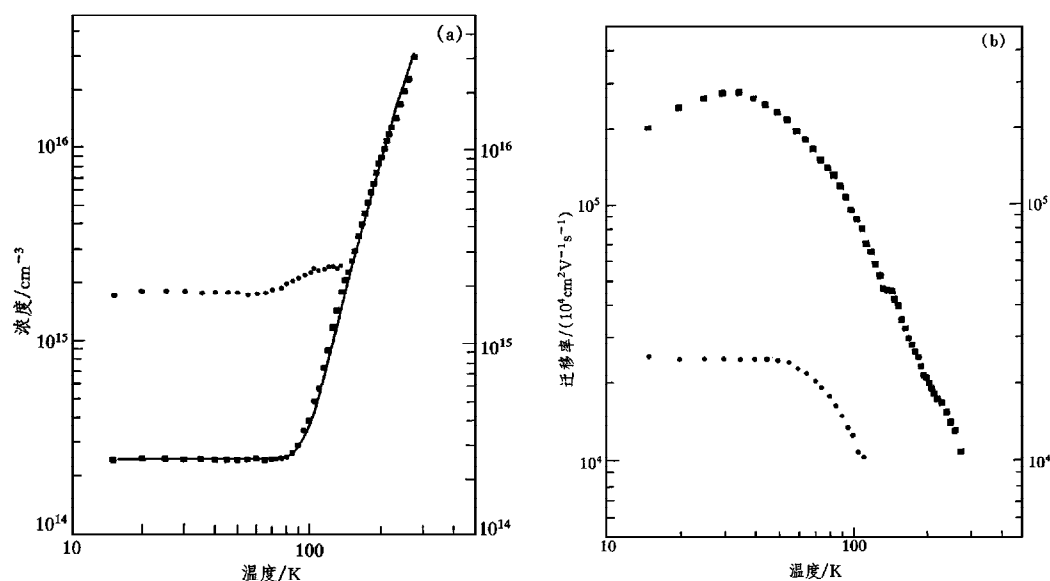


图2 采用混合电导分析法得到 M9608 的(a)载流子浓度和(b)迁移率与温度的关系 ■为 A 载流子体电子;●为 B 载流子表面电子

率与温度的关系. 从图 2(a)和图 2(b)可以看出: A 载流子的浓度在 $15\text{--}80\ \text{K}$ 范围基本没有变化, 当温度超过 $80\ \text{K}$, 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 $35\ \text{K}$ 左右达到最大值, 温度继续升高, 迁移率迅速下降; B 载流子的浓度基本与温度 T 无关, 迁移率在 $15\text{--}70\ \text{K}$ 范围内基本与温度无关, 温度高于 $70\ \text{K}$, 迁移率下降得很快, 这与文献[3]报道的 n -型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 样品中表面电子的行为相符合. 在 $120\ \text{K}$ 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. 从上述的特性可以认为 A 载流子为外延层的体电子, 对于窄禁带的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料, 低温下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 $100\ \text{K}$ 左右开始起作用, 温度再高, 体电子基本都是本征载流子, 图 2(a)中的曲线为利用文献[4]中本征载流子公式, 对材料中电子浓度的计算, 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 $\mu_N \propto T^{3/2}$, 由极化光学波散射决定的迁移率 $\mu_{\text{op}} \propto \exp(1/T)$, 图 2(b)中 A 载流子迁移率变化的趋势符合体电子的特性. 一般认为^[5] $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 表面或界面处的电子浓度基本上与温度无关, 所以可以认为 B 载流子为 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 与 CdTe 界面处的电子.

4 结 论

我们采用混合电导分析法对 MBE 生长的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 样品进行了分析, 结果表明了

该方法是准确可靠的. 迁移率谱首先被用来指明样品中参与导电的载流子种类、电荷性以及迁移率的近似值, 然后利用多载流子模型来拟合出载流子浓度和迁移率的定量值. 在混合电导分析过程中, 只需输入样品的变磁场输运数据, 然后由计算机进行数值计算, 最后输出所需的结果. 在 PC486 机器上, 整个过程只需 1 min 即可完成, 非常方便、适用. 除了 MBE 生长的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 样品外, 我们还对 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 体材料制备的探测器级尺寸的样品、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符合. 所有这些表明该方法可以成为一种半导体材料和器件的常规电学测量手段.

- [1] J. R. Meyer *et al.*, *Semicond. Sci. Technol.*, **8**(1993), 805.
- [2] W. A. Beck and J. R. Anderson, *J. Appl. Phys.*, **62**(1987), 541.
- [3] M. B. Reine, K. R. Maschhoff *et al.*, *Semicond. Sci. Technol.*, **8**(1993), 788.
- [4] 褚君浩, 红外研究, **2**(1983), 241.
- [5] K. K. Parat *et al.*, *J. Crystal Growth*, **106**(1990), 513.

MAGNETO-TRANSPORT CHARACTERIZATION OF MBE-GROWN $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$

GUI YONG-SHENG ZHENG GUO-ZHEN CHU JUN-HAO GUO SHAO-LING TANG DING-YUAN

(State Key Laboratory for Infrared Physics, Academia Sinica, Shanghai 200083)

(Received 8 October 1996)

ABSTRACT

A hybrid conduction analysis method mixed with multi-carrier fitting procedure and mobility spectrum is present to analyze the experimental Hall and resistivity data of MBE grown $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ samples as a function of magnetic field. This method enables the conductivity contribution of bulk electron to separated from that of interface electron. Applications to temperature-dependent Hall and resistivity data confirm that the procedure may be regarded accurate and reliable one. The method seems to be a suitable tool for the routine electrical characterization of semiconductor materials and devices.

PACC: 7280E; 7320; 7215G