

表面氧化层对 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 霍耳数据的影响*

黄河

(湖南大学应用物理系, 湖南, 长沙, 410082)

郑国珍 童斐明 汤定元

(中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家实验室, 上海, 200083)

摘要: 报道了表面氧化层对 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 霍耳数据影响的实验研究结果. 利用两层模型对实验结果进行了解释.

关键词: 表面氧化层, 反常霍耳行为, 两层模型.

引言

三元化合物半导体 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料的许多重要电学参数可通过常规测量霍耳效应得到. 较长时间暴露于空气中或经过高温处理的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料, 其表面会形成一层自然氧化层, 具有较高的固定正电荷密度 ($\sim 10^{13}\text{cm}^{-2}$), 造成与氧化层接触的材料表面的电荷状态变化, 如在 N 型样品表面形成电子积累层, 而在 P 型样品表面形成电子反型层. 这对准确测量 HgCdTe 材料霍耳数据产生重大影响, 特别是那些载流子浓度较小, 迁移率较低的样品, 其影响更大, 甚至会出现 P 型样品的反常霍耳行为^[1~4]. 这种氧化层的影响会随着样品厚度的减薄变得更加严重. 在大量采用外延技术生长超薄型 HgCdTe 材料的今天, 氧化层对其霍耳数据的影响是必须考虑的. 本文报道了这种自然氧化层对 HgCdTe 霍耳数据影响的实验研究结果, 并利用两层模型对实验结果进行了分析和讨论.

1 基本原理

由于氧化层的存在, HgCdTe 表面感应了一层不同于体内的表面电子导电层. 利用两层模型^[5]可以很好地解释实验结果. 可以认为样品是由厚度为 d_s 、电导率为 σ_s 的表面导电层和厚度为 d_b 、电导率为 σ_b 的体内部份并联组成. 在弱磁场条件下, 样品的有效电导

本文 1992 年 1 月 23 日收到, 修改稿 1992 年 9 月 5 日收到.

* 中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家实验室资助课题.

率 σ 和霍尔系数 R 可分别为

$$\sigma = \frac{\sigma_s d_s + \sigma_b d_b}{d}, \tag{1}$$

$$R = \frac{(\sigma_s^2 d_s R_s + \sigma_b^2 d_b R_b) d}{(\sigma_s d_s + \sigma_b d_b)^2}. \tag{2}$$

式中, R_s 和 R_b 分别为表面层和体内部份的霍尔系数, $d = d_s + d_b$ ($d_s \ll d_b$) 为样品的总厚度. 这样, 样品有效霍尔系数 $\mu = |R\sigma|$ 、表面层的载流子迁移率 μ_s 和表面载流子密度 N_s 都可以由测得的有效霍尔数据获得.

2 实验结果

利用阳极氧化法在 HgCdTe 表面生长自然氧化层^[6], 采用范德堡方法测量霍尔数据. 实验分两步进行: 先测量有氧化层的样品, 然后将氧化层腐蚀后, 立即进行无氧化层样品测量, 数据作为体参数.

2.1 氧化层对霍尔数据的影响

图 1 是典型的 P 型 HgCdTe 样品在有氧化层和没有氧化层两种情况下测得的电导率 σ 和霍尔系数 R 与温度 $10^3/T$ 的关系. 对没有氧化层的体参数, 显然是标准的 P 型 HgCdTe 霍尔数据. 在存在氧化层时, 由于氧化层感应的表面反型层沟道参与了导电, 测得的霍尔系数发生了很大的变化. 如在 77 K 时, 氧化层引起霍尔系数的测量误差达 41.3%, 由此估算的空穴浓度比体内真实值相差近两倍, 严重影响了体参数的准确估算. 利用两层模型可以估算 P 型样品表面反型层中的电子电荷密度为 $1.57 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 这与对 MIS 结构的 $C-V$ 特性测量^[7]得到的氧化层固定正电荷密度 $1.68 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 基本上一致, 这说明反型层中导电的电子电荷由氧化层中固定正电荷感应所致. 这些表面层中的电子迁移率为 $1.28 \times 10^4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

图 2 是典型的 N 型样品的实验数据. 在相同样品厚度和掺杂浓度下, 氧化层对 N 型样品霍尔数据的影响要比 P 型样品小得多. 样品的表面电子迁移率与体内迁移率之比为 0.47, 这是因为表面的非完整性形成一些附加散射中

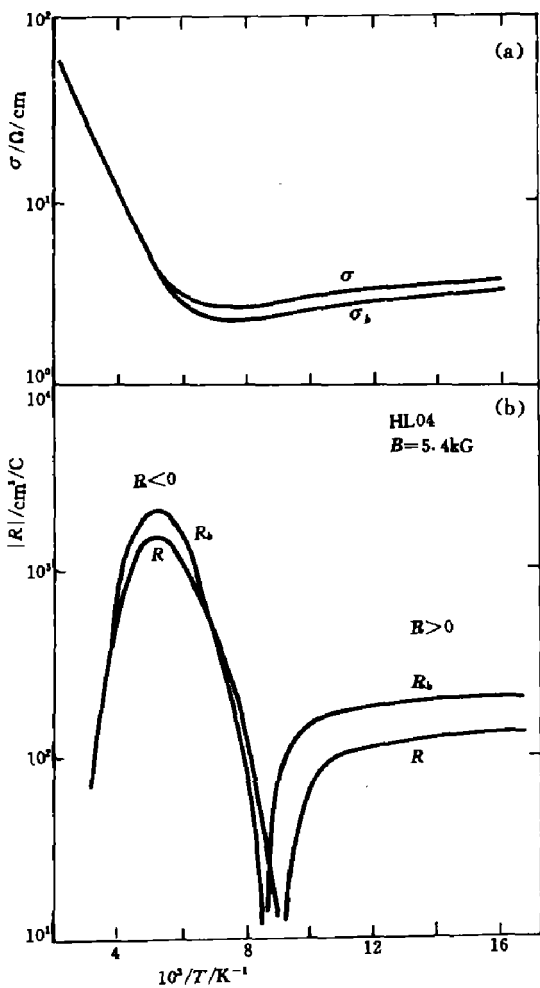


图 1 测得的 $x=0.2$ 的 P 型 HgCdTe 样品的电导率 σ (a) 和霍尔系数 R (b) 与温度倒数 $10^3/T$ 的关系 (σ 和 R 对应有氧化层的情况, σ_b 和 R_b 对应无氧化层的情况)

Fig. 1 Measured conductivity (a) and Hall coefficient (b) vs. reciprocal temperature for a P-type $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ sample with $x=0.2$

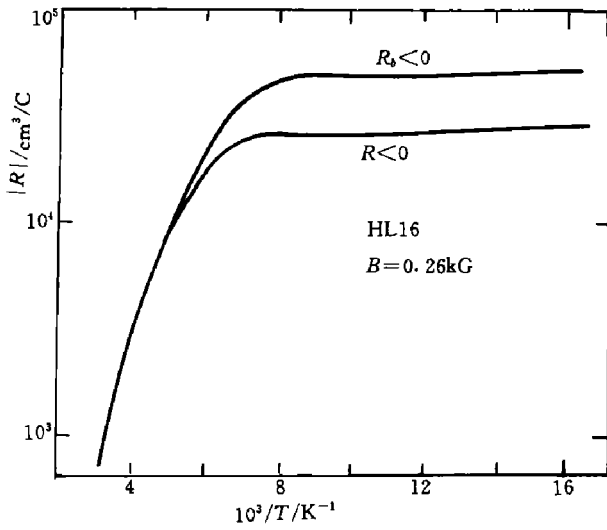


图 2 测得的 $x=0.256$ N 型 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 样品霍尔系数 R 与温度 $10^3/T$ 的关系
Fig. 2 Measured Hall coefficient versus reciprocal temperature for N-type $Hg_{1-x}Cd_xTe$ sample with $x=0.256$

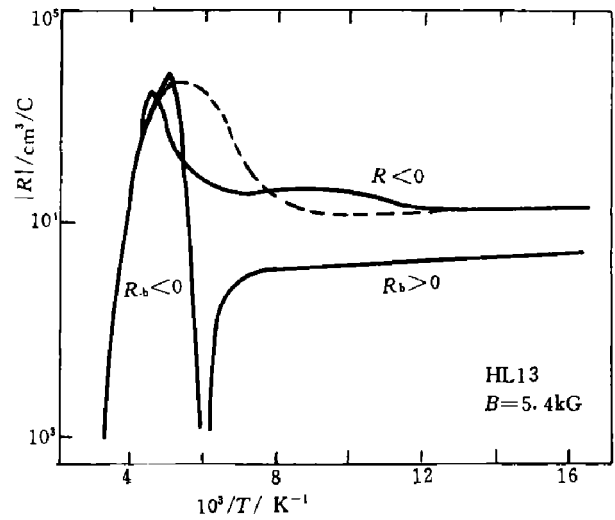


图 3 测得的 $x=0.32$ P 型 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 样品的霍尔系数的反常霍尔行为 (虚线为两层导电模型的理论计算曲线)
Fig. 3 Measured anomalous temperature behavior of Hall coefficient R for P- $Hg_{1-x}Cd_xTe$ sample with $x=0.32$

心，使得表面迁移率低于体内迁移率。

2.2 反常霍尔行为

几个典型的 $HgCdTe$ 样品的体内和表面电学参数测量值列于表 1。可以看出，氧化层的存在会影响体霍尔数据的测量精度。其中，对 P 型样品会出现反常霍尔行为，即在 P 型样品的非本征区测量的霍尔系数为负值，表现为电子的导电行为，如图 3 所示。实验数据表明，氧化层存在时，没有出现正常 P 型样品霍尔系数所具有的霍尔系数从负值到

表 1 测量的几个典型样品在 77 K 时的体内和表面电学参数
Table 1 Measured bulk and surface parameters for various $Hg_{1-x}Cd_xTe$ samples at 77 K

样品编号	HL04	HL11	HL13	HL16	HL17
组份 x	0.204	0.251	0.320	0.256	0.190
禁带宽度 E_g (eV)	0.10	0.18	0.29	0.18	0.077
导电类型	P	P	P	N	N
净掺杂浓度 $N_D - N_A$				1.3×10^{14}	5.5×10^{14}
N (cm^{-3})	3.3×10^{16}	1.5×10^{16}	9.1×10^{14}		
霍尔迁移率 μ_b ($cm^2/V \cdot s$)	5.5×10^2	5.8×10^2	3.9×10^2	1.5×10^4	7.6×10^4
表面参数					
表面电子电荷数 N_s (cm^{-2})	1.6×10^{12}	1.23×10^{12}	1.01×10^{12}	1.54×10^{12}	1.42×10^{12}
表面电子迁移率 μ_s ($cm^2/V \cdot s$)	1.3×10^4	1.3×10^4	5.4×10^3	7.0×10^3	3.7×10^4
相对误差 $\frac{\Delta R}{R_b} = \left \frac{R - R_b}{R_b} \right $ (%)	41.3	48.5	25.5	14.6	2.11
MIS 测量					
氧化层中固定正电荷数 N_f (cm^{-2})	1.63×10^{12}	1.33×10^{12}	1.21×10^{12}	1.66×10^{12}	1.56×10^{12}

正值的转变点. 这是由于氧化层在 HgCdTe 表面产生了电子反型层导电沟道, 反型层中的电子迁移率远大于体内空穴迁移率, 使表面反型层在导电过程中起主要作用, 并掩盖了体内空穴的 P 型导电行为. 霍耳系数的峰值是由于体内本征电子浓度的变化引起的. 图 3 中的虚线为理论计算曲线, 计算中采用了两层导电模型并考虑了载流子的混合导电行为. 不难看出, 利用两层模型计算的理论与实验结果符合得很好.

3 分析讨论

我们从样品的表面载流子浓度和样品厚度两方面来讨论氧化层对 HgCdTe 霍耳系数的影响. 根据两层模型, 可以推导得出测量样品的相对霍耳系数为

$$\frac{R}{R_b} = \frac{1 \pm k^2 \frac{N_s}{N_d}}{\left(1 + k \frac{N_s}{N_d}\right)^2}, \quad (3)$$

式中对 N 型样品取正号, 对 P 型样品则取负号. $R = \mu_s / \mu_b$ 为表面和体内载流子迁移率之比, N 为 HgCdTe 体内净掺杂浓度.

不难看出, 对 N 型样品, 氧化层存在时, 测量样品也呈 N 型特征, 即 R 与 R_b 同号, 但数值要比体内小, 且随着表面层中载流子密度 N_s 的增加, 霍耳系数 R 减小 (参见图 4(a)). 而对 P 型样品, 氧化层的存在总是造成 HgCdTe 表面反型, 样品的霍耳系数由体内的 P 型空穴导电和表面层的 N 型电子导电共同决定. 当表面层载流子数目较少, 满足 $N_s k^2 \ll N_d$ 时, $R \approx R_b$, 即霍耳系数完全由体参数 R_b 决定. 而随着表面层中载流子浓度的增加, 氧化层影响增大, 当满足 $N_s k \gg N_d$ 时, $R \approx -d/qN_s$, q 为电子电荷量, 霍耳系数完全由反型层决定, 样品呈同与 N 型导电的反常霍耳行为 (参见图 4(b)). 当样品表现为这种两层混合导电时, 难以通过霍耳系数有效地确定样品的导电类型和掺杂水平. 图 4 给出了两个典型样品相对霍耳系数 R/R_b 与表面层载流子浓度 N_s 的关系的理论计算曲线, 有关的计算参数取自表 1. 对于那些不可控制的自然氧化过程, 常常会使 HgCdTe 表面的载流子浓度超过 10^{13} cm^{-2} 量级, 此时氧化层对霍耳数据的影响尤为严重. 另外, 对于不同的样品厚度, 氧化层对霍耳系数的影响是不相同的, 可写为

$$\frac{R}{R_b} = \frac{1 \pm k \cdot \lambda/d}{(1 + \lambda/d)^2}, \quad (4)$$

其中, $\lambda = \sigma_s \cdot d_s / \sigma_b$, N 型样品分子取正号, P 型样品分子取负号.

图 5 为氧化层存在时, 两个典型样品的霍耳系数 R/R_b 与样品厚度 d 的关系, 有关的理论计算参数取自表 1. 显然, 在同样的表面条件下, 样品越薄, 氧化层的影响越大. 对 N 型样品, 霍耳系数的符号保持不变, 但随着样品厚度的减薄而数值变小, 当厚度小于几十 μm 时, 霍耳系数的数值会有数量级上的改变. 而对 P 型样品, 则当样品厚度满足条件 $d \ll \lambda$ 时, 出现反常霍耳行为.

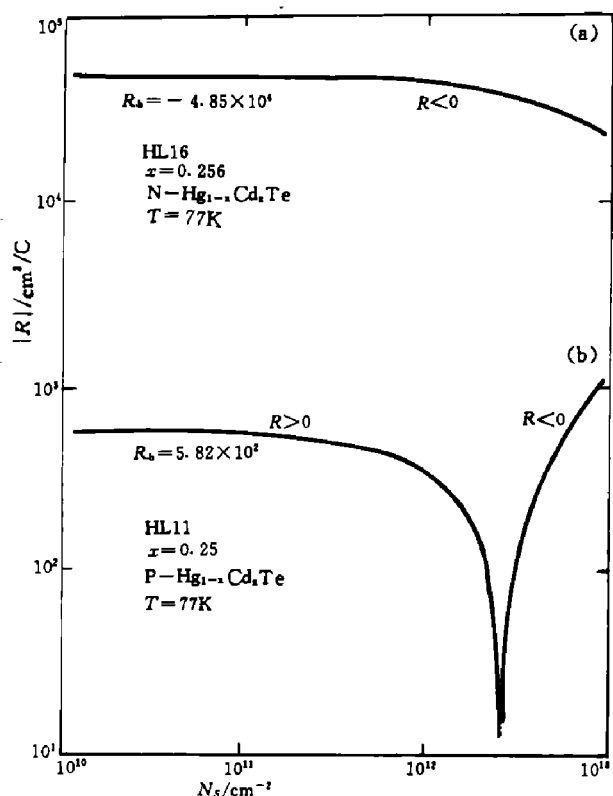


图 4 计算的霍尔系数 R 与表面层载流子浓度 N_s 的关系

(a): N 型样品, (b): P 型样品

Fig. 4 Calculated values of Hall coefficient R as a function of surface carrier concentration N_s

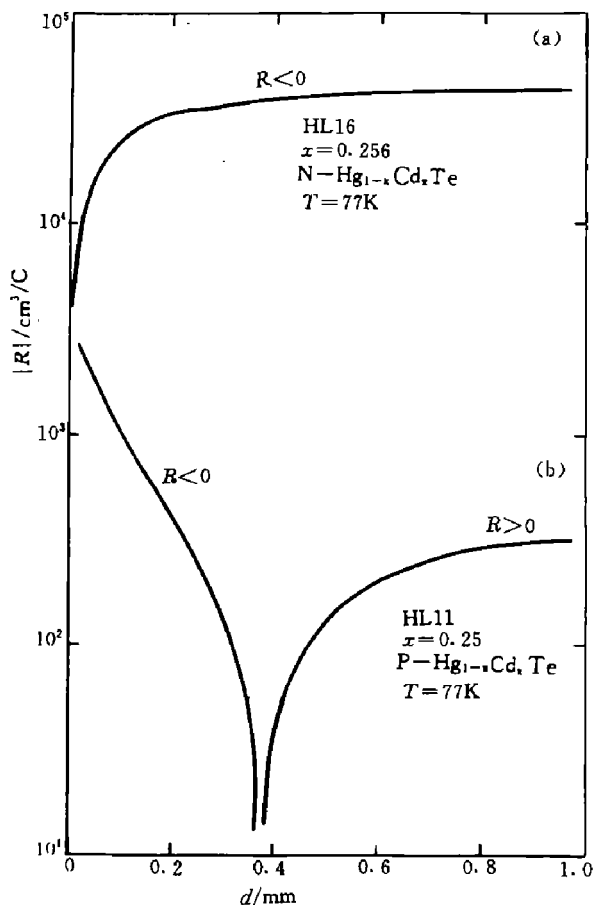


图 5 计算的霍尔系数 R 与样品厚度的关系
(a): N 型样品, (b): P 型样品

Fig. 5 Calculated values of Hall coefficient R as a function of sample thickness d

随着外延材料的广泛使用, HgCdTe 样品的厚度往往只有几十 μm 量级. 这时如果不考虑氧化层的影响, 往往难以正确地根据霍尔数据来分析和评价材料本身的电学性质.

4 结论

材料表面的自然氧化层会影响对其霍尔数据的分析, 对迁移率较低、载流子浓度较小和厚度较薄的样品尤为突出. 对于 P 型样品, 氧化层形成的表面反型层会引起反常霍尔行为. 利用两层导电模型可对实验结果进行解释.

参考文献

- 1 Dornhaus R, Nimtz G. *Narrow gap Semiconductors*, 1983;98:119
- 2 Nemirovsky Y, Kindom I. *Solid State Electronics*, 1979;22:831
- 3 Ivanov-Omskii VI, Berchenko NN, Elizarov AL. *Phys. Stat. Sol. (a)*, 1987;103:1861

- 4 Zemel A, Eger D. *J. Appl. Phys.*, 1987;**62**:1861
- 5 Many A, Goldstein Y, Grover NB, *Semiconductor Surface*, New York: Wiley, 1965:295
- 6 Catagnus PC, Baker CT. U.S. Patent. No.3977018, 1976
- 7 黄河, 童斐明, 汤定元. *红外研究*, 1988;**7A**:89

THE EFFECT OF SURFACE LAYER OXIDE ON $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ HALL DATA*

HUANG HE

(Department of Applied Physics, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

ZHENG GUOZHEN, TONG FEIMING, TANG DINGYUAN

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

Abstract: The experimental studies of the effect of surface oxide layer on $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ Hall data are reported. The experimental results are well explained by using a two-layer conduction model.

Key words: surface oxide layer, anomalous Hall behavior, two-layer model.

*The project supported by the Foundation of National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences.