

# 超导电性的研究现状和前景

M. Tinkham

(哈佛大学物理系)

M. R. Beasley

(斯坦福大学应用物理系)

D. C. Labalestier

(威斯康星大学材料科学中心)

A. F. Clark

(国家标准局电磁技术部)

D. F. Finnemore

(依阿华州立大学物理系)

1983年8月22—23日在美国科罗拉多州铜山市召开了“超导专题讨论会”。在这份讨论会的报告中指出了超导电性的研究现状和前景,概述了基本物理学、材料和器件等三个方面中超导电性的关键问题,介绍了这个比较花钱的研究领域发展中的障碍以及该领域对新设备的需求。

## 一、引言

影响超导科学发展的原因并不是由于缺乏新思想,而是由于缺乏一贯的支持以及缺乏某些重要的新设备。这些设备是用来制备材料和检验它们的物理结构,为进一步的基础研究和促进技术的发展提供必要的条件。当前,有些国家在对基本问题的理解能力方面和技术力量方面都提高很快。为了维持美国在这个领域中的地位,使近期的及长远的技术进步得以实现,就需要有一项长期的、基础广泛的、多方面的支持。可能超导电性并不是唯一提出这种要求的领域,但这绝不会使情况减少任何紧迫性。

超导已是一项可供应用的技术。最近,国家加速器实验室启动了在Tevatron加速器中的1000多个6m长的超导磁体,这将使美国在高能物理方面居世界前列,同时将每年为国家节省五百万美元的电费。利用超导磁体才成为可能的人体核磁共振仪刚刚发挥出它在医学诊

断中的作用,并且预计两年后将作为20亿美元的大工业。超导微电路作为一种世界上最灵敏的电磁仪器,从直流到远红外频率,它们的灵敏度接近了测量的量子极限。超导电路的高速信息处理性能超过了与它竞争的其他技术。

超导又是一种未来的技术。超导磁体在磁约束等离子体受控热核聚变方面的必不可少的作用是众所周知的。未来的超快速计算机最终必须要在低温下工作,而且几乎肯定会在某种形式上包含超导在内。这样的信念,绝不会因为美国最近缩减了工业规模的约瑟夫森结计算机的研究而受到削弱。

超导电性正产生出一股新思潮。这些新思潮预示着未来发展的重要前途。三元化合物、人工结构材料、非均匀超导体、有机超导体、以及各种类型的超导器件结构等所呈现的现象预示着对新科学的一种深远的潜力。当超导扩展了它的极限时候,它将有更广泛的应用。

超导是研究许多科学领域中的现象的独特工具。超导具有独特的能力,能以简单的外部测量来检验基本的内部机制,从而了解基本的物理问题和材料科学问题。此外,超导仪器提供了独特的灵敏方法来做许许多多的物理测量。

尽管有这样的进展和前途,许多在超导研究界的科学家仍感到需要对超导研究和发展问题给予更明确的注意和关心。在这一领域要付

出的代价会非常高，因此适当的投资已变成国家性的议题。作为这一方向的一个步骤，举行了关于超导问题的专门讨论会，会上着重研讨了以下几个问题：

(1) 提出了今后五至十年里超导研究的关键问题；

(2) 决定了哪些是需要花费人力、物力最大的研究领域；

(3) 找出了目前限制超导研究发展的因素，并讨论了在哪些领域里，可能取得突破。

(4) 研究了假若新的设备或技术可以得到的话，可能提供哪些研究课题。

此报告是超导界的三十六位代表在一天半的会议中热烈讨论的简要结果。

## 二、基本物理学

超导体基本物理学的发展前景可分为两类：(1)内部发展，即对超导现象本身的科学理解；(2)外部推动，超导作为独特的工具在其他科学领域中发挥着重要作用。我们将其中的某些内容概要地在以下几节中叙述，同时还将讨论用什么办法来克服发展中的障碍。

### 1. 超导科学的内部发展

当前最活跃的研究领域之一是非平衡超导电性，即研究超导体对外部扰动的响应。在这一领域里已取得了很大的进展，特别是在偏离平衡态不太远的线性范围内，进展就更大了。例如，已经分析了正常和超导电子之间的那种独特的“电荷不平衡”型的非平衡态，其标志就是在同一金属体积中存在着两个不同的、可以测量到的电势。然而一个非常突出的问题是超导双金属回路中热电产生的磁通线，观察到的效应比理论预言的大一个数量级，并具有完全不同的温度关系。理论和实验之间的偏离提出了几年来一直未能解决的难题。为了解决这一问题，需要新的思想。

一般地说，这一领域的前沿是在远离平衡的区域，在那里线性响应近似已不适用了。一个例子是瞬态超导性的研究，即将一个超过临

界值的电流脉冲加在一个超导细丝上，来研究此超导体向正常态转变的演变过程。由于电子-声子弛豫时间所决定的这一特征时间非常短，为得到高电压灵敏度下所需要的10ps的时间分辨率，必须采用Fairs超导取样电路（基于IBM的计算机技术基础）。过去日本报道了一个更快的电路。第二个例子是用强正常电子隧道注入使超导体远离平衡态，来研究超导态的不稳定性。日本人的工作表明存在着一个自发地分裂为空间不均匀（其线度为 $\sim 100\mu\text{m}$ ）的二能隙态。这一现象至今尚未得到满意的解释。然而，这类电子注入的非线性效应是一种被称为“Quiteron”器件的超导三极管的基础。这类问题中都存在很大的热流，所以就要求采用那些能描述薄膜与衬底之间边界卡皮察热阻的特征的新技术，以便对这些耗散现象给出可信的分析。尤其是当非平衡实验合乎希望地扩展到 $T \ll 1\text{K}$ 区域时更需要。

在理论方面，微观理论（而不是数字模拟）现在只限制在非常靠近转变温度 $T_c$ （即能隙 $\Delta \ll kT$ ）和声子的非平衡分布可以忽略的情况下。在典型的实验条件下，这两个限制都不成立。有效的（即容易处理的并且仍然是严格合理的）延伸Schmid-Schön的理论到较宽的范围，这将代表重大的进展。

除了非平衡超导性外，超导阵的研究是方兴未艾的活跃领域。这种规矩矩制作的结构，包含约 $10^6$ 个超导元件，排列成二维的阵，元件间借助约瑟夫森效应（S-I-S或S-N-S）弱耦合在一起。研究这种结构，以观察岛上的超导波函数的位相是如何最终锁定为一个整体的位相相干态。这是Kosterlitz-Thouless均匀薄膜中涡旋线解束缚转变的分立模拟。由于这是分立的结构，磁场下的电阻转变是被周期地调制了。这个周期对应于在阵的每个原胞中加入一个磁通量子。当规则的超晶格中的磁通量子数和原胞数是有理分数的关系时，观察到了谐波结构。这类现象的研究不论在理论或实验上仍处在初期阶段。但已显露出在这个领域可能发现一些重要的新现象。

另一类重要的进展是人们不断加深对超导和其它现象间相互作用的理解。超导电性和磁性之间的相互竞争已有很长的研究历史,但新的分支仍不断地被发现。一个非常重要的新发展是超导和局域化之间的相互作用,以及无序金属中修正了的电子间相互作用的研究。例如,它提供了 Anderson 定理不成立的解释。这个定理说,无序对  $T_c$  的影响非常微小。当局域化长度变得小于超导相干长度,或当由于屏蔽减弱的结果,排斥的库仑作用增加时,Anderson 定理即不成立了。从而可以解释受辐照损伤的超导体的  $T_c$  (临界温度) 明显降低。实际上,关于脏的超导体的全部理论都应当修正,以包含这些新观点。 $T_c$  以上磁导现象的研究,由于考虑到局域化效应,对从前的“自由的”参数,如自旋-轨道散射率,也提供了一个独立的确定方法。同时,对  $T_c$  上下金属的电子性质也提供了全面的了解。尽管目前还没有得到详细的结果,但对材料接近于作为宏观样品的电连续性的渗流阈值时,超导性是怎样被修正,是另一个“界面”领域。在这方面大量的新东西似乎很容易抓到。

最后,我们扼要地谈一下有关计算材料特性的问题,特别是从微观的电子理论来计算  $T_c$  的进展和前途。目前,在给出经验的声子谱后,对简单材料在计算  $T_c$  方面,能带理论已是足够好的了。随着计算能力的增长,有可能完全从头开始进行精确的电子计算,以决定力常数(它决定于电子能量的导数),从而决定出声子谱和  $T_c$ 。事实上,对结构简单的材料,赝势方法最近的进展已基本达到了这一阶段。同样的计算还提供了从理论上预言相图的基础,其中包括很重要的向高压相的延伸。在这方面,理论家和材料科学家在寻找新材料方面富有成效的合作应当变得可能了。随着研究工作的进展,新型的超导体可能很快地被提出来。虽然提出一个不同于电-声子耦合的“奇异”的耦合机制会带来困难,可是最后还是有了某些进展,特别是发现了制备隧道势垒的通用方法。进一步的研究是完全值得的。新超导电性机制的实验证

明,将是一个具有伟大意义的发现。

## 2. 作为独特工具的超导电性

由于超导态是宏观量子态,它提供了一个符合量子理论的最灵敏的测量及研究基本量子问题的独特工具。另外,超导电性还提供了研究统计物理学中其他问题的很有吸引力的试验园地。现将当前最吸引人的应用的例子讨论如下:

目前用超导电性来进行研究的最新颖的问题之一是宏观量子隧道(MQT)以及有关的宏观量子相干问题。研究的问题是,量子力学中支配微观粒子运动的规律能否被直接用到代表巨大数目粒子的宏观量上去,这些粒子通过阻尼力与热池发生作用;特别是宏观量,如超导位相  $\phi$  (它描述着  $\sim 10^{23}$  个超导电子的状态)能否通过一个能量势垒“隧道”到另一个能量上被允许的  $\phi$  值上去,以及隧道几率能否利用对初等量子理论中的经典隧道问题所作的较简单的模拟来加以计算。理论家们已经做了详细的分析,认为以上问题都是肯定的。而实验的情况却混乱得多。与理论符合的有关轻阻尼的约瑟夫森结的实验已经报道过了。而对重阻尼的约瑟夫森结,理论和实验之间存在着超出了误差范围的定量分歧。即使在与理论明显符合的负阻尼情形下,其他科学家也持怀疑态度。现有的数据确实还非常有限,实验也确实极其困难。因为不仅样品必须冷却到非常低的温度(典型的为 10mK 左右)以压制所有的热激活过程,而且所有外来的电噪声也必须被排除掉。由于这个问题的重要性,以及有一个共同的见解——约瑟夫森器件构成了一个最有希望的试验系统,切实地解决这一问题做进一步的实验是值得的。

第二个基本问题是量子噪声。Johnson 噪声是与热池交换能量而产生的。然而量子噪声与量子力学零点振动能(每个振子自由度有  $\frac{1}{2} \times \hbar\omega$  的能量)相联系。在高频下,通常称为光子散粒噪声。对低频器件它又给出了灵敏度的极限。只有超导电子器件才具有可达到这一极限的足够低的内禀噪声。事实上,几个实验室已

经制成了能量灵敏度(以  $\Delta E \Delta t$  为单位)为普朗克常数 ( $h$ ) 量级的 SQUID (超导量子干涉器件), 不过尚无商品。假如工程方面的支持和制造设备都现成的话, 这类器件将会扩展以至产生一个范围宽广的量子极限的检波器、放大器和混频器。这些器件可以工作在从直流到亚毫米波长范围, 甚至大地磁声以及磁性普查法中所用的普通 SQUID 器件已对地球物理勘探产生重大影响, 达到量子极限更灵敏的 SQUID 将在引力波探测器的使用中起关键作用, 从而触及物理学中另一个非常时髦的又是长期未得解决的问题。或许基于超导电子学的“量子不破坏”器件, 最终将达到超过测不准原理给出的极限灵敏度。不过这要等到将来全部测量系统都达到量子极限之时。其他一些基于 SQUID 独特灵敏度的基础研究, 包括长期准备的斯坦福大学的回转-相对论实验, 以及最近 Cabrera 对可能是磁单极穿过以 SQUID 为基础的超导探测器所进行的直接观察。现在, 几个实验室正在研制一种比 Cabrera 的原始装置更为高级的装置, 以便将来万一磁单极的事件被检测时能给出确切的印迹。不单是基于约瑟夫森效应的器件, 还有那些基于通常的二超导体之间的准粒子 (Giaever) 隧道器件, 都有用做辐射探测器的极大可能。事实上, 与超导能隙相联系的电子态密度的锐结构, 使 S-I-S (以及 S-I-N) 隧道器件成为红外天体物理中最理想的量子极限噪声毫米波检测器, 从而不断得出一些令人激动的新结果。这类隧道结又是非常有前途的新兴固体光谱技术的基础, 不管是对于隧道势垒中的分子, 还是势垒两侧金属的光谱, 都可通过外加一个电压, 测定发射出的电子和声子的能量的办法来测定。

除了实践上要达到量子噪声范围这一动机之外, 还存在关于系统的量子噪声性质等一些一直未得到解决的问题。例如, 约瑟夫森结  $I-V$  关系高度非线性, 以及高度非线性的电抗性响应等。通常用简化的 RSJ 模型对这类器件所作的分析不能说明这些问题, 不过这些模型在分析实际器件的性能方面也起到了直接的作

用。已经得到了预期的高电压下电子散粒噪声的初步数据。但是在与离开零电压态跃迁相联系的低电压范围, 不论在理论上还是在实验上仍然是个完全没有解决的问题, 只有热激活过程明显地占主导地位时是例外。对上述问题作出严格的理论处理的尝试, 象处理一般情况下的量子噪声问题一样, 非常难于作具体分析, 似乎需要一些新思想以给出可用的数学公式, 同时也需要  $T < 1K$  下更进一步的实验, 以便为检验这些理论提供适当的数据基础。

超导电性的第三个普遍应用是测定基本物理常数。约瑟夫森频率关系已对  $h/e$  给出了最精确的确定, 所以可以反过来用它去定义电压标准。结合由新近发现的量子霍尔效应得出的  $h/e^2$  精确值, 从而可以独立地精确确定  $h$  和  $e$ 。而且借助 SQUID 来测量一个转动着的超导体中 (“London 动量”) 感应的磁通, 有人获得了  $h/m$  的测量值,  $m$  是包含了相对论修正的电子质量。这些测量还处于初级阶段, 但已对金属中的传导电子的波函数给出了有意义的检验。

作为超导电性的最后一类应用, 我们给出一个例证, 以说明超导电性作为试验园地检验统计物理学中其它一些重要概念上的应用。在上一节中, 我们已经谈到了从利用超导阵证明二维超流系统中开始耗散的 Kosterlitz-Thouless 模型的正确性过程中, 出现的一些令人激动的新结果。这个模型原是对中性超流系统提出的。相似的实验已经在名义上同样均匀的超导薄膜上完成, 对  $K-T$  预言给出了更为精确的类似验证。只是最近一些实验, 开始毫无疑问地表明, 观察到了这个模型的一些预言, 而且当新的实验做完后, 一些更新的分支又不断暴露出来, 利用周期超导阵中的磁通量子, 研究理论上讨论的公度与非公度转变, 也是处在萌芽阶段, 还有大量的工作要做。

最后, 提一下当前正在进行的关于约瑟夫森器件中“混沌”或“湍流”方面的研究工作。这是当前统计物理学中一个非常热门的课题。因为它清楚地阐明了只有少数几个自由度的决定

论的经典系统中“混沌”的来源。结果，在许多系统中从物理上和计算上研究了这个问题。由于约瑟夫森器件的简单性，并且已经过透彻的研究，所以它仍是特别有吸引力的对象。除了这一广泛的、基本的意义之外，约瑟夫森结中的混沌现象是过量噪声的一个明显的来源，它比热噪声高六个数量级，必须对此有很好的了解，才能在电磁检测器和国家标准局保持的电压基准方面约瑟夫森器件的许多应用中避免混沌现象。

### 3. 前进中的障碍

从根本上说，上述所有领域的发展不是受目的性限制，而是受缺乏现代化的仪器和设备的限制，尤其是缺乏用来制备和初步检验薄膜超导体、隧道结和其他器件结构的主要设备。由于在这一点上，超导电性的基本物理研究与其他方面研究的要求是重叠的，所以对此我们只给以简单的叙述，以避免重复。总的说来，可以提出两点要求：为了进行研究需要微观检验设备和样品制备设备（至于为了应用研究的设备，我们将在本报告的器件一节中给予讨论）。

很清楚，为了对超导体微观性质和过程进行研究，要求对其化学组分和结构有深入的了解。能够给出这些信息的、不断发展的有力分析工具是存在的，但对超导界来说，必须使这些仪器成为现成可用的。这些东西很昂贵，不过在很多情况下可以共用，或作为主要设备的一部分来使用。如果说这些工具是创造过程的组成部分，那么根本的问题是能方便地、重复地使用这些工具。在某些情况下，还需要捐赠一些仪器设备。

所谓用于研究的制备技术，意味着许多单位都能研制出典型系统和实验结构，以便使性能达到新水平，探索新效应，或将已知的技术发展成一类专门的实验应用。不需要特别详细地了解系统的微观结构（如隧道结），只要所要求的特性合理地重复达到即可。这样可放宽对分析仪器的要求。不过这就要求微制备技术达到亚微米水平的分辨率。这包括蒸发镀膜、溅射设备、掩膜装置、光刻或电子束刻蚀设备以及

超净室等。每个这样的实验室约需几十万美元。这些设备现成可用，不但会使许许多多实验得以进行和发展，而且将为那些对未来各种微电子学有兴趣的研究生们提供很重要的教学环境。

## 三、材 料

根据要求的性能合成超导材料，根据要求的电子学性能制造超导器件，这种能力对超导科学和超导技术来说都是基本的。对实用的或可能成为实用的超导材料的理解上的进展，通常都转变成改进工艺性能。这种进展对实际应用来说常常是关键性的。同时，合成新的或有优良性能的超导体，为科学和技术上的先进材料开辟新的领域，况且探索新的和性能改进的超导材料一直包含着发展最前沿的合成技术和工具，而后者的发展又扩展了冶金和材料科学的领域。

同等重要的是这些材料要具有合适的性质。为了应用而优化材料，为了对材料的物理性能有合理的解释，至少要对所研究的材料的原子成分、晶体结构以及冶金学上的微观结构有详细的了解。还需要有更详细的知识，例如表面和界面，尺度精细的组合材料的几何形状，错综复杂的微电路以及非均匀超导材料等。它们在超导电性中起着愈来愈重要的作用。

### 1. 薄膜合成及新超导材料

#### (1) 薄膜合成

在最近的将来，最重要的合成技术，是基于蒸发淀积的薄膜合成技术。这种技术在超导材料的研究和发展中所具有的能力和适用性已被证明。尽管许多新的进展是用已有薄膜合成技术得到的，还必须使那些最新最好的工具成为现成可用的。

例如，由于超导电子学本身的薄膜性质，它苛刻地依赖于薄膜合成技术。最近做成的非常可靠的以铌为基础的电路，可经受无数次冷热循环的考验，就是用了这种新的薄膜技术。同样，高  $T_c$  超导电子学也有所进展。薄膜合成还

是获得新材料的有力手段。已知的转变温度最高的超导体  $Nb_3Ge$ , 最先是利用薄膜技术发现的。薄膜合成的灵活性和多样性, 使得它便于产生出材料研究或物理研究的典型系统。例如, 最近用性能非常好的薄膜样品, 详细地研究了  $Nb_3Sn$  的超导性质与结晶学有序, 或与第三添加元素的关系, 从而为最近能实用的  $Nb_3Sn$  磁体导体材料优化提供了科学基础。具有规则的或渗流结构的各种新颖薄膜结构已用薄膜合成的办法生产出来。这种方法对超导电性基本物理学的许多问题都是关键性的。薄膜淀积以及形成隧道位垒方面的进展, 使得现在能用电子隧道来研究的材料范围大大地增加了。

但是, 因为令人感兴趣的超导材料越来越复杂(如各种合金和化合物), 常常表现出复杂的化学问题(如过渡金属的氧化), 越来越多地涉及苛刻的界面(如隧道位垒), 以及特定的微观结构(如磁通钉扎)。因此, 薄膜合成的工具必须是强有力的。幸好有这种工具, 但可能很昂贵; 然而, 如果想抓住今后十年超导电性方面的研究时机的话, 没有别的替代办法。理想的情况是必须有一个封闭的真空系统, 将淀积、检验和处理(如清洁表面、氧化)都在这同一系统里“原位”地进行。

应用这些技术将会大大改进对薄膜成分、结构、化学杂质和材料界面的控制。除了多晶膜的生长以外, 可以预期在非晶、亚稳相、外延、单晶以及多层膜的生长方面将会有许多新机会。对隧道位垒的膜薄氧化研究以及新的、淀积的人造位垒方面的研究将会有巨大的进展。探索新的超导体和优化已知的超导体, 将可能以更系统和更少靠经验的方法去进行。

在实用方面, 这些技术的应用至少将改进实用材料为基础的超导电子学应用中的电极和位垒, 改善对各种实际位垒的隧道行为的了解, 而且很有希望提高人们对隧道位垒的物理学和材料科学的详细理解。基于这种理解, 可能做出新的三极管型的器件。很可能出现一种完整的、全部是难熔材料的、而且力学性能上是坚固的超导电子学工艺, 而且全部都是高  $T_c$  材料

的工艺似乎也是可行的。

最后, 我们指出, 通过这些工作也会得出一些关于膜的成核和生长、低温晶体生长以及一般金属分子束外延等方面的新知识。在表面和界面物理学以及化学方面也会有类似的进展。这种知识的价值不只限于超导电性方面, 预期对薄膜科学和技术方面也是有益的。众所周知, 薄膜技术在我们国家的全部技术中正起着越来越关键的作用。

## (2) 亚稳相和非晶材料

人们最熟悉的超导体要么是元素、二元合金, 要么就是金属间化合物; 最好的超导体通常至少含有一种过渡金属元素。对于他们的平衡态, 元素和二元超导体已被广泛地研究过了, 因此, 现在的兴趣正转向这些材料的非平衡状态, 如热或压力淬火产生的材料。较熟悉的例子有非晶超导合金和 A15 相  $Nb_3Ge$  ( $T_c = 23.3K$ ), 后者在化学配比下不是平衡相。很清楚, 这是一些非常有意思的超导体。在超导材料研究的这一领域, 近期仍有大量研究课题。要在新的合成方法和研究材料的基本性质方面做工作。

已知的非晶超导体远不同于它们的结晶对应体。它们有不同的电子-声子相互作用谱函数  $[\alpha^2 F(\omega)]$ , 很短的相干长度, 而且表现为受局域化的影响, 至少在很薄的膜中是如此。它们的磁通钉扎强度很低, 因而它们成为基础研究方面很有兴趣的对象, 而且有可能用它来做类似于磁泡的涡旋记忆元件。这些应用现在实际上尚未被研究。

亚稳材料方面, 由于相和晶格不稳定性与高  $T_c$  超导电性之间明显的密切关系, 激励着人们去研究, 因此, 原则上很有理由猜测,  $T_c$  较高的材料有可能通过这条路线得到。A15 相  $Nb_3Ge$ , 可能还有  $Nb_3Si$  是特别得益于这一途径的。还应注意  $NbN$  的高  $T_c$  相在低温下是不稳定的。

## (3) 奇异超导体和根据经验探索新超导体

奇异超导体表现出新的或罕见的性质, 他们提出了许多理论上还没有解释的问题。人们对这些材料的兴趣主要是在科学上, 评价他们

的应用前景(如果有的话)还要等待更深入的理解。因为这些材料一般是新的,研究这些材料的一个很基本的方面是合成这类材料的新品种。每个新品种都带着更为不寻常的性质,并且无论如何会提供另一些线索:当材料成分和参数系统地变化时,材料的性质会如何变化。

当前奇异超导体的重要例子包括:重费米子超导体(例如  $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$  和  $\text{UBe}_{13}$ ),电子态密度非常低的超导体(如  $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$ ),三元超导体(如 Chevrel 相和稀土硼化物),有机超导体(如  $\text{TMTSF}_2\text{X}$ )以及准一维和准二维超导体(如  $\text{NbSe}_3$  和  $\text{NbSe}_2$ )。将来还可能包括 MOSFET 反型层以及人工金属超晶格。

凭经验探索新超导体处在超导性研究的最前沿。这种探索是更一般的、有新型物理性质的新材料的探索的一部分,是经过系统地合成新材料后得到的。这种探索是对未来的一种基本投资。超导科学的发展的历史是对此最好的例证。最近 25 年的研究向我们提供了绝大多数科学上和技术上重要的超导材料,包括过渡金属合金 ( $\text{Nb-Ti}$ ), A15 相和 B1 相化合物(如  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ ,  $\text{Nb}_3\text{Ge}$ ,  $\text{V}_3\text{Ga}$  和  $\text{NbN}$ ),以及所有上面提到的奇异超导体。正象我们知道的,没有这些超导体,现代超导科学和技术将不会是现在这个样子。然而这类研究仍常受到怀疑。这种异议似乎来自于不同人的风格和见解,而不是科学实质。当富有创造性的材料科学家系统地实现了新合成方法的探索时(这是超导电性研究的根本部分),就应当受到支持。引入优良的超导材料(如  $T_c$  很高的材料,延展性好的高场超导体,或容易用到超导电子学上去的超导体),总是可能的,并且可能有重大的意义。不幸的是,几乎没有如何着手的指导意见可循。智慧也许就在人们耐心研究之中,而不是在于指定材料的类型或研究方法。

#### (4) 前进中的障碍

如上所述,薄膜合成对超导物理、材料科学和技术应用的许多研究课题来说都是一个中心问题。薄膜淀积设备以及运转这些设备的经费都有限,是超导研究和发展的最大障碍。

由于绝大多数有兴趣的超导材料表面化学灵敏度都很高,所以要求有超高真空系统(UHV)。已被证明是重要的或预期会是重要的淀积技术,包括蒸发(电子束和分子束)、直接溅射和反应溅射(磁控和离子束)以及化学气相淀积(CVD)。必要的表面成分和结构特性的分析工具(许多情况下要求原位地进行),包括 RHEED, SEM, AES, XPS, 可能还有 LEED 和 SIMS。重要的加工处理(以及图形技术),包括离子束、反应离子束和等离子体加工。某些情况下,合适的光刻设备也是必要的。

正如已提到的,这些仪器是昂贵的。价格从 10 到 20 万美元,直到百万美元,取决于完备和高级的程度,以及真空度水平。很清楚,功能最全的系统不是所有研究人员都可以得到的,也并非对所有研究和发展计划都一定是适当的。必须找到某种平衡。也许需要发展一些新的有想象力的公共机构,以使这些资源能被广泛地利用。无论如何,这种需要必须以某种方式给予满足。值得注意的是,至少在超导电子学方面以及有关的基本材料研究方面,这种通用的高级系统在日本已使用了好几年,至少在最好的研究组里是这种情况。而类似的系统在美国还没有成为现成可用的。

在大块材料合成方面,合适的合成技术与特殊种类的材料有关(如 Chevrel 相和有机材料等)。但应指出,在合成最先进的超导材料(如奇异超导体)方面最杰出的研究组现在是在欧洲。我们也注意到一个投资为 240 万美元的,目的在于发展新的超导材料、内容范围很广的计划(包括理论学家),最近在东京大学已着手执行这一情况,只不过是美国材料科学大块材料合成研究方面全面落后的一个特例而已。为了改变这种情况,超导界的人应更多地卷入一些固体化学方面,并且必须伴随有相应支持。

## 2. 磁体用导体材料

非常重要的生产超导磁体导体的工业已经成长起来。这些导体现在已相当漂亮和复杂,(有时)包含几千根直径只有几微米的超导细

丝。但是现在只有两种材料被正规生产,一种是有延展性的 Nb-Ti 固熔体合金,另一种是脆性化合物 Nb<sub>3</sub>Sn。两种材料既被用到大型专用装置的磁体上,也用在小型的实验磁体上。因为磁体的使用要求导体的安培匝数,对磁体建造者来说,重要的导体性质是超导临界电流密度  $J_c$  (假定有合适的  $T_c$  和临界场  $H_{c2}$ )。Nb<sub>3</sub>Sn 的优点是它的  $T_c$  和  $H_{c2}$  大约是 Nb-Ti 的二倍(18K 和 9K, ~21T 和 11T),因此在很宽的磁场和温度范围内,  $J_c$  仍然很高。不过因为 Nb<sub>3</sub>Sn 很脆,给应用带来复杂性。

加工过程对超导体微观结构有决定作用,它决定着超导体的  $J_c$ 。但是,由于生产细丝复合导体需要用大量的制造工序,由于在制造过程中形成复杂的异质微观结构,制备具有合适的冶金学特性的巨大困难,以及在高场、强钉扎材料中还没有一个好的  $J_c$  的理论,所以导体的开发完全是靠经验来进行的。

超导磁体目前主要用在高能物理、核聚变、核磁共振以及多种类型的普通实验室。未来很重要的应用是储能,同位素分离以及其它许多分散的领域。目前使用的绝大多数的超导磁体的磁场在 7T 及以下,少量磁体磁场达到 15T, (最高的是 17.5T)。做成上述磁体的材料主要是 NbTi (已生产了 1000—2000 吨) 和 Nb<sub>3</sub>Sn (约制造 10 吨)。其它材料对某些新的应用(如串联磁镜抛流圈)是有吸引力的,这时渴望达到 20T 的场强。

#### (1) 临界电流密度

对磁通钉扎机制的基本理解是正确理解高场超导体  $J_c$  的关键。这要求详细地描述实用高场超导体的冶金学缺陷,要求理解密集的强钉扎系统中磁通束-缺陷相互作用,以及这两种研究的综合情况。为了检验理论,需要仔细地制备一些非常确定的典型系统。

为了对实用材料的微结构有详细的了解,需要从冶金学和电磁学方面进行检验。现在进行的初步研究正给出许多没有预料到的性质(例如在 NbTi 中脱溶的不寻常的模式,以及 Cu 偏析到 Nb<sub>3</sub>Sn 颗粒边界)。其它制造工艺

可能产生新的缺陷形貌,尺寸在 ~30—200Å 范围,磁通钉扎就发生在这个尺度范围。而且新工艺可能允许发展具有较简单的磁通钉扎行为的缺陷几何模型。现在在美国磁通钉扎的研究处在非常低的水平上(日本和欧洲的努力程度要高得多)。为了攻下强而密的钉扎系统中的磁通钉扎问题,需要进行实验和计算机模拟两方面的研究。

对冶金学和磁通量子微观结构很好的理解,无疑地将会导致  $J_c$  的大大增加(NbTi 在 5T 时的  $J_c$  约是最好的典型合金的一半,同样 Nb<sub>3</sub>Sn 在 12T 时  $J_c$  也是典型系统的一半),从而将使每安培米导体的成本降低。在某些应用中(如高场磁体,某些超高能“desertron”加速器偶极磁体设计),高  $J_c$  是技术设计中至关重要的因素。还有一些其它的应用,如电站网间超导磁能储存器(SMES),超导体的价格是总投资的 10—15%,这时高  $J_c$  对于设备的经济效益是非常重要的。

磁体的某些应用要求以持续电流的方式工作,超导电性特别适合于这方面应用。核磁共振的磁体就是这样一种实例。持续方式工作的磁体,其电流必须大大低于  $I_c$ ,合适的冶金学和电磁学特性对于提高持续方式工作的电平是很有帮助的。

#### (2) 超导体的扩散生长

$T_c$  和  $H_{c2}$  超过 NbTi 的可用的超导材料(如 Nb<sub>3</sub>Sn, Nb<sub>3</sub>Sn + 掺杂元素, Nb<sub>3</sub>Al, NbN, PbMo<sub>6</sub>S<sub>8</sub>) 都是采用扩散法获得的。为了生成细的晶粒,从而有利于晶界以相结构的模式进行扩散,扩散的过程通常是在低温下进行的。在扩散过程中,某个相中有组分梯度,第三种元素(例如 Nb<sub>3</sub>Sn 中掺 Cu) 可能会在晶界处偏析出来。而在一些大块的相图中没有预言局部平衡的新形式能控制相的形成(这也是材料科学中最有趣的问题)。很明显,搞不清楚 Nb<sub>3</sub>Sn 中的这些现象也就搞不清楚其超导性质。

发展一种强场超导体微观结构的详细而又非常局域的缺陷模型,对于材料科学具有普遍的适用性。对很多种材料来说,搞清楚其晶界



结构的问题、局部的热力学平衡、晶界的扩散以及在  $50\text{\AA}$  尺度范围脱溶物的结构,具有特别的意义。为了这些研究所需要的技术和设备又有着广泛的用途。

### (3) 延展性和应变容限

一种超导材料需要有高的强度、适当的应变容限和柔韧性,以便能够较容易地制成大型强场磁体应用中所必需的各种形状。将脆性的超导体混入具有很好机械性能的复合材料中,用以制成磁体,这项技术研究已经付出了很大代价。A15 超导体的应变效应的研究还处在初始阶段,无疑还需要进一步研究和改进。

### (4) 更高的 $H_c$ 和 $T_c$

除了 NbTi 和 Nb<sub>3</sub>Sn 之外,其它超导材料的研究必须继续进行。超导磁体的新应用是多种多样的,也是无法预测的。这就意味着为了满足更高场或更高温度下使用的需要,必须研究出新型的超导材料。近期的一个研究对象是 Nb<sub>3</sub>Al; 比较冒险的和花费较大的材料是 NbN, Nb<sub>3</sub>Ge 和 chevrel 相,如 PbMo<sub>6</sub>S<sub>8</sub> 等。

### (5) 前进中的障碍

进一步研究高场超导体的主要问题是没有建立必要的边缘学科的小组,对这些材料从物理学和冶金学两方面结合地去进行研究。上面所讨论的问题都需要在一个广泛领域内进行探讨,而一般地说这是不可能的,因为缺乏现代化的仪器和缺乏能充分使用这些仪器的有训练的人员。

对  $J_c$  的研究是所有高场材料研究(包括 NbTi 和 Nb<sub>3</sub>Sn 在内)的中心问题。从冶金学角度详细搞清超导体缺陷微观结构的特征也是需要的。这就需要有最高级的近代分析仪器,例如分析电子显微镜和扫描俄歇显微探针。这些仪器很昂贵(25—50 万美元),但在材料科学中有着广泛的用途。在这个领域内工作的研究小组要具备这些仪器是至关重要的。为了保证这一点,就需要向一些研究小组提供几十万美元的拨款(由于这些仪器可以被广泛使用,共同分担这些花费是可行的)。不过,分析仪器还不能立刻给出答案来,更重要的是在五年或更多

一些的时间内培训出会使用这方面技术的熟练技术人员,以便能认真细致地、定量地开展这方面的研究工作。

在  $J_c$  的研究中,除了冶金学特性研究计划外,还需要有强有力的磁通钉扎研究计划。这方面的研究目前在美国还处于极低的水平。应该有几个小组着手准备从事高场材料方面的研究,理论和实验工作都需要去做。而且这些小组有必要与冶金学检验小组保持密切的联系。

很多新的材料(如 NbN 和 PbMo<sub>6</sub>S<sub>8</sub>)不能采用轧压和拉丝的技术进行加工,尽管这些技术对 NbTi 和 Nb<sub>3</sub>Sn 非常成功。因此就需要提供一笔相当大的经费使一些小组可以建立起快速淬火、粉末冶金、CVD(化学气相淀积)和其它非常规的仪器装置。这样才能制备出可供初步测试的足够大小的超导体。对这些新材料进行冶金学和电磁学检验以及研究化合物的扩散生长,还要求一种类似于研究  $J_c$  所用的分析手段。这里再次强调要合作,首先是每一个从事这方面工作的小组内部的合作,其次是这些小组之间的合作。不断地给各个单独的小组提供低水平经费的危险在于,这将使他们仅就问题的有限方面从事研究。在材料科学中,许多领域的进一步发展强烈地依赖于这里所提到的范围广阔的边缘学科的发展。所以这样做必将大大增强超导材料研究对整个材料科学的推动。

## 四、器 件

### 1. 约瑟夫森结器件和超导电子学

#### (1) 应用和器件

超导电性在电子学上的应用有许多方面。鉴于最近 IBM 决定中止约瑟夫森结超级计算机的研究,因而澄清在这领域内的研究前景和需求是尤其重要的。大体来说,超导电子学可分为四大类:超灵敏仪器和电磁检测器;基准;微波和高速信号处理应用(数字的和模拟的两种);以及大规模和高性能的计算机。IBM 的决定仅仅与其中的最后一方面有关。即使这样,

如引言中指出的,最终是否需要低温计算机,仍在争论中。从长远来看,高性能的计算机仍与超导电性相关。不管怎样,一种新型的开关器件大概是需要的。

另一方面,在其余的几类应用中,超导器件比它的竞争对手们继续显示出很大的优越性。特别是不久的将来有望出现应用快速约瑟夫森结的模数转换器和高速模拟信号处理器(转换器和相关器)。同时超导仪器和检测器的发展一定也会明显地推动基础科学,如医学(SQUID用于脑磁照相术)和射电天文学(SIS混频器)。

新器件的可能性在于对隧道位垒层有更好的了解。它可以促进新技术,也是新器件结构和原理的科学基础。位垒层是制备任何含有隧道结的超导器件的最关键部分,必须在极端严格的控制和可重复的条件下制备。现在,我们对实际位垒层中真实的化学和物理结构以及隧道过程本身的物理学,理解还是非常原始的,与人们花费在电极上的研究相比,位垒方面是注意得太少了。

在最近几年内,新方法形成人工位垒层(非晶硅、氧化铝等)的隧道位垒已经出现,而且非常成功。与此同时发展起来的还有其它一些制备工艺,如选择铌阳极氧化工艺(SNAP)和选择铌腐蚀工艺(SNEP)。这种整片制备方法(结的制备是在晶片上整体完成的,然后再蚀刻成所要求的小结构)根本不同于标准的SiO<sub>2</sub>掩膜和蚀刻图形方法。原理上看来它要更好些。这种方法需要进一步研究以确定它的真正价值。与此相似,近来取得迅速进展的由全难熔材料制成的集成电路的研究应当继续下去。因为最终还是指望应用这种全难熔材料的电路,如果努力推动,将有实现可能。这方面我们确实落在日本后面,至少在全难熔材料电路的完善程度上比日本落后。

用小型闭路循环致冷机就可工作的全高 $T_c$ 材料电路的情况就更复杂了。这种电路对小规模的超导电子学应用可能是十分重要的。这种应用只包含几个器件或几个片子,而且从致冷

技术和经济方面来说也是有意义的。用高 $T_c$ 材料做基础电极可以制成非常好的隧道结,但高 $T_c$ 的反电极很难做,问题在于为了不损坏底下的位垒层而必须在足够低的衬底温度下形成高质量的薄膜。两种非常类似的候选材料是:Al<sub>15</sub>超导体和NbN。要获得成功必须同时考虑:降低反电极需要的淀积温度或提高位垒层可承受的温度,或者两者都有。

目前,NbN是最有进展的,它能在相当低的温度下淀积,而 $T_c > 10\text{K}$ 。全NbN的隧道结已在日本制作成功(最近美国也做到了)。不过在高工作温度的超导电子器件真正实用之前,它们的性能,尤其是反电极的 $T_c$ 必须提高。高 $T_c$ 的SNS约瑟夫森器件虽然已经问世,但在应用上似乎它比隧道结有更大的局限性。它们在某些应用中占上风,但还必须继续改进。最后我们还应看到用小型致冷机工作的超导电子器件的实用性是与小型致冷机的发展紧密结合在一起的,所以要密切注意这方面的发展,并努力将这类超导电路与微型致冷机组装在一起。

超导电子学的另一个很有可能的方面是新器件,特别是三端的晶体管型的器件。这种器件的引入将会开辟各种可能的应用并改变应用的性质。这肯定是研制高性能的通用超导计算机的必要条件。Quiteron是一种可能的器件,但有其一定的局限性。其它基于非平衡超导性的途径是可以想象得到的,并应进行研究。完全新的其它方法也应该受到鼓励。我们所渴望得到的是高速、低功耗和高增益的隧道三极管或者场效应管型的器件。感兴趣的还有涡旋线记忆元件。出现新的电路概念和它的应用是可能的,并会带来很大的冲击。最后,当人们关注将来的应用和需要时,必须揭示出所有超导器件和电路在微型化方面存在的物理上和技术上的限制。

## (2) 前进中的障碍

对超导电子学,目前最需要的是使更多的研究组和设备投入技术工作。由新的思想、新的应用和新的方法而产生的刺激和活力是不能

低估的。很清楚,在不远的将来,一个最大的挑战是使目前正在研究的东西付诸应用,并不断地将电工方面的科学家包括进来。

象其它超导电性研究领域一样,超导电子学的进展受器件制备能力和工艺的限制最大。除了几乎肯定即将关闭的在 East Fishkill 的 IBM 研制线以外,美国就再也没有能够生产即使是中等规模的(比如 15—20 个器件以上)超导电子学集成电路片的生产线了。显然在这种条件下,这个领域的研究工作是不能得到发展的。不幸的是在这次专门讨论会之后,IBM 已采取了这个决定。所以关于这一问题没有再讨论的余地了。非常清楚,这是一个国家性的重要议题。

为器件研制和工艺研究的设备与已经讨论的薄膜淀积设备相似,因为所有超导器件和电路都由多层薄膜构成。与制备实用器件的设备不同,制备实用器件的生产线必须是非常严格的,而研究用的设备则要求更灵活。然而不幸的是这两种功能不容易同时兼备。两种设备的费用将是非常可观的,没有仔细估计过,不过似乎十分清楚的是,现有这个领域的资金水平是无法进行投资和运转这些设备的。

最后,当超导电子学达到成熟并标准化了的时候,将会有更多的应用出现。在这些应用中超导元件真正是一种用标准方法生产的有一定性能指标的“设计的”器件了。为了越过财政上的困难,使这些应用能成为私人工业进行生产的规模,也许需要建立某种有补贴的“约瑟夫森结制造厂”,以便在国家的规模上实现这一目标。不过,大多数与会者认为目前这样做可能为时过早,会分散当前最紧迫项目的资金。不过希望在今后的年月里能建立起来。

## 2. 磁体导体

### (1) 实际需要

当然,磁体导体是用于绕制磁体的。会议上只简单地概述了超导磁体和它的技术,本报告中也不再提及了。不过,值得考虑一下如何鼓励从以前仅仅出于纯科学兴趣的材料研究过渡到磁体导体的工程研究。研制新导体方面的

主要困难,在于获得高  $T_c$  和高  $H_{c2}$  超导化合物所需的冶金工程问题和物理问题,并能制成少数几种可用的稳定的短样导体(线材或带材)。最苛刻的一步是把它制备成一种最后适合于磁体使用形式的材料,它的  $J_c$  和  $T_c$  必须达到可使用的值,它的结构必须是电磁上和力学上稳定的。这一阶段标志着从初步合成材料到可能的工业生产的过渡。制备足够稳定、有一定强度和超导特性的优良导体的第一阶段研究,一般是在研究实验室里进行的。研制的后一阶段一定要有工业部门的认真参加,而前阶段可以在大学、国家实验室或者工业部门进行。最好是所有这些从事磁体导体研究的小组之间进行很好的协作。

从引进一个新材料到磁体导体生产,包括的问题是多种多样的。从引进性能优良的材料到制成足够长的磁体导体所需要的费用是相当可观的,所以这一阶段的研制工作将主要着重于实际器件的特殊需要,而不是对新材料本身的科学兴趣。因此将研制具有特殊结构的、比如 20 或 25T 的磁体导体工作留到需要这类导体的研究计划中去,也许是适当的。

然而,把新材料制备成有用的磁体导体的一般方法,是研究的重要课题,不管具体的应用目的如何。我们现在对常用的 NbTi 和 Nb<sub>3</sub>Sn 材料的了解仍很少,更不用说 Nb<sub>3</sub>Al 或 PbMo<sub>6</sub>S<sub>8</sub> 那样的新材料了。与这些材料最终用作磁体导体相关的有用的研究工作,例如小规模制备技术,材料的微观结构特性和弄清  $T_c$ ,  $H_{c2}$  和  $J_c$  如何受制备条件的影响等必须进行。高于 15T 的常规磁体的电阻功耗是如此之大,以至世界上只有几个实验室拥有这样的磁体。对高场的需要大大超过目前可使用的磁体的数目。不进行磁体导体的研究,适用于更高场强的导体就不会出现,所以这样的研究对任何建造场强为 20T 左右的超导磁体的计划都是十分基础的。

### (2) 前进中的障碍

高场超导磁体发展的明显障碍是资金不足。几年来,超导磁体的实用极限停留在 15T

左右,这种磁体仍然使用  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  薄带,而没有使用更好的  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  多股细丝。日本拥有的世界上最高场强 ( $\sim 17.5\text{T}$ ) 的超导磁体,也有几年历史了。这个磁体使用的也是带材技术,并被认为是把带材使用推到极限的一个部分成功的尝试。现在需要的是在  $15\text{--}20\text{T}$  范围的高场强螺线管中使用  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  细丝和它的合金。

提高超导磁体的场强不仅对磁体研究本身来说是有意义的,而且对许多基础学科的研究来说,也有广泛的意义。日本有一个生气勃勃的计划,目的在于生产出  $18\text{--}20\text{T}$  的超导磁体。把一个重仅几磅的导体绕制的小小的螺线管,在实际的应力状态和场强下,插入原有的磁体中,就能够产生几个 T 的场强增量。这种方法对其它有希望在高场下使用的材料,在把它们从实验室材料转变成磁体材料时,也是可行的。这些结构上的改进需要材料在高场下有高  $J_c$ , 以使磁体可以实用,并要详细研究它的电磁的和冶金学的特性。当然,这些研究在实验室合成阶段以及磁体导体的雏形阶段都应进行。提高超导磁体的场强(即使在很小的体积内)都将对技术有巨大的推动,例如串联磁镜核聚变就需要在大体积内有高场强。从而使大规模的工程项目在进行生产时能更有效地使用其资金。

## 五、小 结

国家在超导研究方面的投资已经在工艺上大见成效。最近的例子是:

采用超导磁体的核磁共振人体扫描技术正在医学诊断中显示出它的重要性,预计在两年后将成为一个 20 亿美元的大工业。

国家加速器实验室近来已经使它的 Tevatron 1000 多个 6m 长的超导磁体开始运转,这些磁体能节省巨大的电能,并使美国在高能物理方面居于领先地位。

超导微电路探测器是微弱信号检测中最现代化的器件。

本文阐述了这样的问题,即“我们的目标是

什么? 要达到目标将付出怎样的代价?”

### 1. 研究时机

为了超导科学自身的发展而必须进行的基础研究包括下列各项关键领域:

(1) 远离平衡的瞬态响应特性;(2)在强电子注入下的非线性效应;(3)热电效应;(4)局域化现象;(5)新的超导机制。

这里主要的问题是新的概念。在另一些领域中,超导电性用于解决超导以外更广泛的基本问题,这类研究有:

(1) 量子噪声问题,它对于探测器、放大器和混频器的发展将是一个中心问题;(2)磁通量子化和约瑟夫森效应在基本物理常数的测量和在寻找新的粒子和新现象(如磁单极子,宏观量子隧道的研究)中的应用。

在超导材料领域内最关键的项目是:

(1) 薄膜合成;(2) 高质量隧道势垒的制备;(3)界面效应的研究;(4)单晶和多层膜的外延生长;(5)新型大块合成材料的开发。

特别重要的新材料包括:

(1)亚稳和非晶材料;(2)三元超导体;(3)重费米子系统;(4)超导氧化物;(5)有机超导体。

寻找新型超导材料的研究可望为科学和技术提供具有广泛使用价值的新材料。

用于磁体的实用导体材料的发展,关键在于下列几项花费很高的发展项目:

(1) 了解和控制微结构的新技术;(2)优化脆的超导细丝性能,以便生产出高强度和高应变容限的组合导体的新方法;(3)高  $H_c$  新材料的生产过程;(4)高场强、强钉扎材料  $J_c$  的研究;(5)高  $H_c$  化合物扩散生长的研究。

在超导电子仪器的发展中,关键性的研究包括:

(1) 从根本上研究势垒材料,搞清电子穿过不同种类势垒的物理过程;

(2) 全部为难熔的和高  $T_c$  的超导电子线路中的材料制备技术;

(3) 三端超导器件的发展。这些器件可能会带来象晶体管对半导体电子学一样的冲击。

## 2. 需要专用基金

实质上前面讨论的各项发展都受到缺乏现代设备和装置的限制。这些仪器设备是用来满足多方面工作需要的,比如用以合成、检验、以及制作所要求的超导材料和器件,不论是奇异的超导体、实用材料、复杂的复合导体还是隧道结。粗略地说,有四个方面:合成(薄膜或是大块),微观特性的测定,用于研究的制备技术和用于应用的制备技术。

就影响的范围来说,合成方面最需要的是提高薄膜合成的能力。这种能力对于物理研究、新材料及其应用是非常重要的。另一方面,从全球的范围来衡量,大块材料的合成在美国并不具有代表性的水平,因此培养人才同改进设备是同样重要的。

超导材料研究的中心问题是对于化学组分和原子结构的精确了解。在超导电子学中,这就是约瑟夫森结特别是势垒的微观性质问题。在磁体导体材料中,则是磁通钉扎缺陷(例如脱溶和晶粒边界)的微观性质。经常涉及到复杂的多相结构或化学组分随空间变化的非均匀材料、界面、缺陷、局域电子态等问题。了解这些性质是非常重要的,不管是为了控制它们从而获得具有满意特性的高性能材料,或者仅仅为了了解这些材料。这样的工作需要一系列的分析仪器,它们通常都装在一个复杂的高真空系统里。同时也要进行长期的智力投资,以训练有关人员熟练地使用和管理这些技术。这些仪器是非常昂贵的,但幸好可以共用,或者只分别使用整机的一部分。

为了使某种实验应用中的性能达到新的水平,很多小组都需要用于研究和应用的制造技术。这项工作只要求有关特性能重复达到就可以了,而不要求对样品作详尽的特性研究。许多实验室都需要这种方式的提高,大约每一个实验室都要几十万美元。

这样,人们认识到,下面两大类研究设备应有机会获得经费,因为它们会给超导和超导以外的研究领域带来普遍的影响。这两类研究设

备是:

(1) 若干台(10—20台)专供研究象隧道结、特种材料或磁通钉扎等特殊问题或应用研究的专用设备(每台价格估计为20—50万美元)。这里应当在合成、检验和制备样品设备中进行一下平衡。

(2) 几台(3—4台)装备非常齐全的、专门用于攻克高级材料、高级磁体导体或高级电子线路等领域中的普遍问题的大型设备(每台价格估计为100—300万美元)。鉴于它们的价格,这些设备应属于研究训练中心,以便能通过合作或客籍研究等方式被广泛地利用。

最后指出以下一点是重要的,即所有这些设备以及用这些设备所做的研究都是处在一些迅速发展着的广泛科学领域的前沿,其意义远远超出了超导本身。从工作中我们将获得关于薄膜材料特性和基础物理方面的新知识。薄膜技术在全国范围的技术发展中正起着越来越重要的作用。

## 3. 结论

面临着今天的挑战;人们所需要的设备和投资是巨大的。但是如果摆在我们面前的一些机会应当追踪的话,那么这些花费也就是必要的。这个事实已被国外认识到了,特别是在日本。在那里巨额的研究经费和国家的长期支持已经带来了超导计算机和超导材料开发方面的广泛进展。为着这样的目标,一些日本的实验室正采用一系列更加高级的设备在进行工作,而在美国却没有一个研究组能申请到这种设备。如果美国不想不负责任地放弃它的技术领先地位的话,就必须马上着手提供和日本可相匹敌的投资和制订长远规划。当然,从国家的尺度来看所需的人力物力是属于适中的,但问题是,我们有没有使之实现的眼光?这确实是一个国家性的大事。

[陶宏杰、杨乾声、陈莺飞、

陈建湘译自 *Cryogenics*, 24-7

(1984), 378.]