

DJ 高等院校“十二五”规划教材

物理学 与工程技术

Physics
and Engineering/Technology

©张世全 主编

陕西师范大学出版总社有限公司

DJ 高等院校“十二五”规划教材

物理学

与工程技术

主 编	张世全	江克侠	白宏刚	李远谋
副主 编	曾俊	曾俊	江克侠	白宏刚
编 者	张世全	薛军	王养丽	曹卫兵
	李远谋			

陕西师范大学出版总社有限公司

内容提要

本书简介物理学原理与工程技术之间的关系,精选若干典型的工程技术课题,高度概括物理学原理的工程技术应用以及工程技术应用的物理基础。全书分为12章,包括:超导技术、微波技术、红外技术、纳米技术、量子通信技术、隐身技术、毫米波技术、太赫兹技术、半导体技术、电磁兼容技术、激光技术、光子晶体技术。本书可供大专院校各类学生和工程技术人员使用,也可作为研究生的辅助参考资料使用。

图书代号 JC12N1135

图书在版编目(CIP)数据

物理学与工程技术 / 张世全主编. ——西安:陕西师范大学出版总社有限公司, 2012. 11
ISBN 978 - 7 - 5613 - 6737 - 7

I. ①物… II. ①张… III. ①物理学 - 关系 - 工程技术
IV. ①O59②TB114

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 245881 号

物理学与工程技术

主 编 / 张世全
责任编辑 / 田均利
责任校对 / 田均利
封面设计 / 鼎新设计
出版发行 / 陕西师范大学出版总社有限公司
(西安市长安南路 199 号 邮编 710062)
网 址 / <http://www.snupg.com>
经 销 / 新华书店
印 刷 / 陕西金德佳印务有限公司
开 本 / 787mm × 1092mm 1/16
印 张 / 11
字 数 / 135 千
版 次 / 2012 年 11 月第 1 版
印 次 / 2012 年 11 月第 1 次印刷
书 号 / ISBN 978 - 7 - 5613 - 6737 - 7
定 价 / 20.00 元

读者购书、书店添货如发现印刷装订问题,请与本社高教出版分社联系调换。
电话:(029)85303622(兼传真),85307826。

前 言

物理学是自然科学的重要基础,物理学原理是工程技术的源泉。一方面,物理学的新思想、新方法和新理论直接引发、推动和影响着现代科技的重大变革,为许多工程技术的实现和交叉学科的发展提供了重要的理论基础、思想方法和技术手段;另一方面,工程技术的各个领域都广泛应用着物理学的有关知识,也为物理学的理论提供了广阔的应用空间。物理学与工程技术的紧密结合,使人类对自然界的认识推进到前所未有的深度和广度。

本书精选若干典型的工程技术课题,高度概括物理学原理的工程技术应用以及工程技术应用的物理学基础。全书分为12章,包括:超导技术、微波技术、红外技术、纳米技术、量子通信技术、隐身技术、毫米波技术、太赫兹技术、半导体技术、电磁兼容技术、激光技术、光子晶体技术。借此简介物理学原理与工程技术之间的关系,打开物理学通向工程应用的大门,开阔读者视野。本书可供大专院校各类学生和工程技术人员使用,也可作为研究生的辅助参考资料使用。

本书第1章、第2章、第6章、第7章、第8章、第10章、第11章、第12章由张世全教授执笔,第4章由曾俊博士执笔,第5章由江克侠博士执笔,第3章由白宏刚讲师编写,第9章由李远谋讲师编写,薛军副教授和王养丽副教授参与了第8章和第12章的编写工作。曹卫兵副教授对全书做了文字的校读工作。全书由张世全教授、曾俊博士、江克侠博士负责统稿。

由于本书涉及知识面广,加之编写时间仓促和作者水平有限,疏漏之处在所难免,敬请读者不吝赐教。

目 录

第1章	超导技术	(1)
第2章	微波技术	(14)
第3章	红外技术	(28)
第4章	纳米技术	(43)
第5章	量子通信技术	(58)
第6章	隐身技术	(72)
第7章	毫米波技术	(84)
第8章	太赫兹技术	(93)
第9章	半导体技术	(102)
第10章	电磁兼容技术	(113)
第11章	激光技术	(125)
第12章	光子晶体技术	(138)
附录一	历届诺贝尔物理学奖简介	(151)
附录二	世界十大经典物理实验	(161)
参考文献	(165)

第1章 超导技术

自1911年昂内斯首先发现汞在4.2K附近的电阻突然消失以来,开拓了一个新的超导物理领域。一个世纪以来,超导技术从理论到实践,从原理到应用,从低温到高温都取得了长足的进展。本章简要介绍超导的物理效应、技术原理、发展历史和实际应用。

1.1 超导基本效应

实验发现,在常温下金属的电阻与温度呈线性关系,在低温下,随绝对温度的五次方线性降低,在接近绝对零度时,某些金属,如汞、钒、铅、铌等的电阻将消失。实验还发现,某些金属合金和化合物在较低温度下电阻也会急剧地下降,直至为零。这种电阻突然变为零的现象称为超导现象。金属或合金从正常态转变为超导态的温度,称为临界温度,用 T_c 表示。

1. 零电阻效应

1911年,荷兰莱顿大学的卡末林-昂内斯意外地发现,将汞冷却到 -268.98 度(4.2 K)时,汞的电阻突然消失,后来他又发现许多金属和合金都具有与上述相似的低温零电阻特性,由于这特殊的导电性能,卡末林-昂内斯称之为超导态。正是这一发现,卡末林-昂内斯于1913年获得了诺贝尔物理学奖。人们把处于超导状态

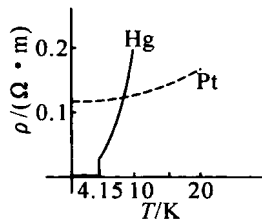


图 1-1 汞和铂的电阻率随温度的变化

的导体称之为超导体。超导体的直流电阻率在一定的低温下突然消失,被称作零电阻效应。图 1-1 中实线示出了温度为 4.2 K 附近汞的电阻率随温度的变化情况,可见在温度低于 4.15 K 时汞的电阻率变为零。作为对比,虚线示出了正常金属铂的电阻率随温度的变化关系。导体没有电阻时,电流流经超导体时就不发生热损耗,电流可以毫无阻力地在导线中形成强大的电流,从而产生超强磁场。对超导体,一旦其内部产生电流后,只要保持超导状态,其电流就不会减小,这种电流称为持续电流。有一次,有人在超导铅环中激发了几百安培的电流,在持续两年半的时间内没有发现可观测到的电流变化。

2. 迈斯纳效应

1933 年,荷兰的迈斯纳和奥森菲尔德共同发现了超导体的另一个极为重要的性质,当金属处在超导状态时,这一超导体内的磁感应强度为零,却把原来存在于体内的磁场排挤出去(图 1-2)。对单晶锡球进行的实验发现:锡球过渡到超导态时,锡球周围的磁场突然发生变化,磁感线似乎一下子被排斥到超导体之外去了,人们将这种现象称之为“迈斯纳效应”。后来人们还做过这样一个实验:在一个浅平的锡盘中,放入一个体积很小但磁性很强的永久磁体,然后把温度降低,使锡盘出现超导性,这时可以看到,小磁体竟然离开锡盘表面,慢慢地飘起,悬浮不动。迈斯纳效应可以用来判别物质是否具有超导性。

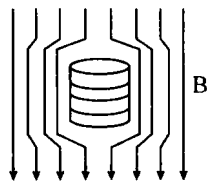


图 1-2 完全抗磁

强磁场可以破坏超导电性。例如,在绝对零度附近,0.042 T 的磁场就足以破坏汞的超导电性。接近临界温度时,甚至更弱的磁场也会破坏超导电性。破坏材料超导电性的最小磁场称为临界磁场,用 B_c 表示, B_c 随温度的变化而变化(图 1-3)。所有超导材

料临界磁场与温度的关系如下

$$B_c = B_c(0) \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^2 \quad (1-1)$$

式中 T_c 为临界温度, $B_c(0)$ 为绝对零度时的磁场。

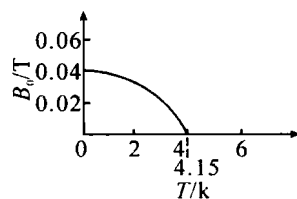


图 1-3 汞的临界磁场随温度的变化

大多数金属超导体排除磁感线的性质有一个明显的分界。在低于临界温度某一温度下,当所加磁场低于临界磁场时,超导体禁止磁感线进入。而一旦磁场高于临界磁场时,这种特性立即消失。具有这种性质的超导体称为第一类超导体。还有一类超导体的磁场性质较为复杂,具有两个临界磁场,当磁场比第一临界磁场低时处于超导态,当磁场介于第一临界磁场和第二临界磁场之间时处于混合态,当磁场比第二临界磁场高时又转入正常态。具有这种性质的超导体称为第二类超导体(图 1-4)。

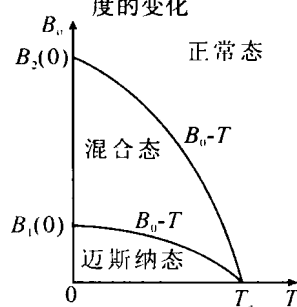


图 1-4 汞的临界磁场随温度的变化

3. 约瑟夫森效应

两块超导体中间夹一薄的绝缘层就形成一个约瑟夫森结(图 1-5)。在约瑟夫森结中,电子对可以通过氧化层形成超导电流的现象称为约瑟夫森效应,亦称超导隧道效应。这与量子力学中的势垒贯穿是类似的。量子力学指出,即使对于相当高的势垒,能量较小的电子也能穿过,好像势垒下面有隧道似的。将超导体放在磁场中,磁场透入氧化层,这时超导结的最大超导电流随外磁场大小作有规律的变

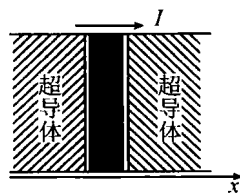


图 1-5 约瑟夫森结

化。约瑟夫森的这一重要发现为超导体中电子对运动提供了证据,使对超导现象本质的认识更加深入。约瑟夫森效应成为微弱电磁信号探测和其他电子学应用的基础。约瑟夫森结的基本方程为

$$I = I_c \sin \varphi \quad (1-2)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{4\pi e}{h} U \quad (1-3)$$

式中 I 为流过结的超导电流, U 为结两端的电压, φ 为结两侧超导电子对波函数相位差, e 为电子电量, h 为普朗克常数, I_c 是结的临界电流。

对(1-3)式积分后代入(1-2)式,得

$$I = I_c \sin \left(\frac{4\pi e}{h} \int U dt + \varphi \right) \quad (1-4)$$

London 方程可以描述超导体的零电阻效应和抗磁性。London 第一方程为

$$\mathbf{E} = \frac{m}{n_s e^2} \frac{\partial \mathbf{j}_s}{\partial t} \quad (1-5)$$

London 第二方程为

$$\mathbf{B} = -\frac{m}{n_s e^2} \Delta \times \mathbf{j}_s \quad (1-6)$$

这两个方程共同组成了超导电流的电动力学。(1-5)式描述超导体的零电阻效应,(1-6)式则描述了超导体的抗磁性。原则上,利用 London 方程可以求出任一超导体内部磁感应强度的分布,其方法是结合边界条件和外加磁场的形式求解微分方程。

London 方程是根据超导体的实验结果建立起来的,它只是对普通电磁方程的限定。由于根据这些定律推导出来的超导电磁行为与实验观察到的结果一致,所以它是正确的。

约瑟夫森结两旁电子波的相互作用可以产生独特的干涉效

应。在约瑟夫森结上加直流电压 U 时,发现结中产生交变电流,而且辐射电磁波。交变电流和电磁波的频率为

$$\nu = \frac{2e}{h}U \quad (1-7)$$

如果用频率为 ν 的电磁波照射约瑟夫森结时,则结两端电压会出现台阶式的变化(图 1-6),电压突变值 U_n 和频率 ν 之间的关系为

$$U_n = n \frac{h\nu}{2e} \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

(1-8)

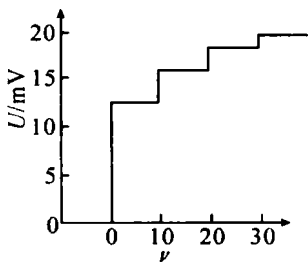


图 1-6 台阶式电压

4. 量子干涉效应

利用并联约瑟夫森结可以产生超导量子干涉,这样一个并联约瑟夫森结装置叫做超导量子干涉仪(SQUID,如图 1-7 所示)。穿过超导环的磁通量是磁通量子 Φ_0 的整数倍时电流最大(图 1-8),即

$$\Phi_n = n \frac{h}{2e} = n\Phi_0 \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1-9)$$

式中, $\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.07 \times 10^{-15} \text{T} \cdot \text{m}^2$

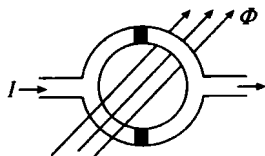


图 1-7 超导量子干涉

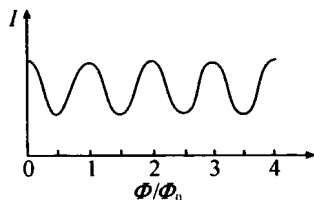


图 1-8 磁通量子

1.2 超导电性的物理解释

1950年,美籍德国人弗茹里赫与美国伊利诺斯大学的巴丁经过复杂的研究和推论后,同时提出:超导电性是电子与晶格振动相互作用而产生的。他们都认为金属中的电子在点阵中被正离子所包围,正离子被电子吸引而影响到正离子振动,并吸引其他电子形成了超导电流。

接着,美国伊利诺斯大学的巴丁、库柏和斯里弗提出超导电量子理论(BCS理论),他们认为:在超导态金属中电子以晶格波为媒介相互吸引而形成电子对,无数电子对相互重叠又常常互换搭配对象形成一个整体,电子对作为一个整体流动产生了超导电流。由于拆开电子对需要一定能量,因此超导体中基态和激发态之间存在能量差,即能隙。这一重要的理论预言了电子对能隙的存在,成功地解释了超导现象,被科学界称作“巴库斯理论”或者简称BCS理论。这一理论的提出标志着超导理论的正式建立,使超导研究进入了一个崭新的发展阶段。

1.3 高温超导

超导现象发现之后,科学家一直在寻求较高温度下具有超导电性的材料,然而到1985年所能达到的最高超导临界温度也不过23 K,所用材料是 Nb^3Ge 。1986年4月美国IBM公司的缪勒(K. A. Muller, 1927)和柏诺兹(J. G. Bednorz, 1950)博士宣布钡镧铜氧化物在35K时出现超导现象。1987年超导材料的研究出现了划时代的进展。先是年初华裔美籍科学家朱经武、吴茂昆宣布制成了转变温度98 K的钇钡铜氧超导材料。其后在1987年2月24日

中科院的新闻发布会上宣布,物理所赵忠贤、陈立泉等十三位科技人员制成了主要成分为钡铋铜氧四种元素的钡基氧化物超导材料,其零电阻的温度为 78.5 K。几乎同一时期,日本、前苏联等科学家也获得了类似的成功。这样,科学家们就获得了液氮温区的超导体,从而把人们认为到 2000 年才能实现的目标大大提前了。这一突破性的成果可能带来许多学科领域的革命,它将对电子工业和仪器设备发生重大影响,并为实现电能超导输送、数字电子学革命、大功率电磁铁和新一代粒子加速器的制造提供实际的可能。目前,中、美、日、俄等国家都正在大力开发高温超导体的研究工作。

目前中国在高温超导材料研制方面仍处于世界领先地位。具体的成果有:钇钡铜氧材料临界电流密度可达 6000 A/cm^2 , 同样材料的薄膜临界电流密度可达 10^6 A/cm^2 。利用自制超导材料可测到 $2 \times 10^{-8} \text{ Gs}$ 的极弱磁场(这相当于人体内肌肉电流的磁场),新研制的铋铅铋锶钙铜氧超导体的临界温度已达 132 K 到 164 K,这些材料的超导机制已不能用 BCS 理论解释,中国科学家在超导理论方面也正做着有开创性的工作。

1.4 超导技术的发展历史

1911 年,卡末林-昂内斯意外地发现,将汞冷却到 -268.98°C 时,汞的电阻突然消失;后来他发现许多金属和合金都具有与上述汞相类似的低温下失去电阻的特性。

1913 年,卡末林-昂内斯在诺贝尔领奖演说中指出:低温下金属电阻的消失“不是逐渐的,而是突然的”,水银在 4.2 K 进入了一种新状态,由于它的特殊导电性能,可以称为超导态。

1932 年,霍尔姆和卡末林-昂内斯都在实验中发现,隔着极薄

一层氧化物的两块处于超导状态的金属,没有外加电压时也有电流流过。

1933年,荷兰的迈斯纳和奥森菲尔德共同发现了超导体的一个极为重要的性质。

1935年,德国人伦敦兄弟提出了一个超导电性的电动力学理论。

1950年,美国伊利诺斯大学的巴丁、库珀和斯里弗提出了超导电性的量子理论(BCS理论)。

1953年,毕派德推广了伦敦的概念并得到与实验基本相符的超导穿透深度的数值。

1960-1961年,美籍挪威人贾埃瓦用铝做成隧道元件进行超导实验,直接观测到了超导能隙,证明了巴库斯理论。他在大量实验中,曾多次测量到零电压的超导电流,但未引起他的重视。

1962年,年仅20多岁的剑桥大学实验物理研究生约瑟夫森在著名科学家安德森指导下研究超导体能隙性质,发现了约瑟夫森效应。

70年代,超导列车成功地进行了载人可行性试验。超导列车是在车上安装强大的超导磁体,地上安放一系列金属环状线圈。当车辆行进时,车上的磁体在地上的线圈中感应起相反的磁极,使两者的斥力将车子悬浮于地面之上。车辆在电机牵引下无摩擦地前进,时速可高达500千米。

1986年1月,在美国国际商用机器公司设在瑞士苏黎世实验室中工作的科学家柏诺兹和缪勒,首先发现钡镧铜氧化物是高温超导体,将超导温度提高到30 K;紧接着,日本东京大学工学部又将超导温度提高到37 K。

1987年1月初,日本川崎国立分子研究所将超导温度提高到43 K;不久日本综合电子研究所又将超导温度提高到46 K和53

K。中国科学院物理研究所由赵忠贤、陈立泉领导的研究组,获得了48.6 K的铌镧铜氧系超导体,并看到这类物质有在70 K发生转变的迹象。

1987年2月16日,美国国家科学基金会宣布,朱经武与吴茂昆获得转变温度为98 K的超导体。

1987年2月20日,中国也宣布发现100 K以上超导体。1987年3月3日,日本宣布发现123 K超导体。

1987年3月12日,中国北京大学成功地用液氮进行超导磁悬浮实验。

1987年3月27日,美国华裔科学家又发现在氧化物超导材料中有转变温度为240 K的超导迹象。

1987年12月30日,美国休斯敦大学宣布,美籍华裔科学家朱经武又将超导温度提高到40.2 K。

1987年,日本铁道综合技术研究所的“MLU002”号磁悬浮实验车开始试运行。

1991年3月,日本住友电气工业公司展示了世界上第一个超导磁体。

1991年10月,日本原子能研究所和东芝公司共同研制成核聚变堆用的新型超导线圈。该线圈电流密度达到 40 A/mm^2 ,为过去的3倍多,达到世界最高水准。该研究所把这个线圈大型化后提供给国际热核聚变堆使用。这个新型磁体使用的超导材料是铌和锡的化合物。

1992年1月27日,第一艘由日本船舶和海洋基金会建造的超导船“大和”1号在日本神户下水试航。超导船由船上的超导磁体产生强磁场,船两侧的正负电极使水中电流从船的一侧向另一侧流动,磁场和电流之间的洛伦兹力驱动船舶高速前进。这种高速超导船直到目前尚未进入实用化阶段,但实验证明,这种船舶有可

能引发船舶工业爆发一次革命,就像当年富尔顿发明轮船最后取代了帆船那样。

1992年,一个以巨型超导磁体为主的超导超级对撞机特大型设备,于美国得克萨斯州建成并投入使用,耗资超过82亿美元。

1996年,改进高温超导电线的研究工作取得进展,制成了第一条地下输电电缆。欧洲电缆巨头皮雷利电缆公司、美国超导体公司和旧金山的电力研究所的工人,共同把6000米长的铋、锶、钙、铜和氧制成的线缠绕到一根保持超导温度的液氮的空管子上。

2001年4月,340米铋系高温超导导线在清华大学应用超导研究中心研制成功,并于年末建成第一条铋系高温线材生产线。

2001年5月,北京有色金属研究总院采用自行设计研制的设备,成功地制备出国内最大面积的高质量双面钇钡铜氧超导薄膜,达到国际同类材料的先进水平。

2001年7月,香港科技大学宣布成功开发出全球最细的纳米超导导线。

目前,我国超导临界温度已提高到零下120℃即153 K左右。

1.5 超导的应用

超导材料具有的优异特性使它从被发现之日起,就向人类展示了诱人的应用前景。但要实际应用超导材料又受到一系列因素的制约,这首先是它的临界参量,其次还有材料制作的工艺等问题(例如脆性的超导陶瓷如何制成柔细的线材就有一系列工艺问题)。超导材料的应用主要包括以下几个方面。

1. 制作磁体

超导在技术中最主要的应用是做成电磁铁的超导线圈以产生

强磁场。这项技术是近 30 年来发展起来的新兴技术之一,在高能加速器、受控热核反应实验中已有很多的应用,在电力工业、现代医学等方面已显示出良好的前景。传统的电磁铁是铜线绕组和铁心构成的。尽管在理论上可通过增加电流来获得很强的磁场,但实际上由于铜线有电阻,电流增大时,发热量要按电流的平方的倍数增加,因此,要维持一定的电流,就需要很大的功率。而且除了开始时产生磁场所需要的能量之外,供给电磁铁的能量都以热的形式损耗了。为此,还需要用大量的循环油或水进行冷却,这也需要额外的功率来维持。因此,传统的电磁铁是技术中效率最低的设备之一,而且形体笨重。与此相反,如果用超导线做电磁铁,则维持线圈中产生强磁场的大电流并不需要输入任何功率。同时由于超导线(如 Nb^3Sn 芯线)的容许电流密度(10^9 A/m^2 ,为发热熔化所限)大得多,因而导线可以细得多;再加上不需庞大的冷却设备,所以超导电磁铁可以做得很轻便。例如,一个产生 5 T 的中型传统电磁铁重量可达 20 T,而产生相同磁场的超导电磁铁不过几千克!

2. 超导输电

超导材料还可能作为远距离传送电能的传输线。由于其电阻为零,当然大大减小了线路上能量的损耗(传统高压输电损耗可达 10%)。更重要的是,由于重量轻、体积小,输送大功率的超导传输线可设在地下管道中,从而省去了许多传统输电线的架设铁塔。另外,传统输电需要高压,因而有升压、降压设备。用超导线就不需要高压,还可不用交流电而用直流电。用直流电的超导输电线比用交流的要便宜些,因为直流输电线可以用第二类超导材料,它的容许电流密度大而且设计简单。

3. 制作通信电缆和天线

利用材料的超导电性可制作通信电缆和天线,其性能优于常规材料。超导材料(如 NbTi 合金或 Nb³Sn)都很脆,因此做电缆时通常都把它们做成很多细线嵌在铜线内,并且把这种导线和铜线绕在一起。这样不仅增加了电缆的强度,而且增大了超导体的表面积。这后一点也是重要的,因为在超导体中,电流都是沿表面流通的,表面积的增大可允许通过更大的电流。另外,在超导情况下,相对于超导材料,铜是绝缘体,但一旦由于制冷出事故或磁场过强而使超导性破坏时,电流仍能通过铜导线流通。这样就可避免强电流(10⁵ A 或更大)突然被大电阻阻断时大量磁能突然转变为大量的热而发生危险。

4. 测量磁场

利用超导量子干涉仪可以非常精密地测量磁场。

5. 磁悬浮列车和超导船

利用超导材料的完全抗磁性可制作无摩擦陀螺仪和轴承。可以用此原理制造磁悬浮列车和超导船,由于这些交通工具在悬浮无摩擦状态下运行,这将大大提高它们的速度和稳定性,并有效减少机械磨损。利用超导悬浮可制造无磨损轴承,将轴承转速提高到每分钟 10 万转以上。超导列车已于 20 世纪 70 年代成功地进行了载人可行性试验,1987 年,日本开始试运行。超导船已于 1992 年 1 月 27 日下水试航,目前尚未进入实用化阶段。

6. 制作测量仪表和电子器件

利用约瑟夫森效应可制作一系列精密测量仪表以及辐射探测