

低温物性及测量

——一个实验技术人员的
理解和经验总结



苏少奎 著



科学出版社

低温物性及测量

——一个实验技术人员的理解和经验总结

苏少奎 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书分三部分：低温条件下的电输运测量、比热测量及分析和磁性测量及分析。在电输运测量中，不仅介绍了低温电输运测量的基础知识、测量中的注意事项，还包括电阻率、各向异性电阻率的测量、霍尔系数的测量、门电压的使用等内容。在比热测量及分析中，介绍了声子、电子、磁子等对比热的贡献及拟合公式的适用范围，并列举出了各个相变的比热特征曲线。同时，也介绍了两种常用的测量方法，可以帮助读者了解在测量中如何才能得到可靠的数据。在磁性测量及分析中，介绍了基本物理图像、测量方法等，也列举了各个性质磁性特征曲线，以及一些物性参数的测量方法。

本书适合凝聚态物理领域从事实验工作的研究生与科研人员学习使用，也适合相关领域科研工作者作为常备的实验参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

低温物性及测量：一个实验技术人员的理解和经验总结/苏少奎著.
—北京：科学出版社，2019.1
ISBN 978-7-03-059908-7

I. ①低… II. ①苏… III. ①电磁测量—测量方法 IV. ①O441.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 282755 号

责任编辑：钱 俊 陈艳峰/ 责任校对：杨 然
责任印制：张 伟 / 封面设计：谜底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 1 月第 一 版 开本：720×1000 1/16

2019 年 1 月第一次印刷 印张：15 3/4

字数：200 000

定价：59.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前 言

经过近二十年的飞速发展，我国用于低温物性分析的仪器已经相当普遍了；同时，新材料每天都在大批量的合成。所以，现在利用低温物性测量设备探测材料的各种性质，已经成为各个研究单位的必备条件了。

然而，经过专业训练的低温物性测量的技术人员，却远远不够。而且，现今的绝大部分课程和书籍，主要介绍测量方法和原理，很少有涉及具体测量过程的。大部分刚刚接触低温测量设备的人，都是在这个基础上开始的。然而，理论与实际的出入非常大。例如：人们常说的霍尔系数测量，大多数人认为只要在垂直电场方向上测量电压就行了。但实际测量中，由于两个电压电极不可能完全处在同一等势线上，所以，测量的电压信号往往还包含正常电阻的电压。而且，正常电阻的电压值一般远大于霍尔信号。如何扣除掉正常电阻的电压而检测出霍尔信号，还是要经过一系列的实验和数据处理才可以的。还有，大多数人把测量设备提供的温度，就当作样品温度。而实际上，不同的变温速度和测量发热功率，会导致样品温度和显示温度差距很大。所以，一本关于低温物性测量分析的教材或资料，应该是每个测量人员都有的需求。

本人从1997年到现在，一直从事低温物性测量的工作。每天和

不同的学生打交道。发现他们的很多问题具有共性，例如：有的实验条件常常被忽视；有些地方容易犯错；实验现象不明白怎么回事，更不知道下一步该怎么做；有些物理参数不会测量等。从 2008 年本人就开始收集和整理实验测量过程中研究生容易犯错的地方，实验现象的物理图像理解，相关物理参数的测量方法，各种性质的特征曲线等。现将这些内容收集成册，以方便更多的刚刚进入低温物性测量分析的研究者参考。

本书的主要内容有三部分：低温条件下的电输运测量、比热测量及分析、磁性测量及分析。在电输运测量中，主要包括电阻率、各向异性电阻率的测量、霍尔系数的测量、门电压的使用等。从制作电极到测量方法，以及测量中的注意事项等一一包括了。在比热测量及分析中，介绍了声子、电子、磁子等对比热的贡献及拟合公式的适用范围，并列举出了各个相变的比热特征曲线，将会使读者立即判断出他测量的数据属于什么相变。同时，还介绍了两种常用的测量方法，可以帮助读者知晓在测量中该注意什么才能得到可靠的数据。在磁性测量及分析中，不仅介绍了测量方法，也同样列举了各个性质磁性特征曲线，还列举了一些物性参数的测量方法。本书还具有如下特点。

(1) 书中引用了许多公式，省略了部分推导过程，但是详细说明了公式的适用条件。这样做的目的是方便读者的使用。具体的推导过程，可以参阅相关文献。

(2) 本书的全部内容是本入熟悉的，且亲自做过实验。只有这样，才能有真正的实验意义。而本书的目的，就是“将我自己的经验告诉给读者”。

(3) 书中列举的数据图，一般选取本人自己使用设备上测量的数据。虽然不是特别完美，但都是真实的数据。另外，由于测量的都是新材料，测量人往往要求保密。所以，有些数据图中的材料无

法标注出来。

(4) 本书中的测量方法、数据处理方法和注意事项的总结，是本人经过对以往的质疑，根据实验反复思考后，得到的结论。虽然不敢确保完全正确、内容全面，但必有一定道理，供读者参考。

(5) 书中的很多观点和理解，源于本人自学并与许多老师讨论的结果。对于书中部分观点，可能还存在不同看法、见解。所以，对于这部分内容，书中做了标注，仅供读者参考。

本书涉及内容较广，且本人学识浅陋，难免有不足之处。恳请读者予以批评指正。如果能将发现的问题反馈给本人（邮箱：sski@iphy.ac.cn），本人将万分感激！

苏少奎

2017 年 10 月

致 谢

2000年1月1日，我们一行人从中国科学院低温实验技术中心加入到中国科学院物理研究所工作。我个人加入到王云平的课题组一起做关于“磁量子隧穿”方面的研究。

那时候，我只是一个做极低温实验的技术人员，连最基本的“声子”的概念也没理解！王云平老师深厚的物理基础和讨论问题时清晰的物理图像，对我的帮助非常大，是我物理图像认知形成的主要促成者。从那时至今，我有什么物理问题，都是首先和他讨论。所以，首先感谢的人，便是王云平研究员。

其次，我请教和与之讨论过的老师还有：张殿琳院士、陈兆甲研究员、吕力研究员、王楠林教授、雒建林研究员、景秀年主任工程师、白海洋研究员，在此致以衷心的感谢。

再次，还有许多帮助过我的朋友，如杨昌黎研究员、单磊研究员、杨义峰研究员、程金光研究员、孙培杰研究员、梁文杰研究员、金魁研究员、张宏伟研究员、李岗副研究员、陆俊副研究员等。另外，米振宇博士对全书进行了仔细阅读并修改。在此致以衷心的感谢。

另外，我还要特别感谢我的“虎友”——汪卫华院士。本人天性是“又笨、又懒、又贪玩”，所以经常浪费时间和情绪沮丧。而汪卫华经常用一些小事情和言语刺激我，气得我只好去努力。而他

自称这就是“虎友”的价值。可我在沮丧时，他反倒鼓励我。细想起来，若没有他的因素，恐怕还要晚几年才能完成这部书。

最后，要感谢的是我的妻子——杜立力。从结婚以来，她把所有家务都包了，只是催促我做好工作。想想自己“又馋、又懒、又没钱”，如何配得上如此的爱人？于是暗下决心：把工作做好，把书写好！也因此促进了本书的完成。

在出版过程中，中国科学院物理所的领导及科技处、财务处给予了大力支持，在此深表感谢！

最后，衷心感谢所有帮助过我的人！

2017年11月7日 立冬

目 录

前言

致谢

第一章 低温电输运的测量	1
第一节 低温电输运测量的必备基础知识	1
一、热电势	1
二、接触电势	2
三、电极的制作方法	5
1. 导电银胶法	5
2. 压钢法	6
3. 镀膜法	6
4. 点焊法	6
四、接触电阻	7
五、“地”的问题	8
1. “地”的概念和种类	8
2. “地”的漏电流	9
3. “地”的耦合信号	11
六、人体静电冲击的避免	13
七、开关电势差导致的电冲击	13
八、锁相放大器	14

九、低温电输运测量注意事项	19
1. 样品温度和显示温度不一样的情况	19
2. 热膨胀系数不一致的情况	22
3. 接触电阻导致的样品温度不均匀	23
4. 关于信号噪声的分析和处理	24
5. 关于假信号的分析和处理	25
第二节 电阻的测量	27
一、电阻的定义	27
二、电阻的测量方法及注意事项	29
1. 标准四线法	29
2. 范德堡方法	32
3. J. D. Wasscher 法	35
4. H. C. Montgomery 法	38
附 1. 方形样品测量实例	41
附 2. 电极对测量精度的影响	42
三、恒压法测量大阻值电阻	43
第三节 霍尔信号的测量	44
一、霍尔效应及注意事项	44
1. 成立的条件	46
2. 霍尔因子修正	46
3. 两种载流子的情况	47
4. 载流子偏转方向	48
二、霍尔电压测量的干扰项	48
1. 正常电阻	49
2. 不等位效应	50
3. 温差引起的相关效应	51
三、霍尔信号测量方法及注意事项	52

1. 简易快速变温霍尔测量法	52
2. 定温霍尔测量法	54
3. 高精度霍尔测量法（五线法测量）	54
附：定温霍尔测量温度点的选择	56
第四节 I - V 特性的测量	57
一、直流法测量	58
二、交流法测量	59
第五节 门电压的使用	60
一、门电压的作用	61
二、门电压的使用	62
三、门电压使用的注意事项	64
第六节 通过输运测量得到的几个常用物理学参数	65
一、电阻率的计算	65
二、迁移率	66
1. 定义及含义	66
2. 迁移率的计算	68
三、电阻法测量超导转变温度	69
1. 10%法	69
2. 转变中间法	70
3. 二倍测量噪声法	70
4. 用电阻法定义超导 T_C 注意事项	71
第二章 比热的测量及分析	73
第一节 比热的物理意义	73
一、什么是比热	73
二、比热的微观理解	75
1. 声子系统的比热	76

2. 电子系统的比热	80
3. 磁子系统的比热	82
4. 总比热	83
第二节 比热的数据分析及各种性质的特征	84
一、声子比热	84
二、电子比热	86
三、磁子比热	87
四、声子比热的拟合	88
第三节 反常比热行为分析及各种性质的特征	91
一、相变比热	91
1. 相变的含义	91
2. 超导相变的比热特征曲线	94
3. 磁性相变的比热特征曲线	97
4. 结构相变的比热特征曲线	99
二、肖特基比热	99
第四节 比热的测量	102
一、绝热法	102
1. 测量原理	102
2. 测量装置	102
3. 具体分析及注意事项	104
二、热弛豫法	106
1. 测量原理	106
2. 测量装置	108
3. 测量过程	109
4. “时间常数”和“样品耦合百分比”	110
5. 注意事项	114
6. 个人经验总结	118

第三章 磁性的测量及分析	119
第一节 原子的磁矩	119
一、什么是磁矩	119
二、原子磁矩	120
三、固有磁矩和有效磁矩	123
第二节 磁性的宏观表现	123
一、当原子的固有磁矩不为零时	123
1. 顺磁性	124
2. 超顺磁态	125
3. 自旋玻璃态	129
4. 铁磁性	132
5. 反铁磁态	134
6. 亚铁磁	134
二、当原子的固有磁矩为零时	138
1. 原子的轨道抗磁	138
2. 范·夫莱克顺磁磁化率	140
3. 自由电子的泡利顺磁	140
4. 自由电子的朗道抗磁	141
5. 半导体内部的载流子的磁性	141
6. 巡游电子	142
三、特殊的磁性现象——超导抗磁性	142
1. 第一类超导体	143
2. 第二类超导体	145
第三节 磁性测量常用的实验方法	149
一、测量前必备知识	149
1. 几个物理量	149

2. 磁学单位的认识	151
3. 退磁因子	152
二、各种测量手段	153
1. 零场冷和场冷的降温方式	153
2. 磁化强度随温度的变化曲线	154
3. 磁化曲线	155
4. 磁滞回线	156
5. 换向磁化曲线	156
6. 磁化强度随时间的变化曲线	156
7. 交流磁化率	157
第四节 一些参数的获得方法	160
一、磁性材料常用参数	160
二、有效磁矩	163
1. 通过拟合高温磁化率得到有效磁矩	163
2. 通过测量饱和磁化强度得到有效磁矩	166
三、居里温度	167
1. 顺磁居里温度	167
2. 铁磁居里温度	167
四、反铁磁奈尔温度	168
五、阻塞温度	170
六、弛豫时间	171
七、第一类超导体	173
1. T_c 的测量	174
2. H_c 的测量	174
3. 超导含量的测量	176
八、第二类超导体	176

1. T_c 的测量	177
2. H_{c1} 的测量	179
3. H_{c2} 的测量	183
4. 超导体体积的测量	185
附: 迈斯纳分数	189
九、磁熵及其测量方法	189
1. 比热测量法	190
2. 磁化率方法	191
第五节 磁性测量方法及原理简介	192
一、提拉法	192
1. 测量原理	192
2. 测量结构	193
3. 注意事项	194
二、SQUID VSM	195
1. SQUID	196
2. VSM	200
3. SQUID VSM	202
三、交流磁化率	206
四、霍尔片法	209
第六节 几个可供参考的实验案例	211
一、剩余磁场导致的现象	212
1. 超导和铁磁的混淆	212
2. 奇异曲线的产生	213
3. 磁滞回线的变形	215
附: 剩余磁场	215
二、漏空气导致的奇异数据	218
三、样品翻转导致的错误	220

四、铝箔包裹的样品引起的错误	221
五、薄膜样品测量的问题	222
1. 磁场平行膜面	223
2. 磁场垂直膜面	224
六、样品定中心不正确带来的问题	224
七、扫场测量带来的问题	228
参考文献	230
后记	233

第一章 低温电运输的测量

第一节 低温电运输测量的必备基础知识

由于我们人类无法像看水流那样，看到电流和电场及其变化，所以只好凭已有的知识来判断：电流和电场是否按我们的预期变化。在实验过程中，有很多因素会影响我们施加的电场，从而使样品上的电流分布和预期的相差甚远！所以，对于这些影响实验的情况，我们必须非常清楚！否则，得到的数据要么没有规律可循；要么测量结果就是错误的！

另外，在电运输测量中，微弱信号测量往往需要锁相放大器等仪器设备，其原理和使用注意事项等是微弱信号测量的基础，也是必须要清楚明白的！所以，该内容也放置在本节。

本节将主要介绍各种常见影响测量的因素和一般测量需要的知识。

一、热电势

由于电子的浓度、运动速度和平均自由程等参数，以及电子和声子相互作用的强弱等都会随温度变化而变化；如果材料两端有温