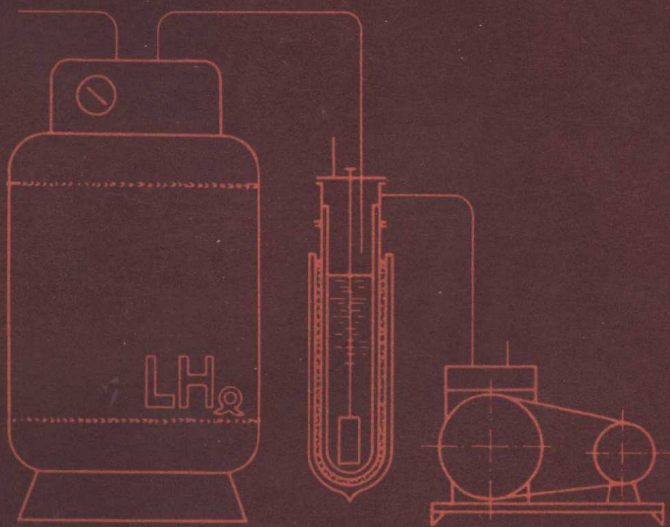


实验物理学丛书

低温物理实验的原理与方法

阎守胜 陆果 编著



科学出版社

实验物理学丛书

低温物理实验的原理与方法

阎守胜 陆 果 编 著

科 学 出 版 社

1 9 8 5

内 容 简 介

本书全面地论述了低温物理实验技术及其有关的原理,它是一本比较实用,同时又反映了国内外最新进展的书。全书共分十四章。第一、二两章以温度测量为中心,论述温标、温度基准和实用温度计。第三、四、五章论述有关低温流体、固体材料低温物理性质的知识及传热的基本原理。第六至九章以低温恒温器的设计和制作为中心,介绍实验技术的主要内容。第十章以后为热容的测量、氦的特性、1 K以下实验技术、超导电性、超导磁体和超导量子干涉器件等几个较为独立的专题。

本书可供从事低温物理实验、低温技术工作的科技人员,高等院校有关专业的教师、研究生及高年级学生参考。

实验物理学丛书 低温物理实验的原理与方法

阎守胜 陆 果 编著

责任编辑 王昌泰

科学出版社 出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1985年4月第一版 开本: 850×1168 1/32
1985年4月第一次印刷 印张: 18 1/8
印数: 精 1—2,250 插页: 精3 平2
平 1—2,700 字数: 475,000

统一书号: 13031·2824

本社书号: 3839·13—3

定价: 布面精装 6.10元
平 装 5.10元

科技新书目: 88—精25 平26

前 言

近年来,国内低温物理、超导电技术及其它低温技术的研究和应用发展很快。我们将这些年在北京大学物理系教学的讲义加以扩充,编写成这本书,希望能对从事这方面工作的同志有所帮助。

1962年翻译出版的怀特著《低温物理实验技术》(科学出版社)一书,对国内低温实验技术的发展和提高起过很好的作用。这方面的书籍还有A. C. Rose-Innes的“Techniques in Low Temperature Physics”(1979)和田沼静一主编的《低温》(1974)等。前者比较实用,后者涉及面较广。在编写过程中,我们参考了这些书籍,并努力使本书具有自己的特色。

我们认为,要掌握一门实验技术,重要的是要理解产生这些实验技术特点的原因,这样才能灵活应用并有所创造。在本书中,除了在某些章节中集中叙述了一些实验技术所涉及的原理外,在其它章节的叙述中也力求在介绍方法的同时阐明原理。我们还力求使本书比较实用,对实验工作中可能遇到的一些问题,作了尽可能详尽的说明。

为了适应我国实际发展的需要,本书尽量反映近年来国内外的新发展和成功的经验。1 K以下的实验技术是当前很活跃和发展很快的领域,本书因篇幅限制,只作了较简单的介绍,有兴趣的读者可参阅第十二章中所列专著及其他文献。

本书第一、二两章以低温物理实验工作最基本的测量——温度的测量为中心,介绍温标、温度基准和温度的测量。第三、四、五章介绍低温物理实验技术的基础知识——低温流体和固体材料的低温物理性质以及传热的基本原理。第六、七、八、九章以低温恒温器的设计、制作和使用为中心,介绍低温物理实验技术的

主要内容。第十章以后各章，分别介绍几个专题，在全书最后，以各章内容为序，把常用的图表编排成目录，以便查阅。除了第四章的数据表集中附在章末外，其它图表均在各章节中有关内容附近。

本书各章内容有一定的独立性，在涉及其它章节内容时我们都尽可能注明，使读者在参阅时较为方便。本书也可作为大学的教学参考书，初学时可以先选学前九章中的部分内容。

作者在1961年曾听过洪朝生教授在中国科学技术大学讲授的低温实验技术课，受到了很多启发。在本书编写过程中洪朝生教授又仔细审阅了绝大部分初稿和修改稿，提出了许多宝贵的指导性的意见，改正了不少错误或不妥之处。我们还感谢在美国 Cornell 大学物理系低温组和荷兰 Kamerlingh Onnes 实验室的朋友们，他们丰富的实践经验，充实了本书的内容。北京大学物理系低温物理教研室许多同志对有关章节提出了宝贵的意见。校内外有很多同志为我们提供了资料、计算了数据表，我们谨在此致以深切的谢意。

但本书内容涉及面较广，加之我们水平有限，一定会有不少错误和不妥之处，诚恳地希望读者给以批评指正。

1981年12月于北京

序 言

实验是物理学发展的基础，又是检验物理理论的唯一标准。回顾物理学发展的历史，正是实验技术的发展，推动着整个物理学向前发展。因此，实验是物理学和一切科学技术发展的基础。

为了适应我国科技事业发展的需要，强调实验物理学的重要性，并总结我国物理学工作者在实验工作中的创新和实践经验，我们特编辑出版《实验物理学丛书》。

本丛书的编辑方针是：1. 密切联系当前科研、教学、生产的实际需要，介绍各种物理实验的基本原理、技术、设备及其在各方面的应用。2. 反映国内外最新的实验水平和发展动向，并注意实用性。3. 以科技工作者和高等院校师生为对象，坚持理论联系实际，贯彻百家争鸣的方针，力求使丛书具有我国的特色和风格。

我国科技事业的发展已进入一个新的时期，实现科学技术现代化是我国广大科技工作者肩负的光荣而艰巨的任务。我们诚恳地希望广大物理学工作者发挥为社会主义事业著述的积极性，不断总结实践经验，总结研究成果，积极支持丛书的出版工作，共同为出好该丛书而努力。

《实验物理学丛书》编委会

《实验物理学丛书》编委会

主 编 钱临照

副主编 王淦昌 王大珩 柯 俊 洪朝生 管惟炎

编 委 王之江 王业宁 王守觉 王华馥 王祝翔 许顺生

华中一 苟清泉 何寿安 吴自勤 张自三 汤定元

杨 楨 杨顺华 项志遴 姜承烈 徐其昌 徐叙瑗

章 综 郭可信 龚祖同 黄兰友 梅镇岳 程晓伍

薛鸣球 魏荣爵 王昌泰

目 录

第一章 温标和温度基准	1
§ 1.1 温度的概念和热力学温标	1
1.1.1 温度和温标	1
1.1.2 热力学温标	2
1.1.3 理想气体温标	4
§ 1.2 温度基准	5
1.2.1 气体温度计	5
1.2.2 噪声温度计	13
1.2.3 声学温度计	16
1.2.4 磁温度计	18
§ 1.3 国际实用温标	21
1.3.1 国际实用温标的由来和发展	21
1.3.2 1968 年国际实用温标 (ITS-68)	23
1.3.3 1976 年 0.5—30 K 暂行温标 (EPT-76)	29
参考文献	31
第二章 温度的测量	33
§ 2.1 利用气体性质的温度计	34
2.1.1 实用气体温度计	34
2.1.2 蒸气压温度计	38
§ 2.2 电阻温度计	47
2.2.1 金属电阻温度计	48
2.2.2 半导体电阻温度计	57
§ 2.3 温差电偶温度计	68
2.3.1 温差电偶测温原理及连接方法	68
2.3.2 低温温差电偶温度计的类型和分度	72
2.3.3 温差电偶的制作和参考点的选择	83

§ 2.4 其它温度计	84
2.4.1 p n 结温度计	84
2.4.2 电容温度计	86
§ 2.5 温度计在磁场中的性能	87
2.5.1 电阻温度计	87
2.5.2 温差电偶温度计	89
§ 2.6 低电势与电阻的精密测量方法	92
2.6.1 直流法	92
2.6.2 交流法	99
§ 2.7 低温温度计的选择、分度和安装	101
2.7.1 低温温度计的选择	101
2.7.2 实用低温温度计的分度	102
2.7.3 低温温度计的安装和使用	104
参考文献	106
第三章 低温流体	112
§ 3.1 概述	112
3.1.1 相图	112
3.1.2 一些有关的物理性质	113
§ 3.2 氮 (N_2)	115
3.2.1 物理性质数据	115
3.2.2 液氮的应用	115
§ 3.3 氧 (O_2)	119
§ 3.4 氖 (Ne)	122
§ 3.5 氢 (H_2)	123
3.5.1 正氢和仲氢、正常氢和平衡氢	124
3.5.2 物理性质数据	128
3.5.3 液氢的应用与安全	128
§ 3.6 氦 4 (4He)	133
3.6.1 零点能效应	134
3.6.2 λ 相变和相图	136
3.6.3 超临界氦和两相氦	139
3.6.4 物理性质数据	146

§ 3.7 氦 3 (^3He)	147
3.7.1 零点能效应	147
3.7.2 物理性质数据	149
参考文献	156
第四章 材料的低温物理性质	158
§ 4.1 热容	158
4.1.1 定义	158
4.1.2 晶格热容和电子热容	159
4.1.3 材料的热容	160
4.1.4 热容的温度特性与低温物理实验	162
§ 4.2 热膨胀	163
§ 4.3 材料的电与磁特性	166
4.3.1 纯金属的电阻	166
4.3.2 合金的电阻	169
4.3.3 磁致电阻	169
4.3.4 绝缘材料的电性能	170
4.3.5 结构材料的低温磁性	170
§ 4.4 热导	170
4.4.1 非金属材料的热导	170
4.4.2 金属材料的热导	173
4.4.3 合金材料的热导	175
§ 4.5 力学性质	176
4.5.1 金属材料的力学性质	176
4.5.2 非金属材料力学性质	179
§ 4.6 常用材料的特性	180
4.6.1 金属材料	180
4.6.2 非金属材料	183
4.6.3 粘接材料	185
参考文献	201
第五章 传热	204
§ 5.1 辐射传热	204
5.1.1 物体的热辐射	204

5.1.2	两物体之间的辐射传热	208
5.1.3	减小辐射传热的方法	210
§ 5.2	气体传热	211
5.2.1	分子平均自由程和气体传热	211
5.2.2	适应系数	213
§ 5.3	固体传热	214
5.3.1	基本关系式	214
5.3.2	热阻的串联与并联	215
5.3.3	非稳定情况——暂态传热	217
§ 5.4	界面传热和卡皮查 (Капи́ча) 热阻	219
5.4.1	固体-固体界面传热	220
5.4.2	固体-液体界面传热	221
5.4.3	卡皮查热阻	225
§ 5.5	传热计算举例	227
5.5.1	从杜瓦瓶口向低温部分的辐射传热	227
5.5.2	沿杜瓦容器颈管的漏热	230
参考文献		232
第六章 低温液体的使用		233
§ 6.1	氮液化器的配置和使用	233
§ 6.2	杜瓦容器	235
6.2.1	实验用玻璃杜瓦瓶	235
6.2.2	实验用金属杜瓦瓶	240
6.2.3	贮存和运输用的杜瓦容器	243
§ 6.3	输液杜瓦管	246
6.3.1	输液杜瓦管的结构和制作	246
6.3.2	输液杜瓦管的使用	249
§ 6.4	实验用液氮杜瓦瓶的灌注	250
§ 6.5	液面的测量	255
6.5.1	静液压法	255
6.5.2	热声振荡法	257
6.5.3	电容法	258
6.5.4	电阻法	261

6.5.5 其它方法	264
§ 6.6 安全知识	264
参考文献	265
第七章 低温恒温器 (I)——主要类型及温度控制	267
§ 7.1 减压降温恒温器	268
7.1.1 减压降温	268
7.1.2 减压液池	269
7.1.3 减压降温过程中低温液体的消耗	272
7.1.4 蒸气压的控制	273
§ 7.2 高真空绝热恒温器	276
7.2.1 高真空绝热恒温器	276
7.2.2 热开关	279
§ 7.3 电加热控温	284
7.3.1 感温元件的选择	284
7.3.2 控温的方法	285
7.3.3 控温电路举例	287
§ 7.4 连续流恒温器	293
7.4.1 实例	293
7.4.2 优缺点	295
7.4.3 连续流控温	297
7.4.4 其它类型的连续流恒温器	300
§ 7.5 其它恒温器	302
7.5.1 漏热恒温器	302
7.5.2 插入贮槽的恒温器	305
7.5.3 制冷机冷却的恒温器	307
7.5.4 活性炭退吸附恒温器	308
参考文献	308
第八章 低温恒温器 (I)——实例及一些技术问题	311
§ 8.1 实用恒温器及测量举例	311
8.1.1 校准温度计用恒温器	311
8.1.2 热导测量用恒温器	313
8.1.3 光学和 X 射线研究用恒温器、窗口	316

8.1.4	磁测量用恒温器	317
8.1.5	核磁共振 (NMR) 测量	320
8.1.6	微波测量用恒温器	323
8.1.7	扭摆	324
8.1.8	低温拉伸用恒温器	327
§ 8.2	真空室, 引线热沉及其它	328
8.2.1	真空室	328
8.2.2	同轴线	330
8.2.3	电引线的热沉	331
8.2.4	超导线的连接	332
8.2.5	实验杜瓦顶部辐射的减小	333
8.2.6	实验杜瓦中温度的分布	336
8.2.7	热声振荡	338
§ 8.3	恒温器设计小结	340
参考文献		343
第九章 真空技术		345
§ 9.1	真空系统	346
9.1.1	真空系统的构成和使用	346
9.1.2	极限真空度	351
9.1.3	抽气速率	352
§ 9.2	检漏技术	356
§ 9.3	高真空绝热恒温器的抽真空	361
9.3.1	真空系统的抽速	361
9.3.2	系统的真空度	361
9.3.3	低温泄漏现象	362
§ 9.4	杜瓦容器的抽真空	363
9.4.1	吸附剂	363
9.4.2	除气	364
9.4.3	封口	365
§ 9.5	减压降温的抽空设备和管路	368
§ 9.6	冷凝泵和吸附泵	370
9.6.1	冷凝泵	370

9.6.2 吸附泵	373
§ 9.7 焊接	374
9.7.1 锡焊和伍德合金焊	375
9.7.2 银焊	280
9.7.3 氩弧焊	381
§ 9.8 真空密封	383
9.8.1 用环氧树脂的密封	383
9.8.2 密封圈的使用	384
9.8.3 锥形密封	387
9.8.4 管子的螺纹连接及其它	388
9.8.5 室温下电引线的密封	388
参考文献	390
第十章 热容的测量	391
§ 10.1 绝热量热法	392
10.1.1 热脉冲方法	392
10.1.2 连续量热法	396
10.1.3 差分量热法	397
§ 10.2 非绝热量热法	399
10.2.1 热弛豫方法	399
10.2.2 流量量热法	405
10.2.3 测量小样品热容的各种方法的比较	410
§ 10.3 热容测量中的漏热计算	411
参考文献	414
第十一章 氦的特性	416
§ 11.1 He II 的特性	416
11.1.1 超流动性	416
11.1.2 热-机械效应	421
11.1.3 热传导	422
11.1.4 波的传播	423
11.1.5 液氦膜	424
11.1.6 涡旋线和临界速度	425
§ 11.2 ^3He 的特性	426

11.2.1	固态和液态的熵	426
11.2.2	^3He 的超流相	429
§ 11.3	^3He - ^4He 混合液体	433
11.3.1	^3He - ^4He 混合液体的相分离	433
11.3.2	^3He - ^4He 混合液体的一些物理性质	434
参考文献		435
第十二章 1 K 以下实验技术概述		436
§ 12.1	He 恒温器	436
12.1.1	恒温器的结构	437
12.1.2	恒温器的使用	438
12.1.3	连续循环工作方式	440
12.1.4	采用活性炭吸附泵的 ^3He 恒温器	441
§ 12.2	稀释制冷	442
12.2.1	稀释制冷机的原理和循环 ^3He 的制 冷机的结构	442
12.2.2	热交换器	446
12.2.3	蒸馏室	449
12.2.4	混合室	451
12.2.5	主流阻	452
12.2.6	稀释制冷机的使用	452
12.2.7	其它类型的稀释制冷机	454
§ 12.3	波麦兰丘克制冷	455
§ 12.4	顺磁盐绝热去磁	458
§ 12.5	核绝热去磁	461
§ 12.6	1 K 以下温度的测量	466
12.6.1	核取向温度计	467
12.6.2	核磁共振温度计	469
§ 12.7	1 K 以下实验技术的特点和一些具体问题	471
12.7.1	漏热的减小	471
12.7.2	热平衡和热接触	477
参考文献		479
第十三章 超导电性与超导磁体		482

§ 13.1 超导体的基本性质及其应用	482
13.1.1 超导体的基本性质	482
13.1.2 超导电性在低温物理实验中的一些应用	489
§ 13.2 强磁场超导材料	490
13.2.1 强磁场超导材料	490
13.2.2 超导材料性能的测量	492
§ 13.3 超导磁体	505
13.3.1 超导磁体的特点	505
13.3.2 中小型超导磁体的使用	509
13.3.3 磁体设计简介	519
参考文献	522
第十四章 超导量子干涉器件	526
§ 14.1 约瑟夫森效应	526
14.1.1 直流约瑟夫森效应	527
14.1.2 交流约瑟夫森效应	529
14.1.3 弱连接超导体的各种形式	531
§ 14.2 超导量子干涉器件的工作原理和测量方法	534
14.2.1 直流超导量子干涉器件 (dc SQUID)	534
14.2.2 射频超导量子干涉器件 (rf SQUID)	541
14.2.3 其它 SQUID 测量仪器	548
§ 14.3 超导量子干涉器件的结构和使用	550
14.3.1 超导量子干涉器件的结构	550
14.3.2 磁通变换器和磁场梯度计	554
14.3.3 SQUID 系统中的噪声	557
参考文献	558
附录	560
I 主要物理量的符号	560
II 基本物理常数	561
III 一些物理量的单位及其换算	562
IV 常用图表目录	562

第一章 温标和温度基准

温度的测量是低温物理实验中首要和基本的测量。随着科学技术的发展，测量方法不断增多，准确程度也逐渐提高，所测量的温区不断向更低的温度延伸。为了满足科学技术发展的要求，对作为国际协议结果的国际实用温标，近年来进行了多次修改和补充。

§ 1.1 温度的概念和热力学温标

1.1.1 温度和温标

温度是表征处于热平衡的系统的一个参量，热能从温度高的物体传向温度低的物体，一切互为热平衡的系统都具有相同的温度。我们可以选择适当的系统作为测温仪器——温度计，只要使温度计与待测系统接触并经过一段时间达到平衡，则温度计的温度就等于待测系统的温度。

对于选作温度计用的物质（测温物质），通常总是选择一种变化显著、便于测量的物理量（测温属性）作为温度的标志。例如，气体温度计的气体体积或压强，电阻温度计的电阻，温差电偶温度计的温差电动势等等。各种类型的温度计的测温属性随温度变化的规律，除了可以是接近线性的以外，还可以是比较复杂的。

温度的数值表示法叫做温标。例如，历史上的摄氏温标规定：在标准大气压强下，冰水混合物的温度（冰点）为零度，水沸腾的温度（汽点）为 100 度，在零度和 100 度之间按温度计内液体体积随温度作线性变化来刻度。显然，由于测温属性随温度的变化并不都是线性的，因此用不同的测温物质或同一物质的不