

体超导铟对一维锌超导纳米线超导电性的抑制效应*

田明亮[†] Nitesh Kumar 许胜勇 王金国 James Kurtz 陈鸿渭

(美国宾夕法尼亚州立大学纳米尺度科学中心及物理系 宾夕法尼亚州 16802 美国)

摘要 文章细致研究了超导体铟/一维锌超导纳米线阵列/超导体铟夹心结构的超导电性. 实验发现, 当锌纳米线的长度在 2—6 μm、直径等于 40 nm 时, 宏观尺寸的超导体铟电极对中间的锌纳米线的超导电性具有反常的抑制作用. 即当铟处在超导态时, 中间的锌纳米线则停留在正常态. 如果施加一个磁场, 使超导体铟电极变为正常态, 锌纳米线则恢复其超导电性. 这种奇异的现象与超导体电极材料的类型及锌纳米线的直径和长度有关.

关键词 一维纳米线, 超导电性, 铟

Suppression of superconductivity in zinc nanowires by bulk indium superconductors

TIAN Ming-Liang[†] Nitesh Kumar XU Sheng-Yong WANG Jin-Guo James Kurtz Chan Moses

(Center for Nanoscale Science and Department of Physics, Pennsylvania State University, University Park, PA 16802-6300, USA)

Abstract The transport properties were measured in a system consisting of a zinc nanowire array sandwiched between two bulk superconductors. It was found that the superconductivity of Zn nanowires of 40 nm diameter is suppressed either completely or partially by the bulk superconductors. When the latter are driven into their normal state by a magnetic field, the nanowires switch back to their superconducting state. This novel phenomenon is not seen in wires with diameters equal to or thicker than 70 nm.

Keywords one-dimensional nanowires, superconductivity, Zn

如果一个正常金属与一个超导体组成一个金属/超导结, 而且金属层的厚度与超导体的超导电子相干长度 $\xi(0)$ 可比时, 这个金属/超导结在低温下将变为超导体. 这种由于超导电子波函数在金属中的泄漏而导致金属呈现超导电性的现象, 被称为超导近邻效应^[1-3]. 同样地, 由于金属中正常电子在超导中的扩散, 超导体的超导电性在某种程度上将被削弱.

与宏观尺寸的超导体相比, 如果一根超导线的直径小于其超导电子的相干长度 $\xi(0)$ 以及磁场在导线中的穿透深度 $\lambda(0)$ 时, 这根超导线被称为一维或准一维超导线. 近年来, 准一维超导线的超导电性问题已引起人们的极大兴趣^[4-9]. 一般而言, 超导电子的相干长度 $\xi(0)$ 在 100 nm 量级 (即 10^{-5} cm), 因此人们将直径在这样一个尺度上的导线也称纳米超导线. 准一维纳米超导线的超导行为与宏

观尺寸的超导体相比有许多特点: 超导相变温度展宽, 而且其电阻在远低于超导转变的温区内仍不为零. 这种由样品的尺寸效应而引起的耗散电阻, 被认为是来自于超导电子波函数相位的热涨落和量子涨落. 如果把这样一根长度在几个微米长的细超导线的两端连接到两个宏观尺寸的正常金属电极上, 金属电极中正常电子到超导纳米线中的扩散将导致超导线的绝大部分表现出电阻特性^[10]. 因此, 一维超导纳米线的超导行为与它的环境紧密相关.

试想一下, 如果一根超导纳米线的两端连接到两个宏观尺寸的超导体电极上, 它的物理特性又会怎样呢? 按照我们当前对超导现象的理解, 这根具有

* 美国自然科学基金和美国宾夕法尼亚州立大学材料和工程中心资助项目

2005-11-02 收到初稿 2005-12-29 修回

[†] 通讯联系人. Email: tian@phys.psu.edu

较弱超导电性的纳米线与具有较强超导电性的超导体的耦合,将会导致纳米线超导电性的增强. 这里我们要指出的是,在丰富多彩的纳米世界里,物质所展现的独特行为往往使我们不得不重新认识一些长期深信不疑的看法. 本文我们将报道一个在超导体铟/锌纳米线阵列/超导体铟(In/ZNWs/In)夹心结构中所观察到的与我们的期待完全相反的现象. 我们发现,直径为40nm,长度为 $2\mu\text{m}$ 或 $6\mu\text{m}$ 的锌(Zn)超导纳米线(ZNWs)阵列的超导电性完全由与其连接的宏观尺寸超导体铟(In)电极的超导态所控制. 当In超导电极处在超导态时, $2\mu\text{m}$ 长的锌纳米线阵列的超导电性完全地被抑制而变为正常金属. 相反,若施加一个磁场使In超导电极变为正常态,直径为40nm的锌纳米线阵列突然恢复其超导电性. 若锌纳米线的长度从 $2\mu\text{m}$ 增加到 $6\mu\text{m}$,锌纳米线阵列的超导电性则部分地被In超导电极所抑制. 我们将这种体超导对一维锌超导纳米线的超导电性的反常抑制现象称为“反近邻”效应^[11].

铟和锌都是典型的第一类超导体. 其超导转变温度分别为3.4 K和0.85 K. 在绝对零度温度下,他们的超导临界磁场 $H_c(0)$ 分别为293 Oe和52 Oe^[12]. 我们利用电化学沉积方法^[13]进行多孔模板^[14]组装,制备锌纳米线. 实验发现,绝大多数Zn纳米线是多晶体,但晶粒呈长条状,长度在几十纳米甚至到微米量级.

图1(a)给出了直径为70nm,长度为 $6\mu\text{m}$ 的Zn纳米线用In做电极的In/ZNWs/In样品在不同垂直磁场下的电阻-温度关系曲线. 测量的纳米线的数目大约为9根. 由图可看出:在零磁场下, $R-T$ 曲线在3.4 K附近出现一个小的电阻下降,然后在1.0 K附近出现一个大的电阻下降,并且电阻值在0.7 K时趋于0. 很显然,在3.4 K和1.0 K时的电阻下降,分别来自于In电极和Zn纳米线的超导体转变. 当外加一个300 Oe磁场使In电极变为正常金属时,Zn纳米线仍然在1.0 K附近出现超导转变. 进一步增加磁场到1800 Oe,Zn纳米线的超导电性在我们观察的温区内消失. 这一现象与我们的期待相一致,即超导电极对中间的超导体的超导电性没有任何抑制作用,它们分别独立地在其超导转变温度出现超导电性. 前面我们已经提到,体材料锌在0 K时的超导临界磁场大约为52 Oe,而这里直径为70nm的Zn纳米线在0.47 K的临界磁场大于1200 Oe. Zn纳米线临界磁场的增强现象是由于样品的尺寸效应所引起,与超导体引线无关.

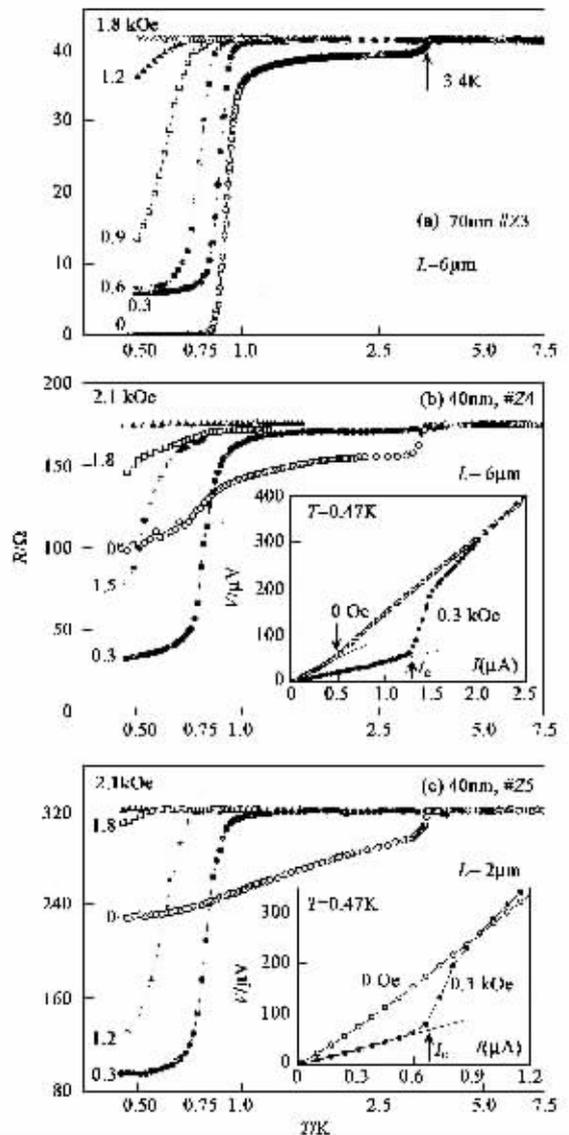


图1 Zn纳米线用In做电极的样品在不同垂直磁场下的电阻-温度关系曲线 (a) Zn纳米线直径为70nm,长度为 $6\mu\text{m}$; (b) Zn纳米线直径为40nm,长度为 $6\mu\text{m}$; (c) Zn纳米线直径为40nm,长度为 $2\mu\text{m}$

图1(b)给出了直径为40nm,长度仍然为 $6\mu\text{m}$ 的Zn纳米线用In做电极的样品在不同垂直磁场下的电阻-温度关系曲线. 在纳米线阵列中被测量的纳米线的数目大约为6根. 与上面直径为70nm的样品的 $R-T$ 曲线相对比,在零磁场下,直径为40nm的Zn纳米线样品在1.0 K附近的超导转变温度展宽,并且电阻缓慢下降. 当温度达到0.47 K时,样品的电阻仍然不为0,并且保持在 100Ω 的大阻值. 令人惊异的是,当我们外加一个300 Oe磁场使电极变为正常金属时,Zn纳米线在1.0 K附近出现一个陡峭的电阻下降. 进一步增加磁场到2100 Oe,Zn纳米线的超导电性在我们观察的温区内消

失. 这一不寻常的结果告诉我们, 当 In 电极处在超导态时, 直径为 40nm 的 Zn 纳米线的超导电性变弱; 反之, 若 In 电极的超导电性被抑制时, Zn 纳米线立即恢复了其原来的超导电性. 也就是说, In 电极的超导电状态不利于 40nm Zn 纳米线中超导电子对的形成. 我们把这种反常的现象称为超导体的反近邻效应. 这种反近邻效应与样品中锌纳米线的长度有关. 若我们把 Zn 纳米线的长度从 6nm 缩短到 2nm, 反近邻效应被大大加强. 图 1(c) 给出了直径仍然为 40nm, 但长度为 $2\mu\text{m}$ 的 Zn 纳米线样品在不同垂直磁场下的电阻 - 温度关系曲线. 由图可以看出, 在零磁场下, 当 In 电极处在超导电状态时, Zn 纳米线在 1.0K 附近的超导相变完全被抑制, 在 1.0 K 附近 $R-T$ 曲线没有任何由 Zn 纳米线超导相变引起的电阻下降. 当我们外加一个 300 Oe 的磁场使 In 电极变为正常金属时, 锌纳米线在 1.0 K 附近才出现一个陡峭的由正常金属到超导的电阻转变 (在低温时的剩余电阻来自电极引线和接触电阻).

在 $R-T$ 曲线上观察到的反近邻效应现象也被我们进一步的电压 - 电流 ($V-I$) 特性测量所证实. 图 1(b) 和 1(c) 的插图分别给出了该样品在 0.47 K 温度时零场和 300 Oe 下的 $V-I$ 特性曲线. 由图可看出, 在 300 Oe 磁场下, 当通过样品的电流达到一个临界电流值 I_c 时, 样品的 $V-I$ 曲线出现一个明显的由超导到正常态的电阻转变. 低于 I_c 时, $V-I$ 曲线的剩余电阻来自于样品的电极引线和接触电阻. 相反, 当外加磁场为 0 时, 样品的 $V-I$ 曲线没有看到明显的可定义的临界电流值 I_c . 换句话说, 当电极在超导态时, Zn 纳米线处在正常态.

在超导体铟/一维锌纳米线/超导体铟夹心结构中, 观察到的反近邻效应与超导电极的材料和超导电极与纳米线之间的结点电阻有关. 用锡替代铟, 反近邻效应增强. 但是, 若锡超导电极与 Zn 纳米线之间的结点电阻增大时, 反近邻效应变弱^[11]. 若用铅替代铟, 反近邻效应变得很弱. 即使对直径 40nm、长度 $2\mu\text{m}$ 的锌纳米线, 在 $R-T$ 曲线上观察不到铅对

锌纳米线的反近邻效应. 但是, 在 $V-I$ 特性曲线上, 我们能够看到系统在 0 磁场下的临界电流密度小于在 1000 Oe 磁场下铅变为正常态时的临界电流密度. 若锌纳米线的两端电极为正常金属, 我们仅仅观察到通常的超导近邻效应. 到目前为止, 我们还没有在其他超导纳米线 (如锡和铅纳米线) 中观察到类似的现象.

这里观察到的超导反近邻效应还无法用我们所知的理论去解释. 从我们的实验可推知, 这一现象与体超导与一维超导体之间的相互作用有关. 为了弄清这一现象的本质, 人们还需要对一维超导体的超导电性以及体超导与一维超导体的电子波函数的相互作用进行详细的深入研究.

致 谢 感谢宾夕法尼亚州立大学的 J. K. Jain, Y. Liu 和 T. E. Mallouk 教授, MIT 的 P. A. Lee 和 X. G. Wen 教授, Harvard 大学的 M. Tinkham 教授以及 UC Berkeley 的 J. Clarke 和 D. H. Lee 教授等有益的讨论.

参 考 文 献

- [1] van Dover R B *et al.* J. Appl. Phys. ,1981 ,52 :7327
- [2] Courtois H *et al.* Phys. Rev. B ,1995 ,52 :1162
- [3] Blonder G E *et al.* Phys. Rev. B ,1982 ,25 :4515
- [4] Giordano N. Phys. Rev. Lett. ,1988 ,61 :2137
- [5] Lau C N *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2001 ,87 :217003
- [6] Tian M L *et al.* Phys. Rev. B ,2005 ,71 :104521
- [7] Sharifi F *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1993 ,71 :428
- [8] Vodolazov D Y *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2003 ,91 :157001
- [9] Rogachev A *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2005 ,94 :017004
- [10] Boogaard G R *et al.* Phys. Rev. B ,2004 ,69 :220503
- [11] Tian M L *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2005 ,95 :076802
- [12] 张裕恒编著. 超导物理. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1997 [Zhang Y H Ed. Physics of Superconductivity. Hefei : Press of University of science and Technology of China , 1997 (in Chinese)]
- [13] Tian M L *et al.* Nano Lett. ,2005 ,5 :967
- [14] Tian M L *et al.* Nano Lett. ,2003 3 :919