

MBE 生长的 $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 外延薄膜 变磁场下的 Hall 系数及电导率

杜庆红 何力 袁诗鑫

(中国科学院上海技术物理研究所 上海 200083)

C. R. Becker and G. Laudwehr

(*Physikalisches Institut der Universität Würzburg, D-8700 Würzburg, Germany*)

摘要 本文报道了利用分子束外延技术在 GaAs(211)B 衬底上生长 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{CdTe}$ 异质结, 并通过 Van der pauw (VdP) 方法测量 $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 外延薄膜在不同温度及磁场下 Hall 系数和电导率, 采用最小二乘法对实验数据下行拟合, 得到了混合导电机制下电子、重空穴和轻空穴的迁移率及载流子浓度.

PACC: 6855B, 7201, 7220, 7360C

1 引言

到目前为止 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 一直是红外探测器的最佳材料, 受到人们的重视. 尤其是利用分子束外延 (MBE) 方法生长的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 外延薄膜具有大面积, 组分均匀及原位掺杂等优点, 为制造红外焦平面阵列提供了必要条件. 对于 $8\text{--}12\mu\text{m}$ 的红外大气窗口, 相应的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 组份为 $x \approx 0.22$, 令人感兴趣的是 $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 在低温及变磁场条件下输运性质的研究, 在过去几年中人们^[1-6]研究了 LPE 等 $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 的反常输运性质. M. C. Chen^[7]和 P. Höschl 等^[8]都报道了 p 或 $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 表面不进行钝化而导致表面反型, 其表面电荷明显高于钝化表面, 这就为器件工艺进行表面钝化提供了实验依据, 但作为 LPE 及体材料的表面都无法实现原位表面钝化, 采用分子束外延 (MBE) 方法生长的 $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 可以原位进行表面钝化 (利用 CdTe、ZnS 等异质结生长).

载流子的浓度及迁移率作为评估 $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料的重要电学参数, 在室温及弱磁场条件下的 Hall 测量, 无法准确得到这些参数, 而在变温及变磁场条件采用范德堡 (Van der pauw) 方法进行 Hall 测量, 通过对实验数据的拟合, 可以了解许多信息, 诸如电子、重空穴、轻空穴载流子浓度与迁移率, 以及表面 (或界面) 的迁移率与界面态.

S. Hwang 等^[9]报道了光辅助分子束外延 (PAMBE) 调制掺杂生长的 $\text{HgTe}\text{-CdTe}$ 超晶

杜庆红 男, 1967 年生, 硕士, 现在美国哥伦比亚大学电子工程系攻读博士学位
1993 年 6 月 4 日收到初稿, 1993 年 9 月 6 日收到修改稿

格变磁场条件下的理论计算,本文对分子束外延方法生长 p-Hg_{1-x}Cd_xTe 外延的测量结果进行理论拟合.

2 理论

由于 p-Hg_{1-x}Cd_xTe 材料,是混合导电机理,根据电导率与 Hall 系数对磁场的依赖关系可以确定不同载流子的浓度和迁移率,其关系可用下列方程表示^[18]

$$\sigma(B) = (\sigma_{xx}^2 + \sigma_{xy}^2) / \sigma_{xx} \quad (1)$$

及

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

$\sigma_{xx}(B)$ 与 $\sigma_{xy}(B)$ 为电导张量的 xx 和 xy 分量,如果我们假定有 m 种载流子,那么 σ_{xx} 和 σ_{xy} 可以表示为^[18]

$$\sigma_{xx}(B) = \sum_{j=1}^m \frac{n_j e \mu_j}{1 + \mu_j^2 B^2} \quad (3)$$

$$\sigma_{xy}(B) = \sum_{j=1}^m S_j \frac{n_j e \mu_j^2 B}{1 + \mu_j^2 B^2} \quad (4)$$

式中的 n_j 和 μ_j 分别是第 j 种载流子的浓度及迁移率,对于电子和空穴 S_j 分别为 -1 与 $+1$,显然,在强磁场情况下,对于低迁移率的载流子如重空穴 $\mu B \gg 1$ 的条件并不能满足,所以 p-Hg_{1-x}Cd_xTe 的 Hall 系数及电导率依赖于磁场的变化.

利用(3)或(4)式的最小二乘法可以拟合不同温度下测得 Hall 系数及电导率随磁场的变化曲线,进而得到电子,重空穴和轻空穴的迁移率及浓度.

从方程(4)可以看出, σ_{xy} 对于 n_j 是线性的,而对于 μ_j 则是非线性的,如果我们知道 μ_j 的确切值,那么相应的 n_j 值就可以通过线性最小二乘法技术得到.另外,假定 n_j 知道, μ_j 可通过非线性最小二乘法拟合出来.在此基础上,给定一组接近真实值的各种载流子的 μ_j 的初值,通过方程(4)的线性最小二乘法拟合出 n_j ,将此值代入方程(4)通过非线性最小二乘法计算出 μ_j 的值,如此迭代下去,直至 X^2 最小.

3 MEB 样品制备及 Hall 测量

利用 RIBER32P 型的 MBE 设备在(211)B GaAs 衬底上 $T_s = 300^\circ\text{C}$ 生长 CdTe 缓冲层,以减小失配,避免位错向 Hg_{1-x}Cd_xTe 外延层中延伸;并且避免 Ga 的扩散.然后在衬底温度为 $T_s = 190\text{--}200^\circ\text{C}$ 下生长 $10\mu\text{m}$ Hg_{1-x}Cd_xTe 外延层,导电类型由化学计量比控制,并通过 RHEED 监测长晶过程,最后生长 1000\AA 左右的 CdTe 覆盖层,以防止表面反型,利用红外透射谱测量其组分及外延层厚度.

采用 VdP 方法在一定温度下变换磁场强度对 p-Hg_{1-x}Cd_xTe 样品进行 Hall 及电导率测量,变温重复测量.

4 结果与讨论

图 1(a), (b) 为 $B=0.3\text{T}$ 条件下 #246, #248 样品的迁移率随温度变化的实验曲线, 图 2, 3 为 #246, #248 样品在变磁场条件下 $(1-7\text{T})\sigma_{xy}-B$ 的实验及拟合曲线.

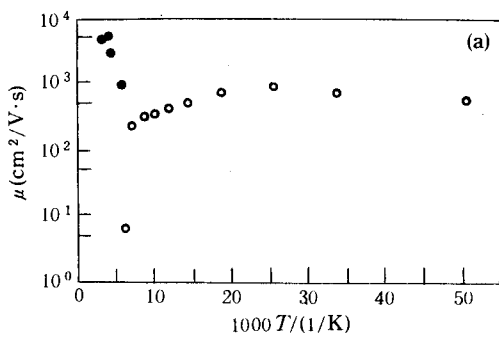


图 1(a) #246 样品 Hall 迁移率 μ_h-1000/T

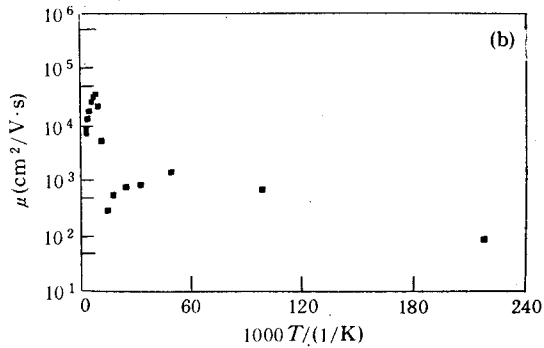


图 1(b) #248 样品 Hall 迁移率 μ_h-1000/T

在此我们假定三种自由载流子的迁移率不随磁场改变, 表 1, 2 即为拟合参数. 此结果与 P. Hoschl 等^[10]报道的 $p\text{-Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ 样品 $(p_1/p)(\mu_1/\mu_h)^2 \approx 0.5$ 基本是符合的. 对于 220K 时的 #246 样品, 50—220K 时的 #248 样品, 我们考虑三种载流子(电子, 重空穴和轻空穴), 对低于 121K 时的 #246 样品, 低于 50K 时 #248 样品, 由于电子被冻结, 此时可忽略电子和轻空穴的影响, 只考虑重空穴的影响. 拟合结果表明, 理论曲线与实验结果符合得很好(见图 2, 3).

表 1 #246 样品的拟合参数

参数 T	220.90K	120.18K	60.05K
$\mu_e(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$	9996	—	—
$\mu_h(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$	300	330	701
$\mu_l(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$	8894	—	—
$n_e(\text{cm}^{-3})$	5.06×10^{14}	—	—
$n_h(\text{cm}^{-3})$	6.21×10^{15}	1.22×10^{15}	4.13×10^{15}
$n_l(\text{cm}^{-3})$	3.53×10^{14}	—	—

表 2 #248 样品的拟合参数

参数 T	221.06K	120.42K	59.99K	29.84K
$\mu_e(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$	18892	590502	79859	—
$\mu_h(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$	500	390	900	2653
$\mu_l(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$	13410	22905	29982	—
$n_e(\text{cm}^{-3})$	1.05×10^{16}	2.31×10^{14}	9.45×10^{13}	—
$n_h(\text{cm}^{-3})$	4.00×10^{15}	2.80×10^{14}	5.49×10^{14}	5.38×10^{13}
$n_l(\text{cm}^{-3})$	1.11×10^{15}	1.00×10^{14}	1.08×10^{14}	—

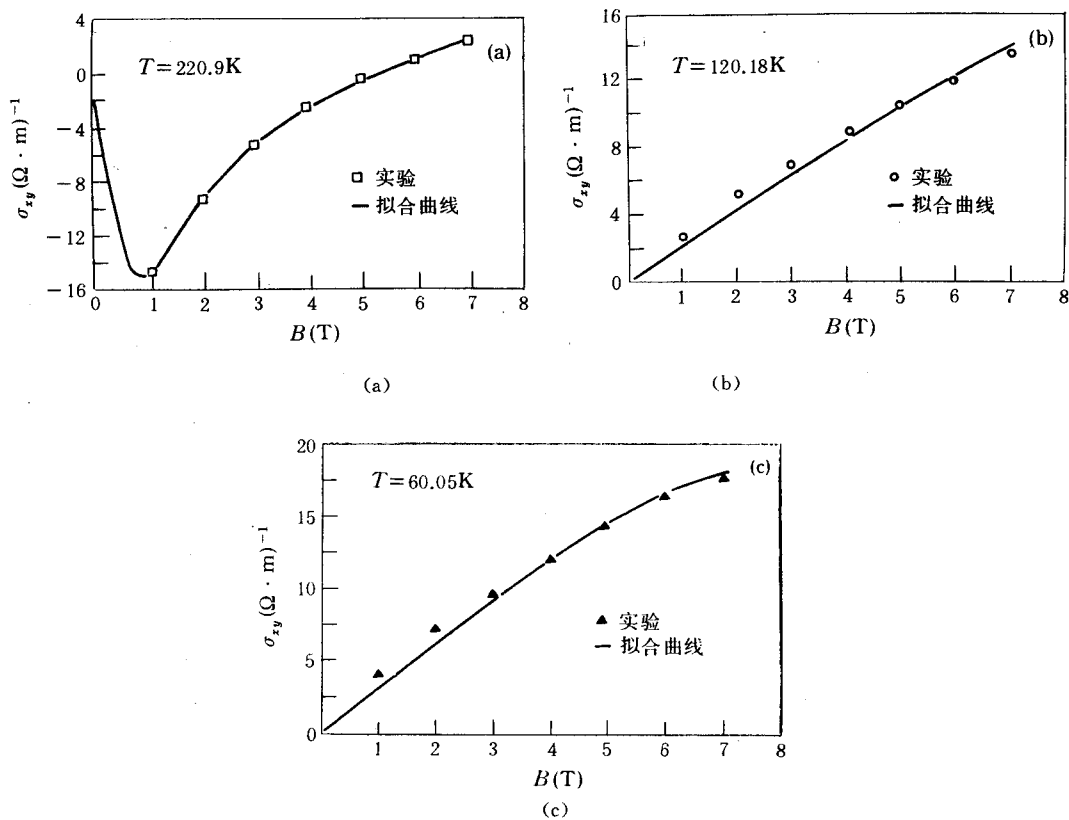


图2 #246 样品 Hall 测量的 σ_{xy} -B 曲线拟合

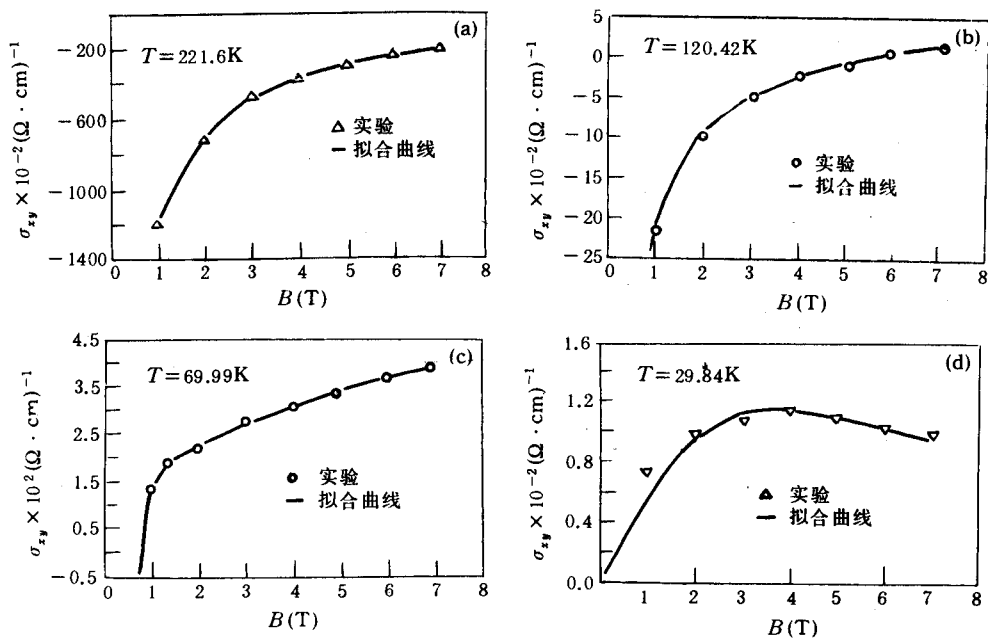


图3 #248 样品 Hall 测量的 σ_{xy} -b 曲线拟合

实验及理论计算表明:由于 p-Hg_{1-x}Cd_xTe 为混合导电机制,在室温情况下,磁场的变化并不能导致转型(图 3(a)),但从图 2(a),3(b)可以看出,在某一温度下,在弱磁场向强磁场过渡时, σ_{xy} (也就是 R_H)改变符号.并且弱场条件不能简单的由 $\mu B \ll 1$ 给出,因为实验测的迁移率只和重空穴接近(见图 1 及表 1,2),对于电子与轻空穴在很低磁场下弱场条件就不能满足.图 2(b),(c)表明: σ_{xy} 与 B 基本成线性关系,也就是说即便在强磁场条件下,由于重空穴的迁移率比较小,因此 $\mu B \ll 1$.

从变温 Hall 测量实验可以了解到,由于 $\mu_e/\mu_h \gg 1$,在转型温度附近,霍尔系数 R_H 依然为负值,但这不一定意味着是 n 型.在此温度下的变磁场 Hall 测量可确定是否转型和 p 型载流子的浓度.

据文献报道,最高霍尔迁移率 20K 时为 $1300\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ^[11],而 #248 样品在 29.84K 时的霍尔迁移率为 $2653\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$,对此可以通过不同的散射机制解释.M. C. Chen^[17]主要考虑四种散射:电离杂质(μ_{II}),中性杂质(μ_{NI}),光学声子(μ_{PO}),声学声子(μ_{AC})散射,但其计算与实验有较大差异,因此又考虑了 Hg_{1-x}Cd_xTe 的无序(disorder)散射和静应力场(static strain fields)散射.由于低温下,杂质电离少,高迁移率主要受无序散射机制控制,Brook^[12]给出了其表达式:

$$\mu_{DIS} = 32.8 / [(m^*/m_e)^{5/2} T^{1/2} (\Delta E_V)^2 x(1-x)] \quad (5)$$

这里 $\Delta E_V = 0.35\text{eV}$,^[13,14] $x = 0.22$, $m^*/m_e = 0.45$ ^[7] (m^* 为受主的有效质量),那么 30K 时 μ_{DIS} 的值为 $2100\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$.

由于 Hg_{1-x}Cd_xTe 材料中存在大量的中性点缺陷,Mayer, Bartoli 和 Hoffman^[15]考虑了由此引起的静应力场散射,解释了低温下低空穴迁移率现象,Feedders^[16]给出的表达式为:

$$\mu_{SF} = 5.3 \times 10^{-18} T^{1/2} \epsilon^2 / [m^*/m_e]^{3/2} e_{14}^2 \beta^6 N_{nd} \quad (6)$$

这里 ϵ 是介电常数, e_{14} 是压电常数,单位为 esucm^2 , β^3 是点缺陷引起的体膨胀, N_{nd} 为中性缺陷密度.

当然,理论拟合的结果未必与实验完全相符,可以进一步通过光 Hall 测量,从实验上给以验证.

参 考 文 献

- [1] W. Scott and R. J. Hager, J. Appl. Phys, 1971, **42**:803.
- [2] L. F. Lou and W. H. Frye, J. Appl. Phys, 1984, **56**:2253.
- [3] M. Boukerche, P. S. Wijewarnasuriya *et al.*, J. Vac. Sci. Technol., 1986, **A4**(4):2072.
- [4] P. Höschl, P. Moravec *et al.*, Phys. Status Solidi, 1988, **B145**:637.
- [5] M. C. Chen, J. Appl. Phys, 1989, **65**(4):1571.
- [6] K. K. Parat *et al.*, J. Cryst. Growth, 1990, **102**:413.

- [7] M. C. Chen, *J. Appl. Phys.*, 1987, **51**(22):1836.
- [8] P. Höschl, P. Moravec *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 1991, **70**(1):313.
- [9] S. Hwang, Y. Lansari *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol.*, 1991, **B9**(3):1799.
- [10] P. Höschl *et al.*, *J. Cryst. Growth*, 1990, **101**:822.
- [11] A. I. Elizaarov *et al.*, *Rut. Sov. Phys. Semicond.*, 1987, **21**:292.
- [12] I. Makowski *et al.*, *J. Phys. Chem. Solids*, 1973, **34**:487.
- [13] L. P. Kowalczyk *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **56**:1605.
- [14] C. K. Shin and W. E. Spicer, *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**:2594.
- [15] J. R. Mayers, F. J. Bartoli, and C. A. Hoffman, *J. Vac. Sci. Technol.*, 1987, **A5**:3035.
- [16] P. A. Fedders, *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**:1804.
- [17] M. C. Chen and J. A. Dogdge, *Solid State Commun.*, 1986, **59**:449.
- [18] C. A. Hoffman, J. R. Mayer *et al.*, *Phys. Rev.*, 1989, **B39**:5208.

Magnetic-Field Dependences of Hall Coefficient and Conductivity of p-type $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ Grown by MBE

Du Qinghong, He Li and Yuan Shixin

(Shanghai Institute of Technical Physics, The Chinese Academy of sciences, Shanghai 200083)

C. R. Becker and G. Landwehr

(Physikalisches Institut der Universität Würzburg, D-8700 Würzburg, Germany)

Received 4 June 1993, revised manuscript received 6 September 1993

Abstract $\text{CdTe}/\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ heterostructure materials grown on GaAs (211)B by MBE are reported. Temperature and magnetic-field dependences of a Hall coefficient and conductivity of p-type $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ epitaxial films are determined by Van der Pauw method. The mobility and carrier concentration such as electron, heavy and light hole are gained through the least square fitting.

PACC: 5855B, 7210, 7220, 7360C