

超导科学技术展望¹⁾

甘子钊

(北京大学物理系,北京 100871)

本文概述了对今后十年左右超导科学技术发展的展望。

自从1911年发现超导现象以来,超导的研究和应用开发经历了几个阶段。1911年到30年代中期是发展的前期阶段,这段时期中人们认识了最基本的超导现象,并且开始认识到超导现象的本质是一种宏观尺度的量子现象。发展的第二个阶段是从30年代中期到50年代中期,研究工作集中在认识超导的物理机理。结果是在50年代中期建立了基本正确的超导现象的微观理论。这是现代凝聚态物理的一个最重要的胜利,它不仅基本正确地说明了超导现象的物理本质,而且对整个凝聚态物理以至于整个物理学的学科发展,产生了巨大的影响。从50年代中期到1986年高温超导氧化物材料的发现,是发展的第三个阶段。从学科上说,这个阶段的主要成就是在继续完善超导的微观机理的认识的基础上,发展了第II类超导电性的物理和发现了约瑟夫森效应,发展了弱连接超导物理。在第II类超导电性的物理和弱连接超导物理的基础上,从60年代到80年代,超导已发展成为一门有一定规模的应用科学技术,有了相应的工业部门。1986年下半年,发现了高温超导氧化物材料,开始了超导研究发展的一个新阶段。经过四年的努力,从学科发展来说,多数的科学工作者都会同意,高温超导电性就其本质来说,仍是配对电子的量子凝结,唯象的描述是与传统的超导体大致相似的;几乎所有在传统超导体中最主要的物理效应,都在高温超导体中得到证实。因此,对传统超导体提出的各种实际应用的设想,都有可能对应到高温超导体。但是,虽然已进行了广泛的实验的和理论

的摸索,目前对高温超导电性的物理机理,还没有一个公认的比较合理的理解。对高温超导电性的唯象描述,也还有一些不清楚的重要问题。如果从实际应用的角度,怎样能得到既有足够好的载流能力而又能按实用要求成型的高温超导材料,怎样制备弱连接高温超导结,怎样按发展电子学应用的要求制备和加工高温超导的有源的和无源的器件等等,则尚有许多物理、化学、材料科学和工艺技术的困难问题有待解决。经过四年的努力,多数科学工作者现在都相信,十年或更长一些时间内,高温超导的研究和应用开发会有巨大的进步。学科将会趋于成熟,大电流应用和电子学应用都会有根本性的进展。

对超导科学技术这样一个正在迅速发展,学科上还没有成熟的领域作预测是困难的。例如,我们就难以预料今后几年会不会发现临界温度远高于已有的高温超导材料的新材料,如果发现了这样的新材料,整个领域的发展就会有很大的变化。

1. 高温超导电性的物理研究将是今后一段时间内凝聚态物理中的一个起带动作用学科领域

四年来围绕高温超导电性的物理研究已发表了近万篇科学论文。虽然对它的微观机理还没有得到令人满意的理解,对它各方面的物理性质也还有一些重要的不清楚的问题,但是通过这些工作,人们都会同意:高温超导电性涉及的是凝聚态物理发展中一些带原则性的问

1) 本文摘自作者《关于我国超导科学技术发展的战略设想的汇报》。

题。高温超导材料是从被叫做莫特绝缘体这一类材料衍变出来的系统，这是一类与典型的金属、半导体等有原则区别的材料。高温超导体中正常-超导的转变是和它的磁性转变、金属绝缘体转变紧密相联系的，这些转变都反映了准二维强关联电子系统的特点。高温超导材料中杂质、缺陷和各种非均匀性起着十分重要的作用；由于短的相干长度和强的各向异性，高温超导体的第II类超导电性与弱连接超导电性表现出许多特点；在理论处理上，有关高温超导电性的问题又可能与当代规范场理论的概念与方法有紧密联系。因此，虽然从发表文章的数量上近一年有关高温超导电性的物理研究明显有所下降，但从深度和系统性上却显然提高了。估计今后十年从学科发展上说，高温超导电性的研究将趋于成熟，而在这过程中将推动整个凝聚态物理学的发展。

2. 高温超导材料的研究将对材料科学的发展起推动作用

最初两年关于高温超导电性物理研究中遇到的某些令人困惑的问题，在最近两年被证实是由于样品质量产生的。进一步发展高温超导电性的物理研究，一定程度上依赖于获得高质量的材料。高温超导电性的应用开发的关键就在于改进现有的材料工艺，发展新的材料工艺，以及对材料的微结构和超导电性的关系的深入研究。发展高温超导材料面临的材料科学问题是与发展传统超导材料和发展其它的功能陶瓷材料有原则性的不同的。短的相干长度和强的各向异性，加上高温超导材料对化学比、杂质、缺陷等的敏感性，使这些问题更加复杂。材料工艺这几年也已从开始时比较“土”（用一般技术）向比较“洋”（用较高级的技术）的方向发展，设备、环境、原材料的要求越来越高了，估计这个趋势会在今后几年更加加速。

3. 超导材料实用化前景

今后十年左右有可能实现在液氮温度下，载流能力相当于液氮温度下一般档次的 NbTi 线水平的实用化超导材料，这将对工业生产、国防技术和科学实验中那些要用到大电流的技术

物理

带来巨大的作用和效益。

超导电性最诱人的应用设想是它的大电流应用。但在高温超导发展的初期，不少人对高温超导体能否有实用意义的载流能力，是有怀疑的。经过四年的努力，应该说这种怀疑已从实践上和从学科上被证明是不该有的。我国用熔融织构法制备的钇系超导材料，77K 下在 5T 的磁场中临界电流密度超过 $2 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ ；在用中子辐照过的样品中，77K 下零场临界电流密度超过 $25 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ ，这个水平已接近实际应用的要求。通过几年的发展，对提高高温超导体的载流能力所牵涉到的超导物理问题和材料科学问题也有了较深入的认识。对解决这些问题的原则也已比较明确。虽然，关于高温超导体中临界电流的物理机制还有许多不清楚的地方，从实用化的角度，除临界电流密度的要求外还有许多其它的要求，关于这些要求的研究还很不够，但现在人们在高温超导电性的大电流应用上普遍乐观了。流行的看法是，十年左右能制备出 77K 下，5T 磁场中临界电流密度超过 $10 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ 的实用化线材、缆材或带材。这个水平大致上相当于最广泛使用的传统超导材料 NbTi（它当然是在液氮温度下工作的）的中、低档水平。有这个水平，在磁体、零场大电流传输、无源的电工元件等方面的应用便可以考虑了。

4. 高温超导电性在电子学上的应用在今后十年中可能发展到的规模

超导电性在电子学上的应用有许多优点。自从发现高温超导电性后，开拓它在电子学方面的应用是一个主要的努力方向。目前高温超导薄膜技术已获得较好的结果，制备高温超导结的探索正在进展。电子学应用的可能性很多，十年内估计下面三个方面是最重要的。

(1) 超导量子干涉器件 (SQUID) 在电磁测量上的应用

用液氮温区 SQUID 代替电磁感应法测量地磁，在 2—3 年以内会有实际效果。实验室用的 SQUID 电磁测量仪器也会在 5—10 年内有一定规模。生物磁效应上的应用也是可以指望

论物理学定律的本质¹⁾

人们很可能同时持有两种完全不相容的观念,一方面我们在不断地坚持牛顿力学规律,另一方面我们中多数人在交往中利用过例如骰子这一类东西。

物理学规律的本质就在于:它的普遍性不仅不断地被直接为它们精心设计的实验,而且由整个物理学结构的一致性证明是正确的和协调的。由宏观物体决定的动力学,仅仅是物理学定律中的(能最好地被证明的)一个。以娱乐和赢利为目的的,轮盘赌球的轨迹是确定的,这已

的。

(2) 高温超导电性在微波技术上的应用

高温超导微波无源器件几年内将会有实际应用。随着制结技术的进步,部分微波有源器件也可利用高温超导电性。天线、谐振腔等也会开始应用。微波技术的应用估计会首先在卫星通信、军事技术上使用。

(3) 液氮 MOS 电路中采用高温超导体

估计 90 年代美、日等国的大规模集成电路技术将进入 $0.5\mu\text{m}$ 尺度。在这个尺度,电路应该在液氮下运用才能发挥其优点,而且互连的电阻将成为进一步改进器件性能的重要问题。如果在液氮 MOS 电路中应用高温超导材料作互连,将对电路性能有很大改进。人们猜测,美、日等国将在 90 年代解决这个技术问题。

5. 低温超导电性的研究和开发

低温超导科学技术的进一步发展与高温超导科学技术发展的问题在性质上是有区别的。从学科上说,传统超导电性是比较成熟的,目前国际上有一些活跃的方面,如重费米子超导体、有机超导体、小尺度约瑟夫森结和列阵约瑟夫森结和超晶格的超导电性等,从基础研究的角度是有意义的,但总的来说,从学科发展的角度不像高温超导电性面临的问题那样鲜明与有原

被几个自称为幸福主义者的当今杰出的物理学家非常彻底和直接地证明。但是,更严格的证明是每天通过我们的仪器和技术的内部的动力学所作出的。利用约瑟夫森(Josephson)和克里津(Klitzing)所发明的现代量子技术,我们能够使基本常数的测量精确到 $10^{-7}-10^{-8}$;运用先进的毫秒脉冲校时仪,我们可以把时间的测量比上述精确度再提高六个数量级。每一个这样精密的测量都是决定论的动力学的一个胜利,在 LEP²⁾ 中以难以想像的高准确度使正、

则性。从应用开发上说,低温超导技术正在稳步发展,相应的材料工艺、器件工艺、设计运用和数值模拟等方面也基本成熟,在具体地深入发展。市场需求的情况看来也相对平稳,一般相信能有每年 10—20% 的需求增长。估计今后十年的情况大致是:

(1) 超导磁体还将是最大量的应用,但看来不会有急剧的增长,使用的材料与工艺技术也不会有重大的变化,也许在高场磁体方面高温超导材料低温使用是一个可能的较大的发展,但还看不准;

(2) 在发达国家中会再上马一些使用低温超导的重大科学工程项目,市场上对超导材料的需求会随每个大工程的上马而有起落;

(3) 低温超导电子学会有较大的发展,由于制备结的技术和大规模集成电路的技术相结合,会推出一些新的超导电子产品,开拓一些新的应用方面,但还不能肯定会有大的市场需求。

应该强调,那种以为高温超导应用的发展会完全代替低温超导的应用的看法是不正确的。在一系列重大科学工程项目上,在科学实验室用的仪器设备上,低温超导还将有一定规模的应用并将持续地发展。