

# 超导电性发现的历史回顾\*

刘冰 任兰亭

(石油大学(华东)应用物理系 山东东营 257061)

**摘要** 回顾了超导电性发现的科学技术条件、过程,以及这一过程中的科学思想方法和经验,说明了超导电性的发现并非是偶然的。通过对超导电性发现的历史回顾,希望能对掌握科学发展的基本规律有所裨益。

**关键词** 超导电性,极低温,迈斯纳效应

## THE DISCOVERY OF SUPERCONDUCTIVITY IN RETROSPECT

LIU Bing Ren Lan Ting

(Department of Applied Physics, University of Petroleum, Shandong Dongying 257061, China)

**Abstract** The technological background and process through which superconductivity was discovered are reviewed. The necessary experience and scientific through that led to the discovery demonstrate that it was not a fortuitous event. A review of the discovery of superconductivity in retrospect should be helpful for the further development of science.

**Key words** superconductivity, very low temperature, Meissner effect

1911年到20世纪30年代中期,确定物质超导性的判据——零电阻特征和迈斯纳效应为科学家发现,人们认识了最基本的超导现象,这一阶段是超导研究的前期阶段。在此阶段,人们于1913年发现了超导温度为7.2K的超导体铅,17年后发现了超导温度为9.2K的铌,这也是目前元素超导体的最高临界温度值<sup>[1]</sup>。超导现象的发现有着深刻的历史背景和漫长的认识过程。回顾超导电性的发现历史,将有助于我们更深刻地认识生产科技的作用,并以更深远的目光去探索这一过程的思想。同时,超导物理学家们提供的研究经验和为探索科学真理作出的不可磨灭的功绩,值得我们借鉴和铭记。

### 1 气体液化与低温的获得

在极低温下,物质中原子或分子的无规则热运动将趋于静止,一些常温下被掩盖的现象会显示出来,这为了解物质世界的规律提供了重要线索。因此,把极低温引入到凝聚态物质的研究中,有助于物质宏观性质和微观机理的探索。如1956年吴健雄等人就是在0.01K的极低温条件下进行了Co-60实验,验证了宇称不守恒原理<sup>[2]</sup>;1980年德国的克利青(Klitzing)在极低温(1.5K)和强磁场(18T)条件下发现了量子霍尔效应<sup>[3]</sup>,获得了1985年度的诺贝尔

物理学奖。1985年前所发现的一切超导材料都是在极低温下才能进入超导态。倘若没有极低温生产技术的背景,超导性的发现是不可能的。极低温的获得需要用人工方法,在很长时间内它始于气体的液化技术。

#### 1.1 低温的早期发展

早在17世纪末阿蒙通(G. Amontons)就提出了绝对零度的概念,认为任何物体都不能冷却到这一温度,所有运动在这一温度将趋于静止。一个世纪以后,查理(Charles)和盖-吕萨克(Gay-Lussac)建立了严格的气体定律,得到温度的极限值为-273℃,将绝对零度精确化。1848年,汤姆孙(W. Thomson)确定了绝对温标,并对绝对零度加以说明<sup>[4]</sup>。18世纪末,荷兰人范马鲁姆(Martin Van Marum)第一次用高压压缩方法将氨液化。著名英国物理学家法拉第(Michael Faraday)于1823年利用相变制冷原理,实现了氯气液化。1926年,又陆续液化了H<sub>2</sub>S, HCl, SO<sub>2</sub>及C<sub>2</sub>N<sub>2</sub>等气体<sup>[5]</sup>。到1845年,法拉第几乎已经液化了除氧、氮、氢、氦、一氧化碳、甲烷等少数几种所谓“惰性气体”外的所有气体<sup>[6]</sup>。1822年,法国人托尔(C.C. Tour)研究了密封在装有石英球的枪管内的酒精,靠听觉辨别石英球发出的噪音时发现,压强为

\* 2000-08-17收到初稿,2000-11-20修回

119 大气压时,酒精在某一温度下将突然全部转变为气体.这使得托尔成为临界点的发现者,但他未能对此加以解释<sup>[5]</sup>.

英国物理学家汤姆孙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:按理想气体状态方程,气体通过一个与外界绝热的多孔物质膨胀,温度应没有变化,但实际气体则未必如此.1851年,他邀请了在热功当量研究中名望很高的焦耳(J. P. Joule)共同进行这一实验.1852年,他们发现了焦耳-汤姆孙效应——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.这一效应为征服“永久气体”指明了方向,是获得低温的最基本的方法.1869年,爱尔兰化学家安德鲁斯(Thomas Andrews)全面地研究了这一现象之后,才搞清楚气液转变的全过程.安德鲁斯长期致力于“永久气体”液化的研究,虽然与其他同时代的许多科学家一样屡遭失败,但丝毫不气馁,不断从失败中总结教训.1869年,安德鲁斯提出了极为重要的临界温度的概念<sup>[7]</sup>,认为气体只有处于一定的温度以下才能被液化,阐明了气体液化的原理,并从理论上证明:只要置于临界温度以下,“永久气体”均可被液化.

“永久气体”中首先被液化的是氧.1877年,几乎同时由两位物理学家分别扩大了安德鲁斯的成果,提出一切气体都有临界温度,并根据焦耳-汤姆孙效应,分别用不同方法实现了氧的液化,产生出少量的液态氮、液态氧、液态一氧化碳<sup>[8]</sup>.瑞士人皮克特(Raoul Pierre Pictet)用真空泵抽去液体表面的蒸气,液体失去了速度最快的分子而降温,然后用降温后的液体包围第2种液体,再用真空泵抽去第2种液体表面的蒸气,它的温度必然低于第1种液体,如此一级一级联下去,终于达到了氧的临界温度<sup>[5]</sup>.法国人盖勒特(Louis Paul Gailletet)基于绝热膨胀原理,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 $-29^{\circ}\text{C}$ 和 $300\text{atm}$ 时突然撤去水压机的压力,玻璃管内的氧气发生绝热膨胀,温度随之急剧下降,从而获得了液态氧<sup>[7]</sup>.这种绝热膨胀制冷的办法也是获得低温的基本方法之一.从此,“永久气体”不能被液化的结论终于被否定了.

1883年,波兰物理学家乌罗布列夫斯基(S. Wroblewski)和化学家奥利舍夫斯基(K. Olszewski)合作,将以上两种方法综合运用,并做了两点改进:一是将液化的氧用一小玻璃管收集,二是将小玻璃管

置于盛有液态乙烯的低温槽中(温度保持在 $-130^{\circ}\text{C}$ ),这样,他们就第一次收集到了液氧.后来,奥利舍夫斯基在低温领域里除了氢和氦,对所有的气体都实现了液化和固化,并研究了液态空气的种种性质<sup>[5]</sup>.1890年是液化气体技术发展关键的一年,这一年,英国发明家汉普森(William Hampson)和德国的林德(Carl von Linde)以及德国的克洛德(Georges Claude)分别独立地提出利用焦耳-汤姆孙效应以及循环法大量制取液态气体的新技术<sup>[8]</sup>.从此,通往绝对零度的大门被逐渐地打开,液化气体也成为商品供应市场.至此,在向绝对零度进军的征途上,还有最困难也是最关键的两步——氢和氦的液化.

1893年1月20日,英国化学家杜瓦(James Dewar)巧妙地应用真空技术,发明了一种后来被称为杜瓦瓶的特殊的低温恒温器(cryostat),至今仍在低温物理领域和其他领域中被广泛应用.在范德瓦耳斯的理论指导下,杜瓦于1898年5月10日应用焦耳-汤姆孙效应及林德机实现了氢的液化,达到了 $20.4\text{K}$ 的低温.次年,他又利用减压降温的方法,实现了氢的固化,达到了 $14\text{K}$ 的低温.

## 1.2 昂内斯与氦的液化

“永久气体”的最后堡垒——氦的液化,是被荷兰物理学家昂内斯(Heike Kamerlingh Onnes)于1908年攻克的<sup>[5-8]</sup>.液化氦的实现为超导现象的发现提供了必要的条件.昂内斯于1870年进入格罗宁根大学学习,第二年就获得学士学位.其后去海德堡,在本生和基尔霍夫指导下学习,以后在格罗宁根大学获得博士学位.1872年,范德瓦耳斯(J. D. Van der Waals)用分子物理学理论解释了安德鲁斯于1861年对二氧化碳的气液相变实验,出色的理论工作吸引了昂内斯.1880年,27岁的昂内斯对根据范德瓦耳斯方程预测当时尚未被液化气体的临界点深感兴趣,并预感到即将发生巨大的变化.1882年,年仅29岁的昂内斯成为莱顿(Leiden)大学物理系教授,并任物理实验室负责人,此后担任这一职务达42年之久.他极有远见地决定把实验室的全部研究方向都确定在低温物理的研究上,建成了当时世界一流的低温实验室,从而使莱顿大学成为世界著名的低温中心.他对液化实验精心策划,改进仪器,解决工程技术问题,培训人才,采取了一系列深谋远虑且卓有成效的措施.例如,在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”,以至于30年后,仍能满足莱顿实验室低温研究迅速增长的需要.1901年,昂内斯在莱顿实验室成立了仪器制造工和玻璃吹制工训练学校.这不仅保证了实验室研究计划的实现,而且在这里受过训练的毕业生,在20多年后还在世界上许多物理实验室中发挥重要作用.1906年,莱顿实验室成功地液化了氢气.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,从而为进一步液化氢奠定了坚实的基础.昂内斯制造出一台非常精巧的装置,先用蒸发氢使氦气冷却,再利用焦耳-汤姆孙效应使氦气液化,终于在1908年7月10日首次制出液态氢,共获得60ml的液氢,这是人类第一次获得4.3K的低温.可是,地球上尚未被液化的最后一种自然界气体——氦气被液化了.以后,昂内斯进一步模仿杜瓦利用减压降温的方法,努力使液氢固化,但始终未能成功.然而,通过这种方法,他却使温度降低到了1.04K的低温,真正逼近了绝对零度,为超导电性的发现作好了必要的准备.由此可以恰当地说,当时地球上的最冷点是在莱顿实验室.当时人们尊敬而又风趣地称昂内斯为“绝对零度先生”.

在昂内斯1926年去世4个月后,他的一个合作者基佐姆(W. H. Keesom)在低温(0.71K)和高压(25atm)的条件下,成功地实现了氦的固化.事实上,温度的降低不是由能量决定,而是取决于物质系统的熵.熵代表物质系统无序化的程度,温度下降,分子和原子热运动缓慢,系统的有序化程度增加,熵减小;反之,系统的有序化程度增加了,熵就减小,温度也就下降.根据现代量子理论的不确定性原理,物质系统的熵在绝对零度时为零,但此时物质系统的能量并不为零,因此在常压下得不到固态氦.1911年至1926年间,昂内斯一直努力固化氦未能获得成功的主要原因是他对低温制冷过程的物理本质理解不够深刻.

20世纪初的低温领域的工作有3个特点:(1)继续更加接近绝对零度;(2)通过英国的汉普森和德国的林德以及克洛德等人的工作使空气液化形成工业发展规律;(3)在已开拓的极低温领域内研究低温下的物性.在人们进军绝对零度的征程中,只能是逐渐无限逼近绝对零度而不能达到绝对零度.早在1905年,德国物理化学家能斯特(W. Nernst)就告诫人们,每次降温只能使整个系统的熵减少一部分,但是无论如何也不能去掉因有极小熵的存在而对应的极低温,因而绝对零度是不可能达到的.由此可以

看出,更加接近绝对零度的探索是永无止境的.

## 2 超导电性的发现

### 2.1 零电阻效应的发现

从微观上讲,材料的电阻是电子在电场中运动被散射而失去部分或全部电场方向的动量所导致的.电子的定向运动在量子力学中可用朝相同方向传播的平面波来描述.当平面波通过完整的周期结构时,它不会被散射到其他的方向.运动的电子若通过完整周期性结构的晶体时,就不会产生散射,不会损失原方向的动量;若通过有缺陷的晶体时,将会发生散射.自然界中的实际晶体都存有缺陷,因此,偏离绝对零度的物质都具有一定的电阻.金属的电阻随温度降低而减小,完整金属的电阻在绝对零度时将为零,不完整金属的电阻在绝对零度时将趋于一个由缺陷所决定的数值.随着人们注意到纯金属的电阻随温度的降低而减小的现象及低温的获得,金属电阻在低温区的变化成了人们关注的问题之一.

在氦未得到液化时,对于金属的电阻在绝对零度附近将如何变化,人们只能进行猜测.例如,能斯特的重要发现——熵能随温度趋于绝对零度而趋于零,表明了金属的电阻随温度的降低而减小,并最终在绝对零度时消失;杜瓦在液氢温区研究了铂的电阻,发现铂的电阻随温度下降而下降的速度比理论预期的要慢得多.显然这是两种相反的观点且具有代表性.在低温下金属电阻如何变化众说纷纭之时,昂内斯加入到探索者的行列中来.

昂内斯从事低温电阻的研究最初受到了开尔文的影响<sup>[8]</sup>.1902年,开尔文认为电子在极低温下将凝结在金属原子上,这会使金属的电阻变得无限大.受这一思想的影响,昂内斯最初认为纯金属的电阻随温度的降低应先达到一个极小值,随着温度进一步下降,电阻又会重新开始增大,在绝对零度时变为无限大.昂内斯由此把研究重点转移到低温下的金属电阻上来,事实证明这个选择极有远见.

研究极低温下物性问题的成熟时机是实现了氦的液化而能达到4K到1K的极低温区.在实现了氦的液化后,昂内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的电阻变化情况也不相同.随着温度的下降,越纯的金属,电阻变得越小,尤其是金和铂更明显.获得液氢后,昂内斯于1911年组织研究了液氢温度下铂和金的电阻,并提出了附加的杂质电阻概念.他发现铂的

电阻在 4.3K 以下是一个定值,认为这个定值可能由杂质引起,若铂很纯净,其电阻很可能在氦的沸点下消失为零.因此,昂内斯放弃了电阻在绝对零度时趋于无限大的观点.他甚至利用普朗克量子概念,并类比爱因斯坦于 1907 年提出的量子固体比热理论,提出一个新的电阻理论来说明金属的电阻在绝对零度时减小为零.在以后进一步的研究工作中,昂内斯采用尽可能纯净的金属样品汞做实验以排除杂质电阻的影响.当时汞是可利用的最纯金属,在常温下可以连续用蒸馏法提纯.昂内斯的学生霍尔斯特(Gilles Holst)在测量极低温下汞的电阻行为的实验中发现:当冷却至氦的沸点(4.2K)时,电阻突然降到零;当升温到 4.2K 时这种现象消失,再冷却时这种现象又会出现.得到实验结果报告的昂内斯又重复实验多次后终于确认:在 4.2K 附近汞的电阻已经降到该实验室仪器无法测出的程度<sup>[5]</sup>.这实际上是人类第一次观察到的超导电性.

1911 年 4 月 28 日,昂内斯发表的题为“在液氦温度下纯汞的电阻”的论文表明:“纯汞能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.”毫无疑问,汞在 4.2K 附近,进入一个新的物态,其电阻实际为零.然而昂内斯本人并没有意识到这就是物质的超导现象,反而误以为这个结果与先前所持观点相吻合.5 月 29 日,昂内斯发表题为“汞电阻的消失”的论文表明:“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.”昂内斯注意到了汞在 4.2—3K 间的电阻变化比以前理论预言的要快得多.12 月 30 日,昂内斯在题为“论汞电阻消失速度的突变”的论文中明确给出了汞的超导转变曲线:在 4.21—4.19K 间,汞电阻减小得极快,在 4.19K 完全消失.

1912—1913 年间,昂内斯又发现了锡在 3.8K 和铅在 7.2K 时电阻消失现象<sup>[9]</sup>.同时还有两项重要发现:超导体电流愈强,临界转变温度就愈低;对于不纯的汞,其电阻消失的方式和纯汞一样.这一结果出乎预料,这就进一步否定了昂内斯自己先前的观点——只有纯金属电阻才会在液氦温度下消失的理论.1913 年,昂内斯在其第二篇论文中第一次使用了“超导电性(superconductivity)”一词,同年 9 月,在华盛顿召开的第三届国际制冷会议上,昂内斯正式提出了“超导态”概念.由于低温物性和液化氦方面富有开创性的研究,开辟了对物理学有着重大意义的低温超导领域,昂内斯荣获了 1913 年的诺贝尔物理学奖.

## 2.2 零电阻效应的证实

在超导态下电阻是不是真的完全消失了呢?为了进一步测量超导态下电阻减小的程度,昂内斯于 1914 年 4—5 月间做了更巧妙的实验.他先把超导铝环置于磁场中,然后降温使其进入超导态,再将磁场撤去,超导环中产生感应电流.通过观察感应电流的衰减情况发现,直至液氮完全蒸发,两个多小时内没有看到电流有丝毫衰减的迹象.昂内斯由此实验估计超导环的电阻率不会超过  $10^{-16} \Omega \cdot \text{cm}$ .其后柯林斯(Collins)曾使一超导环中的电流持续了约两年半之久而未发现电流有明显变化.奎恩(Quinn)等人指出,超导态铅的电阻率小于  $3.6 \times 10^{-23} \Omega \cdot \text{m}$ <sup>[10]</sup>.法奥(J. File)和迈奥斯(R. G. Mills)利用精确的核磁共振方法测量超导电流产生的磁场来研究螺线管内超导电流的衰变,结论是衰减时间不低于十万年<sup>[11]</sup>.

## 3 迈斯纳(Meissner)效应的发现

1914 年第一次世界大战爆发,严重阻碍了科学技术的发展,科学研究失去了稳定的环境.莱顿的超导电性实验研究几乎处于停顿状态.在这一期间,美国物理学家西耳斯比(Francis Silsbee)完成了一项重要的理论工作:把超导体的临界电流和临界磁场相联系,大胆假设电流的临界值就是当电流自身的磁场为临界磁场时的电流值.这个假设于 1926 年由昂内斯等人所证实.西耳斯比在缺乏足够实验数据的条件下,把两种表面上不同的现象联系起来,并指出其中的磁效应更为根本,这对以后的超导研究产生了重要的影响.勇气和创造性思维发挥了重要作用.

从物理学(如量子论和相对论)的发展史中,可以明显地看出,人们往往不能立即深刻地意识到一个新发现的重要意义,不能立即接受新出现的“反常”概念,而且总是力图将新的发现纳入已经建立起来的旧理论体系之中.当实验数据和新的发现日益积累且不断冲击旧观念时,旧观点才被放弃.这种思维方式严重束缚了科学的发展.在极低温下,某些金属会显示出超导电性,已为世人承认.但在 1911—1933 年间,包括昂内斯本人在内,超导电性只是被看成金属正常导电机制的一种特殊情况<sup>[4]</sup>,企图把超导机制纳入原有的导电理论体系,而没有认识到超导体与正常导体的本质区别.

自 1911 年发现超导体到 1933 年间,零电阻现象是超导体的最基本性质为人们普遍接受,很自然地把超导体看作理想导体,却忽略了对超导体磁性

质的认识.德国的迈斯纳(Walter Meissner)在前人的工作中注意到超导体在有磁场时的转变中,有滞后效应.他说:“这种滞后现象首先使我想可能是磁导率发生了变化.在产生超导电性时,如果用来测量的电流和它的磁场分布保持不变,那就没有理由出现磁滞后现象.”为了判断超导态的磁性是否完全由零电阻决定,1933年,迈斯纳和奥克森费尔德(R. Ochsenfeld)测量了Sb和Pb样品在磁场中冷却到转变温度以下的外部磁通分布情况<sup>[1,5,8]</sup>.实验是把一个圆柱形样品在垂直于轴的磁场中冷却到超导态,并以小的检验线圈检查样品四周的磁场分布情况,发现结果与前人认识(磁场保持在超导体内不变)截然不同:不论是先降温后加磁场,还是先加磁场后降温,只要是进入了超导态,外部磁场分布将发生改变,磁通量被完全排斥在超导体之外,当撤去外磁场后,磁场完全消失.这说明,不管达到超导态的途径如何,只要是在临界温度以下,超导态内的磁感应强度总是为零,即具有完全抗磁性,后人称之为迈斯纳效应.阿卡迪也夫(ArKadiev)在1947年以悬浮磁体实验来表示超导体完全抗磁性<sup>[10]</sup>.这种完全抗磁性是超导体的独立于零电阻性的又一个基本特性,使人们意识到超导态是一个真正的热力学态.它的发现是超导研究的第一块里程碑,不仅使人们对超导态的本质有了全新的认识,而且为可逆热力学在超导方面的应用奠定了基础.

#### 4 结束语

20世纪初的莱顿实验室在国际超导研究方面一直处于领先地位,然而未能发现超导体的完全抗磁性,也许有以下原因造成.一是昂内斯倾向于精确的定量的测量.他在题为“定量测量在物理学中的重要性”的就职演说中说<sup>[9]</sup>:“物理学能创造获得新的物质的手段,并且对我们的实验哲学思维有着巨大的影响,但只有当物理学通过测量和实验去夺取新的疆土时,它才会在我们今天社会的思维和工作占有重要的地位”,“我喜欢把‘通过测量获得知识’这个座右铭贴在每个物理实验室的大门上”.虽然昂内斯以这种精神在实验物理学的研究中取得了卓越的成就,但它导致了人们偏爱测量胜过观察,这对于新效应的发现,并不总是最好的方式.二是冻结磁场的传统观念束缚了人们的头脑.1933年以前,人们一直把超导体当作理想导体来研究,即认为超导体

内无随时间变化的磁场,它的磁化状态与过程有关且不可逆.由此得到所谓磁场“冻结”被认为是不验自明的理论,为人们深信不疑地接受.莱顿老一辈科学家对其深信不疑,思维受到了禁锢.因此,在科学研究的道路上,要加强对传统观念和理论的批判性思考,加强创造性思维能力,测量与观察并重,才能在重大发现上有所突破.

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] 张礼主编.近代物理学进展.北京:清华大学出版社,1997.104[ Zhang L ed. Development of Modern Physics. Beijing: Tsinghua Univ. Press, 1997. 104( in Chinese ) ]
- [ 2 ] 张三慧,沈慧君编.分子物理与热力学.北京:北京科学技术出版社,1987.126[ Zhang S H, Shen H J ed. Molecule Physics and Thermodynamics. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1987. 126( in Chinese ) ]
- [ 3 ] 冯端,金国钧.凝聚态物理学新论.上海:上海科学技术出版社,1997.194[ Feng D, Jin G J. New Perspective on Condensed Matter Physics. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1997. 194( in Chinese ) ]
- [ 4 ] K. 门德尔松著.张长贵等译.绝对零度的探索——低温物理趣谈.北京:科学普及出版社,1987.5,78[ Mendelerson K. Zhang C G et al trans. The Quest for Absolute Zero. Beijing: Science Popularization Press, 1987. 5, 78( in Chinese ) ]
- [ 5 ] 郭奕玲,沈慧君编.物理学史.北京:清华大学出版社,1993.79—84[ Guo Y L, Shen H J ed. History of Physics. Beijing: Tsinghua Univ. Press, 1993. 79—84( in Chinese ) ]
- [ 6 ] 中国版协科技出版工作委员会编.高技术现状与发展趋势.北京:科学出版社,1993.127—129[ Science and Technology Publishing Council of Chinese Press Association ed. Actuality and Developing Trend of High Technic. Beijing: Science Press, 1993. 127—129( in Chinese ) ]
- [ 7 ] 林德华编.超导物理基础与应用.重庆:重庆大学出版社,1992.3[ Lin D H ed. Base and Application of Superconductive Physics. Chongqing: Chongqing Univ. Press, 1992. 3( in Chinese ) ]
- [ 8 ] 魏凤文,申先甲编.20世纪物理学史.南昌:江西教育出版社,1994.330—334[ Wei F W, Shen X J ed. History in 20th Century Physics. Nanchang: Jiangxi Education Press, 1994. 330—334( in Chinese ) ]
- [ 9 ] 郭奕玲,沈慧君编.科学家的道路.北京:人民教育出版社,1996.146[ Guo Y L, Shen H J ed. The Tracks of Scientists. Beijing: Renmin Education Press, 1996. 146( in Chinese ) ]
- [ 10 ] 章立源,张金龙,崔广霖.超导物理学.北京:电子工业出版社,1995.2,7[ Zhang L Y, Zhang J L, Cui G J. Superconductive Physics. Beijing: Electron Industry Press, 1995. 2, 7( in Chinese ) ]
- [ 11 ] 任兰亭主编.大学物理教程(下册).东营:石油大学出版社,1999(第二版).482[ Ren L T ed. College Physics Tutorial(2nd ed, 2nd volume). Dongying: Univ. of Petroleum Press, 1999. 482( in Chinese ) ]