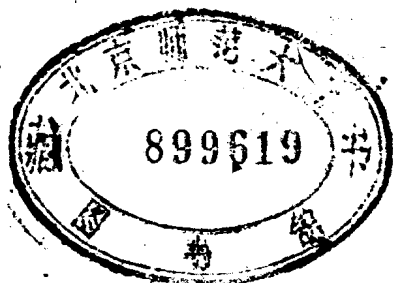


超导电性导论

A. C. 罗斯-英尼斯 著
E. H. 罗德里克
章立源 毕金献 译



人民教育出版社

本书原为英国曼彻斯特大学有关专业的大学生和研究生用参考书。共13章，内容侧重超导物理方面，较全面而简明地介绍了超导电性的基本概念和基本理论。

本书可供我国有关专业的教师、大学生、研究生及科技人员参考。

超 导 电 性 导 论

A. C. 罗斯·英尼斯

E. H. 罗德里克 著

章立源 毕金献 译

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷一厂印刷

通县满庄装订厂装订

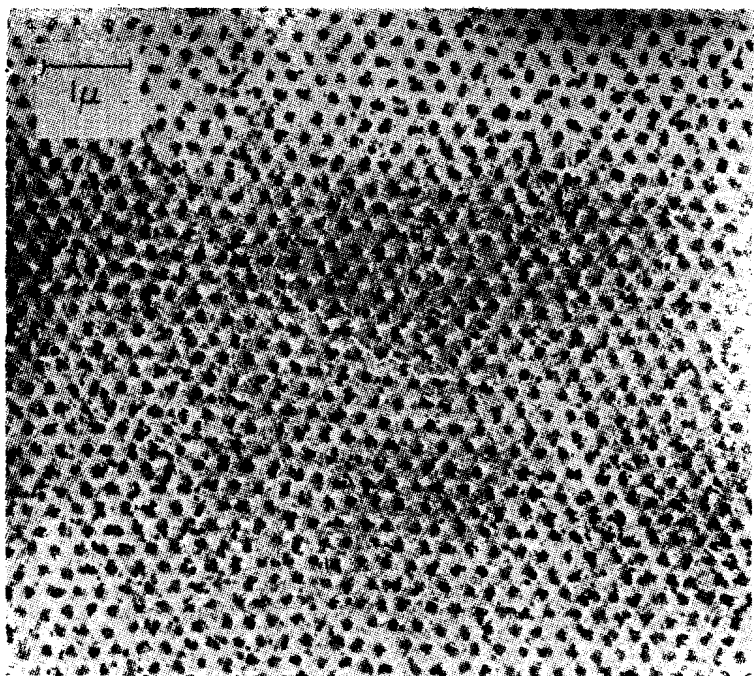
*

开本 850×1168·1/32 印张 7.75 字数 180,000

1981年3月第1版 1981年12月第1次印刷

印数 00,001—6,500

书号 13012·0592 定价 0.69 元



第二类超导体中分个的磁通量子图案

这张照片显示第二类超导体中磁通量子的三角图案。这图案是把很小的(500埃)铁磁颗粒放在磁化了的样品(铅-锡合金)表面上显示出来的。这些颗粒定位在磁通量和表面相交处。此照片是用淀积粒子的电子显微术拍摄的(照片得到 Max Plank 金属研究所的 V. Essmann 和 H. Trauble 的特许)。

第二版 序 言

这一版与第一版的不同处主要在第 11 章,这一章几乎完全重写了。对于超导体中电子波长程相干性和量子干涉器件的作用所产生的一些效应作了更加富于物理意义的描述。书中其它地方有一些较小的改动,我们希望这样做将使本版有所改进。……

曼彻斯特大学

科学技术研究所

1976.12

E.H.R.

A.C.R.-I.

第一版 序 言

本书的编写在很大程度上是以我们给大学生及一年级研究生讲课用的讲义为基础的。在取材上我们力求把本书写成名符其实的超导电性导论。我们不打算把有关超导的内容写得非常详尽、无所不包。目前已经出版好几本那样的教科书，我们不想和这些书竞争。我们的目的是，尽可能清楚地解释超导电性的基本现象和概念，使那些以前对超导电性不了解而在固体物理方面只有一般知识的人们易于理解。

本书重点放在超导物理方面，对超导应用只偶而涉及，不加详述。尽管如此，我们仍然希望本书对理论物理学家以及关心实际应用的人们都有用。基于同一考虑，本书全部使用有理化MKS制。因为，在关心实际应用的人中，许多人是工程师，他们学的是MKS制；此外，在目前物理教学中，使用MKS单位的趋势也日益增长。因此本书决意采用MKS制。采用MKS制，我们就必须仔细研究超导体中 B 和 H 的意义，这个问题在附录A中作了讨论。

自然，我们吸取了其他教科书的一些材料，特别是经常利用肖恩贝格(Shoenberg)的经典著作《超导电性》。由于本书是导论性的，所以我们没有列出全部参考文献，只在适当的地方提到一些重要文献。

曼彻斯特大学
科学技术研究所

1968.7

E.H.R.
A.C.R.-I.

目 录

第二版序言	VI
第一版序言	VII
引言	1

第一部分 第一类超导体

第一章 零电阻现象	3
1.1. 超导转变温度	5
1.2. 零电阻	8
1.3. 无电阻电路	9
1.4. 交流电阻率	12
第二章 完全抗磁性	15
2.1. 理想导体的磁学性质	15
2.2. 超导体的特殊磁性能	18
2.2.1. 迈斯纳效应	18
2.2.2. 超导体的磁导率和磁化率	20
2.3. 表面电流	21
2.3.1. 超导体的空洞	23
2.4. 穿透深度	25
2.4.1. 随温度的变化	27
第三章 电动力学	30
3.1. 零电阻的结果	30
3.2. 伦敦理论	32
3.2.1. 伦敦理论的应用	36
第四章 临界磁场	38
4.1. 超导体的自由能	39
4.2. 临界磁场随温度的变化	41

4.3. 超导体的磁化强度	44
4.3.1. “非理想”样品	45
4.4. 磁特性的测量	46
4.4.1. 磁通密度的测量	47
4.4.2. 磁化强度的测量	49
4.4.3. 积分法	50
第五章 相变热力学	52
5.1. 超导态的熵	52
5.2. 比热和潜热	54
5.2.1. 一级相变和二级相变	55
5.2.2. 绝热磁化	56
5.2.3. 晶格比热和电子比热	57
5.3. 机械效应	59
5.4. 热导率	59
5.5. 温差电效应	60
第六章 中间态	61
6.1. 退磁因数	61
6.2. $n \neq 0$ 的磁转变	64
6.3. 超导区和正常区之间的边界	65
6.4. 中间态的磁性质	66
6.5. 中间态的吉布斯自由能	68
6.6. 中间态的实验观察	69
6.7. 畴的绝对大小; 表面能的作用	71
6.8. 横磁场中金属线电阻的恢复	72
6.9. 相干性概念及表面能的起源	74
第七章 超导体的输运电流	78
7.1. 临界电流	78
7.1.1. 导线的临界电流	79
7.2. 热传播	81
7.3. 由电流诱导的中间态	84

第八章 小样品的超导性质	88
8.1. 穿透效应对临界磁场的影响	88
8.2. 平行面平板的临界场	89
8.3. 更复杂的几何形状	93
8.4. 伦敦理论的局限性	93
8.5. 京茨堡-朗道理论	97
8.6. 边缘效应	99
8.7. 垂直磁场中的转变	101
8.8. 薄样品的临界电流	102
8.9. 临界电流的测量	105
第九章 超导电性的微观理论	107
9.1. 超导态特性总结	107
9.1.1. 零电阻	107
9.1.2. 晶体结构	108
9.1.3. 电子比热	108
9.1.4. 长程序	109
9.1.5. 同位素效应	109
9.1.6. 迈斯纳效应	109
9.2. 能隙概念	110
9.3. 巴丁-库柏-施里弗理论	111
9.3.1. 问题的重述	111
9.3.2. 电子-晶格相互作用	112
9.3.3. 库柏对	114
9.3.4. 超导基态	119
9.3.5. BCS 基态的性质	122
9.3.6. BCS 理论下的超导体宏观性质	126
9.3.7. 载流态	129
9.3.8. 库柏对波函数: 长程相干性	132
第十章 隧道效应和能隙	134
10.1. 隧道效应过程	134

10.2. 超导体的能级图	136
10.3. 正常金属和超导体间的隧道效应	137
10.4. 两个相同超导体间的隧道效应	139
10.5. 半导体表示法	140
10.6. 其它类型的隧道效应	143
10.7. 实际细节	144
第十一章 电子对波的相干性: 量子干涉	148
11.1. 电子对波	148
11.1.1. 电子对波的相	148
11.1.2. 磁场的影响	150
11.2. 全磁通	151
11.2.1. 超导金属内的全磁通	154
11.3. 弱连接	155
11.3.1. 约瑟夫森隧道效应	155
11.3.2. 摆模拟	156
11.3.3. 交流约瑟夫森效应	160
11.3.4. 耦合能	162
11.3.5. 弱连接	163
11.4. 超导量子干涉器件(SQUID)	164
11.4.1. “衍射”效应	172

第二部分 第二类超导体

第十二章 混合态	175
12.1. 负表面能	177
12.2. 混合态	178
12.2.1. 混合态的细节	180
12.3. 金属及合金的京茨堡-朗道常数	182
12.4. 下临界场和上临界场	183
12.4.1. 下临界场, H_{c1}	183
12.4.2. 上临界场, H_{c2}	183

12.4.3. 热力学临界场, H_c	185
12.4.4. 上临界场值	186
12.4.5. 顺磁极限	187
12.5. 第二类超导体的磁化强度	188
12.5.1. κ 的确定	189
12.5.2. 不可逆磁化	190
12.6. 第二类超导体的比热	191
第十三章 第二类超导体的临界电流	194
13.1. 临界电流	194
13.2. 流阻	196
13.3. 磁通流动	198
13.3.1. 洛伦兹力和临界电流	198
13.3.2. 磁通流动	203
13.3.3. 心运动引起的电动势	206
13.4. 表面超导电性	208
附录 A 磁通密度 B 和磁场强 H 的意义	211
A.1. B 的定义	211
A.2. 磁介质效应	212
A.3. 磁场强度	214
A.4. 超导体情形	215
A.5. 退磁效应	218
附录 B 磁化物体的自由能	221
索引	223

引 言

某些金属被冷却到极低温时所呈现的异乎寻常的电、磁综合特性，称之为超导电性。这种低温是卡末林·昂尼斯于1908年在莱登大学液化氦成功时首次达到的。他利用液氦能获得低到约1 K的温度。

昂尼斯在新达到的低温范围内进行的最初试验之一，是研究金属的电阻随温度的变化。多年以来人们就已知道，金属被冷却到室温以下时，它们的电阻减小；但是并不知道，如果温度降低到接近0 K，其电阻会达到什么样的极限值。昂尼斯用铂进行实验时发现，铂被冷却时，它的电阻降到一个取决于样品纯度的低数值。当时，可利用的最纯金属是汞；昂尼斯为了揭示一种极纯金属的性能，便测量了纯汞的电阻。他发现纯汞的电阻在很低的温度下小得无法测量；虽然这并不奇怪，但是他很快（1911）发现，其电阻消失的方式却是完全出乎意料的。当温度降到接近0 K时，汞的电阻不是平稳地下降，而是在约4 K时，其电阻急剧地下降，而低于这一温度时，汞便完全不显示电阻了。而且，这种向无电阻状态的突然转变并不局限于纯汞，即使十分不纯的汞也会发生这种转变。昂尼斯认识到，汞在4 K以下时便进入一种新的状态，其导电性能完全不同于过去已知的情况，这种新状态就称为“超导态”。

后来发现，如果施加一个足够强的磁场，超导性就可能遭到破坏（即电阻恢复）；随后又发现，处于超导状态的金属具有极不寻常的磁特性，这些特性完全不同于普通温度下已知的那些特性。

到目前为止，业已发现有大约半数金属元素以及若干合金在低温下可变为超导性的。凡是在充分冷却时显示超导电性的金属，就叫做超导体。多年来人们认为，所有的超导体都按照基本上相同的方式表现其性能。但是现在知道，有两种类型的超导体，分

别称作第一类超导体和第二类超导体。可成为超导体的大多数金属元素显示第一类超导性,而合金一般呈现第二类超导性。这两种类型的超导体有许多共同的特性,但是在磁性能方面,却有相当大的差别。这些差别足以使我们有理由将这两种类型分开加以讨论。因此,本书第一部分论述第一类超导体,而第二部分讨论第二类超导体。

第一部分 第一类超导体

第一章 零电阻现象

所有金属和合金当它们被冷却时其电阻率都减小。这是什么原因呢？要了解这一点，先要弄清楚使导体产生电阻的原因是什么。导体中的电流是由能穿过材料自由移动的“导电电子”运动形成的。当然，电子有波动性，在金属中行进的一个电子可以用朝相同方向传播的平面波表示。大家知道，金属具有晶体结构，其中的原子排列在规则的周期性晶格上，而平面波恰有一种特性，它能通过完整的周期性结构而不会被散射到其它方向。因此，一个电子能通过一完整的晶体而其原方向上的动量不会有任何损失。换句话说，如果使一电流在完整晶体中流动（这相当于在电流方向上给导电电子一净动量），那么，这电流将不会受到电阻。不过，晶体周期性的任何缺陷都会散射电子波，从而产生一定的电阻。有两种效应能破坏晶格完整周期性而产生电阻。首先，在高于绝对零度的温度下，晶体点阵的原子都要因振动而不同程度地偏离其平衡位置；其次，无规分布的缺陷或外来原子也会造成周期性的中断。不论是热振动还是任何杂质或不完整性都要造成导电电子的散射而产生电阻。

现在我们可以来说明，为什么当金属或合金冷却时电阻率变小。当温度降低时，原子热振动减弱，导电电子被散射的机会减少。当材料的温度高于其德拜温度 θ_D 的三分之一时，电阻随温度

的降低而线性下降，而在 $\frac{1}{3}\theta_D$ 以下，电阻则随温度下降而逐渐缓慢地减低（图 1.1）。就完整纯金属而论，其中的电子运动仅受晶

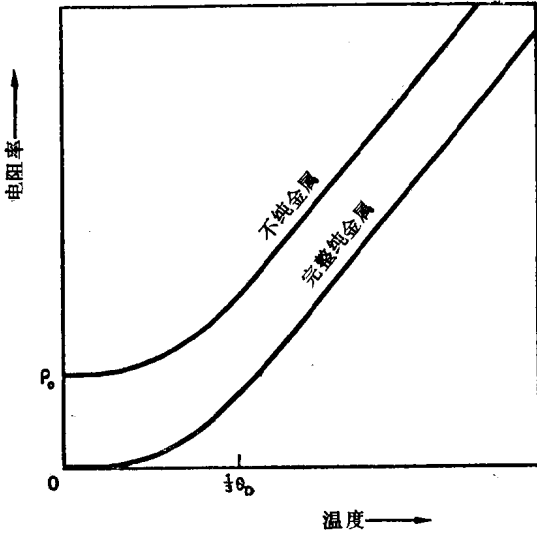


图 1.1 金属电阻随温度的变化。

格热振动的阻碍，当温度趋于 0 K 时，电阻应趋于零。然而，这种零电阻并不是超导电现象，这是一个假想的“理想”样品被冷却到绝对零度时应具有的零电阻。任何真实的金属样品不可能完全纯净，总要含有某些杂质。所以，除了被晶格原子的热振动所散射外，电子还要被杂质所散射，这种杂质散射大体与温度无关。结果，直到最低温度下仍保留有一定的“剩余电阻率”（ ρ_0 ，图 1.1）。金属越不纯，剩余电阻率就越大。

然而，某些金属表现出一种很不平常的特性：把它们冷却时，它们的电阻先以通常方式减小，而在离绝对零度不过几度的某一温度下，电阻突然完全消失（图 1.2）。这时我们就说这金属已过

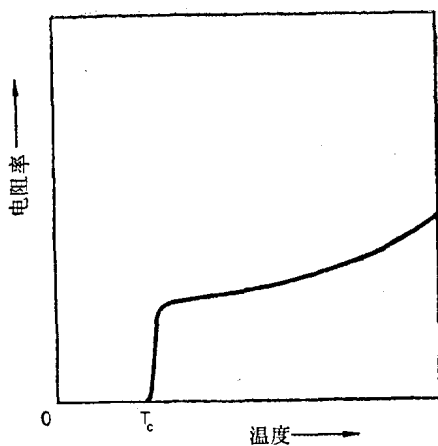


图 1.2. 在低温下超导体电阻的消失。

渡到超导态[†]。即使可能具有很大剩余电阻率的不纯金属也可以过渡到超导态。

1.1. 超导转变温度

超导体失去电阻的温度称为超导转变温度或临界温度，以 T_c 表示；不同金属的 T_c 值各异，表 1.1 列出了金属元素的转变温度。虽然磁性杂质往往降低超导转变温度，但一般说来，转变温度对少量杂质并不很敏感。（在第 9 章将看到，铁磁性[†]与超导电性是不能和谐并存的，前者的各电子自旋是互相平行排列的。）像铌和钼等几种纯金属的超导转变温度极低，但是，存在微量磁性杂质可以破坏其超导电性。所以，这些元素只有在极纯时才能显示出超导电性，而普通商品纯度样品则不是超导体。并不是所有纯金属都是超导体；例如铜、铁和钠，直至被冷却到迄今它们曾达到的最低温

[†] 在本书中，超导体一词系指冷却时能具有超导电性的材料。形容词“超导的”则用来描写正显示出超导电性的材料，而“正常的”是指其时未显示出超导电性的材料（例如，在超导体的临界温度以上）。

表 1.1. 超 导 元 素

T_c 是超导转变温度

H_c 是在 0 K 下的临界磁场 (见第 4 章)

	T_c (K)	H_c	
		(安米 ⁻¹)	(高斯)
铝	1.2	0.79×10^4	99
镉	0.52	0.22×10^4	30
铟	1.1	0.41×10^4	51
铊	3.4	2.2×10^4	276
铋	0.11	0.13×10^4	16
铜 { α	4.8		
β	4.9		
铅	7.2	6.4×10^4	803
铪	0.1	2.8×10^4	350
汞 { α	4.2	3.3×10^4	413
β	4.0	2.7×10^4	340
钼	0.9		
铌	9.3	第二类 (见第 12 章)	
钒	0.7	$\sim 0.5 \times 10^4$	~ 63
铯	1.7	1.6×10^4	201
铊	0.5	0.53×10^4	66
铋	4.5	6.6×10^4	830
铟	7.9	第二类 (见第 12 章)	
铊	2.4	1.4×10^4	171
铊	1.4	1.3×10^4	162
锡	3.7	2.4×10^4	306
钛	0.4		
铊	0.016	0.0096×10^4	1.2
铊 { α	0.6		
β	1.8		
钒	5.4	第二类 (见第 12 章)	
铊	0.9	0.42×10^4	53
铊	0.8	0.37×10^4	47

度仍未表现出超导电性。当然，在更低的温度下作实验时可能会揭示出一些新超导体，但是，没有什么根本性理由认为所有的金属都应当表现出超导电性，即使在绝对零度下也是如此。然而，应该注意，超导电性也并非罕见现象；现在已经知道约有半数金属元素是超导体，此外，还有很多合金是超导体。用两个本身并非超导体的金属制成的合金可以是超导体（例如 Bi-Pd）。那些在通常意义上并非金属的导体也可能具有超导电性，例如，属于半导体的铋、铅和铋的氧化混合物是超导体；此外，已发现导电的聚合物，多硫氮化物(SN)_x，在约 0.3 K 时变为超导的。

铌是转变温度最高的金属元素(9.3 K)，但是某些合金和金属化合物在更高的温度下仍是超导的。例如，Nb₃Ge 的转变温度约为 23 K。这些转变温度较高的合金在超导电性的工程应用上十分重要。

表 1.2. 某些合金和金属化合物的超导转变温度与其组元元素的超导转变温度的比较

	钽-铌	铅-铋	三铌-锆	铌三锡	铌三锆
T_c (K)	6.3	8	11	18	23

	铌	铅	钽	锡	锆	铋	锆
T_c (K)	9.3	7.2	4.5	3.7	0.8	晶态非超导	晶态非超导

如果样品很纯而且物理上完整，那么冷却时，可以很急剧地转变到超导态。例如，对纯铋样品观察到的转变只发生在 10^{-5} 度的温度范围内。然而，如果样品不纯或者晶体结构受到扰动，那么，转变所跨越的温度范围会显著变宽。图 1.3 表示纯锡和不纯锡样品中的超导转变。