

# 界面超导新进展： 外延于SrTiO<sub>3</sub>衬底上的单层FeSe薄膜的 超导转变温度超过40 K\*

王立莉<sup>1,3,4</sup> 王健<sup>2,3</sup> 王亚愚<sup>1,3</sup> 陈曦<sup>1,3</sup>

季帅华<sup>1,3</sup> 马旭村<sup>1,3,4</sup> 薛其坤<sup>1,3,†</sup>

(1 清华大学 低维量子物理国家重点实验室 北京 100084)

(2 北京大学 量子材料科学中心 北京 100871)

(3 教育部量子物质科学协同创新中心 北京)

(4 中国科学院物理研究所 北京 100190)

2014-1-25收到

† email: qkxue@mail.tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20140308

界面超导概念的起源可追溯至50多年前物理学家对二维超导的研究。1968年，首次在实验上观测到界面增强超导现象，即当Al与Cu或者Sn混杂形成超晶格时，其超导转变温度提高接近1 K<sup>[1]</sup>。在1986年和2008年发现的铜基<sup>[2]</sup>和铁基<sup>[3]</sup>两大类高温超导体都具有层状三明治结构，形成库珀对的载流子来源于氧化物电荷库层的掺杂。不仅铜基和铁基两大类高温超导体，还有MgB<sub>2</sub><sup>[4]</sup>等，目前已发现的超导转变温度超过30 K的高温超导材料，都具有层状结构。由此，薛其坤产生了一个大胆的设想：高温超导是否源自于界面增强效应并且其机理就是基于电声子作用的BCS理论？

针对这一问题，我们这个研究团队从2008年开始利用分子束外延—低温强磁场扫描隧道显微镜这个强大的实验技术进行高温超导材料的探索 and 高温超导机理的研究。2009年，我们发现，在硅单晶衬底上生长的厚度仅仅只有一个原子层的铟膜和铅膜都具有超导特性，并且其超导转变温度接近体相材料的超导转变温度<sup>[5]</sup>。这个结果出乎意料，因为薄膜的超导转变温度随着厚度的减小会迅速降低，在二维极限下因量子涨落超导消失。这项工作再次直接验证了传统超导体中的

界面增强效应，并且也先后得到了日本两个研究组输运实验的直接证实<sup>[6, 7]</sup>以及美国理论物理学家的支持<sup>[8]</sup>。此后，我们的研究重点转向高温超导体体系，开始利用分子束外延生长技术制备高温超导材料薄膜，利用扫描隧道显微镜研究超导能隙及磁通结构等超导相关现象，探索高温超导体体系的界面增强效应。2011年，利用分子束外延技术在石墨烯衬底上制备出了高质量的FeSe薄膜<sup>[9]</sup>，在此基础上，我们研究了SrTiO<sub>3</sub>(001)衬底上FeSe薄膜的生长及超导特性。我们发现，在SrTiO<sub>3</sub>衬底上的单层FeSe薄膜具有20 meV左右的超导能隙，是体相FeSe超导能隙的8倍多<sup>[10]</sup>。更为奇特的是，此种超导能隙仅在第一层FeSe表面出现，在2.5 K的测量温度下，在两层以及更厚FeSe薄膜的表面我们没有观察到超导能隙的打开。以上结果表明，界面增强效应同样适用于高温超导体体系。单层FeSe如此大的超导能隙意味着其超导转变温度有可能超过液氮温度(77 K)。这一研究成果很快得到了国内外高温超导领域的关注，中国科学院物理研究所、复旦大学、中国人民大学、美国斯坦福大学、加州大学伯克利分校、休斯顿大学和日本国家材料研究所等单位的科学家都随后开始了这方面的研究。其中，中国科学院物理研究所周兴江研究组和复旦大学封东来研究组的变温角分辨光电子谱研究分别显示，该体系的电子结构不同于体相FeSe，其超导能隙直到65 K甚

\* 国家自然科学基金(批准号: 91121004, 11321091, 11374336)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CB934600, 2012CB921300)资助项目

至 70 K 才消失<sup>[11-13]</sup>。若外延于 SrTiO<sub>3</sub> 衬底上的单层 FeSe 薄膜体系的高温超导被证实, 这将对界面增强超导最直接的实验验证, 也将对研究高温超导机理和探索高温超导材料产生巨大推进作用。

最近, 我们这个研究团队在制备大面积均匀的单层 FeSe 薄膜的基础上, 成功地制备出 FeTe 薄膜。我们利用 FeTe 作为保护层进行了非原位的输运测量研究。图 1 中的原位扫描隧道显微镜图像显示, FeSe 薄膜在很大尺度上具有原子级平整度的表面。覆盖 FeTe 保护层后的非原位透射电镜观察显示, FeSe 薄膜与 SrTiO<sub>3</sub> 衬底

以及 FeTe 保护层间的界面非常尖锐, 基本没有互混。图 2 显示了外延于 SrTiO<sub>3</sub> 衬底上单层 FeSe 薄膜并覆盖 FeTe 保护层后的  $R-T$  曲线: 电阻从 54.5 K 开始下降, 在 23.5 K 达到零电阻。我们取正常态电阻和超导转变态电阻对温度的线性外延交点定义超导转变起始温度为 40.2 K, 接近于体相 FeSe 在常压下的超导转变温度的 5 倍。图 3 为抗磁性测量结果, 显示出 21 K 的转变温度, 与图 2 中零电阻温度基本一致。至此, 在外延于 SrTiO<sub>3</sub> 衬底上的单层 FeSe 薄膜体系中我们同时观

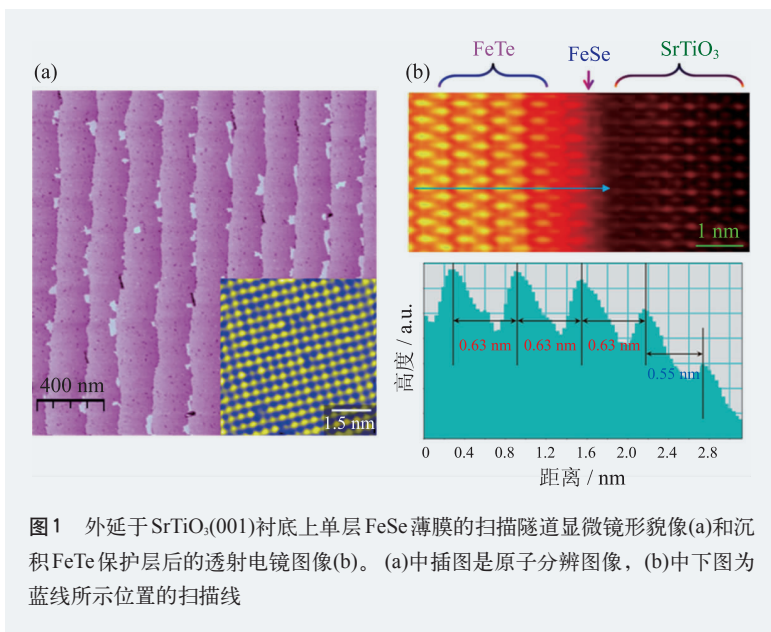


图 1 外延于 SrTiO<sub>3</sub>(001) 衬底上单层 FeSe 薄膜的扫描隧道显微镜形貌像(a)和沉积 FeTe 保护层后的透射电镜图像(b)。(a)中插图是原子分辨图像, (b)中下图为蓝线所示位置的扫描线

测到零电阻和抗磁现象, 此体系中的高温超导特性因而得到证实。由于 SrTiO<sub>3</sub> 衬底和 FeTe 保护层均不超导<sup>[14]</sup>, 因此外延于 SrTiO<sub>3</sub> 衬底上的单层 FeSe 薄膜是目前已发现的最薄的高温超导材料, 而且其临界电流比体相高近两个量级。值得指出的是, 目前的超导转变温度还低于角分辨光电子谱研究结果, 尚未达到由超导能隙推算出的超过液氮温度的预期<sup>[10]</sup>, 我们认为 FeTe 保护层中的磁有序有可能削弱单层 FeSe 膜的超导特性, 单层 FeSe 薄膜中由于与 SrTiO<sub>3</sub> 衬底晶

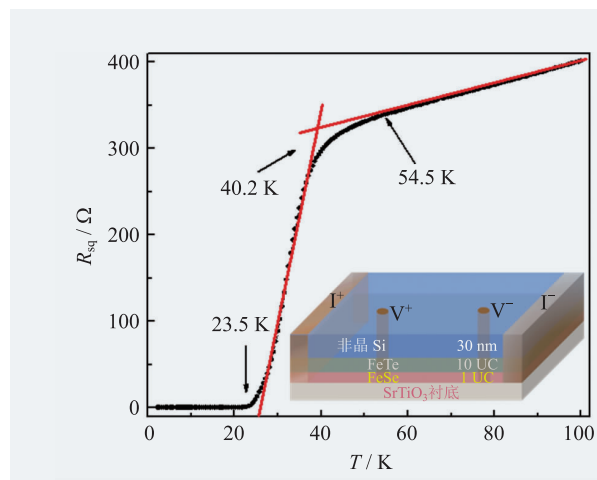


图 2 SrTiO<sub>3</sub>(001) 衬底上单层 FeSe 薄膜在覆盖 FeTe 保护层后的  $R-T$  曲线, 显示电阻在 54.5 K 开始偏离线性关系, 并在 23.5 K 降为零。插图为样品结构及电极示意图

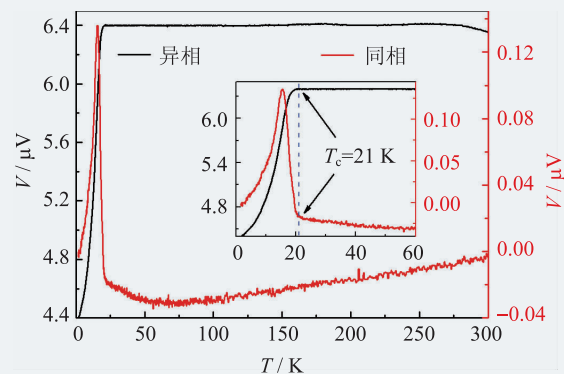


图 3 利用双线圈互感进行抗磁性测量结果, 显示  $T_c=21$  K

格失配而形成的畴界也会导致超导转变温度降低和超导转变展宽。因此,通过进一步提高样品质量和利用原位输运测量,有望获得更高超导转变温度。

该成果以“Direct observation of high-temperature superconductivity in one-unit-cell FeSe films”为题以 Express Letter 发表在《中国物理快报》上<sup>[14]</sup>。文章发表后不久,美国 *Science* 杂志在 Edi-

tors' Choice 栏目中以“A very thin superconductor”为题对该工作进行了报道<sup>[15]</sup>。我们的工作对理解非常规高温超导机制以及探索新的高温超导材料都将具有重要的指导意义。

**致谢** 感谢日本东北大学陈明伟教授在透射电镜研究方面提供的合作与帮助,感谢武汉强磁场中心在强场测量方面提供的合作与帮助。

## 参考文献

- [1] Strongin M *et al.* Phys. Rev. Lett., 1968, 21: 1320
- [2] Bednorz J G, Müller K A. Z. Phys. B, 1986, 64: 189
- [3] Kamihara L *et al.* Journals of the American Chemical Society, 2008, 130: 3296
- [4] Nagamatsu J *et al.* Nature, 2001, 410: 63
- [5] Zhang T *et al.* Nat. Phys., 2010, 6: 104
- [6] Uchihashi T *et al.* Phys. Rev. Lett., 2011, 107: 207001
- [7] Yamada M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 237001
- [8] Noffsinger J, Cohen M L. Solid State Commun., 2011, 151: 421
- [9] Song C L *et al.* Science, 2011, 332: 1410
- [10] Wang Q Y *et al.* Chin. Phys. Lett., 2012, 29: 037402
- [11] Liu D *et al.* Nat. Commun., 2012, 3: 931
- [12] He S *et al.* Nat Mater., 2013, 12, 605
- [13] Tan S *et al.* Nat. Mater., 2013, 12: 634
- [14] Zhang W *et al.* Chin. Phys. Lett., 2014, 31: 017401
- [15] Stajic J. Science, 2014, 343: 230

## 物理新闻和动态

### 厄尔尼诺会加剧和转移季节性风暴

在北美洲地区,冬季和春季的风暴次数与强度都在日益增加。气候的变化可能是导致风暴次数与强度增加的罪魁祸首,但年际的气候变化(即厄尔尼诺现象)也是导致风暴上升的因素。为此,美国阿拉斯加大学的 Xiangdong Zhang 和他的同事们进行了一系列的模拟研究工作,他们的工作中使用了美国国家大气研究中心的局域大气模型。由于地球上的气候变化,对初始条件

都非常敏感,所以 Zhang 的研究团队作了 120 次的模拟计算,让每一次的初始条件都有一些微小的改变,在这些变化中,有一半是考虑了厄瓜多尔附近海洋表面温度的上升,这个参数是厄尔尼诺现象的特征;还有一半不考虑这个参数。经过长达 7 个多月的数字运算后,得到的结果显示,厄尔尼诺现象会加剧冬季和春季季节性风暴的强度,同时增加了在北美洲西北、东南和西南方向上风暴出现的次数。但对北美洲的东南方向,厄尔尼诺现象的主要作用是使冬季风暴减弱。从

模型给出的各种参数中, Zhang 和他的研究团队确认了区域性大气斑图产生的原因。他们发现,在阿留申群岛上空的非厄尔尼诺运行区,大气角动量的聚集是风暴最大的孕育地,然后这些风暴向南移动,形成厄尔尼诺。厄尔尼诺不是由气候变化引起的,但是作为观测与模拟的结果表明,气候的变化正在使厄尔尼诺的强度变大和次数变多。所以大部分的加拿大和北美地区,冬季的天气变得越来越坏。

(黄 昀 编译自 *Geophys. Res. Lett.*, 2013, 40: 5228)