

新型超导体二硼化镁(MgB_2) 基础研究及其应用展望*

闻海虎†

(中国科学院物理研究所超导国家重点实验室 北京 100080)

摘要 文章简要介绍了新型超导体二硼化镁的发现、研究进展和应用前景. 理论和实验都已经证明, 二硼化镁的超导电性来源于电声子耦合, 可以用具有 S-波对称性波函数的 BCS 图像来描述. 然而在二硼化镁超导体中, 人们发现有两个超导能隙, 一个在 6 meV, 另外一个在 2 meV 左右, 它们同时在超导转变温度处打开, 这给超导机理研究带来了一些新的内容. 在混合态物理方面, 人们发现超导与正常态的边界线(上临界磁场 H_{c2})与磁通融化线(不可逆线 H_{irr})之间有很大的间隙, 即使在绝对零度时也是如此, 作者提出这可能是由于双能隙的结果或磁通物质的量子融化. 在应用方面, 最有可能把它做成超导磁体, 利用闭路循环制冷机制冷在 20 K 左右使用, 这样极有可能取代现在医学上使用的核磁共振成像的液氮温度超导磁体.

关键词 二硼化镁, 双能隙, 应用

The new superconductor MgB_2 and its applications

WEN Hai-Hu†

(National Laboratory for Superconductivity, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract We report the discovery, development and prospective applications of the new superconductor MgB_2 . Both from theoretical and experimental studies, it has been found that the superconductivity in MgB_2 is induced by electron phonon coupling and can be described by the BCS theory with S-wave pairing symmetry. However, two energy gaps have been observed to appear at the same temperature in MgB_2 , which sheds new light to the study of superconductivity and calls for more work. On the application side, the most obvious application is to make superconducting magnets using MgB_2 wires (tapes). This magnet can work at 20K with a closed-circle refrigerator and produce a magnetic field of 4T.

Key words MgB_2 , two gap, application

超导体,顾名思义就是通电流后没有能量耗散的导体.它是由于大量配对电子凝结到一个“步调一致”的相干态后,其运动不受晶格散射的结果.1911年,荷兰的科学家 Onnes 发现水银的超导现象后,人们一直期望能找到室温超导体,这是人们长期以来的梦想.人们在随后七十余年的岁月中,只将转变温度提高到 23 K(约零下 250°C).1986年底,瑞士的 Bednorz 和 Müller 首先在原来不曾想到的氧化物中找到了转变温度为 30 K 以上的超导体,在世界上掀起了一场对高温超导电性的追逐.不久,中国科学家就独立地发现了液氮温度(77.3 K)以上的超

导体.目前氧化物超导体的转变温度已经高达 130 多 K(高压下可达 160 K),在某些方面的应用已经崭露头角.另外氧化物超导体的超导机制也是摆在凝聚态物理学家面前的最富有意义和挑战性的课题之一.这是由于此类材料中电子之间的相互作用很强,其运动行为似乎不能用业已成熟的固体物理的知识来理解.对高温超导机理的理解可能会导致人们对很多被称为电子强关联的一大类材料物理本质

* 国家自然科学基金(批准号:10274097)资助项目

2003-01-10 收到

† E-mail: hhwen@aphy.iphy.ac.cn

的理解,同时在科学和技术两个方面产生飞跃。

由于其自身的特点,氧化物超导体在很多方面的应用受到限制。这些特点包括非常小的相干长度导致小的凝聚能和磁通钉扎能,层状结构导致磁通系统容易变成二维而产生运动,陶瓷特性使得材料容易脆裂,原材料价格比较昂贵使得应用得成本很高等等。因此人们需要寻求新的超导体。2001年3月初,日本科学家报道了二元材料二硼化镁(MgB_2)在39 K左右表现出超导特性^[1]。这个发现迅速激起了全世界范围内的研究热潮。由于在对氧化物高温超导体长达十余年的研究中,人们积累了丰富的经验和建立了先进的手段,所以对二硼化镁超导体性质的研究进展得非常迅速。中国科学家也以极快的速度开展了研究,获得了一些重要结果。由于这个新发现在2001年3月初才报道出来,因此在同年3月底举办的美国物理年会上(美国西雅图),只能以特别专场的形式报告这个重要发现以及因此引发的工作。来自世界各地的60多个报告一直从晚上8点持续到凌晨1点多。来自中国科学院的科学家应邀在这个特别专场上作了两个报告。

关于二硼化镁超导体机理的研究经历了一波三折的过程。由于二硼化镁的超导转变温度接近传统电声耦合的上限,因此一开始很多人相信的超导电性可能不是来自传统的电声耦合,而是由其他原因所致。后来,二硼化镁中硼原子的同位素效应实验演示出超导转变温度对原子质量具有明显的依赖关系^[2],因此人们逐渐相信电声耦合作用对超导的形成是十分重要的。进一步又发现,对此系统的任何形式的掺杂只会使超导温度下降,因此人们越来越相信二硼化镁超导体可能只是一个众多二元合金超导体中的“漏网之鱼”,并且人们将其超导完全归结于传统超导体的BCS机理。然而,人类的想象与自然界的客观事实总是有些差距,这也是促使科学家不断更新和提高自己认知的动力。后来的理论计算表明,在二硼化镁中不只一个能带跨越费米面^[3],电声耦合所造成的费米面失稳完全可能在两个能带的费米面处产生能隙。这一点又与传统的所有的超导体完全不同。有关两个能隙的图像后来被比热、核磁共振、电子隧道谱和角分辨光电子谱的实验广泛证实。有关两个能隙是如何形成的以及它如何影响超导特性是目前有关二硼化镁超导体研究的热点。

二硼化镁超导体在应用上的契机远比对其物理的理解更让人激动。在发现后不久,人们就测量了很多有关其电、磁、热方面的宏观特性^[4],这方面包括

中国科学家所做出的大量出色的工作^[5-7]。首先,人们发现,这个超导体在20 K左右的温度和8万倍于地球磁场的情况下,可以承载很大的超导电流,而且能耗极低。由于20 K的温度可以方便地使用小型制冷机获得,因此这使得人们想到在将来的医院里使用的核磁成像仪器的超导磁体再也不要昂贵的液氦来运行,而只需要插上电源就行了。另外,二硼化镁材料的价格很低,而且远比陶瓷特性的氧化物高温超导体容易加工成形,因此在发现后不久,美国Ames实验室就能够拉出长达几十米的线材和带材。此外,二硼化镁超导体的超导相干长度较长,容易制备出超导量子干涉器件用于微弱电磁信号的检测,在大地探矿、医疗仪器、环境和军事方面具有应用前景。

中国科学家在这次二硼化镁超导体的研究中表现出了相当强的竞争力。在得知消息后不到一个星期,中国科学院物理研究所超导国家重点实验室就制备出了高质量的样品,随即做出了大量出色的研究工作。比如他们很快认识到二硼化镁超导体的上临界磁场和磁通融化磁场之间存在一个巨大的差距,提出了合理的图像来解释这个差距^[6];再比如他们与挪威的科学家^[8]用不同的方法独立地发现在二硼化镁超导薄膜中存在细小密集的磁通跳跃,而且中国科学家明确地界定了这个磁通跳跃的范围^[7],为以后克服弱电应用中的困难起到了积极作用。此外,中国科学家有关二硼化镁超导体的掺杂和电镜观测等工作都在国际上引起了广泛的关注。在应用方面,中国科学家已经能够成功地制备出长达几十米的线材,为下一步制备超导磁体奠定了坚实的基础。可以预见,在未来三年中,用二硼化镁线材所制造的超导磁体将会在中国的科学家手中诞生。

参 考 文 献

- [1] Nagamatsu J, Nakagawa N, Maranaka T *et al.* Nature, 2001, 410, 630
- [2] Budko S L, Petrovic C, Lapertot G *et al.* Phys. Rev. Lett., 2001, 86: 1877
- [3] Liu A Y, Mazin I I, Kortus J. Phys. Rev. Lett., 2001, 87: 87005
- [4] Finnemore D K, Ostenson J E, Bud'ko S L *et al.* Phys. Rev. Lett., 2001, 86: 2420
- [5] Li S L, Wen H H, Zhao Z W *et al.* Phys. Rev. B, 2001, 64: 094522
- [6] Wen H H, Li S L, Zhao Z W *et al.* Phys. Rev. B, 2001, 64: 134505
- [7] Zhao Z W, Li S L, Ni Y M *et al.* Phys. Rev. B, 2002, 65: 064512
- [8] Johansen T H, Baziljevich M, Shantsev D V *et al.* Europhys. Lett., 2002, 59: 599