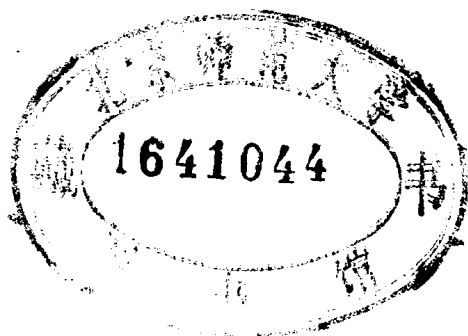


超导物理基础与应用

林德华 编

2011/35/01



重庆大学出版社

内 容 提 要

本书以大学物理为起点,内容包括超导研究历史的回顾、超导体的基本电磁学性质、超导的唯象理论、超导的微观图象、两类超导体、单电子隧道效应、约瑟夫森效应、超导量子干涉器件、高温超导体、超导体的应用等。

该书可供工科院校电气、自控、仪表、电子、计算机、采矿、运输、材料、计量、生物工程等专业高年级学生作为超导选修课的基本教材,也可供有关工程技术人员参考。

超导物理基础与应用

林德华 编

责任编辑 黄开植

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆大学出版社印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 7.375 字数: 166千

1992年7月第1版 1992年7月第1次印刷

印数: 1—4000

标准书号: ISBN 7-5624-0451-8 定价: 3.25元

O·64

川新登字020号

前 言

自从1911年荷兰物理学家昂尼斯首先发现超导电性以来，超导诱人的应用前景一直吸引着世界各国的科学家去探索它的奥秘。特别是1986年超导研究出现重大突破之后，全世界更是掀起了研究与应用超导的热潮，并取得了可喜的成果。超导发展的进程比人们预想的还要快。

为适应高科技迅速发展的形势对人才的需求，作者在重庆大学开设超导选修课的基础上，编写了《超导物理基础与应用》一书，将它奉献给关心并希望了解超导的人们，尤其是工科院校的广大同学们。本书对超导发展的历史作了较为全面的回顾，以便于读者对超导发展的整个过程有一概括的了解。作者在超导理论的工科化方面作了一些有益的探索，并在书中增加了应用内容的比重，但愿能够对读者真正有所帮助。作者编写该书的目的，就是希望通过自己的工作，能够使更多的人关心与了解超导，形成一个广泛、扎实的群众基础。如果其中有些人能为超导的发展与应用作出重要贡献的话，那将是对作者最好的报偿。

作者的工作得到了重庆大学领导和有关部门的重视与具体支持。也得到了浙江大学张其瑞、中国科大研究生院刘兵、同济大学张宝凤、复旦大学邱经武、四川新材料研究中心赵敏光、四川大学陈志学、西南交通大学王家素、成都电子科技大学吴朝阳，以及重庆大学陈新镛、舒启清等专家、学者的鼓励、支持和帮助。在此，作者谨向他们表示深切的谢意。

由于编写时间比较短促，又限于作者的水平，本书肯定存在许多不足，甚至是错误之处。作者诚恳希望各位专家和广大读者提出批评意见，以便在重印或再版时改进。

本书由浙江大学张其瑞教授和同济大学张宝凤副教授担任主审。重庆大学万茂松同志绘制了书中的全部插图。

最后还应感谢重庆大学出版社的支持和高效率的工作，使本书得以迅速和广大读者见面。

作者

1991年8月

于重庆大学

目 录

第一章 历史的回顾

§ 1-1	低温的获得·····	(1)
§ 1-2	超导电现象的发现·····	(7)
§ 1-3	迈斯纳效应·····	(10)
§ 1-4	超导唯象理论的建立·····	(12)
§ 1-5	BCS理论的形成·····	(15)
§ 1-6	关于第二类超导体·····	(18)
§ 1-7	约瑟夫森效应·····	(20)
§ 1-8	高 T_c 和非常规超导体的探索·····	(21)

第二章 超导体的基本电磁学性质

§ 2-1	正常金属电阻的起因·····	(25)
§ 2-2	临界温度·····	(27)
§ 2-3	零电阻性·····	(30)
§ 2-4	临界磁场与临界电流·····	(32)
§ 2-5	迈斯纳效应·····	(35)
§ 2-6	对超导体磁性的两种模写·····	(39)
§ 2-7	穿透深度·····	(40)

第三章 超导的唯象理论

§ 3-1	在磁场中超导态的自由能·····	(44)
§ 3-2	超导-正常相变时熵及比热的变化·····	(47)
§ 3-3	超导态的二流体唯象模型·····	(50)

§ 3-4	伦敦方程·····	(51)
§ 3-5	相干长度与非局域理论·····	(57)
§ 3-6	金兹堡-朗道理论概述·····	(62)

第四章 超导的微观图象

§ 4-1	金属电子论简介·····	(65)
§ 4-2	建立微观理论的实验与理论背景·····	(71)
§ 4-3	电子-声子相互作用·····	(75)
§ 4-4	库柏电子对·····	(77)
§ 4-5	BCS超导微观图象·····	(80)

第五章 两类超导体

§ 5-1	界面能与两类超导体·····	(84)
§ 5-2	混合态·····	(87)
§ 5-3	流阻与钉扎·····	(94)
§ 5-4	临界电流与磁化曲线·····	(97)
§ 5-5	稳定性问题与基本对策·····	(101)

第六章 单电子隧道效应

§ 6-1	量子力学隧道效应·····	(104)
§ 6-2	正常金属之间的隧道效应·····	(106)
§ 6-3	超导体和正常金属之间的隧道效应·····	(109)
§ 6-4	两个相同超导体间的隧道效应·····	(113)
§ 6-5	超导体能级的半导体表示法·····	(115)
§ 6-6	隧道效应和超导体能隙·····	(117)

第七章 约瑟夫森效应

§ 7-1	电子对波与磁通量子化·····	(120)
§ 7-2	约瑟夫森方程·····	(125)
§ 7-3	直流约瑟夫森效应·····	(128)
§ 7-4	交流约瑟夫森效应·····	(131)

§ 7-5	摆模拟.....	(136)
§ 7-6	弱连接超导体.....	(137)

第八章 超导量子干涉器件

§ 8-1	双结超导量子干涉器件.....	(140)
§ 8-2	临界电流随外磁通量的变化.....	(142)
§ 8-3	电压随外磁通量的变化.....	(147)
§ 8-4	双结磁强计.....	(150)
§ 8-5	单结超导量子干涉器简介.....	(155)

第九章 高温超导体

§ 9-1	高温超导体的发现.....	(159)
§ 9-2	高温超导体的特征.....	(162)
§ 9-3	高温超导材料与器件的研制(一).....	(166)
§ 9-4	高温超导材料与器件的研制(二).....	(173)

第十章 超导的应用

§ 10-1	超导强电强磁应用概述.....	(180)
§ 10-2	超导强电强磁应用实例.....	(186)
§ 10-3	超导弱电弱磁应用概述.....	(190)
§ 10-4	超导弱电弱磁应用实例.....	(197)

附 录

附录 I	热力学基础.....	(204)
附录 II	麦克斯韦方程组的微分形式与矢量分 析.....	(221)
主要参考文献.....		(227)

第一章 历史的回顾

超导电现象与其它物理现象一样，也有它发现的深刻背景，以及漫长的认识过程。回顾超导的发展历史，将有助于我们更深刻地认识它的现状，并以更深远的目光去展望它的未来。同时，超导物理学家们提供的正反两个方面的经验，以及他们为探索科学真理而作出的不可磨灭的功绩，也是值得我们借鉴和铭记的。

本章概括介绍超导的发展历程，重点追述超导物理学史中重大的关键性事件，对低温物理的初步知识作了适当介绍。

§1-1 低温的获得

在凝聚态物质的研究中，人们发现引进极低温、超高压、强磁场等极端条件，对研究物质的宏观性质和微观机理十分有用。其中，低温物理和技术的迅速发展并取得成果，就是由此引发的一个典型。

要弄清物质在接近绝对零度的极低温范围内，将会呈现什么样的物理性质，首先必须获得这样的极低温环境。在地球表面的自然界中，可以说要数南极洲最冷了，据记载，南极洲最冷时曾达到 -88°C 。但与我们所需的那种极低温相比，可以说是“超高温”了。因此，极低温环境只有用人为的方法去获得。在历史上，低温的获得在很长时间内，是与气体的液化技术密切相关的。

早在19世纪初，人们就开始了对气体液化的研究。著名的英国物理学家法拉第是这方面工作的先驱。1823年，他利用相变制冷原理，实现了氯气和 其它几种 气体的 液化。到1845年，他已经液化了大多数种类的气体，但仍有几种气体不能被液化。这些不能被液化的气体是氧气、氮气、氢气、一氧化氮、一氧化碳和甲烷，还有一种是1895年才被发现的惰性气体氦。人们在失望之余，把它们称为“永久气体”。

英国物理学家汤姆逊在精心研究能量守恒定律的基础上，产生了获得低温的另一途径的设想。他认为，若气体通过一个与外界绝热的多孔物质膨胀，按理想气体状态方程，应该得到温度没有变化的结果，但是对于实际气体则未必如此。1861年，他邀请当时在热功当量研究中名望很高的焦耳，共同进行这一实验。在实验中他们发现，经过多孔物质膨胀后的气体，其温度随两端压强差值而成正比地变化。在常温、常压下，空气、氧气、氮气、二氧化碳等经绝热膨胀后降温，而氢气则升温。进一步研究还发现，存在着一个转化温度，气体若高于转化温度膨胀后则升温，低于转化温度膨胀后则降温。显然，空气、氧气、氮气、二氧化碳的转化温度均高于室温，而氢气的转化温度则低于室温，见表1-1。由此得出结论，要使气体通过与外界绝热的多孔物质膨胀后，获得降温的效果，就必须使气体的起始温度在转化温度以下。物理学中称此实验结果为焦耳-汤姆逊效应。同理，气体通过小孔，由高压到低压，在与外界绝热的条件下膨胀，同样也可产生这个效应，因此，焦-汤效应也被称为“节流效应”。这一效应为人们征服“永久气体”指明了方向。这是目前获得低温的最基本的方法。

根据焦-汤效应，瑞士物理学家皮克特，在1877年首先

表1-1 节流效应的转化温度

气 体	转化温度(K)	气 体	转化温度(K)
氧	893	氢	204
氮	225	氦	621
氩	723	氖	51

实现了氧的液化。同一年，法国物理学家凯勒特，基于绝热膨胀原理，也独立实现了氧的液化。他的作法是，用汞把氧气密封在一个玻璃管中，外面再用水封闭起来，用水压机进行加压，在达到 -29°C 和300个大气压条件下，突然撤去水压机的压力，玻璃管内的氧气因此而绝热膨胀，温度也随之急剧下降，从而获得了液态氧。这种绝热膨胀制冷的方法，目前也是获得低温的基本方法之一。从此，人们认为“永久气体”不能被液化的结论终于被否定了。

值得一提的是，英国皇家学院的安德鲁斯，长期致力于“永久气体”液化的研究。虽然他与其它同时代的许多科学家一样累遭失败，但是他毫不气馁，从失败中总结经验教训。在1869年，他提出了极为重要的临界温度的概念。安德鲁斯认为，气体只有处于一定的温度以下才能被液化。他阐明了气体液化的原理，并从理论上证明“永久气体”无一不可制服，关键在于要使气体置于临界温度以下。表1-2为几种气体

表1-2 气体的临界温度

气 体	临界温度 $T_c(\text{K})$	气 体	临界温度 $T_c(\text{K})$
氧	154.6	氟	44.5
氩	150.7	氢	33.2
氮	126.2	氦	5.2

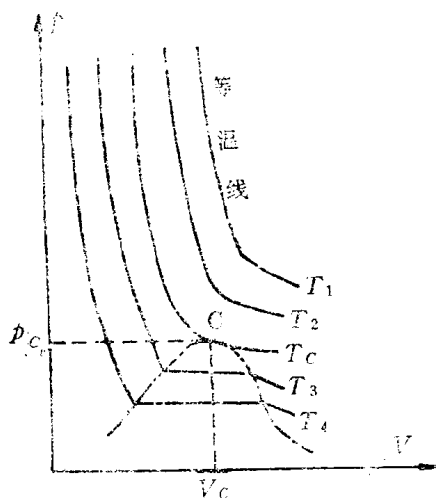


图1.1 气体的 P V 图

的临界温度,图1.1为气体临界温度的 P - V 图。图中, C 点为临界点(T_c 、 P_c 、 V_c)。在临界温度 T_c 以上,无论怎样加压,气体都不能被液化。液化区是由临界温度 T_c 等温线与两坐标轴所包围的状态区域。

后来,波兰科

学家弗伯勒夫斯基和奥耳舍夫斯基、英国的汉普孙、德国的林德等人,在液化气体方面又相继作出了重要的贡献。通向绝对零度的大门被逐渐地打开。在这向绝对零度进军的征程上,最困难也是最关键的两步,就是氢与氮的液化。

1898年5月10日,英国化学家、物理学家杜瓦应用焦-汤效应,终于实现了氢的液化,达到了20K左右的低温。随后,他又利用减压降温的方法,达到了大约15K的低温,并且使液氢变成了固体。而且,在征服“永久气体”的过程中,杜瓦还巧妙地应用真空技术,发明了杜瓦瓶来贮存低温液体。至今,杜瓦瓶仍在低温物理领域和其它领域中广泛应用。

“永久气体”的最后堡垒——氮,是被荷兰物理学家昂尼斯所攻克的。1882年,昂尼斯被任命为莱顿大学的物理学教授和物理实验室的负责人。他极有远见地决定,实验室的主要工作应放在对低温物理的研究上。1892年至1894年间,在

莱顿建造了一座大型的液化工厂，来液化氧、氮和空气。该厂设备相当复杂庞大，曾被戏称为“啤酒厂”，以致于30年后，仍能满足莱顿实验室低温研究迅速增长的需要。

1906年，莱顿实验室成功地液化了氢气。这虽然已落后于杜瓦8年，但与杜瓦的演示性实验不同，在莱顿可以生产出大量的液化氢。这为进一步液化氮奠定了坚实的基础。

1908年7月10日，这一天是一个值得纪念的日子。在莱顿实验室里，液化氮的实验从早晨五点半就开始了，直到晚上九点半才结束。在下午六点半时，人们第一次在地球上看到了液化氮。与此相应，温度降到了4 K左右。以后，昂尼斯进一步模仿杜瓦利用减压降温的方法，努力使液氮固化，但始终没能成功。然而，他通过这种方法，却使温度降到了1 K左右，真正逼近了绝对零度。因此，可以恰当地说，当时地球上的最冷点是在莱顿实验室。昂尼斯本人，也被人们尊敬而又风趣地称为“绝对零度先生”。

在昂尼斯1926年去世四个月之后，莱顿实验室的接班人之一开色姆，在低温和高压同时存在的条件下，才成功地实现了氮的固化。在氮的固化问题上，昂尼斯未能取得成功的原因，主要是他对低温下制冷过程的物理本质的理解还不够深刻。事实上，温度的降低取决于物质系统的熵，而不是能量。熵代表物质系统无序化的程度，温度上升，分子、原子热运动剧烈，系统的有序化程度降低，熵就增加；反之，系统的有序化程度增加，熵就减小，温度也就下降。另外，根据现代量子理论，在常压下之所以不能形成固态氮，是由于不确定性原理得出的固氮零点能较大的缘故。因此，液氮又被称为量子液体。

荷兰物理学家德拜，从昂尼斯固化氮的失败中得到启

迪，提出了新的制冷方法，继续向绝对零度逼近。他吸取了当时各个学派的理论精华，着手研究由熵物理图象来获得更低的温度。当时，法国物理学家朗之万提出了物质的磁性理论；普朗克也指出，纯粹物质的熵在绝对零度时才能找到它们的共同状态点。即仅在此时，所有物质微粒包括分子、原子等都呈现高度有序排列的状态。也就是说，物质系统的熵等于零。但此时物质系统的能量却并不等于零。这就意味着，要使物质系统的温度下降，就应该使系统的熵减小。据此，德拜提出了用绝热去磁的方法来获得更低温度的设想。与此同时，美国化学家吉奥克也独立地提出了这种见解。

绝热去磁方法的基本原理是，在外加磁场下，顺磁物质的原子磁矩有序地排列；而撤去磁场时，它的原子磁矩就要恢复原来的混乱状态。在绝热条件下，此时吸收的热量又将由物质系统自身提供，从而引起降温效应。它的本质就是利用系统熵的改变来获得低温。应用这种方法可以获得 $0.01 \sim 0.001\text{K}$ 的极低温。1949年，德拜和吉奥克由于极低温的获得，而荣获了诺贝尔物理学奖。

库提等人在原子磁矩绝热去磁制冷方法获得成功的基础上，又提出了用原子核磁矩绝热去磁方法来获得更低温度的预言。他认为，物质中原子核的磁矩比电子磁矩小得多，约为电子磁矩的二千分之一。因此，在绝热去磁后，熵的改变更大，从而温度降得更低，有可能获得 μK 量级的极低温。这个预言由库提本人和吉奥克分别在1956年和1957年用实验证实。

1951年，物理学家H.伦敦提出了 He^3 - He^4 混合液稀释制冷的理论。这种理论认为， He^3 和 He^4 混合液在 0.86K 以下将

互相分离。由于 He^3 比 He^4 轻，因而在混合液上层 He^3 较多，称为浓相；而在混合液下层 He^3 较少，称为稀相，这相当于 He^3 在混合液下层被稀释了。若设法在绝热的条件下，把混合液下层中的 He^3 不断抽走，那么，为了保持平衡，上层的 He^3 液体就会经过界面，不断向下层扩散，从而产生降温效应，称为稀释致冷，利用这种方法可以达到mK量级的极低温。1966年，第一台连续致冷的稀释致冷机问世。

1950年，泡墨朗切克提出了另外一种极低温连续致冷机设想。他认为，如果利用绝热加压，压缩液态的 He^3 ，则可以获得低温。利用 He^3 的固-液熔解曲线反常特性的这种制冷方法，经不断试验与改进，这种制冷机也研究成功了，最低温也可达mK量级。

最后应该指出，早在1905年，热物理学家能斯脱就告诫人们，每次降温只能够使整个系统的熵减少一部分，但是无论如何也不可能去掉因有极小熵的存在而对应的极低温度。因此，无论制冷设备设计多么精巧，系统的熵只能减少其中的一部分，始终存在一个微小的剩余量，因而绝对零度是不可能达到的。换言之，人们在向绝对零度进军的过程中，只能逐渐逼近绝对零度。因而，对于低温之最后的探索是永无止境的。

§1-2 超导现象的发现

随着氮的液化而获得了低温。但金属的电阻在新的低温区域将如何变化，这是当时人们普遍关心的一个问题。在氮被液化之前，对于金属的电阻在绝对零度附近将如何变化，人们只能作出各自的猜测。例如，能斯脱的工作表明，金属

的电阻将逐渐减小，并最终在绝对零度消失；杜瓦在液氢温区研究了同一问题，他发现，随着温度的下降，铂电阻的下降速度比预期的要慢。显然，这是有代表性的两种相反的观点。在人们对于低温下电阻如何变化，感到困惑不解的时候，昂尼斯也加入了探索者的行列。

昂尼斯最初接受了汤姆逊在1902年提出的见解。他认为，当温度降低时，纯金属的电阻应先达到一个极小值，然后随温度的进一步下降，其电阻会重新开始增加，并在绝对零度时变为无限大。而且，多年来莱顿实验室一直把这种观点，作为研究低温下金属电阻的指导思想。当然，究竟哪一种观点是正确的，最终还要由实验来检验。

在氢被液化以后，昂尼斯在液氢温度下测量了金、银、汞、铋、铅和铂的电阻，发现不同纯度的金属在低温下电阻的变化情况也不相同。随着温度的下降，越纯的金属电阻变得越小，尤其是金和铂更甚。在获得液氮之后，昂尼斯又在液氮温度下测量了金和铂的电阻。他发现，在4.3K以下，铂的电阻是一个不变的常数值。因此，他放弃了原先认为电阻在绝对零度时会变得无限大的观点。并认为，这个常数值电阻可能是由杂质引起的。只要是绝对纯的铂，它的电阻有可能在氮的沸点下消失。

进一步的实验需要更纯的金属作为测量对象。昂尼斯选择了汞，因为在当时的条件下，汞比其它金属更容易提纯。

在1911年一年间，昂尼斯发表了三篇有关汞电阻实验的重要论文。4月28日发表的论文题目是《在氮温度下纯汞的电阻》。文中提到测量的结果表明，“纯汞能够被带到这样一个状态，其电阻变为零，或者说至少觉察不出与零的差

异。”昂尼斯并没有意识到这就是物质的超导电现象，反而误认为，这个结果是与先前所持的观点相吻合的。第二篇论文发表在5月29日，题目是《汞电阻的消失》。“在3K，发现电阻降到了 $3 \times 10^{-6} \Omega$ 以下，即为其在摄氏零度的电阻值的一千万分之一。”这次，昂尼斯已注意到，在4.3K到3K之间，汞的电阻变化要比他以前理论的预言快得多。最后一篇论文《论汞电阻消失速度的突变》发表在12月30日。在文中，昂尼斯明确地给出了汞的超导转变曲线。从曲线中可以清楚地看出，在4.21K至4.19K，电阻减小得极快，并在4.19K完全消失。电阻以这种方式突然变成零，完全出乎人们的意料。

1912年至1913年，昂尼斯又发现了锡和铅的超导电现象。同时还有两项重要发现，一是发现通过超导体的电流越强，超导转变温度就越低。另一发现是，对于不纯的汞来说，其电阻消失的方式和纯汞完全相同。从而进一步否定了他原先认为只有纯金属电阻才会在液氮温度下消失的理论。并且，在《莱顿通讯》第1336期中，第一次使用了“超导电性”一词。

由于昂尼斯创造了在液氮温度下进行实验的可能性，并开辟了对于物理学有着重大意义的低温超导领域，他荣获了1913年的诺贝尔物理学奖。

超导电现象被发现后，昂尼斯马上意识到，这种现象可能对电工技术有重要的潜在意义，特别是可以用来制造高场强的电磁铁。但结果却令人十分扫兴，当线圈内的磁场只有几百高斯时，样品就由超导态转变到了正常态。昂尼斯进一步的实验发现，当超导体的外加磁场大于一定值时，超导态就会被破坏。直到60年代发现了第二类超导体后，获得

高场强的磁体才成为可能。并且在当今,已成了超导体最重要的应用领域之一。

§1-3 迈斯纳效应

尽管是由昂尼斯发现了超导电现象,但是他却倾向于把超导电性看成是金属正常导电机制的一种极端情形。因而,在超导电现象被发现了两年之后,仍未看出它与正常导体有什么本质上的不同。由此也可看出,人们往往不能马上就深刻地意识到一个新发现的重要意义,往往不愿接受“反常”的概念,并力图将新的发现,纳入已经建立的旧理论的框架之中。只有当实验证据和新的发现逐渐积累,不断地冲击着旧的观念,当新现象与传统理论的矛盾日益激化时,人们才不得不开始放弃旧观点。

1914年爆发了第一次世界大战,这次大战影响了对超导电性的研究,实际上处于停顿状态。在这次大战期间,美国的物理学家西耳斯比做了一项重要的理论工作。他将超导体的临界电流与临界磁场联系在一起,提出了西耳斯比假设。这个假设在1926年被昂尼斯在逝世前不久所证实。

事实上,从发现超导体直到1933年,人们一直比较普遍地认为,电阻为零是超导体最基本的性质,而对于超导体的磁性质却认识不足,基本上是把超导体当作理想导体来对待的。对于这种理想导体,在它的体内不可能有随时间变化的磁场,因此它的磁化状态将与达到这一状态所经历的具体过程有关,是不可逆的。由此得出的所谓磁场“冻结”,被人们普遍地接受而且深信不疑。著名超导物理学家休恩伯格曾指出,1933年以前,关于理想导体磁性质的这些预言,一直