

超导 高技术的突破口

〔日〕太刀川恭治 户叶一正

化学工业出版社

(京)新登字039号

太刀川恭治 戸叶一正
超 電 導
スーパーテクへの突破口
読売新聞社
東京都千代田区大手町
昭和六一年五月十日
超 導
高技术的突破口
林 华 译
王文魁 审校

责任编辑: 骆文敏
封面设计: 季玉芳

*

化学工业出版社出版发行
(北京和平门七区十六号楼)
化学工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所经销

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张 5, 字数110千字
1992年5月第1版 1992年5月北京第1次印刷
印 数 1—2,000
ISBN 7-5025-0999-2/TQ·577
定 价3.60元

译 序

自从氧化物高温超导体问世以来，超导一词对许多读者已经不很陌生了。但是，要真正了解超导的含义及其应用范围，还必须系统地掌握有关的基本知识，而且，这种知识涉及到物理学、化学、冶金学、材料学，工程学等许多方面。

本书是一本中级科普读物，非常适合各界读者在这方面的需要。具有中等以上文化程度的广大科学和工程技术工作者、管理干部、有关专业技术工人、大中学生、以及从事超导工作的人也可以从中得到收益。

约在十年前，我在日本时便有幸与本书主要作者之一太刀川相识，他从事超导材料研制工作多年，在化合物超导材料研究方面颇有建树。本书的副标题是“超导是高技术的突破口”，从超导材料的物理本质出发，深入浅出地介绍了各类材料的制备方法，以及在电工学、电子学、交通、医疗各方面的应用前景。

我国正在执行一个推动我国经济发展的高技术计划，超导是高技术的一个突破口，本书将使关心我国高技术的读者得到启迪。

本书涉及到的专业知识面很广，作者用通俗的笔法描述专业科学技术内容，在语言上也有许多技巧，因此，完成这本译著不是轻而易举的事。

王文魁

前 言

超导，是把握未来核聚变能源，集成电路的约瑟夫森器件以及未来交通工具中的磁浮列车等高技术的关键科学技术。

用超导体能轻而易举地制造比最普通磁体大 500 倍的电磁体。而其电功率却只有现有电磁体的十分之一到百分之一。

超导体还部分地实现了人类当初冥思若索的“永动机”。实际上，它是实现了电流在零电阻下的流动，就象电子在原子内部半永久旋转那样。人们创造条件将这种电子运动引入超导线材内，使它得到很好的利用。

仅在十几年前，超导体还只是幻想而已。而现在，在我们周围常见的同步加速器、受控核聚变和医用核磁共振电子计算机 x 线断层扫描装置(NMR-CT) 等方面，超导体已开始投入实际应用。

今后，本书所介绍的新型加工技术还将继续不断发展。我们深信，几年后，临界温度在 20 K 以上、磁场超过 20 特斯拉的超导材料，在实用领域一定会居于主导地位。

如果真能如此，超导体的应用将会进一步蓬勃发展，也许，大部分机器设备将会采用超导材料。目前，超导应用的设计还没有全部开发出来。譬如，约瑟夫森器件的功能不仅仅是用于判断；各类机械的运动部分，都可以采用由超导磁体制成的超导电动机。这样一来，就能够增大磁力和降低成本。

如果把输电、电力储存和各种各样的电动机械等都包括在内，那么，由于利用超导技术，电力系统可能会面貌一新，简

直令人无法想象。

由此看来，超导体正在成为一种平平常常的东西。

对于超导电的原理，如不深入到超导物质的内部去探索，是很难理解的。所以，它并非是所有人都能轻易搞清楚的问题。

本书的原则，是使普通读者也能饶有兴味地了解超导原理、超导材料和实现超导的低温环境等知识。本着这一原则，作者太刀川和户叶两人边商量边写作，尽量采取一般人容易理解的表述方式。

在成书过程中，遇到了撰写论文时也不曾有的困难。虽然编辑希望能达到最通俗易懂的程度，但在这方面我们的努力还很不够。

（原文谢志部分从略）

太刀川恭治

户叶 一正

1986年3月15日

01568

内 容 提 要

本书是中级科普读物，译自日本读卖新闻社出版的读卖科学丛书，两位作者都是超导研究领域建树颇丰的知名专家。全书以浅易的措词介绍了超导研究的目的、意义和作用；超导电现象的基本特性；两种类型的超导体；超导材料的性质、种类、制法和应用；约瑟夫森器件的特性与制法；受控核聚变、交通工具、医疗设备、电力储存、输电和工业机器等许多方面利用超导的进展概况，以及基础与应用研究未来发展的课题等。记述了极低温技术的历史、现状和发展方向。

本书可供具有中等文化程度对超导有兴趣的广大读者、大、中学生及有关的科技人员阅读。

本书译稿由中国科学院物理所王文魁同志审校。



目 录

第一章 什么是超导体 实现永久电流的装置	1
一、零电阻的发现	1
(1) 值得纪念的超低温日	1
(2) 记住超低温的温标	3
(3) 零电阻的发现	5
(4) 什么是电阻——回忆欧姆定律	7
(5) 电阻的成因	8
二、为什么会产生超导现象	9
(1) 超导体的性质	9
(2) 磁特性	11
(3) 临界磁场的重要性	12
(4) 电子在产生超导中的作用	13
(5) 因晶格振动而受到吸引	14
(6) 电子严格挑选成对的同伴	16
(7) 两个电子之间的距离	19
三、超导体有两种类型	20
(1) 两类超导体	20
(2) 电流趋向超导	22
(3) 超导态与正常态睦邻相处的结构	23
四、制止磁通涡线运动的方法	26
(1) 电流在超导体内流动的限制	26
(2) 产生了涡线!	27
(3) 涡线的运动产生电阻	28

(4) 钉扎法	29
第二章 终于实现实用化! 超导电的元素与合金材料	31
一、超导物质究竟是什么物质	31
(1) 单质超导物质	31
(2) 超导元素有28种	33
(3) 铅制超导磁体的失败	36
(4) 铌的分离成为突破口	38
二、出路在于合金	38
(1) 终于制成合用的磁体	38
(2) 合金线材制法	39
第三章 向更高的磁场进军 化合物系超导材料	45
一、化合物系超导线材的种类	45
(1) 化合物材料的优良特性	45
(2) 奥妙在于晶体结构	46
(3) 最高者60特斯拉	48
二、化合物线材的制法	49
(1) 能用石头制成细丝吗?	49
(2) 扩散法的利用	50
(3) 类似于制作镀锌铁皮	51
(4) 中间化合物的制法	52
(5) “铜有催化剂的作用”	53
三、太刀川法和青铜法	54
(1) 浅谈太刀川法	54
(2) 青铜法——铌三锡复合法	55
(3) 添加其它元素的线材及其在磁镜式热核反应堆 中的应用	57
四、原位法和析出法	60
(1) 不受条件制约的原位法	60
(2) 高明的超导体	61
(3) 拉伸树枝状结晶	62

(4) 技术要点颇似“用面粉焙制曲奇饼干”的粉末法	64
(5) 使晶体析出的方法——析出法	65
五、以30特斯拉为目标 熔体急冷法、激光法和电子束法	67
(1) 超导材料已发展到这一步	67
(2) 熔体急冷法	69
(3) 用激光和电子束辐照的方法	71
第四章 超导材料内部的真象 钉扎, 跳跃, 稳定和破坏	75
一、钉扎作用	75
(1) 晶体缺陷构成钉扎中心	75
(2) 使晶体产生缺陷的技巧	77
(3) 晶粒大小与钉扎	77
二、磁通跳跃 制作超细多芯线的理由	78
(1) 磁不稳定性	78
(2) 芯线越细越稳定	80
(3) 千方百计使多芯线更加稳定	81
(4) 需要承受很大的力	83
第五章 约瑟夫森器件的原材料 超导薄膜技术	85
一、铌膜约瑟夫森器件	85
(1) 硅时代后兴起的一代新秀	85
(2) 效果显著的铌单质薄膜	87
(3) 利用溅射法制备薄膜	88
(4) 用铌膜试制约瑟夫森器件	89
二、化合物超导薄膜材料	91
(1) 氮化铌	91
(2) A15型化合物铌三锗	92
第六章 超导的应用 从核聚变到约瑟夫森器件	94
一、二十一世纪是超导时代	94
(1) 一切领域的关键技术	94
(2) 超导磁体的优点	95
二、开发用之不竭的能源在实现受控核聚变方面的应用	97

(1) 用于建造热核反应堆	97
(2) 托卡马克型装置的磁体 全世界的发展趋势	99
(3) 磁镜式装置的强磁场同样也是开发关键	101
(4) 抗中子辐射性强的莱夫斯型化合物线材	102
五、交通运输工具上的应用	103
(1) 磁浮列车	103
(2) 利用电磁航行的超导船	107
四、约瑟夫森器件上的应用	108
(1) 制造运行速度更快的电子计算机	108
(2) 心磁图和脑磁图	109
五、医学诊疗方面的应用	110
(1) 核磁共振电子计算机X线断层扫描装置 [NMR-CT(MR—)]	110
(2) π 介子照射治疗装置	111
六、电力旋转机械	113
(1) 体积小电力大	113
(2) 走向大型化的超导发电机	114
七、超导在研究领域的应用	117
(1) 登上世界最高磁场的宝座	117
(2) 混合型磁体	119
(3) 利用核磁共振进行分析	119
(4) 同步加速器的关键部件	121
(5) 加速器大小与磁体的关系	122
(6) 电子显微镜的电子透镜	125
八、电子储存、输电和工业机器	126
(1) 储能	126
(2) 超导输电	128
(3) 磁流体 (MHD) 发电	129
(4) 磁分离	130
(5) 单晶体培育装置	130

第七章 极低温技术与未来展望	131
一、极低温技术	131
(1) 进入磁制冷机时代	131
(2) 磁场变化与吸放热	132
(3) 氦制冷机	135
(4) 采取浸润方式还是中空导体方式进行冷却?	137
(5) 极低温结构材料	138
(6) 稀有金属的资源问题	139
(7) 数量稀缺的氦	141
二、超导体的未来发展	141
(1) 目前的展望	141
(2) 更新的品种——设计超导体	142
(3) 室温超导体	143

第一章 什么是超导体

实现永久电流的装置

一、零电阻的发现

(1) 值得纪念的超低温日



图 1.1 1986年春，日本金属材料技术研究所刷新它保持了10年之久的17.5特斯拉超导磁体的世界最高纪录，使超导磁体产生18.1特斯拉的磁场

时间：1908年7月10日；地点：荷兰莱顿市莱顿大学。在

这一天，这所大学低温研究所的卡麦林，翁纳斯教授，开始进行一项早在10多年以前就一直在着手准备的“极重要实验”。这项实验的内容，是将当时还被认为恒为气体的氮进行液化。

恰恰也在10年前，伦敦皇家研究所的杜瓦教授首次将氢液化。杜瓦教授氢液化实验的成功，在当时曾成为轰动整个社会的事情。

引起震动的原因是，在此之前的几年里，人们相继将氧、氢及空气（主要由氮和氧组成）液化了，由于氢远比它们容易蒸发，所以都认为它是一种极难液化的物质。

因而，氢气液化的成功给人们一个希望：或许有可能使最后一种气体——氮也被液化。杜瓦教授自己也以此作为下一个攻关目标，着手进行氮气液化的研究。

翁纳斯教授与杜瓦教授不同的地方，是他具有卓越的指挥能力和组织能力。为了使氮气液化能获成功，要进行预冷，这就需要使用大量的液态空气和液态氢。翁纳斯与莱顿大学的研究人员共同协作，安装了制造这些液体的大型装置，稳步而顺利地进行着准备。

实验从10日早晨正式开始。整个上午，都在用头一天准备好的液态空气蓄积实验所必需的液态氢，到了傍晚才开始冷却氮气。

为了将经过液态氢冷却的氮进一步冷却，要把氮从盛放它的高压容器上的小孔内喷出。当然，该容器本身也是处于超低温状态。

由于这种剧烈的运动，使氮失去了自身的热。运动需要能量。因为运动，喷射出来的氮的热能被夺走，所以，它的温度比在这以前状态下要低得多。这就如同人在运动时要消耗体

能一样。就这样一下子刷新了超低温纪录。

起初，实验进行得并不太顺利。

后来，供持续冷却用的液态氢没有了，晚上七点半以后，翁纳斯刚断了实验的念头，却在低温恒温器（玻璃制成的超低温容器）中真的发现了氦的液面。

它无疑是极低温世界的曙光。以此为契机，科学工作者开始接近绝对零度即摄氏 -273.15 度的世界。

卡麦林·翁纳斯的伟大之处，就在于他并没有满足于这次成功，而是亲自将这一成果直接应用于物性物理学的研究中。这与翁纳斯最强的竞争对手杜瓦，在听说了这一成功的消息后，感到万分气馁，不久便放弃了低温物理学的研究工作，形成了鲜明对比。翁纳斯从这以后又仅用了三年时间，再一次获得了超导这一历史性发现。

（2）记住超低温的温标

在谈论超导问题之前，首先让我们了解一下孕育超导现象的极低温世界。

我们日常使用的温度计，是用摄氏温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）标定的。它是这样规定的：在常压下，冰溶解时的温度为零度，水沸腾时的温度为100度，把这两者之间分成一百等份，每一个间隔就是1度。无论将这个标度扩展到零度以下还是100度以上，都称为摄氏温度计量方法。

对于我们的日常生活来说，摄氏温度最重要的一点是很方便，但它以冰点作为零度，是没有任何理论依据的。人们只是选择了必不可缺又有象征性的物质——水作为特定的温度标准。

而在另一方面，随着热力学的发展，人们认识到温度没有高温极限，但存在低温极限的重要事实。

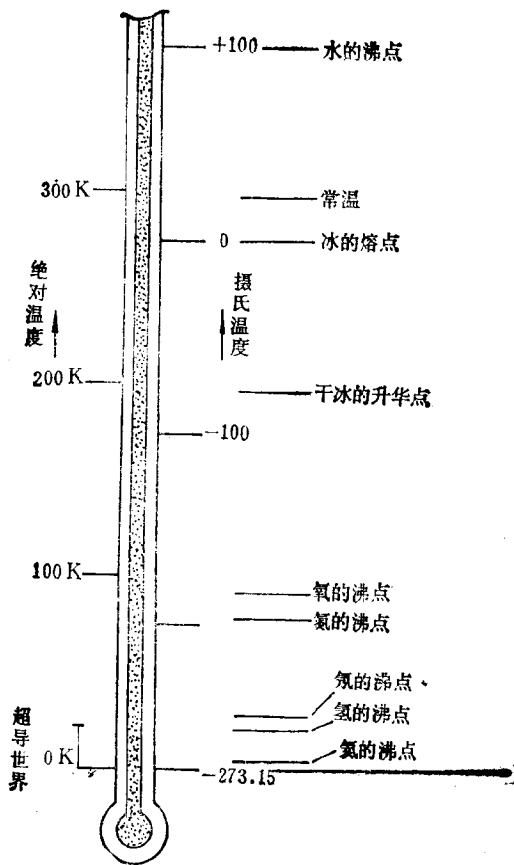


图 1.2 超低温温标

这个低温的极限，摄氏温度为 -273.15 度。

因此，莫不如将低温极限直接作为基准温度来考虑，这对

热力学来说更合理些。它称之为绝对温度。在标度上，国际公认使用以摄氏温度为间隔的开尔文 (Kelvin)。因而绝对温度 K 等于摄氏温度加上 273.15 度。

这个温度基准，在本书中会经常出现。在阅读本书时，只要记住负 273.15 度这个数字就可以了。它用绝对温度来表示就为零度。它是宇宙中的最低温度，只有它才是宇宙温度的基准。

下面，从我们生活环境的温度出发，来靠近认识一下绝对零度。如果从室温始，逐渐降低温度，将会出现什么现象呢？用肉眼所见，最容易理解的大概是物质的状态变化。

如同水在高温下变成蒸汽、在低温时变成冰一样，大多数物质随着温度的降低，会由气体变为液体，由液体变为固体。这种物质状态的变化称为“相变”，发生相变的温度，视不同物质而各异。

我们在空气中生活着，知道它是由氧气和氮气混合而成的。但是，一般所说的氧和氮是气体，是指在我们所生活的温度即常温的世界里，而在极低温的世界，这些气体也会变成液体，接着绝大部分会变成固体。

如果说，低温物理学的黎明期始终贯穿着向这些永久气体的液化提出挑战，是并不过分的。由于许许多多前辈的努力，在十九世纪后半叶，氧、氮、氢相继被液化，到1908年终于使剩下的最后一种气体——氦也被液化了。

这些气体液化的成功，使利用它们作为制冷剂进行低温实验的构想成为可能，其结果是推动了低温物性研究的巨大进步。

(3) 零电阻的发现

氦气液化成功以后，卡麦林·翁纳斯最先发起对金属电阻的研究。他首先测定铂丝电阻随温度变化会发生何种变化。实

验发现这样的现象：随温度的降低，铂的电阻不断减小，在0K即绝对零度时，电阻趋近某一定值。

这个电阻叫作残余电阻。在试样中混入杂质元素，它就会有残余电阻，这在当时已经多少有所预料。不久，翁纳斯接着又对金丝的电阻进行了测定，金比铂容易获得更高的纯度。

实验结果与当初预想完全吻合。金丝的残余电阻被证实远比铂丝小得多。但也确实还依然残存有电阻。

后来，翁纳斯把目光放到了水银上。水银在室温下是液体，如果进行反复蒸发，可能会得到纯度非常高的水银。

翁纳斯这种执着的信念，使他紧接着又发现了超导电这一划时代的现象，这是连他自己也没想到的。

象事先估计的那样，水银的电阻随着温度的下降而减小。但是，在温度达到4.2K（开尔文）附近时，发生了完全出乎意料的事情。

水银的电阻急剧减小，直至完全消失。1911年，翁纳斯将这个实验结果报告了荷兰皇家科学院。但翁纳斯本人还不轻易相信这种现象是水银的特征现象，经过进一步提高精确度反复进行实验确认后，在1913年发表的论文中，首次使用了“超导态 (Superconductivity State)”这一术语。

人们对所谓“超传导”的传导感到膛目，恐怕就是对super这个词来说的吧。conductivity是传导即导电的意思。虽然都称为传导，但电传导与热传导是截然不同的两码事。

说到学会间术语使用上的纠纷，在日本，对superconductivity这个词，有人叫作“超电导”，也有人叫作“超传导”。

conductivity的词义是电导率，所以称之为超传导也是不错的。但为了防止超导电与热传导等术语发生混淆起见，最好还