

# MgB<sub>2</sub> 超导电性的发现及新一轮高临界温度超导研究热潮\*

熊 光 成

(北京大学物理系 100871 北京)

**摘 要** 2001年1月10日,在日本召开的学术会议上, Aoyama Gakuin 大学的 J. Akimitsu 教授宣布 MgB<sub>2</sub> 显现超导电性 ( $T_c = 39\text{K}$ ). 紧接着的一系列研究工作表明, MgB<sub>2</sub> 属于 BCS 超导体. 这些发现引起了新一轮高临界温度超导研究热潮.

**关键词** MgB<sub>2</sub>, 高温超导

## DISCOVERY OF SUPERCONDUCTING MgB<sub>2</sub> RENEWS INTEREST IN HIGH $T_c$ SUPERCONDUCTORS

XIONG Guang-Cheng

(Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract** On January 10 J. Akimitsu (Aoyama Gakuin University) announced at a symposium in Japan that MgB<sub>2</sub> is a BCS type superconductor with  $T_c = 39\text{K}$ . This discovery is causing new excitement in high temperature superconducting research.

**Key words** MgB<sub>2</sub>, high  $T_c$  superconductivity

新型高温超导材料、超导物理和应用的研究十多年来一直是热门研究领域. 自 1911 年荷兰 Leiden 大学的 H. K. Onnes 发现 Hg 的超导电性之后, 超导研究的历史很清楚地揭示出材料学研究、物理研究和应用研究之间相辅相成的关系以及推动基础研究一浪高过一浪的情况. 近来 MgB<sub>2</sub> 超导电性的发现又掀起了新一轮高临界温度超导研究的热潮. 需要特别指出的是, 由于十多年氧化物高温超导材料研究的积累, 使得人们对于新的材料和物理现象的发现十分敏感, 而且电子网络的发展极大地推动了信息的交流, 这一轮的研究热潮在世界范围的扩散速度超过了以往超导研究领域的任何事件. 我们应该可以从 MgB<sub>2</sub> 超导电性研究热潮中得到更多的启示. 为开展这方面的工作, 北京大学物理系的研究小组在 2 月初完成了合成 MgB<sub>2</sub> 超导材料的起步研究. 据悉, 这是国内首次成功进行的 MgB<sub>2</sub> 超导电性研究工作.

自发现超导电性之后的几十年间, 人们发现了几千种超导材料, 实验方面也有很大进步. 然而引起超导现象的物理本质仍然令人困惑不解. 1957 年, Bardeen, Cooper 和 Schrieffer 成功地分析了超导电

性机制, 并建立了 BCS 超导电性微观理论. 依据 BCS 理论, 决定体系超导临界转变温度的主要参数有材料的德拜温度、在费米面上的态密度和电声子相互作用势. 因此提高样品的超导转变温度常常从改变材料的声子谱着手考虑. 与此同时, 超导应用研究也取得了长足进展, 特别是约瑟夫森 (Josephson) 效应的发现开辟了超导电性弱电应用的广阔领域. 然而, 直至 80 年代初, 超导转变温度最高的 Nb<sub>3</sub>Ge 材料  $T_c$  也仅 23.2K, 刚刚达到氢液化的温度. 因此液氮温度的超导体当时一直是人们的一个“梦想”, 直至 1986 年 4 月 IBM 实验室的 J. G. Bednorz 和 K. A. Müller 在德国的学术刊物上报道 Ba-La-Cu-O 的超导转变温度可能高达 35K, 以及相继的一系列高  $T_c$  氧化物超导材料的发现才打破了这个谜团. 但是氧化物高温超导电性的物理机制却难以用 BCS 理论构造图像来进行描述, 这个问题近十多年来一直困惑着物理学界.

在氧化物高温超导电性研究的同时, C<sub>60</sub> 超导材料的发现为沉闷的空气带来了一缕清风. 比较起来,

\* 2001-02-23 收到

MgB<sub>2</sub> 显现超导电性的报道似乎更快地激发起来了更大的激情. 根据国际超导信息中心通过电子网络发送的高温超导最新消息(High  $T_c$  Update)提供的资料, MgB<sub>2</sub> 显现超导电性是 Aoyama Gakuin 大学的 J. Akimitsu 教授于 2001 年 1 月 10 日在日本仙台(Sendai)召开的“过渡金属氧化物”学术会议上报道的. 他们报道 MgB<sub>2</sub> 是一种二元金属化合物超导体,  $T_c = 39\text{K}$ <sup>[1]</sup>. 他们的结果已经写成题目为“Superconductivity at 39K in MgB<sub>2</sub>”的文章并已投《Nature》杂志, 但目前仍不能发表. 对该报道的第一个反应是 1 月 19 日日本国家金属研究所的 K. Togono 博士告诉国际超导信息中心, 他利用 SQUID 磁测量和电阻法测量已经确认了 MgB<sub>2</sub> 的超导电性, 其起始超导转变温度为  $T_c = 38\text{K}$ . 接下去的反应是接二连三的文章在网上发布. 发布的文章包括美国海军实验室的 J. Kortus 等人(1 月 30 日)所做的能带计算结果<sup>[2]</sup>、美国 Ames 实验室的 S. L. Bud'ko 等人(2 月 3 日)完成的 MgB<sub>2</sub> 超导材料中硼同位素效应的研究(结果将发表于《Phys. Rev. Lett.》)<sup>[3]</sup>、Ames 实验室 D. K. Finnemore 等人(2 月 6 日)对超导 Mg<sup>10</sup>B<sub>2</sub> 样品在不同磁场下进行的输运性质测量结果<sup>[4]</sup>以及 Ames 实验室 P. C. Canfield 等人(2 月 15 日)对 MgB<sub>2</sub> 超导线进行的制备和性能测量结果<sup>[5]</sup>. 据悉, 目前国际一些知名的超导研究单位都在开展 MgB<sub>2</sub> 的研究工作.

MgB<sub>2</sub> 显现超导电性及超导转变温度约为 40K 引起了北京大学物理系的注意, 并开始了 MgB<sub>2</sub> 块材的合成工作. 2 月初由冯庆荣小组完成了超导 MgB<sub>2</sub> 块材样品的合成工作. 第一块 MgB<sub>2</sub> 超导样品的起始超导转变温度为 38.3K, 达到零电阻的温度是 36.9K. 工艺改进后样品的起始超导转变温度为 40.4K, 39.6K 时达到零电阻. 据了解, 国内现在已有其他一些研究单位也开始对 MgB<sub>2</sub> 的研究构造并已有成功合成超导 MgB<sub>2</sub> 样品的消息, 如中国科学院合肥固体物理研究所和中国科学院物理研究所.

北京大学 MgB<sub>2</sub> 块材的合成工作中使用了高纯原料进行扩散合成. 为避免高温有氧情况下生成 MgO 等杂相, 充分混合并压结成型的原料是在真空条件下进行化学反应的. 一开始成功使用的热处理条件是 900℃、2.5h, 与国际的报道稍有不同. 经过真空高温烧结处理后的样品变成黑褐色导体. 图 1 为烧结样品的 X 射线  $\theta - 2\theta$  衍射图. X 射线结构分析表明, 样品主要为 MgB<sub>2</sub> 多晶, 并可得到晶格常数为

$a = 0.309\text{nm}$  和  $c = 0.353\text{nm}$ . 考虑到镁的熔点为 650℃ 而硼的熔点为 2300℃, 在 900℃ 高温下混合原料发生的化学反应可能对应于液态镁元素向硼粉中的扩散及 MgB<sub>2</sub> 的成相. 用四端引线测量直流电阻法得到的条状样品直流电阻率随温度变化的数据表明, 样品有很陡峭的超导转变. 图 2 为我们得到的第一块 MgB<sub>2</sub> 超导样品直流电阻率随温度变化数据图. 图 2 中的曲线是对电阻率数据依据公式  $\rho = \rho_0 + aT + bT^2$  所做的拟合曲线, 其中  $\rho_0$  和  $a, b$  分别为拟合常数,  $T$  为温度. 由图可见, 在室温 MgB<sub>2</sub> 块状样品的直流电阻率十分小.

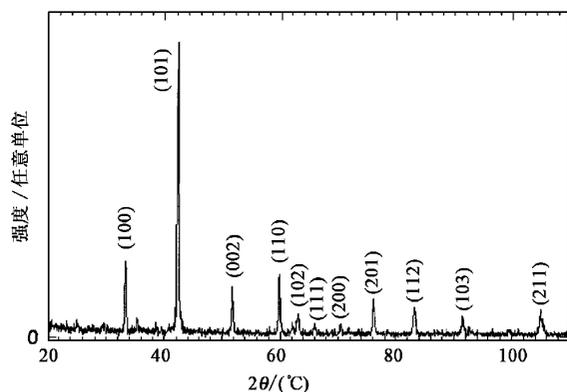


图 1 MgB<sub>2</sub> 烧结样品的 X 射线  $\theta - 2\theta$  衍射图 (数字为 MgB<sub>2</sub> 多晶样品衍射峰的密勒指数)

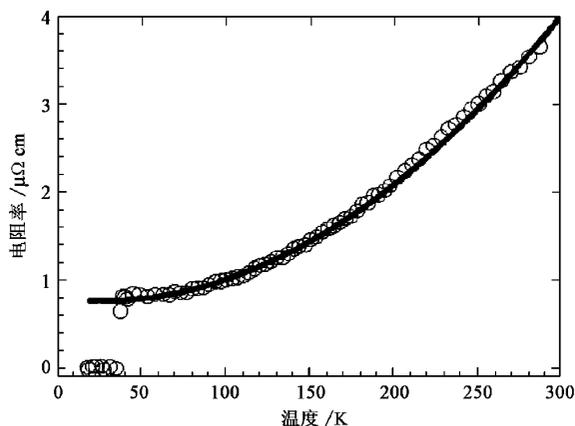


图 2 MgB<sub>2</sub> 块状样品的直流电阻随温度变化数据(○)和拟合曲线

MgB<sub>2</sub> 显现超导电性的报道很快地激励起开展这方面研究热潮的原因是多方面的. 经过十多年来物理学界努力探索仍未搞清楚的氧化物高温超导机制问题揭示出, BCS 理论在解释氧化物超导体时遇到了一些麻烦. 二元金属间化合物 MgB<sub>2</sub> 超导体的发现又将问题转回了“传统 BCS”超导体. S. L. Bud'ko 等人完成的硼同位素效应的研究发现, 样品

的超导临界转变温度由  $\text{Mg}^{11}\text{B}_2$  样品的  $T_c = 39.2\text{K}$  上升到  $\text{Mg}^{10}\text{B}_2$  样品的  $T_c = 40.2\text{K}$ , 这对应于同位素效应指数  $\alpha_B = 0.26$ , 并说明声子在超导转变中起到了很重要的作用. 然而  $40\text{K}$  超导体正接近于十多年前讨论的“传统超导体” $T_c$  极限, 这方面的研究在物理上应可以更好地理解 BCS 理论. 更何况由于氧化物超导体发现不过两三年时间, 超导材料的记录就由  $35\text{K}$  上升到超过  $100\text{K}$ , 因此人们对  $\text{MgB}_2$  提示的其他金属间化合物超导转变温度进一步升高的可能性不敢掉以轻心. 另一方面, 合成  $\text{MgB}_2$  材料比较简易的工艺、较高的超导转变温度和低的电阻率等都预示可能有很好的应用前景. 这可能也是驱动 P. C. Canfield 等人开展  $\text{MgB}_2$  超导线制备和性能研究的背景. 回顾超导研究的历史可以发现, 常常是材料学中的新发现推动了理论物理研究取得进展, 而应用前景又为研究工作提供了积极的推动力和经费支持. 在  $\text{MgB}_2$  显现超导电性的消息公布刚一个多月的情况下就得到多篇报道, 这不能不特别提到网络发展

对科学研究的影响. 到目前为止, 世界上还没有任何一种杂志来得及正式刊印出有关  $\text{MgB}_2$  材料超导电性研究情况的文章, 然而通过网络传播,  $\text{MgB}_2$  材料超导性能的研究已经有了一定规模. 这应该是网络发展对科学研究产生影响的一个很好例子. 这也提示, 要了解世界前沿科技的发展, 需要重视网络技术对信息交流的促进作用.

致谢 本文得到国家超导中心支持.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Akimitsu J *et al.* Symposium on Transition Metal Oxides. Sendai, January 10 2001
- [ 2 ] Kortus J, Mazin I I, Belashchenko K D *et al.* cond-mat/0101446
- [ 3 ] Bud'ko S L, Lapertot G, Petrovic C *et al.* Phys. Rev. Lett. (in press) cond-mat/0101463
- [ 4 ] Finnemore D K, Ostenson J E, Bud'ko S L *et al.* cond-mat/0102114
- [ 5 ] Canfield P C, Finnemore D K, Bud'ko S L *et al.* cond-mat/0102289

## 封 面 说 明

实验室天体物理学是一门正在创建之中的学科, 它是生长在强激光技术、激光等离子体物理以及天体物理学最新发展基础上的交叉学科. 采用当前最先进的激光装置与合适的物质相互作用, 实现了以往在地面无法获得而只在天体物理系统中才存在的极端条件, 由此可以利用地面的实验模拟天上的现象. 这一学科正在成为天体物理学的重要分支领域, 成为在天文观测、理论模拟之外的第三种手段. 人类由此获得了在实验室环境中定量地检验天文观测与模型的能力.

图案的设计正是实验室天体物理学这一学科中心思想的集中体现. 在图案的左下方深蓝色背景上向右上方渗透的花样, 是天体物理学家依据观测到的超新星爆发现象进行理论模拟所给出的流体动力学不稳定性导致的物质混合, 而在图案的右上方则是超强激光与物质相互作用时产生的激光等离子体. 整个图案所构成的和谐整体, 寓意激光等离子体物理学家与天体物理学家通力合作, 共同为实验室天体物理学的创建和发展贡献力量.

(中国科学院物理研究所 夏江帆 张杰)