

# 高温超导体中二维反常金属态的证实\*

刘易<sup>1,2</sup> 唐钺<sup>1,2</sup> 王健<sup>1,2,3,4,†</sup>

(1 北京大学物理学院 量子材料科学中心 北京 100871)

(2 量子物质科学协同创新中心 北京 100871)

(3 中国科学院大学 中国科学院拓扑量子计算卓越创新中心 北京 100190)

(4 北京量子信息科学研究院 北京 100193)

2020-01-10收到

† email: jianwangphysics@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20200205

当超导体的厚度小于库珀对的相关长度时，库珀对在厚度方向的运动受限，可以看作是二维超导体。二维超导体因其中的量子涨落或热力学涨落带来的诸多新奇现象，以及在低耗散或无耗散电子学方面的潜在应用价值，已成为超导领域的重要研究方向。2015年凝聚态物理最高奖Buckley奖颁发给四位美国物理学家，以表彰他们在二维超导体中发现超导-绝缘体相变现象，该相变被认为是量子相变的范例。所谓量子相变，是指在绝对零度(-273.15℃)下系统处于量子基态时随着参数(如无序、磁场、门电压等)变化而发生的相变。在超导-绝缘体相变中，理论上只有两种基态，如果库珀对可以自由运动则会形成零电阻的超导态，反之则形成无法导电的绝缘态<sup>[1]</sup>。自然规律的魅力在于总会有意想不到的事情发生。三十多年前，Ga、Pb、In等颗粒状薄膜的研究揭示了二维超导体中可能存在的一种新奇特性：随着温度降低，薄膜的电阻先迅速下降然后逐渐趋于一个与温度无关的定值，类似金属特性<sup>[2]</sup>。这种特殊的金属态，无法用传统

金属理论Drude模型来解释，被称为反常金属态<sup>[3]</sup>。在过去的三十多年里，各国科学家们陆续在无定形MoGe薄膜、Ta薄膜、TaN薄膜、InO薄膜、石墨烯上的Sn岛阵列以及栅极调制的ZrNCl等多种二维超导体中观察到所谓“反常金属态”的迹象<sup>[4-9]</sup>。然而，最近的实验表明，用滤波器过滤了

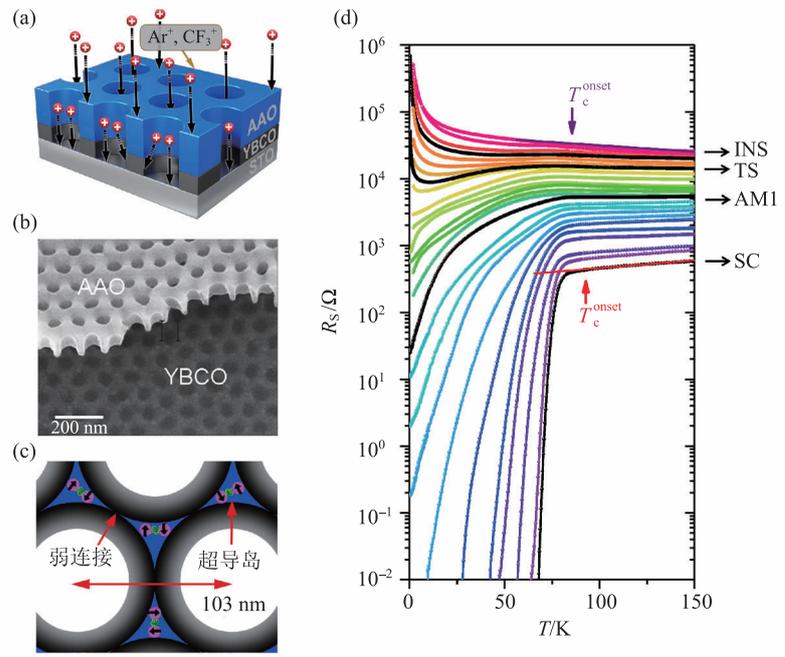


图1 钇钡铜氧(YBCO)纳米多孔薄膜的制备与物性 (a)以多孔氧化铝(AAO)为模板，运用反应离子束蚀刻技术制备YBCO纳米多孔薄膜示意图；(b)YBCO纳米多孔薄膜的扫描电子显微镜(SEM)图像；(c)YBCO纳米多孔薄膜的几何结构示意图；(d)不同刻蚀时间下，YBCO纳米多孔薄膜的电阻随温度的依赖关系。图中4条黑色曲线分别代表超导态(SC)、反常金属态(AM1)、过渡态(TS)和绝缘态(INS)四种典型薄膜的电阻温度关系(引自参考文献[11])

\* 国家自然科学基金(批准号: 11888101, 51722204, 11774008, 91421110, 11474175, 11674028, 11825404)、国家重点研发计划(批准号: 2018YFA0305604, 2015CB358600, 2017YFA0303300, 2016YFA0301001, 2017YFA0304600)、中央高校基本科研业务费(批准号: ZYGX2016Z004)、量子物质科学协同创新中心、中国科学院先导培育项目(批准号: XDB28000000)、低维物理国家重点实验室开放基金(批准号: KF201703)、北京市自然科学基金(批准号: Z180010)、北京市交叉科学与技术基金(批准号: Z181100004218001)、博士后科学基金(批准号: 2019M650290)资助项目

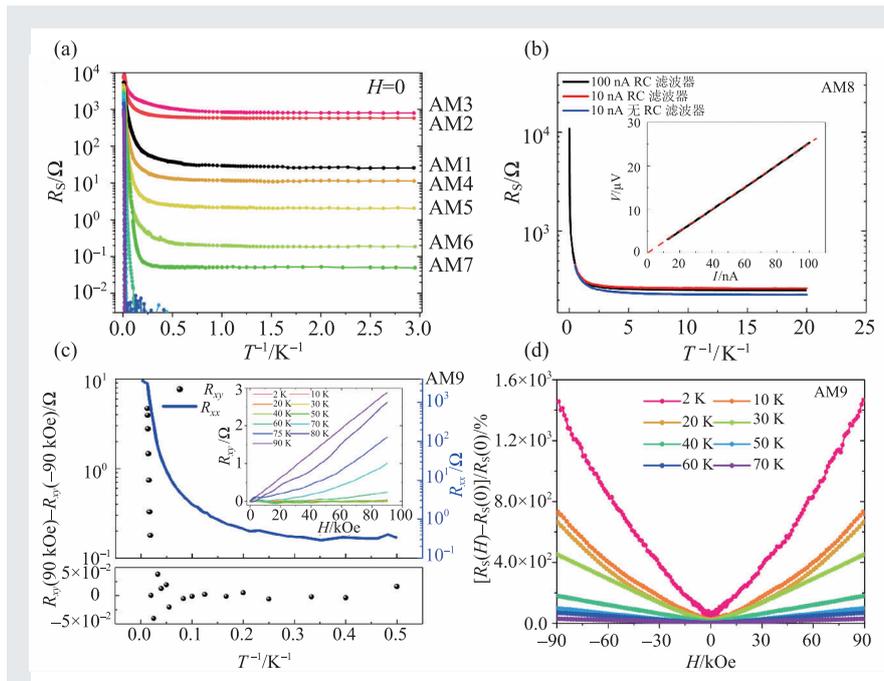
测量线路中的高频噪声信号后,在低温下表现为有限电阻的“反常金属态”会变成零电阻的超导态<sup>[10]</sup>。探测反常金属态通常需要进行非常精密的极低温实验,对于环境的要求极高,稍有干扰就会对实验现象产生极大的影响。因此,二维体系中是否存在反常金属充满争议,是国际学术界一直悬而未决的重要物理难题。

近期,我们与电子科技大学李言荣、熊杰研究团队以及布朗大学的James M. Valles Jr教授等合作,在高温超导钇钡铜氧(YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>(YBCO))纳米多孔薄膜中证实了二维反常金属态的存在<sup>[11]</sup>。我们运用反应离子束刻蚀技术在12 nm厚的YBCO薄膜上刻蚀出三角排列的孔洞阵列(图1(a-c))。通过调节反应离子束刻蚀的时间,观测到了YBCO薄膜中发生的超导—反常金属—绝缘体量子相变(图1(d)),这是一种典型的受无序调控的量子相变。

在YBCO多孔薄膜中,二维反常金属存在的

直接证据是电阻随着温度降低先下降,然后趋于一个非零常数。如图2(a)所示,YBCO多孔薄膜的电阻在5 K( $1/T=0.2\text{ K}^{-1}$ )附近开始呈现出饱和的趋势,这一饱和温度远超过之前的报道。这种有限电阻态表现出线性的金属伏安特性(图2(b)插图)。为了排除外界高频噪声对实验结果的影响,我们设计了高频滤波器极低温对照实验。实验表明,是否添加滤波器对电阻在低温下的饱和和规律没有明显作用(图2(b)),我们测到的电阻饱和和曲线是样品的本征特性,为反常金属态的存在提供了可靠的实验证据。为了进一步揭示反常金属态的其他新奇特性,我们研究了反常金属态薄膜的霍尔电阻,发现在超导转变温度以下,薄膜的霍尔电阻随着温度降低迅速减少至零欧姆(实验测量精度范围内),如图2(c)所示。霍尔效应的消失表明反常金属具有与超导体类似的粒子—空穴对称性(particle-hole symmetry)。此外,YBCO薄膜的电阻在9 T磁场下相比零磁场最高增大了十几倍(图2(d)),表现出巨磁阻效应,这是反常金属的另一重要特征。

更有意思的是,由于YBCO薄膜的孔洞十分均匀,我们在3种量子基态(超导态、反常金属态与绝缘态)对应的样品中均观测到电阻随磁场的周期性振荡,振荡周期对应于库珀对的量子磁通 $h/2e$ (图3(a-c))。在以电子为载流子的体系中,电阻振荡的周期通常对应于 $h/e$ 。而我们观测到的 $h/2e$ 周期振荡表明反常金属态的载流子由两个电子组成,即库珀对玻色子,这与传统金属以电子为载流子有显著的区别,说明库珀对在反常金属态的形成过程中起到了



**图2** YBCO薄膜中反常金属态的实验证据 (a)YBCO薄膜的电阻随着温度降低先下降,然后趋于一个较小的非零常数,这种低温下的电阻饱和和行为是反常金属态的典型特征;(b)高频滤波器对照实验表明,线路中的高频噪声并不会改变反常金属态薄膜低温下的电阻饱和和行为,排除了外界噪声对实验结果的干扰。插图:反常金属态薄膜表现出线性的金属伏安特性;(c)反常金属态薄膜的霍尔电阻 $R_{xy}$ 为零(霍尔效应消失),而纵向电阻 $R_{xx}$ 不为零;(d)反常金属态薄膜的巨磁阻效应(引自参考文献[11])

重要的作用。通过对量子振荡振幅的进一步分析，我们得到了振荡振幅以及相位相干长度随温度的依赖关系。如图 3(d, e) 所示，对于超导态多孔薄膜，量子振荡的振幅随着温度降低迅速增加直至发散；对于绝缘态薄膜，振荡振幅随着温度降低先增加后减小；而对于反常金属态薄膜，振荡振幅随温度降低先增加然后在低温下趋于饱和。反常金属态的振荡振幅和相位相干长度在低温下饱和的特征，有望揭示反常金属态的物理本质(如体系的耗散等物理过程)，开启一个全新的研究方向。

我们的工作为国际学术界争论了三十多年的二维反常金属态的存在提供了有力的实验证据，为研究反常金属的量子起源提供了新的思路。反常金属(亦有专家称其为玻色金属或量子金属)的证实得到了国际学术界的广泛关注。玻色金属理论的提出者美国伊利诺伊大学 Philip W. Phillips 教授在 *Science* 上以《终获自由：玻色金属“猛兽出笼”》为题发表 Perspective 文章指出，我们的实验结果使得“学术争议结束，玻色子可以像金属

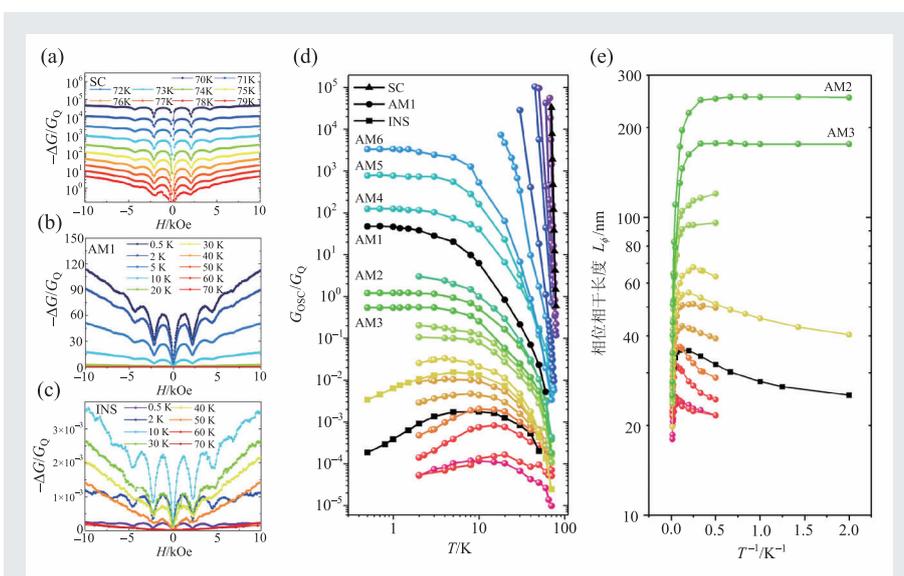


图 3 YBCO 薄膜中(a)超导态、(b)反常金属态、(c)绝缘态的与库珀对相关的  $h/2e$  周期性量子振荡数据图。量子振荡的分析结果表明，振荡振幅(d)和库珀对的相位相干长度(e)在低温下饱和。这一发现有望揭示反常金属态的物理本质(引自参考文献[11])

一样存在”<sup>[12]</sup>。美国科学院院士斯坦福大学 Steven A. Kivelson 教授在 *Journal Club for Condensed Matter Physics* 上发表评论文章高度评价了我们的工作。Kivelson 教授指出，反常金属的证实“对量子材料的理解具有基础性的重要意义”<sup>[13]</sup>。

**致谢** 感谢电子科技大学李言荣院士、熊杰教授、张万里教授、博士生杨超，布朗大学 James M. Valles Jr 教授、Jimmy Xu 教授，北京师范大学刘海文研究员，清华大学姚宏教授，北京大学林熙研究员等对本工作的贡献。

## 参考文献

- [1] Goldman A M. *Int. J. Mod. Phys. B*, 2010, 23: 4081
- [2] Jaeger H M, Haviland D B, Orr B G *et al.* *Phys. Rev. B*, 1989, 40: 182
- [3] Kapitulnik A, Kivelson S A, Spivak B. *Rev. Mod. Phys.*, 2019, 91: 011002
- [4] Ephron D, Yazdani A, Kapitulnik A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 76: 1529
- [5] Christiansen C, Hernandez L M, Goldman A M. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 88: 037004
- [6] Qin Y, Vicente C L, Yoon J. *Phys. Rev. B*, 2006, 73: 100505
- [7] Han Z *et al.* *Nat. Phys.*, 2014, 10: 380
- [8] Breznay N P, Kapitulnik A. *Sci. Adv.*, 2017, 3: e1700612
- [9] Saito Y, Kasahara Y, Ye J *et al.* *Science*, 2015, 350: 409
- [10] Tamir I *et al.* *Sci. Adv.*, 2019, 5: eaau3826
- [11] Yang C *et al.* *Science*, 2019, 366: 1505
- [12] Phillips P W. *Science*, 2019, 366: 1450
- [13] <https://www.condmatjclub.org/?p=3560>



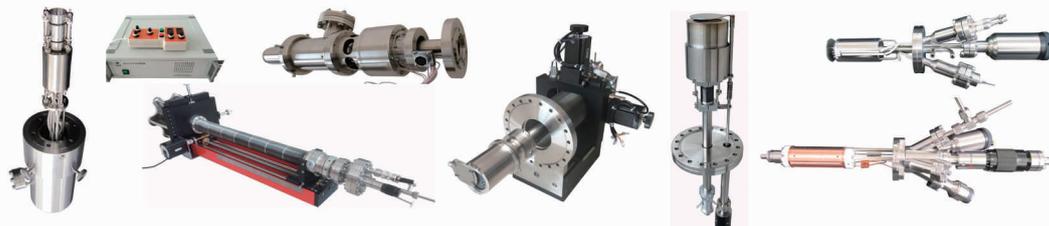
## 大连齐维科技发展有限公司

地址: 大连高新园区龙头工业园龙天路27号

电话: 0411-8628-6788 传真: 0411-8628-5677

E-mail: [info@chi-vac.com](mailto:info@chi-vac.com) HP: <http://www.chi-vac.com>

表面处理和薄膜生长产品: 氩离子枪、RHEED、磁控溅射靶、束源炉、电子轰击蒸发源、样品台。



超高真空腔室和薄膜生长设备: PLD系统、磁控溅射系统、分子束外延系统、热蒸发镀膜装置。



## Advanced Research Systems 低温超导设备制造专家 1.5K-800K全程低温超导解决方案

### 低温探针台

ARS生产的低温探针台, 是理想的低温测试平台。它提供稳定的变温环境(4K-800K), 可在不破坏材料或器件的情况下进行可重复的电学, 微波, 光电, 磁电, 磁光等测试。

ARS可提供低温超导磁体探针台、低温电磁体探针台、低温超稳结构探针台、低温闭循环探针台及液氮/液氮探针台等多种探针台以满足客户不同应用需求。

ARS探针台根据客户需要装配直流探针臂、微波探针臂、光纤探针臂。并可选配超高真空结构, 真空度优于 $10^{-9}$  Pa, 以及快速换样结构。

ARS可接受各种不同结构探针台定制。



**DOWELLLAB**  
扫一扫关注官方微信  
了解更多产品信息

天津多为莱博科技有限公司是ARS产品在中国的独家代理  
网址: [www.dowelllab.com](http://www.dowelllab.com) 邮箱: [sales@dowelllab.com](mailto:sales@dowelllab.com)  
销售及服务热线: 022-26802283