

Hg_{1-x}Cd_xTe 光导探测器的电学参量分析*

桂永胜¹⁾ 郑国珍¹⁾ 郭少令¹⁾ 蔡毅²⁾ 褚君浩¹⁾ 汤定元¹⁾

(¹⁾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

(²⁾昆明物理所, 云南, 昆明, 6650223)

TN215

摘要 测量了 Hg_{1-x}Cd_xTe 光导探测器中电阻率与温度及磁场强度的关系. 在 Shubnikov-de Haas (SdH) 测量中, 发现了表面电子的浓度在 1.2~55K 的范围内没有变化. 一个包括体电子和两类表面电子的三带模型被用来分析电阻率随温度变化的关系, 由此得到的电学参数与实验及 SdH 测量获得的结果非常符合.

关键词 光导探测器, Shubnikov-de Haas 效应, Hg_{1-x}Cd_xTe.

电学参量

SdH 测量

永福 蔡毅

引言

Hg_{1-x}Cd_xTe 光导探测器中, 往往存在多种载流子^[1,2], 它们对电导都有一定的贡献, 其中体内的多数电子和由于表面钝化工艺引入的表面电子对电导的贡献较大^[1]. 由于表面电子的电学性质与工艺密切相关, 因此从提高器件性能的目的出发, 除了在理论上进行优化设计外, 在器件的每一步制备工艺中对材料电学参数进行监控也是必不可少的.

成品的 Hg_{1-x}Cd_xTe 光导探测器, 只是一个两端器件, 不满足霍尔测量至少四个电极的要求, 因此需要建立新的模型, 通过电阻率随外加条件的改变来分析它的电学参数. 本文研究电阻率随温度以及磁场强度的变化, 从中发现这些变化规律与器件电学参数的内在关系.

1 实验

样品为昆明物理所制备的 Hg_{1-x}Cd_xTe 光导探测器, 光敏面为 $2.5 \times 10^{-3} \sim 1.4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$, 厚度为 $7 \sim 8 \mu\text{m}$, 探测器的上下表面均采用同一工艺钝化. 我们在超导磁体中测量了样品 1.2~300K、0~8T 范围内的电阻率变化, 通过改变磁场方向与样品表面的夹角, 区分了样品中的二维电子和三维电子.

2 实验结果与讨论

2.1 电阻率-磁场强度的关系

研究表面积累层准二维结构的输运特性, Shubnikov-de Haas (SdH) 振荡效应是一种非常有效的手段^[3~6]. 在窄禁带半导体 Hg_{1-x}Cd_xTe 材料中, 电子的有效质量非常小, 朗道能级之间的间隙很大, 使得样品的量子效应非常明显. SdH 振荡一般发生在低温下的简并半导体中, 随着磁场强度的增加, 分裂的朗道能级相继穿过费米能级, 引起了样品电阻的突变,

* 国家自然科学基金(编号 69738020)资助项目
稿件收到日期 1998-06-01, 修改稿收到日期 1998-09-08

就形成了 SdH 振荡. 通过改变磁场与样品表面的夹角, SdH 振荡现象还可以区分三维载流子与二维载流子.

不同温度下, 样品 S9601 的电阻率随磁场(磁场方向与表面垂直)的变化如图 1 所示, 从图 1 中可以发现除了振荡的幅度随温度上升而下降外, 振荡的形状基本没有变化. 当磁场方向与表面平行时, 振荡消失了(除了 12.5K 时, 0~1T 之间的部分振荡). 图 1 中振荡的周期并不是简单呈 $1/B$ 规律, 表明了样品中存在多种载流子, 傅里叶变换可以用来分析这种复杂的振荡, 从中发现不同载流子的振荡周期. 图 2 为 SdH 振荡的傅里叶变换结果, 在每种温度中, 都可以发现四个峰, 0, 1, 0' 和 1', 表明在 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光导探测器的每个表面都存在两个子能带(0 和 1 在一表面, 0' 和 1' 为另一表面, 0 表示基态, 1 表示第一激发态), 这就说明了由于子带电子的有效质量很小, 对应的态密度较低, 电子占据了多个子带. 另外, 我们在 12.5K 的谱中还发出了一个尖锐的峰, 它对应着浓度为 $5.2 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 的体电子. 图 2 谱中峰的半峰宽对应着载流子的迁移率, 半峰宽窄的载流子具有较高的迁移率^[9], 也就是说激发态的迁移率比基态的高. 表 1 为通过傅里叶变换获得的不同子带的电子浓度, 从中可以发现电子浓度基本与温度无关. 通过以上的分析我们发现, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光导探测器钝化层中的二维电子气具有多个子带, 子带的电子浓度基本上与温度无关, 并且基态电子的迁移率较低.

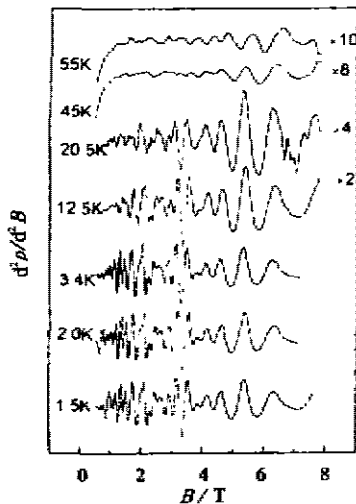


图 1 不同温度下样品 S9601 的 SdH 振荡曲线

Fig. 1 SdH oscillations measured on sample S9601 at different temperature

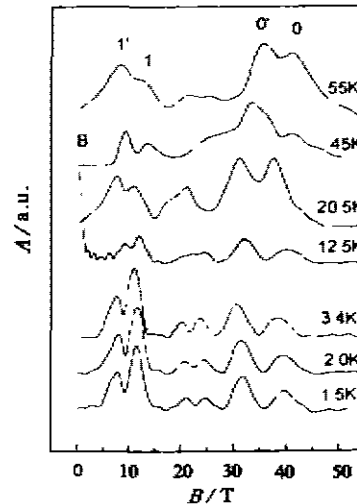


图 2 不同温度下样品 S9601 的 SdH 振荡的傅里叶变换结果

Fig. 2 Fourier transforms of the SdH oscillations of sample S9601 at different temperature

2.2 电阻率-温度关系

在 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光导探测器中, 由于上下表面采用同样的钝化工艺, 因此, 两个钝化层的电学特性相差不大(表 1 的结果也说明了这一点). 在此基础上, 我们建立了一个用于分析 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光导探测器电阻率-温度关系的三带模型(体电子, 钝化层中的基态电子和激发

态电子):

$$\rho(T) = \frac{1}{e[n_b(T)\mu_b(T) + 2n_{s0}(T)\mu_{s0}(T)/d + 2n_{s1}(T)\mu_{s1}(T)/d]}, \quad (1)$$

式(1)中 $n_b(T)$ 、 $n_{s0}(T)$ 、 $n_{s1}(T)$ 和 $\mu_b(T)$ 、 $\mu_{s0}(T)$ 、 $\mu_{s1}(T)$ 分别为体电子和两类表面电子的浓度和迁移率, 表面电子浓度与温度无关, d 为样品厚度. 体电子的迁移率由文献[10]给出:

$$\mu_b = \left\{ \frac{1}{\mu_{300} [m_e^*(300\text{K})/m_e^*(T)(300/T)^{1.9}]} + \frac{1}{\mu_{s0}} \right\}^{-1}, \quad (2)$$

式(2)中 $m_e^*(300\text{K})$ 、 μ_{300} 分别为 300K 时体电子的有效质量和迁移率, 分别由文献[11]和[12]中的有关经验公式给出, μ_{s0} 为体电子极低温度下迁移率的渐近值. 表面电子迁移率满足^[10]:

$$\mu_{s0} = \left(\frac{1}{\mu_b} + \frac{1}{\mu_{s1}} \right)^{-1}, \mu_{s1} = \left(\frac{1}{\mu_b} + \frac{1}{\mu_{s1}} \right)^{-1}, \quad (3)$$

μ_{s0} 、 μ_{s1} 为极低温度下, 表面电子的迁移率渐近值. 体电子的浓度满足

$$n_b = \frac{(N_D - N_A) + \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2(x, T)}}{2}. \quad (4)$$

在拟合过程中, μ_{s0} 、 μ_{s1} 、 μ_{b0} 和 n_{s0} 、 n_{s1} 、 $N_D - N_A$ 为拟合参数, 本征浓度 $n_i(x, T)$ 由文献[13]中的经验公式给出. 图 3 为 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光导探测器样品的实验结果(实点)和拟合结果(实线)的对照, 从图 3 中可见, 二者符合得相当好, 表 2 为拟合获得的有关电学参数, 与 SdH 振荡获得的有关实验结果相对照, 二者相差不大, 这说明了采用三带模型对 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光导

表 1 不同温度下样品 S9601 中不同子带的电子浓度

Table 1 The density of electrons in different subbands as a function of temperature for sample S9601

| T/K | 电子浓度/ 10^{12}cm^{-2} | | | |
|------|-------------------------------|------|------|------|
| | 1* | 1 | 0* | 0 |
| 1.5 | 0.40 | 0.57 | 1.53 | 1.93 |
| 2.0 | 0.41 | 0.54 | 1.50 | 1.87 |
| 3.4 | 0.36 | 0.53 | 1.46 | 1.82 |
| 12.5 | 0.43 | 0.57 | 1.54 | 1.92 |
| 20.5 | 0.37 | 0.53 | 1.50 | 1.82 |
| 45 | 0.44 | 0.61 | 1.58 | 1.94 |
| 55 | 0.41 | 0.62 | 1.66 | 1.96 |

表 2 样品 S9601 和 S9608 的电阻率-温度关系的拟合结果

Table 2 The fitted results of resistivity vs temperature for samples S9601 and S9608

| 样品 | $N_D - N_A$ | n_{s0} | n_{s1} | μ_{s0} | μ_{s1} | μ_b |
|-------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|--|--|
| | ($\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$) | ($\times 10^{12}\text{cm}^{-2}$) | ($\times 10^{12}\text{cm}^{-2}$) | ($\times 10^3\text{cm}^2/\text{Vs}$) | ($\times 10^4\text{cm}^2/\text{Vs}$) | ($\times 10^4\text{cm}^2/\text{Vs}$) |
| S9601 | 4.8 | 1.90 | 0.62 | 3.21 | 4.42 | 6.19 |
| S9608 | 9.1 | 1.34 | 0.45 | 3.25 | 5.03 | 6.81 |

探测器的电阻率-温度关系进行拟合也可以获得一些重要的电学参数.

我们在拟合过程中发现 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 表面积累层中,基态电子的迁移率要比激发态电子的迁移率小,如果认为基态和激发态电子具有相同的驰豫时间,则 $(\mu_0/\mu_1)^{-1}$ 反映了基态和激发态电子有效质量的比率.在 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 表面积累层中,基态电子的有效质量比激发态的大得多^[14-16],其原因在于, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 的禁带宽度很小,价带对基态的影响很大,这就造成了基态电子的迁移率较激发态为低.

3 结语

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光导探测器是不能满足霍尔测量的两端器件,它的电阻率-磁场强度关系和电阻率-温度关系,蕴藏着丰富的电学信息,特别是电阻率-温度关系的获得对实验条件要求较低,通过三带模型,可以较准确地获取器件的有关电学参量,以及它们随温度的变化趋势,通过这种方法还可以研究器件工艺对材料电学参数的影响,这对于提高 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光导探测器的性能有着积极意义.

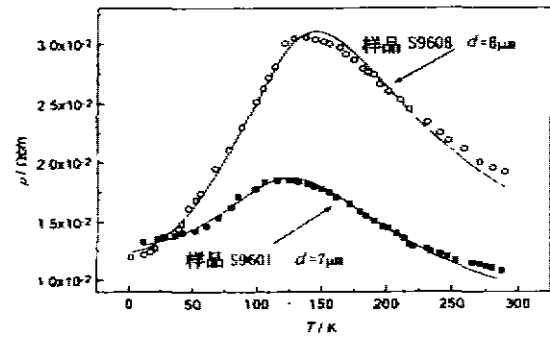


图3 样品 S9601 和 S9608 的电阻率-温度曲线

Fig. 3 The resistivity vs temperature for samples S9601 and S9608

REFERENCES

- 1 Reine M B, Maschhoff K R, Tobin S P, *et al.* The impact of characterization techniques on HgCdTe infrared detector technology, *Semicond. Sci. Technol.* 1993, **8**: 788
- 2 Meyer J R, Hoffeman C A, Bartoli F J, *et al.* Methods for magnetotransport characterization of IR detector material, *Semicond. Sci. Technol.* 1993, **8**: 805
- 3 Justice R J, Seiler D G, Zawadzki W, *et al.* Characterization of molecular beam epitaxially grown HgTe films by Shubnikov-de Haas measurements, *J. Vac. Sci. Technol.* 1988, **A6**: 2779
- 4 Chang L L, Mender E E, Kawaz N J, *et al.* Shubnikov-de Haas oscillations under tilted magnetic field in InAs-GaSb superlattices, *Surf. Sci.* 1982, **113**: 306
- 5 Koch F in *Physics of Narrow Gap Semiconductors*, Vol. 152 in Lecture Notes in Physics, edited by Gornik E, Heinrich H, and Palmetschafer, L New York: Springer, 1982, 92
- 6 Singleton J, Nicholas R J, Nasir F, *et al.* Quantum transport in accumulation layers on $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$, *J. Phys. C*, 1986, **19**: 35
- 7 Singleton J, Nasir F, Nicholas R J, *et al.* High-magnetic field characterization of (Hg,Cd) Te detectors, *Proc. SPIE*, 1986, **659**: 99
- 8 Koch F, in *Two-Dimensional Systems, Heterostructures, and Superlattices*, Vol. 53 in Solid State Science Series, edited by Bauer G, Kuchar F, and Heinrich H, New York: Springer, 1984, 20
- 9 Sturas E, Kumar R, Williams R L, *et al.* Subband dependent mobilities and carrier saturation mechanisms in thin Si doping layers in GaAs in high densities limit, *Semicond. Sci. Technol.* 1991, **6**: 535
- 10 Parat K K, Taskar N R, Bhat I B, *et al.* Annealing and electrical properties of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ grown by OMVPE, *J. Crystal Growth*, 1990, **106**: 513
- 11 Weiler M H. in *Semiconductors and Semimetals*, Vol. 16 edited by Willardson R K and Beer A C, New York: Academic, 1981, 1

- 12 Higgins W, Pultz G N, Roy R G, *et al.* Standard relationships in properties of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, *J. Vac. Sci. Technol.*, 1989, **A7**: 271
- 13 Hanson G L, Schmit J L. Calculation intrinsic carrier concentrations in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**: 639
- 14 Lowney J R, Seiler D G, Thurber W R, *et al.* Heavily accumulated surfaces of mercury cadmium telluride detectors: theory and experiment, *J. Electron. Mater.*, 1993, **22**: 985
- 15 Gui Y S, Zheng G Z, Chu J H, *et al.* The electrical characterization of subbands in HgCdTe surface layer, *J. Appl. Phys.* 1997, **82**: 5000
- 16 GUI Yong-Sheng, ZHENG Guo-Zhen, CHU Jun-Hao, *et al.* Magneto-transport properties for accumulated layer on surface of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, *Chin. J. Semiconductors* (桂永胜, 郑国珍, 褚君浩等. $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 表面积累层的磁输运特性, *半导体学报*), 1997, **18**: 667

THE ELECTRICAL PARAMETER ANALYSIS FOR $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ PHOTOCONDUCTORS *

GUI Yong-Sheng ZHENG Guo-Zhen¹⁾ GUO Shao-Ling¹⁾
CAI Yi²⁾ CHU Jun-Hao¹⁾ TANG Ding-Yuan²⁾

⁽¹⁾National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

⁽²⁾Kunming Institute of Physics, Kunming, Yunnan 650223, China)

Abstract The temperature and magnetic field dependent resistivity was measured for $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ photoconductive detectors. The density of all kinds of surface electrons was found to keep constant from 1.2K to 55K by the Shubnikov-de Haas (SdH) measurements. A three-band model, which consists of two kinds of surface electrons and bulk electrons, was proposed to fit the temperature dependent resistivity. The electrical parameters obtained by this model agree well with the experimental data and the results given by SdH measurements.

Key words photoconductive detector, Shubnikov-de Haas effect, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China
Received 1998-06-01, revised 1998-09-08