

用 Origin 软件探究 HgCdTe 单晶的变温霍尔效应*

弓文平 牟家民 杜雅梦 谈国太†

(北京师范大学物理学系,应用光学北京市重点实验室,100875,北京)

摘要 利用 Origin 软件的模板化绘图、列数据计算、App 插件等功能,探究了 HgCdTe 单晶样品的本征激发温区、禁带宽度、副效应影响等特性.结果表明,Origin 软件在处理实验数据方面具有便捷和高效的优势.

关键词 变温霍尔效应; Origin 软件; 半导体; 能隙

中图分类号 O471.5

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2023031

0 引言

大学物理实验除了可以锻炼大学生的动手操作能力外,培养他们处理与分析实验数据也是一项重要的任务,尤其是近代物理实验涉及的实验数据多,数据与物理现象之间往往不直观,只有通过对所测得的数据进行计算、分析或拟合后,才能发现其中隐含的物理规律.本文以半导体的变温霍尔效应实验为例,介绍用 Origin 软件处理实验数据的思路和方法,以提升大学生处理复杂数据的能力.

Origin 是一款公认的标准制图软件,具有强大的数据分析及图形绘制功能,且界面友好、简单易学,与 Office、WPS 等办公软件兼容,被广泛用于各类实验数据的处理与分析^[1-3],是科研人员和工程师常用的高级数据分析及制图工具(软件详细介绍请访问官网,网址是 <https://www.originlab.com/>).

变温霍尔效应实验^[4]是近代物理实验中的重要实验,其通过测量半导体材料的霍尔系数和电导率,可获得半导体材料的导电类型、载流子浓度,以及载流子迁移率等众多参数.而样品的禁带宽度和杂质电离能这 2 个重要参数需要借助软件拟合才能确定.

1 实验过程

如图 1 所示,将厚度 $d=1\text{ mm}$ 的 HgCdTe 半导体单晶样品固定在 CVM-200 霍尔效应测试系统中霍尔探头的冷指上,冷指部分则密封在系统的 SV-12 变温恒温器内.恒温器下部位于系统的永磁铁中,永磁铁可绕中心垂直轴转换南北磁极方向,为样品提供磁感应强度为 422 mT 的恒定磁场.

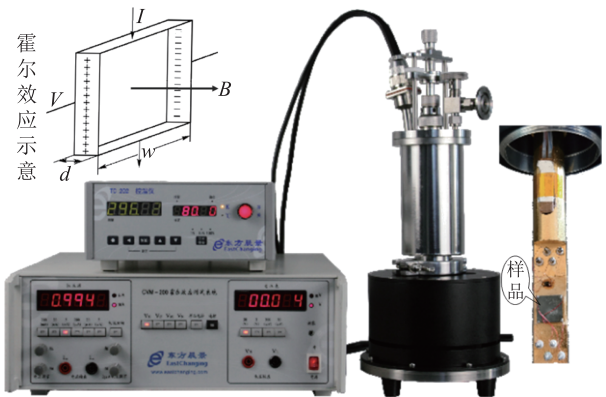


图 1 实验测量装置及样品示意

本实验采用范德堡法测量样品的霍尔电压,样品温度由液氮及 TC202 控温器控制.测量时,在每个被测温度点分别改变电流和磁场的方向,由此测得 4 组样品的电压,分别记为 $V_1 \sim V_4$.

2 数据处理与分析

2.1 霍尔电压与霍尔系数 实验所记录的电压是多种物理效应电压的综合结果,如霍尔电压(V_H)、Ettingshausen 效应电压(V_E)、Nernst 效应电压(V_N)、Righi-Leduc 效应电压(V_{RL}),以及不等位势(V_0)等^[5-7].这些电压中, V_H 与 V_E 均受磁场(H)和电流(I)影响,二者的正负号与 H 、 I 变向后的变化相同; V_N 与 V_{RL} 则只受 H 影响,而 V_0 则只与 I 有关.这些电压之间存在 4 种关系:

$$V_1 = V_H + V_E + V_N + V_{RL} + V_0, \quad (1)$$

$$V_2 = -V_H - V_E + V_N + V_{RL} - V_0, \quad (2)$$

* 基础学科拔尖学生培养计划资助项目(021400-311310042);国家自然科学基金资助项目(12174029)

† 通信作者:谈国太(1968—),男,副教授,博士.研究方向:铁基超导与中子散射研究. E-mail: tangt@bnu.edu.cn

收稿日期:2023-04-25

$$V_3 = V_H + V_E - V_N - V_{RL} - V_0, \quad (3)$$

$$V_4 = -V_H - V_E - V_N - V_{RL} + V_0. \quad (4)$$

说明: 式(1)表示测量时所施加磁场和电流的方向与参考正方向一致, 即 $+H$ 、 $+I$; 式(2)表示所施加的磁场为正向, 电流为反向, 即 $+H$ 、 $-I$; 式(3)所施加的磁场和电流都反向, 即 $-H$ 、 $-I$; 式(4)所施加的电流正向, 磁场则反向, 即 $-H$ 、 $+I$.

因为 $V_H \gg V_E$, 由式(1)~(4)可得

$$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4}.$$

根据霍尔系数(R_H)的定义可知:

$$R_H = \frac{dV_H}{IH},$$

式中 d 为样品的厚度.

将实验所记录的温度和电压数据输入 Origin 软件的表单, 利用软件的列赋值计算功能, 就可以获得各个测量温度点的 R_H 值, 如表 1 所示(部分呈现).

表 1 样品的实验数据及软件的列赋值计算(部分呈现)

A	B	C	D	E	F	I
温度/K	V_1	V_2	V_3	V_4	V_H	$R_H/(m^3 \cdot C^{-1})$
			mV			
83.17	13.44	-13.61	14.92	-15.04	14.25	3.38
86.66	13.50	-13.69	15.10	-15.27	14.39	3.41
90.65	13.69	-13.84	15.33	-15.39	14.56	3.45
95.30	13.81	-13.98	15.78	-15.95	14.88	3.53
99.93	13.97	-14.10	16.01	-16.08	15.04	3.56
104.8	14.02	-14.16	16.36	-16.49	15.26	3.62
110.03	14.12	-14.23	16.70	-16.72	15.44	3.66
113.11	14.02	-14.15	16.88	-17.04	15.52	3.68
115.01	14.10	-14.20	16.92	-17.04	15.57	3.69
120.03	14.10	-14.12	17.05	-17.14	15.60	3.70

对表 1 中数据需说明的是, 考虑软件对某列(A~I 中的某个, 以 x 代替)赋值是用符号 $Col(x)$ 表示, 因此第 F 列的 V_H 及第 I 列的 R_H 的赋值表达式分别为

$$Col(x_F) = 0.25 \times (Col(x_B) - Col(x_C) + Col(x_D) - Col(x_E)),$$

$$Col(x_I) = 1000 \times 1.0 \times [(Col(x_F)) / (422 \times 10)].$$

再用软件提供的图形模板, 就可以一键绘制出 R_H 随温度变化的曲线(图 2).

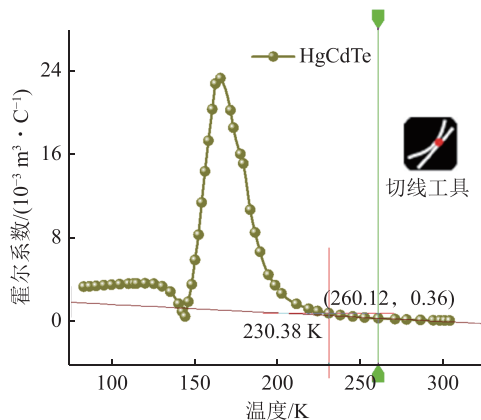


图 2 样品的霍尔电压随温度的变化曲线

需要说明的是, 在绘图前先为温度和 R_H 这 2 个数据列分别赋予长文件名及其单位, 以供软件绘图时自

动获取 2 轴的标注信息.

利用软件求斜率的切线工具应用插件, 可知样品的本征激发温区为 230~300 K, 在该温区范围内有 $p = n$, n 为电子浓度, p 为空穴浓度.

2.2 禁带宽度 根据半导体理论^[8], 本征激发产生的本征载流子浓度

$$n_i = n = p = \sqrt{N_V N_C} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right),$$

式中: N_C 和 N_V 分别为导带和价带有限能级密度; E_g 为禁带宽度, 也称能隙; k_B 为玻耳兹曼常数. 故此, 决定本征激发的载流子浓度的是半导体材料本身的特征和温度^[9-10].

为了获得样品的 E_g , 可利用 Origin 软件的列运算功能, 增加 2 个新列: 一列将温度数据变为倒数, 即 T^{-1} ; 另一列对 V_H 的绝对值取对数. 这样能实现实验数据的“化曲为直”, 即在满足 $\ln|V_H| = \ln C + KT^{-1}$, 式中 C 与 N_C 、 N_V 、 I 、 H 及 d 等有关, $K = \frac{E_g}{2k_B}$, 因此, 通过 Origin 的区间拟合功能, 对 236~300 K 温区范围的 $(\ln|V_H|, T^{-1})$ 做直线拟合, 从而获得 E_g , 如图 3 所示.

根据图 3 所显示的拟合斜率值, 可计算出样品的禁带宽度为

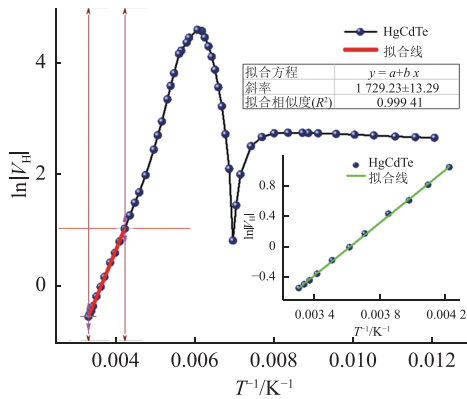


图 3 样品的 $\ln|V_H| \cdot T^{-1}$ 曲线及其区间拟合(插图为区间数据提取后拟合)

$$E_g = 1729.2 \times 2k_B \approx 0.30 \text{ eV}.$$

也可以将区间数据提取出来独立作图,然后再进行直线拟合,如图 3 的插图所示,其拟合结果与区间拟合的情况一致。

2.3 副效应分析 借助表 1 的实验数据,利用 Origin 软件还可以进一步分析 Nernst、Righi-Leduc 等副效应的影响。

在表 1 中再新增列,由 Origin 软件的列赋值功能,可以得出 Nernst 效应和 Righi-Leduc 效应所导致的附加电压值,即 $V_E + V_{RL} = (V_1 + V_2 - V_3 - V_4)/4$ 。作 $(V_E + V_{RL}) - T$ 曲线,如图 4 所示。

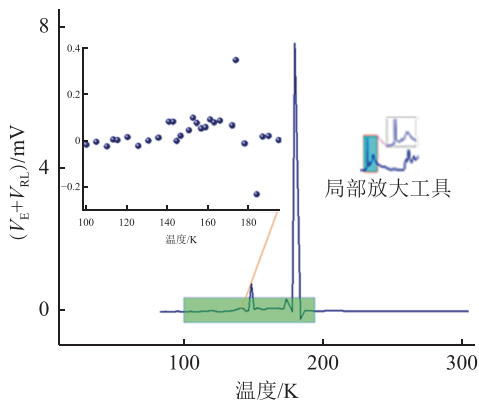


图 4 样品的副效应影响(插图为 150 K 附近数据的局部放大)

由图 4 可见,强峰“淹没”了副效应的影响细节,为此可利用 Origin 的局部放大应用插件(图 4 中的局部放大图标)对强峰附近的温区进行放大,且以数据

点显示,如图 4 中的插图所示。相对其他局部放大方法如调节横轴坐标范围等,应用插件放大的优势是选取范围与数据显示图同步生成,一步到位,无需其他操作。通过局部放大图,可以清楚地看出这 2 种副效应对样品中杂质载流子和本征载流子的影响趋势。根据局部图的数据点涨落范围,还可进一步发现 Nernst 效应和 Righi-Leduc 效应对空穴的影响较对电子的影响大些,会导致实际的 V_H 偏小。

3 结束语

Origin 软件是一款专业的数据处理和绘图软件,利用软件的列数值计算功能,将变温霍尔效应的实验数据化曲为直,在本征激发区探究样品的禁带能隙;此外,用软件的局部放大插件,分析了实验中的副效应对样品载流子的影响。展示了 Origin 软件在处理物理实验时的高效和便捷,有利于培养使用者的物理思维和科学素养。

4 参考文献

- [1] 乐松. Origin 软件在近代物理实验数据处理中的应用[J]. 大学物理实验, 2011, 24(6): 78
- [2] 刘慧, 边健, 丰远, 等. Origin 软件在近代物理实验教学中的应用探讨[J]. 科技创新导报, 2017, 14(27): 216
- [3] 王茂香, 李相银. 利用 Origin 软件处理霍尔效应实验数据[J]. 实验科学与技术, 2011, 9(5): 43
- [4] 熊俊. 近代物理实验[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2007
- [5] 黄响麟, 何琛娟, 廖红波, 等. 变温霍尔效应中副效应的研究[J]. 大学物理, 2011, 30(3): 48
- [6] 张晓旭, 王彤, 吴天安. 霍尔效应及其副效应的深入研究[J]. 实验科学与技术, 2019, 17(5): 99
- [7] 刘昶丁, 柳纪虎. 霍尔效应中的副效应及其消除方法[J]. 物理实验, 1987, 7(1): 1
- [8] 叶良修. 半导体物理学(上册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007
- [9] 郑梓涵, 黄之豪, 符斯列. 利用变温霍尔效应计算 N 型 Ge 的杂质电离能和禁带宽度[J]. 物理实验, 2022, 42(5): 10
- [10] 樊洁平, 努耳·艾合买提江, 原如领, 等. 用变温霍尔效应估测碲化铜的禁带宽度[J]. 大学物理, 2011, 30(11): 32

Studying the variable temperature Hall effect of HgCdTe single crystal with Origin software

GONG Wenping MU Jiamin DU Yameng TAN Guotai

(Department of Physics, Beijing Normal University, Applied Optics Beijing Area Major Laboratory, 100875, Beijing, China)

Abstract In this paper, using template drawing, column data calculation, App plug-in and other functions of the Origin software, the characteristics of HgCdTe single crystal sample such as intrinsic excitation temperature range, band gap width, Nernst effect and Righi-Leduc are analyzed. The results show that the Origin software has the advantages of convenience and efficiency in dealing with data.

Keywords variable temperature Hall effect; Origin software; semiconductor; energy gap

【责任编辑:陆有忠】