

局域在浅施主能级上的电子输运行为研究

郑国珍 韦亚一 沈金熙 郭少令 沈杰 汤定元

(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)

摘要 在 0.3~4.2K 的温度范围, 测量了 5 块 $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.17\sim 0.22$) 样品在强磁场下的横向磁阻和霍尔电阻. 在 4.2K 以下, 随温度降低, 霍尔电阻与磁场的关系改变了原来的经典行为, 在磁场 0.4 T 附近逐渐出现了一个类似二维系统的霍尔平台, 平台正对应 SdH 振荡的极小值. 观察到霍尔系数振荡和 SdH 振荡有一个 90° 的相位差, 且 SdH 振荡呈现反常的温度效应, 与量子霍尔效应中的弱耗散性电流很相似. 用类氢施主和无序引起的局域能级上存在准迁移率边的模型能很好地解释实验结果.

关键词 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, 浅施主能级, 量子输运.

引言

组份 $x\approx 0.2$ 的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 局域能级的测定和研究一直受到国内外学者的重视, 并不断用光学和输运等手段进行探索研究. 许多工作都基于这样的假设: 导带电子不是来源于浅施主, 而是来自于导带中的杂质共振态^[1].

近年来, 已有实验室^[2]用磁光效应实验揭示了在 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.20\sim 0.27$) 中与 $N=0$ 和 $N=1$ 的朗道能级相关的施主束缚态之间的跃迁. 高温时只观测到导带自由电子回旋共振 (CCR), 低温时还有杂质回旋共振 (ICR), ICR 比 CCR 向高能方向有一微小移动. 由此推知样品中存在浅施主杂质态, 且在深低温下电子逐步冻结在浅施主上.

我们在深低温强磁场的输运实验中成功地观察到与浅施主能级相关的 HgCdTe 的局域行为. 利用 HgCdTe 存在着可分离的浅杂质能级的模型很好地解释了实验事实, 说明当温度足够低且磁场足够高时, 导带电子被束缚在施主上, 这与 ICR 和 CCR 的能量分裂是一致的.

1 实验结果

由半溶法生长的 5 块 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 样品, 其组份为 $x=0.17\sim 0.22$. 实验是在 ^3He 致冷系统和 LHe 致冷系统中进行的, 超导磁体提供 0~7 T 的磁场强度, 样品的霍尔系数与温度关系曲线是在电磁铁系统中测量的. 表 1 给出了 5 块样品的电学参数. 图 1 和

表 1 实验样品的参数
Table 1 Parameters of the samples

No	x	Dimension (cm ³)	$E_g(4.2\text{K})$	$\mu_{77\text{K}}$	$n(R_H)(77\text{K})$	$n(R_H)(0.3\text{K})$	$n(B_0^+)$	$n(\Delta I/B)$
1	0.22	0.08×0.1×0.9	101 meV	1×10 ⁵	6.3×10 ¹⁴	2×10 ¹⁴	6.7×10 ¹⁴	7.0×10 ¹⁴
2	0.17	0.09×0.1×0.9	16 meV	8×10 ⁴	4.5×10 ¹⁴	1.8×10 ¹⁴	4.6×10 ¹⁴	
3	0.21	0.06×0.11×0.75	87 meV	1.6×10 ⁵	1×10 ¹⁵	4.5×10 ¹⁴	7.6×10 ¹⁴	8.5×10 ¹⁴
4	0.22	0.08×0.12×0.75	101 meV	1.4×10 ⁵	9.4×10 ¹⁴	9.3×10 ¹⁴	8.6×10 ¹⁴	1×10 ¹⁵
5	0.21	0.06×0.11×0.77	87 meV	1.4×10 ⁶	8.7×10 ¹⁴	9.8×10 ¹⁴	8.9×10 ¹⁴	9.5×10 ¹⁴

图 2 分别为 1# 和 4# 样品在温度 0.3~4.2 K 时的横向电阻、霍尔系数、霍尔电阻与磁场的关系 $R_{xx}-B$ 、 R_H-B 、 $R_{xy}-B$ 的实验曲线. 2# 样品的行为与 1# 样品相似, 3# 和 5# 样品与 4# 样品相似.

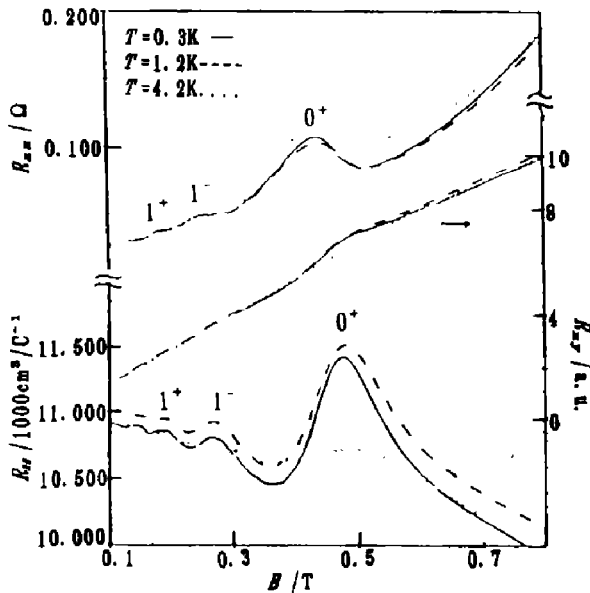


图 1 1# 样品的 Hall 振荡和 SdH 振荡
Fig. 1 The SdH effect and Hall oscillation of the anomalous sample 1

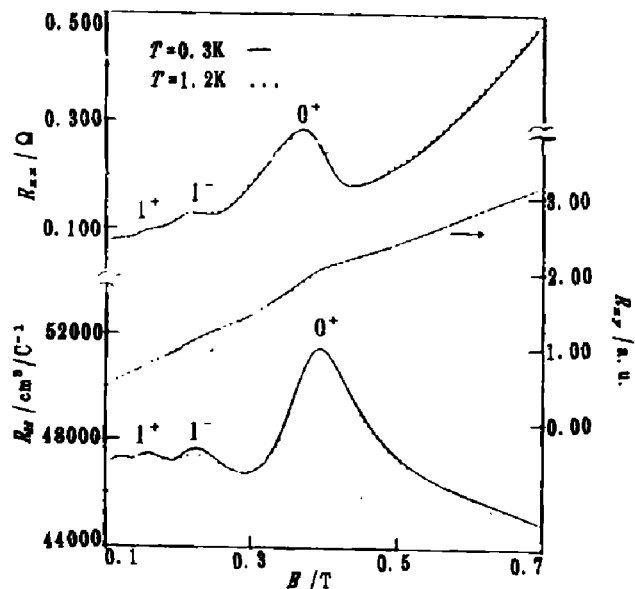


图 2 4# 样品的 Hall 振荡和 SdH 振荡
Fig. 2 The SdH effect and Hall oscillation of the high quality sample 4

从图 1 可看出: 在温度高于 4.2 K 时, 霍尔电阻与磁场的关系呈单调上升, 但当温度降低时, R_{xy} 与磁场的关系改变了经典的行为, 在磁场 $B=0.4\text{T}$ 附近出现了一个类似二维系统的霍尔平台, 但它的值不等于 $h/ve^2=25812\Omega$ (其中: h 为普朗克常数, e 为电子电荷, v 为填充因子), 即二维系统中 $v=1$ 时的数值, 平台正对应 SdH 的极小值. 此外, ΔR_{xx} 与 ΔR_{xy} 有着几乎相同的振幅, 两个振荡分量的相位差为 90° (这与量子霍尔效应中出现的一致). 在 SdH 振荡中还出现了一个反常的温度关系: SdH 振荡的最后一个峰值的极大值几乎与温度无关, 而振幅的极小值随温度的降低却下降得较大 (很像量子霍尔效应中弱耗散性电流的出现). 图 3 和图 4 分别是样品电阻和霍尔系数随温度变化的实验曲线.

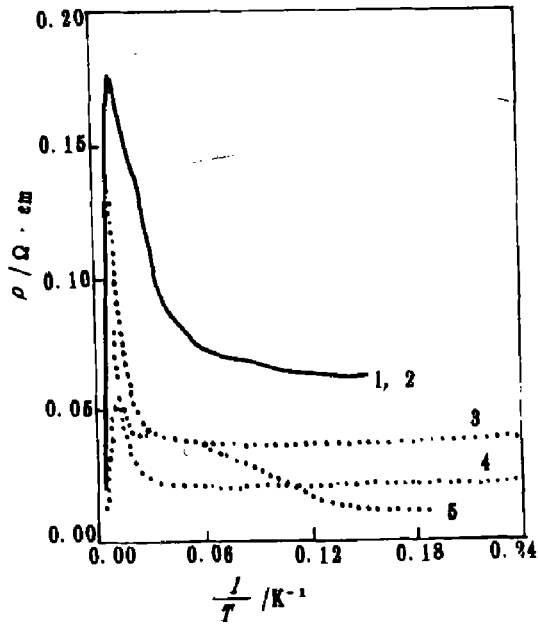


图 3 5 块样品的电阻率与温度关系
Fig. 3 Temperature dependence of resistivity of five samples

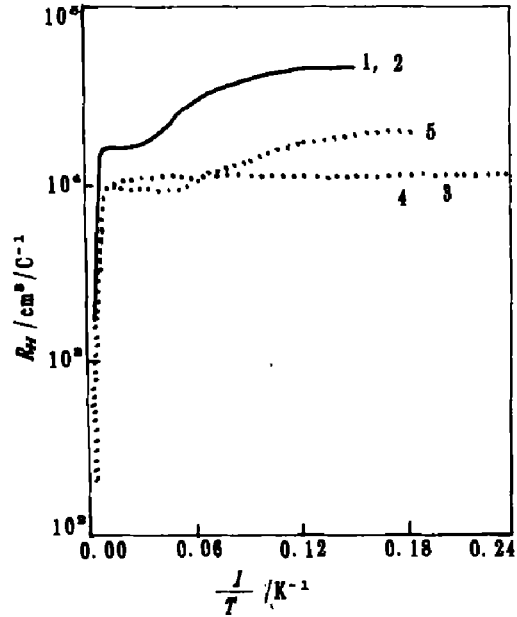


图 4 5 块样品的 Hall 系数与温度关系
Fig. 4 Temperature dependence of Hall coefficient of five samples

2 分析和讨论

2.1 准量子霍尔平台的起源

基于早期 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 磁光实验^[2]观察到的浅杂质回旋共振, 并且考虑到窄禁带半导体中类氢杂质束缚能 $R^* < \hbar\omega_c$ (朗道能级间距), 施主态和不同朗道子带之间的跃迁能量仅比对应的朗道分裂稍大一点. 我们假设在每一个朗道能级下面存在一个准局域能级 (有磁光实验可以验证为类氢杂质原子束缚的局域电子, 同时也估计无序引起的带边空间涨落亦会有效地局域一部分零横向动量), 如图 5(a) 所示. 在一个有限尺寸系统中, 束缚态的形成减少了扩展态的数目. 对 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, $B=0.4\text{ T}$ 时 $\gamma = \hbar\omega_c / (2R^*ch) \approx 2$ 较大, 就意味着无序展宽的杂质带 (局域带) 可以和导带底相接. 局域带和扩展带以迁移率边 E_m 分开, 可以取 $E_m = \nu\hbar\omega_c$ (ν 为标志局域强度的参数). Mani 等人曾按这个模型作过数值模拟计算, 得出 $T=0$ 时, R_{xy} 有平台出现的曲线^[3], 如图 6. 从模拟的结果可见, 随 $E_m/\hbar\omega_c$ 增大, 平台变宽, 这一行为类似二维中量子霍尔平台与局域化强度的关系.

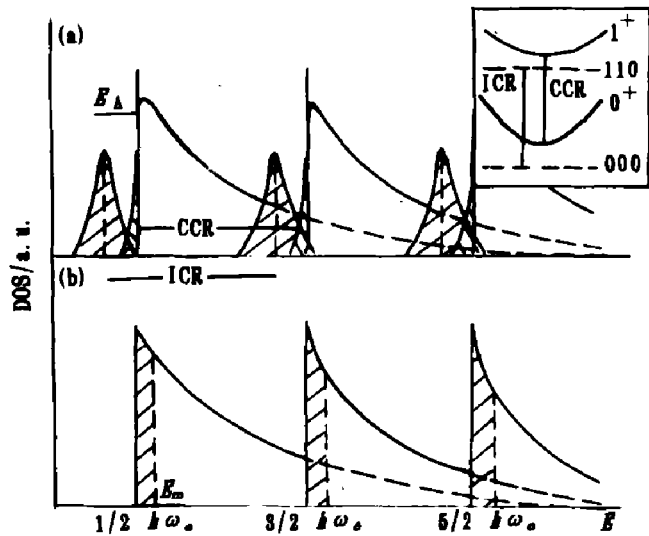


图 5 (a) 类氢局域电子及无序局域电子在能带中的位置, (b) 假定迁移率边 $E_m = \nu\hbar\omega_c$
Fig. 5 (a) Positions of the localized states in the energy band, (b) The assumed mobility edge $E_m = \nu\hbar\omega_c$

从上述假设可看到:当磁场增加时,费密能级通过每一个朗道子能带的迁移率边时,局域态的存在制约了电流的耗散性,对载流子的散射为零.因此出现了类似量子霍尔效应的行为.当然,由于三维系统在 k_z 方向永远存在扩展态,即使 E_F 被钉扎在迁移率边中,在 E_F 处也有与较低朗道子带相联系的载流态,所以三维平台是一种非量子化平台.而且,由于扩展态的存在使霍尔平台不可能很平,电流也不可能全部为非耗散性电流,而是有一定的体电阻.

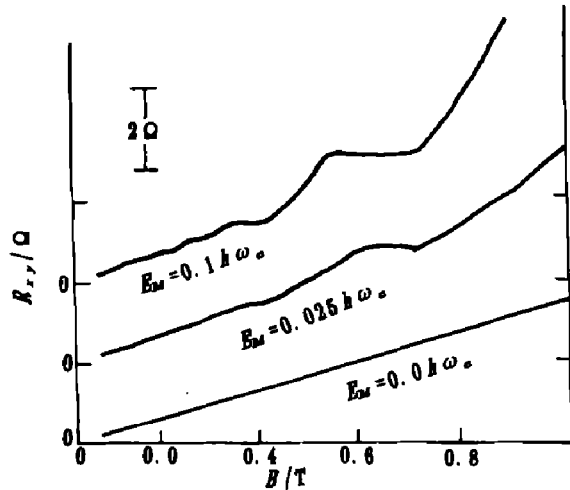


图 6 计算得到的 $T=0$ 时的三维霍尔平台
Fig. 6 Theoretical results of the calculated 3-D Hall plateau at $T=0$

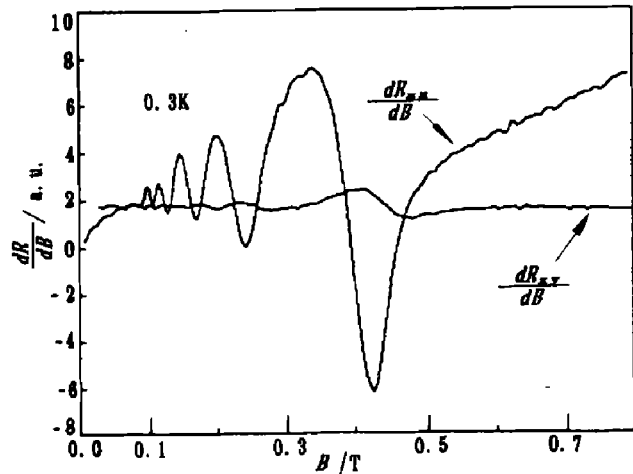


图 7 0.3K 温度时 R_{xy} 、 R_{xx} 对 B 的导数
Fig. 7 The magnetic field induction derivatives of R_{xy} and R_{xx} at 0.3 K

2.2 ΔR_{xy} 与 ΔR_{xx} 的相位差

$\Delta R_{xy} = R_{xy} - B/ne$, $\Delta R_{xx} = R_{xx} - \Delta R_{xx}(B=0)$. 为了便于分析,我们分别取 R_{xy} 、 R_{xx} 对 B 的导数,如图 7. 从图中可见, dR_{xy}/dB 与 dR_{xx}/dB 振荡相位差为 90° . 我们知道在 GaAs/ $Al_xGa_{1-x}As$ 等一系列异质结量子霍尔效应 (QHE) 中,存在这一 90° 相位差的特征^[4]. 即 E_F 位于局域态中时,散射被削弱, R_{xx} 为极小,此时对应整数填充因子,有 $R_{xy} = h/Ne^2$, 求导后出现 90° 相位差,用迁移率边的模型成功地解释了实验现象.将三维与二维类比,我们可以把三维中的 90° 相位差解释为系统中存在准局域态的证据.这也是我们提出准量子霍尔平台的依据之一.

2.3 SdH 振荡峰的反常温度关系

在通常的三维 SdH 振荡理论中, R_{xx} 峰对应 E_F 扫过每一朗道子带底部 DOS 奇异点,这时对电子的散射为极大^[5], 有

$$\Delta\rho_{xx} \approx Tx / \sin h(T_x),$$

其中 $x = 2\pi^2 K_B m^* / (\hbar e B)$. 随温度降低, SdH 峰增高,极小值变小.然而,在我们的实验中尽管 SdH 极小值随温度降低有所减少,而最后一个 SdH 峰值却几乎不变.这说明局

域态随磁场的增大扫过 E_F 时，由于载流态的减少削弱了散射。这是我们提出准量子霍尔平台的依据之二。

3 结语

本工作的前提是基于磁光实验提出 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x \approx 0.2$) 中可能存在浅施主杂质态。我们测量了这种样品在深低温、强磁场下的输运参数，并从中证实了浅施主杂质态的影响。将实验结果与二维 QHE 类比，得出：(1) $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x \approx 0.2$) 中存在浅施主杂质态引入的局域能级；(2) 由于窄禁带的特殊性，这些局域能级在深低温、强磁场下的输运中表现为准量子霍尔平台。

参考文献

- 1 Gebhardt J, et al. *Phys. Rev.*, 1985, **B32**:5449
- 2 Goldman V J, Drew H D, et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **56**(9):968
- 3 Mani R G. *Phys. Rev.*, 1990, **B41**(11):7922
- 4 Prange R E, Girvin S M. *The Quantum Hall Effect*, New York: Springer-Verlag, 1987
- 5 Mani R G, et al. *J. Phys. Chem. Solids*, 1987, **48**(8):687

STUDY OF TRANSPORT BEHAVIOR OF ELECTRONS LOCALIZED IN SHALLOW IMPURITY LEVEL

Zheng Guozhen Wei Yayi Shen Jinxi
Guo Shaoling Shen Jie Tang Dingyuan

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

Abstract Magnetotransport measurement is reported on five bulk n- $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0.17 \sim 0.22$) samples at low temperature from 0.3 K to 4.2 K and high magnetic field up to 7 T. With the decrease of temperature from 4.2 K, Hall resistance gradually deviates from its classical value and shows quantum behavior. The authors' experiments reveal that there is an incipient, nonquantized "Hall plateau", which coincides with the minima of the SdH oscillations near 0.4 T. This phenomenon is quite similar to the quantum Hall effect in two-dimensional systems. The 90° phase difference between Hall oscillation and SdH oscillation was observed, and the anomalous temperature effect of SdH oscillation was also discovered. Using the model of localization, the experimental data can be explained quite well.

Key words $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, shallow donor level, quantum transport.