

三重兼并费米子拓扑半金属 MoP 高压超导相的低压截获^{*}

陈兆亮, 迟振华[†], 崔田[†]

宁波大学物理科学与技术学院, 高压物理科学研究院, 宁波 315211

收稿日期: 2023-03-04; 接收日期: 2023-03-22

【摘要】 碳化钨结构的三重兼并费米子拓扑半金属 MoP 高压下发生超导转变, 然而, 高压超导相能否在低压甚至常压截获尚不清楚. 本文对两个密封于金刚石对顶砧中的 MoP 高压超导相在室温条件下进行快速卸压, 通过测量低温电阻对温度的依赖关系, 验证能否在低压甚至常压截获高压超导相. 实验结果表明: 初始压力 61.5 GPa 的样品 #1, 超导电性可截获的最低压力为 44.2 GPa; 初始压力 95.0 GPa 的样品 #2, 超导电性可截获的最低压力为 3.5 GPa.

关键词: 高压, 三重兼并费米子拓扑半金属, 超导电性, 低压截获

PACS: 07.35.+K, 74.62.Fj, 72.15.-v, 71.5.Ak

DOI: 10.13380/j.ltpl.2023.01.006

Interception of High-Pressure Superconducting Phase of Triply Degenerated Fermion Topological Semimetal MoP at Low Pressure^{*}

CHEN Zhaoliang, CHI Zhenhua[†], CUI Tian[†]

Institute of High Pressure Physics, School of Physical Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211

Received date: 2023-03-04; accepted date: 2023-03-22

【Abstract】 The triply degenerated fermion host topological semimetal MoP is pressurized to exhibit superconductivity. However, whether the high-pressure superconducting phase could be intercepted at ambient pressure or not is unclear. In this paper, we rapidly decompress two high-pressure superconducting phases sealed in the sample chamber of diamond anvil cell at room temperature, in order to check the possibility of interception at ambient pressure. It is demonstrated that the high-pressure superconducting phase of sample #1 could be intercepted at 44.2 GPa, and the high-pressure superconducting phase of sample #2 could be intercepted at 3.5 GPa. The high-pressure superconducting phase potentially to be intercepted at ambient pressure is a promising candidate of topological superconductor.

Keywords: High pressure, Triply degenerated fermion topological semimetal, Superconductivity, Interception at low pressure

PACS: 07.35.+K, 74.62.Fj, 72.15.-v, 71.5.Ak

DOI: 10.13380/j.ltpl.2023.01.006

Reference method: CHEN Zhaoliang, CHI Zhenhua, CUI Tian, Low. Temp. Phys. Lett. **45**, 0050 (2023)

^{*} 宁波大学科研启动项目(批准号:ZX2022000142)和浙江省科技创新团队项目(批准号:2021R01004)资助的课题.

[†] chizhenhua@nbu.edu.cn; cuitian@nbu.edu.cn

1 引言

拓扑材料具有拓扑保护的非常平庸能带结构,包括拓扑绝缘体^[1,2]、拓扑半金属^[3-13]和拓扑超导体^[1]. 拓扑半金属根据磁单极子在晶格动量空间分布不同,可分为狄拉克半金属^[3-5]、外尔半金属^[6-9]、节线半金属和多重兼并费米子半金属^[10-13]等. 拓扑超导体是可应用于拓扑量子计算的马约拉纳费米子的宿主,但拓扑超导体在自然界中非常稀少. 研究表明:通过掺杂^[14-16]和加压^[17-20]将超导电性引入拓扑材料包括拓扑绝缘体和拓扑半金属是制备拓扑超导体的有效手段. 2011年,中国科学院物理研究所靳常青团队通过压力调控观测到了压力诱导拓扑绝缘体 Bi_2Te_3 的超导电性^[17]. 2013年, K. Kirshenbaum 等人通过压力调控发现了压力诱导拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 的超导电性^[18]. 2015年,中国科学院物理研究所孙力玲团队^[19]和南京大学宋凤麒团队^[20]同时报道了压力诱导第二类拓扑外尔半金属 WTe_2 的超导电性. 压力,作为一个独立于组分和磁场的热力学参数,在不引入组分无序的前提下,通过缩小原子间距增强原子之间的相互作用,通过体积塌缩增强晶体中近邻位置电子轨道波函数之间的交叠,反过来增大电荷跃迁动能对库仑排斥势能之比,是调控关联电子体系微观相互作用的一种连续、可逆、可控的洁净物理手段,可以直接探测关联电子体系的量子临界行为. 压力通过调控不同基态之间的相互竞争可诱导出演生的宏观量子现象,比如,压力诱导的超导电性是关联电子体系中常见的演生宏观量子现象.

与体态具有能隙的拓扑绝缘体和拓扑超导体不同,拓扑半金属在费米能级附近具有导带和价带的线性交叉点,展出手性异常、量子反常霍尔效应、量子自旋霍尔效应、超大磁电阻、超高载流子迁移率等新奇的物理性质. MoP 是一种碳化钨结构(空间群: $P-6m2$)的三重兼并费米子拓扑半金属^[12]. 前期工作中,我们实现了压力诱导 MoP 的超导电性,发生超导转变的临界压力在 27 GPa 左右,超导转变临界温度 T_c 约为 2.5 K,随着压力升高, T_c 升高,在 100 GPa 左右, T_c 接近 4 K. 高压同步辐射 X 射线衍射研究表明: MoP 在 0~60 GPa 压力范围内不发生结构相变,晶体结构对称性保持不变,即能带结构的拓扑属性保持不变, MoP 在 27~60 GPa 压力

范围内可能是拓扑超导体^[21]. 如果高压超导相能在低压甚至常压截获,可能是一种有应用前景的拓扑超导体候选材料. 本文中,我们将两个密封于金刚石对顶砧中的 MoP 高压超导相在室温条件下进行快速卸压,观测其超导电性是否可以维持到低压甚至常压. 实验结果表明:初始压力 61.5 GPa 的样品 #1,超导电性可截获的最低压力为 44.2 GPa;初始压力 95.0 GPa 的样品 #2,超导电性可截获的最低压力为 3.5 GPa.

2 实验方法

MoP 单晶样品采用锆为助熔剂通过固态反应生长获得. 高压低温电阻测量采用的高压产生装置是日本 HMD 公司的螺纹旋进加压式铍铜金刚石对顶砧(Diamond Anvil Cell,简称 DAC),一对台面直径 300 微米的金刚石压砧互相挤压产生高压. 初始厚度为 250 微米的钨片预压到厚度 30 微米,利用激光打孔将直径 300 微米的压痕全部打掉,然后填充立方氮化硼粉和环氧树脂粘接剂混合物,重新预压到厚度 30 微米形成致密的绝缘层,手工切割 4 根厚度为 5 微米的铂片做电极,将 4 根电极预压在绝缘层表面,电极按照 van der Pauw 法排布,挑选一片接近正方形形状样品与 4 根电极搭接,加压保证样品和电极之间良好的电接触,样品和电极之间的接触布局如图 1 所示.

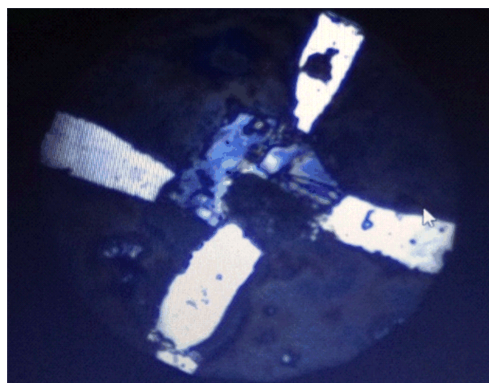


图 1 样品和电极布局图

3 结果与讨论

在室温条件下对初始压力 61.5 GPa 的样品 #1 进行快速卸压,电阻随温度的变化曲线如图 2 所示. 卸压至 44.2 GPa,仍保持超导电性,超导转变临界温度 T_c 约为 2.5 K. 继续卸压至 22.5 GPa,超导

电性消失,继续卸压至 4.0 GPa,仍无超导电性.材料的亚稳态通常具有稳态所不具备的优异性能.亚稳态动力学稳定而热力学不稳定,受能量势垒保护.利用亚稳态和稳态之间的能量势垒,通过迅速卸压或降温,可以截获亚稳态.本文实验中没有打样品孔填充传压介质,样品和金刚石压砧台面直接接触,近似于被单轴压缩,导致样品承受非常大的轴向应力和压力梯度,而应力和压力不均匀可以增强亚稳态和稳态之间的能量势垒,足够高的能量势垒可以阻止从亚稳态返回到稳态,从而截获亚稳态.压力诱导的超导相可以认为是一种亚稳态,在合适的温度条件下,从合适的初始压力迅速卸压有可能在低压甚至常压截获亚稳态的高压超导相.对样品 #1,在室温条件下,从 61.5 GPa 迅速卸压至 44.2 GPa 可以截获亚稳态的高压超导相;从 44.2 GPa 迅速卸压至 22.5 GPa 则无法截获亚稳态的高压超导相;从 22.5 GPa 迅速卸压至 4.0 GPa 也无法截获亚稳态的高压超导相.

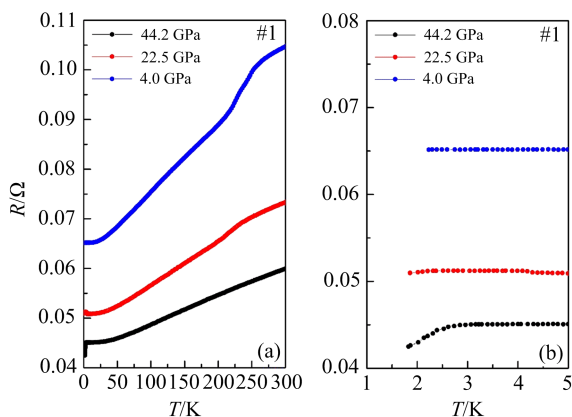


图 2 样品 #1 卸压过程中的电阻-温度曲线

在室温条件下对初始压力 95.0 GPa 的样品 #2 进行快速卸压,电阻随温度的变化曲线如图 3 所示.卸压至 52.2 GPa,仍保持超导电性,超导转变临界温度 T_c 约为 3.5 K.继续卸压至 28.0 GPa,仍保持超导电性,超导转变临界温度 T_c 约为 3.1 K.继续卸压至 3.5 GPa,仍保持超导电性,超导转变临界温度 T_c 约为 2.5 K.表明:压力诱导的超导转变是不可逆相变.压力诱导的超导相可以认为是一种亚稳态,在合适的温度条件下,从合适的初始压力迅速卸压有可能在低压甚至常压截获亚稳态的高压超导相.对样品 #2,在室温条件下,从 95.0 GPa 迅速卸压至 52.2 GPa 可以截获亚稳态的高压超导相;从

52.2 GPa 迅速卸压至 28.0 GPa 也可以截获亚稳态的高压超导相;从 28.0 GPa 迅速卸压至 3.5 GPa 同样可以截获亚稳态的高压超导相.

比较发现,样品 #1 和样品 #2 亚稳态的高压超导相可截获的最低压力截然不同,可归因于不同初始压力下制备的初始亚稳态的高压超导相热力学稳定性不同,造成初始亚稳态的高压超导相和稳态的低压非超导相之间的能量势垒不同.

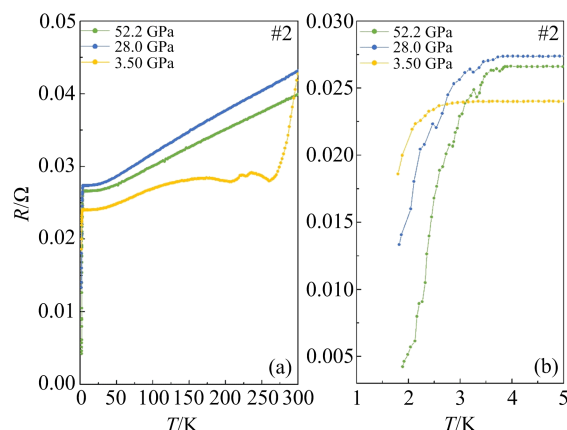


图 3 样品 #2 卸压过程中的电阻-温度曲线

为了验证图 3 中的电阻突降是起源于超导转变,对在室温条件下从初始压力 95.0 GPa 迅速卸压至 79.0 GPa 的样品 #2 进行了外磁场中低温电阻随温度的变化曲线测量.随外磁场强度增加,发生电阻突降的温度单调降低,表明外磁场对其有显著的抑制作用,电阻突降是由于发生超导转变,如图 4 (a)所示.利用图 4(a)中提取的上临界磁场和对应

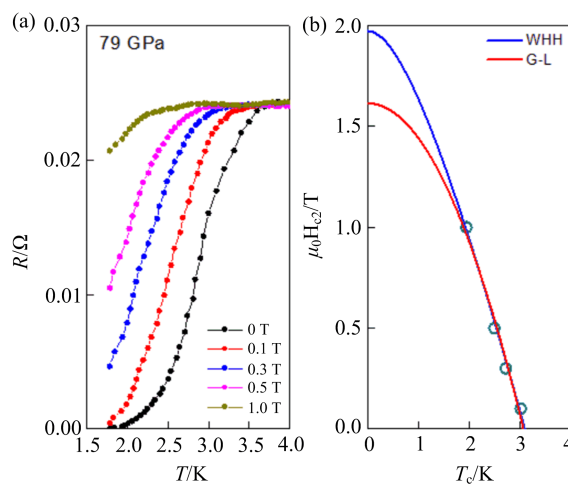


图 4 样品 #2 卸压至 79 GPa 所截获高压超导相的上临界磁场

超导转变温度数据绘制图 4(b), 用 Ginzburg-Landau (G-L) 方程和 Werthamer-Helfand-Hohenberg (WHH) 方程拟合得到卸压至 79.0 GPa 所截获高压超导相的零温上临界磁场分别为 1.62 T 和 1.94 T, 均显著低于 Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 弱耦合泡利顺磁极限 $1.84T_c = 6.44$ T. 泡利极限场的强度由打开超导电子库伯对所需的塞曼能所决定, MoP 中的强自旋-轨道耦合对超导电性的贡献增强了泡利顺磁配对破缺所需能量. 泡利极限场的有效性暗示 MoP 中压力诱导的超导电性起源于电子-声子耦合, 属于常规 BCS 超导体.

4 结 论

本文主要研究了三重兼并费米子拓扑半金属

MoP 高压超导相的低压截获. 研究表明: 初始压力 61.5 GPa 的样品 #1, 超导电性可截获的最低压力为 44.2 GPa; 初始压力 95.0 GPa 的样品 #2, 超导电性可截获的最低压力为 3.5 GPa. 在合适的温度条件下, 比如液氮或液氦温度, 从合适的初始压力进行快速卸压, 利用亚稳态的高压超导相和稳态的常压非超导相之间的能量势垒, 有望在常压截获亚稳态的高压超导相, 常压截获的亚稳态的高压超导相是一种有应用前景的拓扑超导体候选材料, 可通过角分辨光电子能谱和扫描隧道谱等手段进行验证.

参 考 文 献

- [1] X. Qi, S.-C. Zhang, *Rev. Mod. Phys.*, **83**(2011), 1057
- [2] P. Dziawa, B. J. Kowalski, K. Dybko, R. Buczko, A. Szczerbakow, M. Szot, E. Lusakowska, T. Balasubramanian, B. M. Wojek, M. H. Berntsen, O. Tjernberg, T. Story, *Nat. Mater.*, **11**(2012), 1023
- [3] Z. K. Liu, B. Zhou, Y. Zhang, Z. J. Wang, H. M. Weng, D. Prabhakaran, S.-K. Mo, Z. X. Shen, Z. Fang, X. Dai, Z. Hussain, Y. L. Chen, *Science*, **343**(2014), 864
- [4] Z. K. Liu, J. Jiang, B. Zhou, Z. J. Wang, Y. Zhang, H. M. Weng, D. Prabhakaran, S.-K. Mo, H. Peng, P. Dudin, T. Kim, M. Hoesch, Z. Fang, X. Dai, Z. X. Shen, D. L. Feng, Z. Hussain, Y. L. Chen, *Nat. Mater.*, **13**(2014), 677
- [5] M. Z. Yan, H. Q. Huang, K. N. Zhang, E. Wang, W. Yao, K. Deng, G. L. Wan, H. Y. Zhang, M. Arita, H. T. Yang, Z. Sun, H. Yao, Y. Wu, S. S. Fan, W. H. Duan, S. Y. Zhou, *Nat. Commun.*, **8**(2017), 257
- [6] S.-Y. Xu, I. Belopolski, N. Alidoust, M. Neupane, G. Bian, C. L. Zhang, R. Sankar, G. Q. Chang, Z. J. Yuan, C.-C. Lee, S.-M. Huang, H. Zheng, J. Ma, D. S. Sanchez, B. K. Wang, A. Bansil, F. C. Chou, P. P. Shibayev, H. Lin, S. Jia, M. Z. Hasan, *Science*, **349**(2015), 613
- [7] L. X. Yang, Z. K. Liu, Y. Sun, H. Peng, H. F. Yang, T. Zhang, B. Zhou, Y. Zhang, Y. F. Guo, M. Rahn, D. Prabhakaran, Z. Hussain, S.-K. Mo, C. Felser, B. Yan, Y. L. Chen, *Nat. Phys.*, **11**(2015), 728
- [8] A. A. Soluyanov, D. Gresch, Z. J. Wang, Q. S. Wu, M. Troyer, X. Dai, B. A. Bernevig, *Nature*, **527**(2015), 495
- [9] K. Deng, G. L. Wan, P. Deng, K. N. Zhang, S. J. Ding, E. Wang, M. Z. Yan, H. Q. Huang, H. Y. Zhang, Z. L. Xu, J. Denlinger, A. Fedorov, H. T. Yang, W. H. Duan, H. Yao, Y. Wu, S. S. Fan, H. J. Zhang, X. Chen, S. Y. Zhou, *Nat. Phys.*, **12**(2016), 1105
- [10] B. Bradlyn, J. Cano, Z. J. Wang, M. G. Vergniory, C. Felser, R. J. Cava, B. A. Bernevig, *Science*, **353**(2016), aaf5037
- [11] Z. M. Zhu, G. W. Winkler, Q. S. Wu, J. Li, A. A. Soluyanov, *Phys. Rev. X*, **6**(2016), 031003
- [12] B. Q. Lv, Z.-L. Feng, Q.-N. Xu, X. Gao, J.-Z. Ma, L.-Y. Kong, P. Richard, Y.-B. Huang, V. N. Strocov, C. Fang, H.-M. Weng, Y.-G. Shi, T. Qian, H. Ding, *Nature*, **546**(2017), 627
- [13] N. Kumar, Y. Sun, M. Nicklas, S. J. Watzman, O. Young, I. Leermakers, J. Hornung, J. Klotz, J. Gooth, K. Manna, V. Süß, S. N. Guin, T. Förster, M. Schmidt, L. Muechler, B. H. Yan, P. Werner, W. Schnelle, U. Zeitler, J. Wosnitza, S. S. P. Parkin, C. Felser, C. Shekhar, *Nat. Commun.*, **10**(2019), 2475
- [14] L. A. Wray, S.-Y. Xu, Y. Q. Xia, Y. S. Hor, D. Qian, A. V. Fedorov, H. Lin, A. Bansil, R. J. Cava, M. Z. Hasan, *Nat. Phys.*, **6**(2010), 855
- [15] K. Matano, M. Kriener, K. Segawa, Y. Ando, G.-Q. Zheng, *Nat. Phys.*, **12**(2016), 852
- [16] S. Yonezawa, K. Tajiri, S. Nakata, Y. Nagai, Z. W. Wang, K. Segawa, Y. Ando, Y. Maeno, *Nat. Phys.*, **13**(2017), 123

- [17] J. L. Zhang, S. J. Zhang, H. M. Weng, W. Zhang, L. X. Yang, Q. Q. Liu, S. M. Feng, X. C. Wang, R. C. Yu, L. Z. Cao, L. Wang, W. G. Yang, H. Z. Liu, W. Y. Zhao, S. C. Zhang, X. Dai, Z. Fang, C. Q. Jin, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **108** (2011), 24
- [18] K. Kirshenbaum, P. S. Syers, A. P. Hope, N. P. Butch, J. R. Jeffries, S. T. Weir, J. J. Hamlin, M. B. Maple, Y. K. Vohra, J. Paglione, *Phys. Rev. Lett.*, **111**(2013), 087001
- [19] D. F. Kang, Y. Z. Zhou, W. Yi, C. L. Yang, J. Guo, Y. G. Shi, S. Zhang, Z. Wang, C. Zhang, S. Jiang, A. G. Li, K. Yang, Q. Wu, G. M. Zhang, L. L. Sun, Z. X. Zhao, *Nat. Commun.*, **6**(2015), 7804
- [20] X. C. Pan, X. L. Chen, H. M. Liu, Y. Q. Feng, Z. X. Wei, Y. H. Zhou, Z. H. Chi, L. Pi, F. Yen, F. Q. Song, X. G. Wan, Z. R. Yang, B. G. Wang, G. H. Wang, Y. H. Zhang, *Nat. Commun.*, **6**(2015), 7805
- [21] Z. H. Chi, X. L. Chen, C. An, L. X. Yang, J. G. Zhao, Z. L. Feng, Y. H. Zhou, Y. Zhou, C. C. Gu, B. W. Zhang, Y. F. Yuan, C. Kenney-Benson, W. G. Yang, G. Wu, X. G. Wan, Y. -G. Shi, X. P. Yang, Z. R. Yang, *npj Quantum Mater.*, **3**(2018), 28