

$L^3\text{He}$ 温度下碲镉汞量子输运特性

郑国珍 屈敏飞 郭少令
陈建湘 宋祥生 汤定元

(中国科学院上海技术物理研究所红外物理开放研究实验室, 上海)

摘要——在 0.3~4.2K 温度范围, 观察到 N-型碲镉汞的磁场诱发的金属-绝缘体转变, 报道了纵向磁阻在很低的磁场下激活。讨论了纵向磁阻和横向磁阻的各向异性和反常“霍尔系数下凹”区的行为。

关键词——磁量子极限, 金属-绝缘体转变, 磁阻。

1. 引 言

由于窄禁带半导体碲镉汞混晶 ($x \approx 0.20$) 有很小的电子有效质量和较大的介电常数及很高的迁移率, 因此在较低的磁场下就能达到磁量子极限。在磁量子极限范围内, 所有的电子都集中在最后一个朗道能级 ($n=0^-$) 上。在低温和强磁场下, 量子极限区的磁输运特性研究已经成为相当受重视的研究课题。特别是在 $L^3\text{He}$ 温区 (0.3~4.2K), 观察到一系列磁输运反常现象, 提出了不少碲镉汞混晶在磁场诱发下的电子系统局域化的理论模型^[1~6]。Shayegan 等人提出了当磁场小于发生局域电子的临界磁场时, 电子的输运性质如同粘滞液体。Raymond 等人和 De Vos 等则认为系统的局域化是由于导带电子冻出到杂质带所致。而 Nimtz 等人都认为在低温强磁场下, 杂质带对碲镉汞的输运特性的影响不是主要的, 应该考虑的是载流子整体的 Wigner 凝聚。而对于各作者的实验结果, 鉴于实验条件和样品参数不同, 很难加以比较, 看来要阐明这个问题, 尚需作更多的实验和理论工作。

我们在大量的液氮温度的实验基础上, 研究了 N 型碲镉汞混晶在 $L^3\text{He}$ 温度 (0.3~4.2K) 的磁输运特性。并已初步报道了有关实验结果^[7]。

本文进一步在纵向磁阻的实验中, 发现纵向磁阻在很低的磁场下激活的现象, 证实了纵向磁阻和横向磁阻的各向异性; 实验中给出了金属-绝缘体转变的临界磁场; 从霍尔磁阻和“霍尔下凹”区的行为对电子系统的局域化作了讨论。

2. 实验与结果

样品是由碲溶剂法制备的, 组分 $x=0.195$, 矩形样品的几何尺寸约为 $0.8 \times 1.2 \times 20 \text{ mm}^3$; 样品经过研磨后在乙醇-溴(95% 乙醇+5% 溴)溶液中腐蚀. 用钢球作为样品与引线的欧姆接触. 样品都在液氮和液氦温度下经过仔细挑选, 选择电学参数好, 性能均匀的样品做 L^3He 实验.

实验是在 L^3He 致冷系统内进行的. 10 升 ^3He 气体在 ^3He 空间冷凝. 改变吸附泵温度, 使吸附泵吸附能力达到最强. 通过吸附 ^3He 气体, 减压 ^3He 蒸汽, 使 ^3He 空间达到最低温度 0.3K, 增加吸附泵温度和使用加热器, 可以调节样品温度从 0.3K 到 4.2K 或更高温度. 由经定标的碳电阻温度计和渗碳玻璃温度计读数 and 监控. 样品可以与磁场垂直或平行放置, 在低温下还可以调换样品.

图 1 和图 2 分别给出了样品 ($x=0.195$, $n_{\text{THk}}=1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_{\text{THk}}=4.0 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $n_{\text{d.zk}}=7.8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) 横向磁阻和纵向磁阻与磁场的关系. 在图 1 可以看到小于磁场 B_c 时的横向磁阻与温度无关, 在大于磁场 B_c 时, 磁阻与磁场有强烈的依赖关系. 图 2 给出了纵向磁阻在小于 B_c 处已开始与温度有关; 说明其在较低的磁场时就激活, 而横向磁阻没有激活.

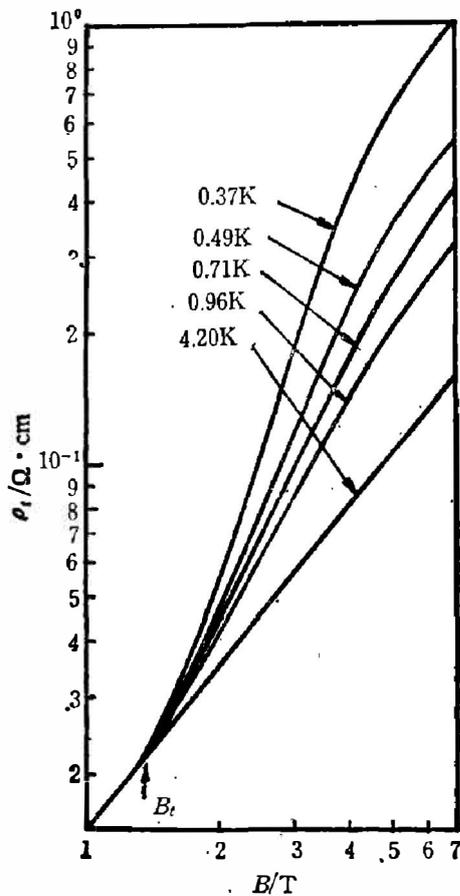


图 1 横向磁阻与磁场的关系

Fig.1 Magnetic field dependence of the transverse magnetoresistance.

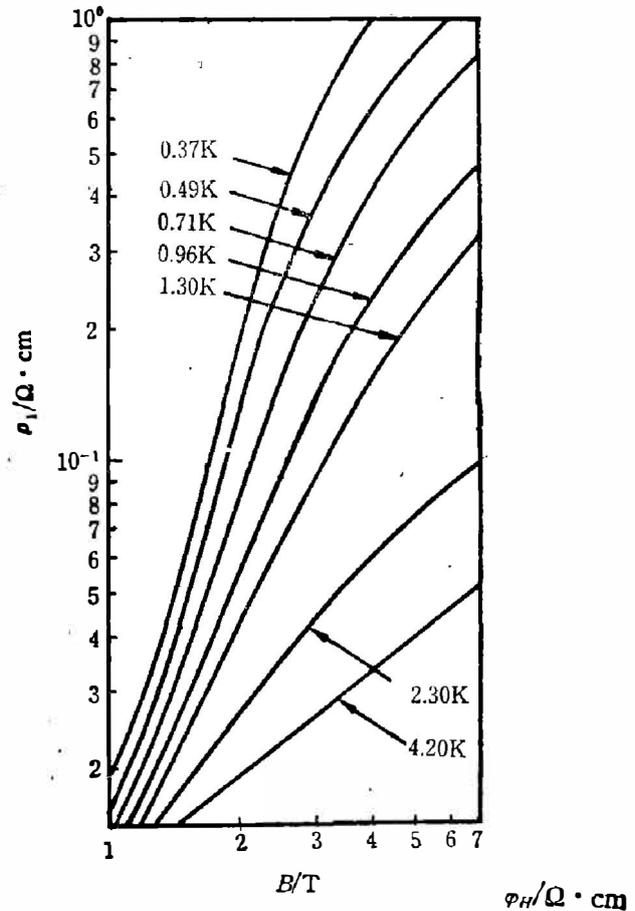


图 2 纵向磁阻与磁场的关系

Fig. 2. Magnetic field dependence of the longitudinal magnetoresistance.

图 3 是样品的霍尔系数与磁场的关系。在 $T < 4.2\text{K}$ 的温区里, 霍尔系数随磁场的增加而减小, 经过某一个临界磁场 B_H 后, 开始随磁场的增加而增加, 出现了所谓的“霍尔下凹”(Hall dip), 左上角的插图是各温度点所对应的 B_H 值, 0B_H 是外推到 $T=0$ 时的磁场。可以很清楚地看到 B_H 与温度 T 有关, 而且与温度成线性关系。

图 4 是霍尔磁阻 ρ_H ($\rho_H(B) = R_H(B) \cdot B$) 与磁场的关系。如图所示: 在 $B > B_i$ 处磁阻 ρ_H 开始与温度有关, 但它对磁场的关系要比横向磁阻 ρ_t 对磁场的关系来得弱, 同时, 必须提及的是在磁场 0B_H 处, ρ_H 随磁场陡然上升。

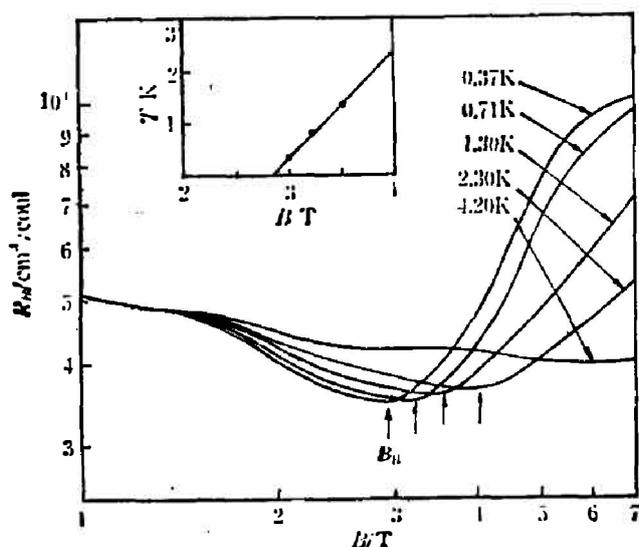


图 3 霍尔系数与磁场的关系

Fig. 3 Magnetic field dependence of Hall coefficient.

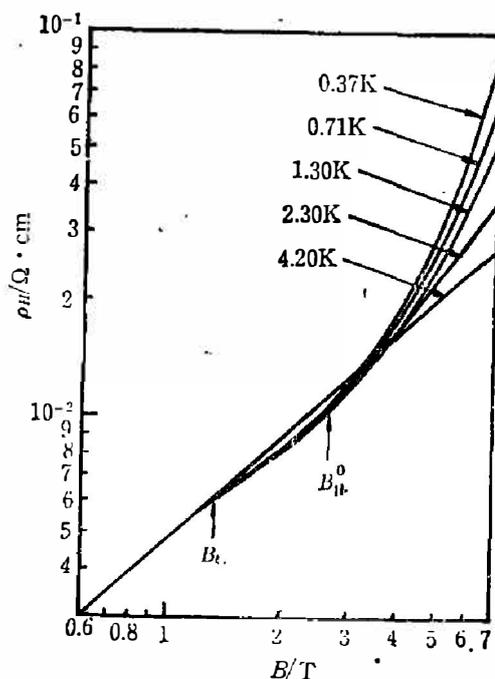


图 4 霍尔磁阻与磁场的关系

Fig. 4 Magnetic field dependence of Hall ρ_H resistivity.

3. 分析与讨论

3.1 反常磁阻现象和纵向磁阻的激活

在以前的实验中, 都证实了当 $T=4.2\text{K}$ 及 4.2K 以上的更高温度时, 纵向磁阻 ρ_l 与横向磁阻 ρ_t 都与磁场呈幂函数关系, 即 $\rho \propto B^\alpha$, 其中指数 α 与散射机制、简并度以及能带结构有关。对于非抛物带采用长程杂质势散射, 理论上给出 $\alpha=1.5$, 在我们的实验中符合得较好。

在 L³He 实验中, 我们发现在小于临界磁场 B_i 的磁场范围内磁阻与温度无关, 材料呈金属性导电的特征; 而当 $B > B_i$ 时, 从某一个临界温度开始, 磁阻与温度有关。

同时从图 2 可以看到纵向磁阻比横向磁阻先激活。纵向磁阻和横向磁阻激活的各向异性虽然在 Wigner 凝聚理论中有所论述^[8], 但在实验上并不多见。M. Shayegan 等人^[9]认为这是载流子准一维局域化的必然结果。因为在强磁场下屏蔽效应趋于各向异性, 屏蔽长度 λ_z (垂直于 B) 而接近于磁场长度, 当而平行于 B 的屏蔽长度 $\lambda_x \sim \frac{1}{K_F}$ (K_F 为费密波矢),

在强磁场下, λ_i 逐渐减小. 在极端量子极限状态下电子的运动接近一维系统, 因为横向运动被洛仑茨力限制在磁场半径 l 内, 所以横向情况比纵向情况对杂质势起伏更容易有效地被屏蔽. 我们知道在磁输运的有些情况下, 纵向状态比横向状态复杂, 要阐明纵向磁阻激活的现象, 还需进一步实验验证.

3.2 磁场诱发的金属-绝缘体转变和 Mott 判据

磁场 $B > B_c$ 时的磁阻(低于某一临界温度)与温度有关, 当 $B > B_H^0$ 时, 霍尔磁阻随磁场迅速上升, 明显地偏离了 $\rho \propto B^a$ 的规律, 表现出绝缘体的特点. 此时电子系统已不能用单电子模型加以描述. Mott 在 Anderson 局域化的基础上提出了迁移率边的概念, 能很好地解释金属-绝缘体转变的现象. Mott^[9] 提出对一个掺杂浓度不高的掺杂半导体, 如果费密能级通过迁移率边缘而位于它的上面, 系统将出现金属性, 因为这时扩展态上占有电子. 在低温下, 电子的费密能级 E_F 位于迁移率边下面, 此时系统处于局域态, 电子的迁移率趋于零, 可认为是一个“绝缘体”. 同样, 当外加磁场增加时, E_F 向导带底移动, 当磁场 B 足够大时, E_F 经过迁移率边而进入局域态. 这时 E_F 处的电子波函数发生强烈变化, 从原来的扩展态波函数转变为局域的波函数; 使某些输运参数发生转折和变化. 也就是在我们的实验中所观察到的磁场诱发的金属-绝缘体转变.

此外, 我们还可以作一些进一步的估算.

在外加磁场下, 电子的费密能 $E_F \propto \frac{1}{B^2}$, 随着磁场的增加, E_F 相应减小到比电子库仑相互作用能小很多.

库仑相互作用能 $E_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{e^2}{r}$, 其中 $\frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{1}{n_0}$; 在 $B = 2.7\text{T}$ 时, 有 $E_F = 1.34 \times 10^{-4}\text{eV}$, $E_C = 1.25 \times 10^{-3}\text{eV}$, $E_C/E_F \approx 10$; 由于动能 $E_{kin} \sim \frac{1}{3} E_F$, 所以 $E_C/E_{kin} \sim 30$. 可见, 强磁场使电子间的相互作用相对于电子动能而言起了主要作用.

金属-绝缘体转变即 Mott 转变的判据广泛地用于各种掺杂半导体, 在有外加磁场下, 满足: $n_0 a_1^2 a_f = \delta^3$ ($\delta \approx 0.25$), 其中 $a_1 = 2l = 2(\hbar/eB)^{\frac{1}{2}}$ (垂直于 B 的 Bohr 半径) $a_f = a_0^*/[\ln(a_0^*/l)^2]$ (平行于 B 的 Bohr 半径), $l = (\hbar/eB)^{\frac{1}{2}}$ (磁场长度), $a_0^* = m_0/m_0^* \cdot \epsilon a_0$, 对于 $n_0 = 7.8 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$, $B = 2.7\text{T}$, 给出: $l = 1.56 \times 10^{-8}\text{cm}$, $a_1 = 3.12 \times 10^{-8}\text{cm}$, $a_f = 3.3 \times 10^{-6}\text{cm}$, $a_0 = 150.0\text{nm}$. 得到: $n_0 a_1^2 a_f = 0.29^3$. 结果与理论值符合得很好, 满足 Mott 转变的临界条件.

3.3 霍尔系数反常下凹

为分析霍尔下凹的现象, 通过实验得到 ρ_i 和 R_H , 分别求出电导张量的各分量为

$$\sigma_{xx} = \frac{\rho_i}{\rho_i^2 + R_H^2 B^2}, \quad \sigma_{xy} = \frac{R_H B}{\rho_i^2 + R_H^2 B^2}.$$

在量子极限条件下, $|\sigma_{xy}|/\sigma_{xx} \gg 1$, 此时载流子浓度可写成 $n = \frac{|\sigma_{xy}|B}{e}$; 但是随着磁场的增加, σ_{xy} 逐渐减小, 且减小的速率比 σ_{xx} 大^[7], 以致 $\sigma_{xy}/\sigma_{xx} (= \omega\tau) \gg 1$ 的条件不再成立, 这时载流子浓度就不能再从 $|\sigma_{xy}|B/e$ 计算得到. 半经典的表达式 $n = 1/R_H e$ 亦不能直接用来计算载流子浓度. 我们在霍尔下凹区作出了外推到 $T = 0$ 的 R_H^0 值为 2.7T , 而霍尔磁阻在这磁场值徒然上升, 这证实了在此磁场附近, 载流子处于局域状态, 它经历了磁场诱发的

金属-绝缘体转变。但是霍尔下降部分反映了载流子有效浓度的增加,这似乎是很难理解的,目前提出的一些观点和理论模型都有待进一步加以充实和完善。

致谢——作者对李捍东同志提供样品,陈永平同志参加了部分实验工作,低温车间提供了数量较多的液氮,一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Nimitz G. et al., *Solid State Commun.*, **32**(1979), 669.
- [2] Raymond A. et al., *J. Phys. Soc. Japan.*, **49**(1980), A301.
- [3] Godelieve De Vos, Fritz Herlach and Hw Myron, *J. Phys.*, **C19**(1986), 2509.
- [4] Aleinikov A. B., Baranskii P. I. and zhidkov A. V., *Solid State Commun.*, **48** (1983), 75.
- [5] Shayegan M. et al., *Phys. Rev.*, **B31**(1985), 6123.
- [6] Goldman V. J., Shayegan M. and Prew H. D., *Phys. Rev. Lett.*, **57**(1986), 1056.
- [7] 屈敏飞, 郑国珍, 汤定元, 中科院上海技术物理所红外物理开放实验室年报, 1987~1988.
- [8] Kleppman W. G. and Elliot R. J., *J. Phys.*, **C8**(1975), 2729.
- [9] Mott N. F. and Davies J. H., *Philos. Mag.*, **42** (1980), 845.

MAGNETO-QUANTUM TRANSPORT PROPERTIES OF $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ AT L^3He TEMPERATURE

ZHENG GUOZHEN, QU MINFEI, GUO SHAOLING,

CHEN JIANXIANG, SONG XIANGSHENG, TANG DINGYUAN

(Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica, Shanghai, China)

ABSTRACT

The magnetic-field-induced metal-insulator transition of $\text{N-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ at L^3He temperature is reported. Anisotropic activation of the longitudinal and transverse resistances is observed at low fields. The anomalous behaviors in the "Hall dip" region are discussed.