

LaO_{1-x}F_xBiS₂ 层状材料超导电性研究^{*}

王莹^{1,2†}, 包建华^{1,2}, 金香^{1,2}, 云慧琴^{1,2}

1. 包头师范学院, 物理科学与技术学院, 包头 014030, 内蒙古;

2. 包头师范学院, 内蒙古自治区高等学校磁学与磁性材料重点实验室, 包头 014030, 内蒙古

收稿日期: 2023-08-22; 接收日期: 2023-09-05

【摘要】 层状材料一直是超导研究领域的热点材料, 陆续有数十种新型的层状超导材料被不断发现, 从至今为止超导转变温度最高的铜氧化物材料, 到铁基超导, 再到诸多新型的层状材料, 学者们关于超导微观机制的理解也在随之更新, 从取得成功的 Bardeen-Cooper-Schrieffer 经典理论到至今无法解释的非常规超导机制, 研究之路从未停止. 本文将研究利用助熔剂法合成的 LaO_{1-x}F_xBiS₂ 材料的结构、电阻、磁化率等性质, 并与国际社会上已存在的研究成果进行对比, 同时从晶体结构、压力效应、体超导电性、临界温度、微观机制五个方面, 对近年发现的镧系铋硫基层状超导材料的研究情况进行讨论.

关键词: 铋硫基, 层状结构, 超导电性, 超导机制

PACS: O469

DOI: 10.13380/j.ltpl.2023.04.007

Study on Superconductivity of LaO_{1-x}F_xBiS₂ Layered Materials

WANG Ying^{1,2†}, BAO Jianhua^{1,2}, JIN Xiang^{1,2}, YUN Huiqin^{1,2}

1. Physics Institute of Science and Technology, Baotou Teachers College, Baotou 014030, China;

2. Key Laboratory for Magnetism and Magnetic Material of Inner Mongolia, Baotou Teachers College, Baotou 014030, China

Received date: 2023-08-22; accepted date: 2023-09-05

【Abstract】 Layered materials always is a hot topic in the field of superconductivity, and dozens of new layered superconductors are discovered. From cuprate superconductors with the highest superconductivity transition temperature, to the iron-based superconductors, and to many new layered materials, researchers' understanding of superconductivity mechanism is also being updated. From the successful Bardeen-Cooper-Schrieffer classical theory to the unconventional superconductivity mechanism that cannot be explained up, it has never stopped. In this paper, the crystal structure, electrical resistivity, magnetic susceptibility and other properties of LaO_{1-x}F_xBiS₂ synthesized by flux method are studied, and the existing research results are compared. Meanwhile, the recent discovery of lanthanide bismuth-sulfur based layered superconductor are discussed from crystal structure, pressure effect, bulk superconductivity, critical temperature, and superconductivity mechanism.

Keywords: Bismuth sulfur-based, Layered structure, Superconductivity, Superconductivity mechanism

PACS: O469

DOI: 10.13380/j.ltpl.2023.04.007

Reference method: WANG Ying, BAO Jianhua, JIN Xiang, YUN Huiqin, Low. Temp. Phys. Lett. **45**, 0240 (2023)

^{*} 内蒙古自治区高等学校科学技术研究项目(NJZY22019)和包头师范学院高层次人才引进人才科研启动基金项目资助的课题.

[†] 70215@btcc.edu.cn

1 引言

自从高温铜氧化物超导材料^[1]发现以来,众多新型层状超导材料被陆续发现,其中包括高温铁基超导材料^[2]、镍氧化物薄膜超导材料^[3]、铋硫基超导材料^[4]等等,因为层状结构独有的超导层和绝缘层相互交错的特殊结构,使得层状结构具有较高的可操作性,吸引了众多学者的目光。

2012年,日本 Mizuguchi 小组首次发现新型铋硫基层状超导材料 $\text{Bi}_4\text{O}_4\text{S}_3$ 的超导临界温度为 4.5 K 左右^[4],随后该小组又发现在高压(2 GPa)情况下, $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ 多晶样品的超导临界温度可以达到 10.6 K^[5]. 随后学者们将在铜氧化物超导和铁基超导研究过程中积累的经验应用到铋硫基超导中,在短短的几年时间内发现了十数种新型铋硫基超导材料. 例如,利用 Se 元素替代 S 元素,产生空穴载流子,形成超导临界温度为 4.0 K 的超导材料 $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiCh}_2$ ($\text{Ch} = \text{S}, \text{Se}$)^[6-7]; 利用稀土元素 Ce、Pr、Nd、Yb 替代 La 元素,形成超导临界温度为 2~10 K 的超导材料 $\text{REO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ ($\text{RE} = \text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Yb}$)^[8-12]; 利用四价的 Ti^{+4} 、 Zr^{+4} 、 Hf^{+4} 、 Th^{+4} 替换部分三价的 La^{+3} 也同样可以得到一系列超导材料 $\text{La}_{1-x}\text{M}_x\text{OBiS}_2$ ($\text{M} = \text{Ti}, \text{Zr}, \text{Hf}, \text{Th}$)^[13].

铋硫基超导系列材料中, $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ 材料因其类似于高温超导材料的结构而受到了广泛的研究,本文也将针对该系列材料进行结构、电阻、磁化率的研究,虽然其超导临界温度还未达到高温超导的范畴,但对研究层状材料的超导微观机制起了至关重要的作用,也掀起了科学家们探索新型层状超导材料和研究层状材料超导微观机制的浪潮。

2 实验方法

将原料 La_2S_3 (99.99%)、 Bi_2S_3 (99.99%)、 Bi_2O_3 (99.999%)、 BiF_3 (99.99%)、 Bi (99.99%) 按照化学计量比在 N_2 保护手套箱里进行称量,然后手动研磨 1 h. 将助熔剂 KCl ($\geq 99\%$) 和 CsCl ($\geq 99\%$) 按照 5:3 的摩尔比在空气中进行称量,然后手动研磨 1 h. 随后将所有原料(2 g)与助熔剂(15 g)混合后在空气中手动研磨 1 h 后封入真空石英管中进行退火,将封好的样品在 950℃ 保温 12 h 后,按照 1.0 °C/h 的速率降温至 600 °C,后自然冷却至室

温,生成单晶 $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ 材料. 样品的结构和性能测试分别利用单晶 XRD 衍射和多功能物性测量系统(PPMS)测量完成。

3 结果与讨论

3.1 晶体结构研究

REOBiS_2 的晶体结构如图 1^[14] 所示,其中 RE 代表镧系稀土元素,SC 和 BL 分别代表超导层(BiS_2)与绝缘层(REO),是类似于高温铜氧化物超导和铁基超导的相互交错的二维层状结构. 有许多研究表明其母相,即 LaOBiS_2 ,为绝缘体^[5],但可以通过 F 元素或 Se 元素的掺杂实现载流子的引入,并产生超导电性,其晶体结构如图 2^[14] 所示. 对于大部分的 REOBiS_2 和其掺杂化合物多为四方结构,空间群为 P4/nmm ,但其母相 LaOBiS_2 和 $\text{LaO-BiS}_{2-x}\text{Se}_x$ 却在室温附近表现出了从四方到单斜的结构转变^[15-16],究其原因可能为超导层(BiS_2)存在未配对的 Bi 电子,造成了结构的不稳定性^[17].

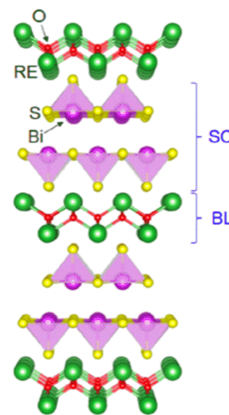


图 1 REOBiS_2 超导体的晶体结构图.

Fig. 1 The crystal structure of REOBiS_2 .

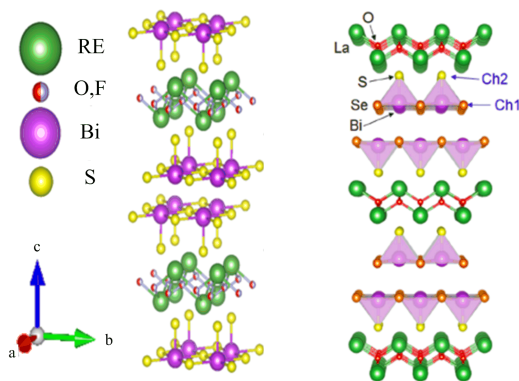


图 2 $\text{REO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiCh}_2$ ($\text{Ch} = \text{S}, \text{Se}$) 超导体的晶体结构图.

Fig. 2 The crystal structure of $\text{REO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiCh}_2$ ($\text{Ch} = \text{S}, \text{Se}$).

下表为 $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ ($x=0.4, 0.5$) 结构参数, 其空间群均为 P4/nmm , 且其结构同样为四方结构,

从表中可以看出当 $x=0.4, 0.5$ 时晶格常数的差距并不明显, 这也与其他学者的研究成果高度一致.

表 1 $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ ($x=0.4, 0.5$) 结构参数列表.

Table 1 List of crystal structure of $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ ($x=0.4, 0.5$).

x	$a/\text{\AA}$	$c/\text{\AA}$	c/a	$V/\text{\AA}^3$	键长 $d/\text{\AA}$				$\angle \text{S1-Bi-S1}/(^{\circ})$
					$d_{\text{Bi-S1}}$	$d_{\text{Bi-S2}}$	$d_{\text{La-S1}}$	$d_{\text{La-S2}}$	
0.4	4.0674	13.448	3.3063	222.49	2.8761	2.530	3.735	3.867	179.61
0.5	4.0655	13.433	3.3041	222.03	2.8748	2.530	3.748	3.862	180.38

3.2 压力效应研究

$\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ 层状超导体是对压力特别敏感的材料, 无论是在外界的压力条件下, 还是化学元素替代引起的化学内部压力, 都能引起超导临界温度的变化. 图 3 和 4 为日本 Mizuguchi 小组关于压力效应的研究结果, 如图 3 所示^[5], $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ 在外界高压退火的条件下, 引起了晶体结构有四方到单斜的转变, 超导临界温度有了明显的提升, 达到了 10.6 K, 且该温度后续被提高到 11.5 K^[18]. 图 4 为化学元素替代所引起的面内化学压力与超导临界温度的关系图^[19], 通过原子半径大于 S 原子的 Se 原子的替代和原子半径小于 La 原子的其他镧系元素的替代, 都能引起面内化学压力的增强, 而随着面内化学压力的增强, 超导临界温度也随之提高. 该结果也得到了国内外学者的肯定, 学者们都得到了与其一致的结果.

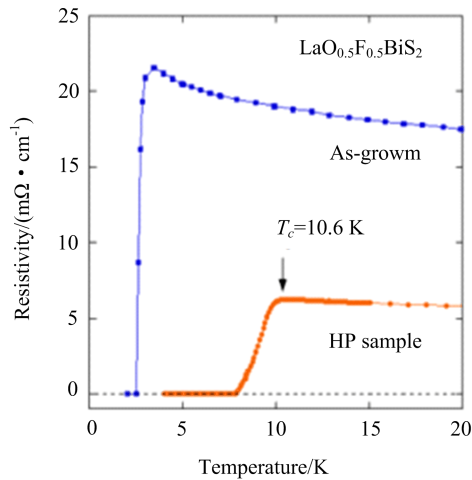


图 3 $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ 的电阻率随温度的变化图.

Fig. 3 Temperature dependences of electrical resistivity of $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$.

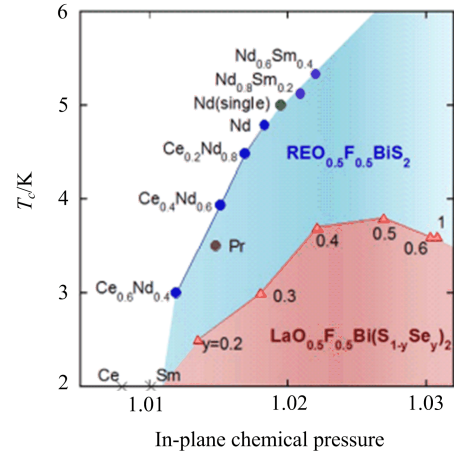


图 4 $\text{REO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ ($\text{Ch}=\text{S, Se}$) 超导临界温度随面内化学压力的变化图.

Fig. 4 T_c dependences of In-plane chemical pressure of $\text{REO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ and $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_{2-x}\text{Se}_x$.

研究表明面内化学压力 CP (Chemical Pressure) $= (R_{\text{Bi}} + R_{\text{S1}}) / (\text{Bi-S1 键长})$ ^[19], 其中 $R_{\text{Bi}} = 104.19 \text{ pm}$ 和 $R_{\text{S1}} = 184 \text{ pm}$ 分别为 Bi-S1 层内 Bi 离子和 S1 离子的半径, 利用表 1 中 Bi-S1 键长的数据, 我们可以计算出当 $x=0.4, 0.5$ 时, $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ ($x=0.4, 0.5$) 面内的化学压力均近似等于 1.005, 这也表明该系列材料的面内化学压力十分薄弱.

3.3 体超导电性研究

超导材料中含有超导相的多少是判定是否具备体超导电性的基本依据, 若材料中含有的超导相多为块状且量多, 则具备体超导电性 (bulk superconductivity), 若材料中含有的超导相多为丝状且量少, 则为丝状超导 (filamentary superconductor). 体超导电性表现出极强的完全抗磁性, 具有很强的应

用性,所以是层状超导材料中重要的性质之一,但是学者们关于 $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ 的体超导电性却没有达成一致。

关于体超导电性的研究有很多表征的形式,例如:研究表明化学压力 $\text{CP} \approx 1.011$ 是体超导电性和非超导电性的临界点^[19],如图4所示,表明 $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ 不具备体超导电性;图5是由磁化率测量结果得出的 $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{Bi}(\text{S}_{1-y}\text{Se}_y)_2$ 超导相图^[19],也表明 $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ 不具备体超导电性;图6是由比热测量结果得出的 $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ 电子比热与温度关系图^[20],在超导临界温度左右,比热存在明显的跳跃,表明 $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ 具备体超导电性。

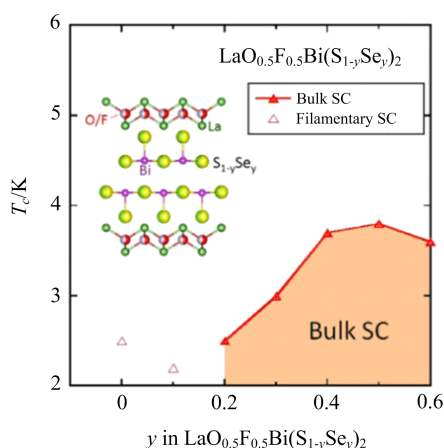


图5 $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{Bi}(\text{S}_{1-y}\text{Se}_y)_2$ 的超导相图。

Fig. 5 Superconductivity phase diagrams of $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{Bi}(\text{S}_{1-y}\text{Se}_y)_2$.

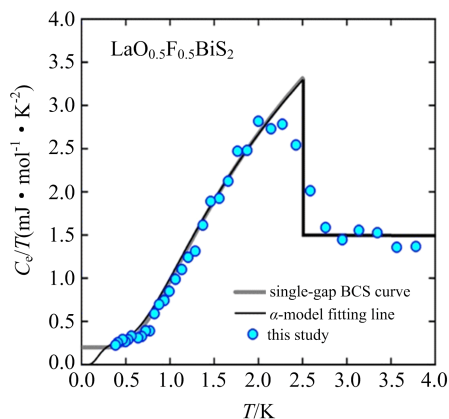


图6 $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ 电子比热与温度变化图。

Fig. 6 The plot of electronic specific heat C_e divide T versus temperature.

3.4 临界温度研究

关于超导临界温度的定义也有很多种途径.图6为电子比热随温度的变化图,一般将电子比热开始增大时对应温度与电子比热增大到最高值时对应温度的中点定义为超导临界温度,如图6所示, $T_c \approx 2.4$ K.图7为 $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ 电阻率随温度的变化图,小图为 $2 \sim 300$ K 范围内的电阻率变化图,在高温范围时,电阻率随温度的降低而升高,表现为半导体,在低温范围时,观测到电阻降低为零,表现为超导体,此时一般将电阻降低到最大值的 50% 时对应的温度定义为超导临界温度,如图7所示, $T_c \approx 2.7$ K. $\text{LaO}_{0.6}\text{F}_{0.4}\text{BiS}_2$ 样品并未观测到电阻降低到零的行为,我们认为 $x = 0.4$ 可能为存在超导电性的临界值.图8和图9为 $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ ($x = 0.4, 0.5$) 的磁化率随温度的变化图,均观测到抗磁的信号,但是由于仪器测量温度有限,磁化率并未达到饱和,且当 $x = 0.4$ 时,抗磁信号十分微弱,也印证了在 $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ 材料中 $x = 0.4$ 可能为超导现象的下限值,此时一般利用线性外推法来定义超导临界温度,将磁化率的最低值线性外推至零,交点即为超导临界温度,如图8和9所示, $T_c \approx 2.7$ K, $x = 0.5$; $T_c \approx 2.4$ K, $x = 0.4$.

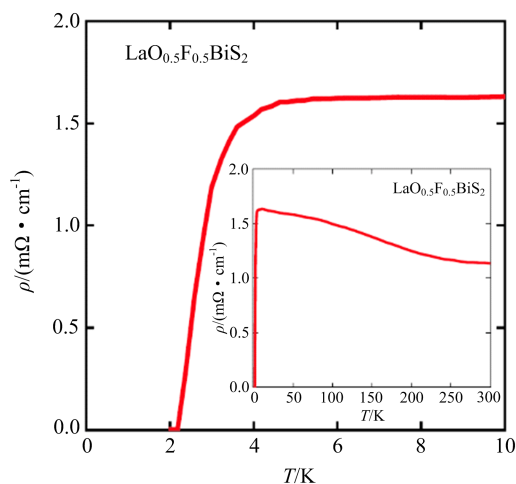


图7 $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ 的电阻率随温度的变化图。

Fig. 7 Temperature dependence of the electrical resistivity of $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ at low temperature. The inset is that of the range of temperature from 2 K to 300 K.

3.5 微观机制研究

对于 $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ 的超导微观机制方面,国

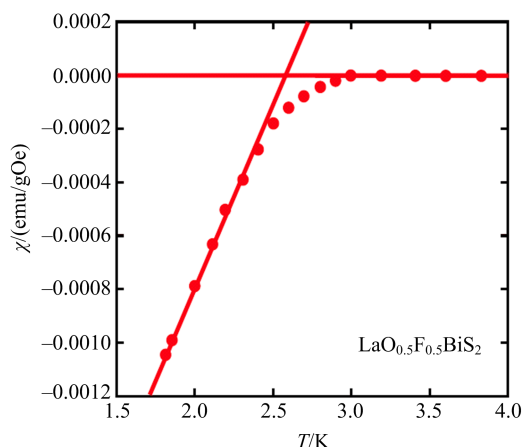

 图 8 $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ 的磁化率随温度的变化图.

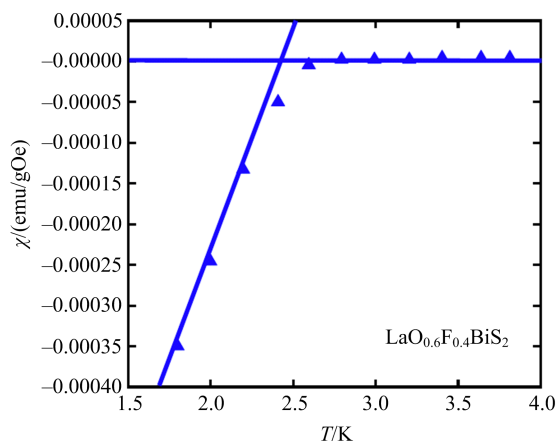
 Fig. 8 Temperature dependence of the magnetic susceptibility of $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ at low temperature.

 图 9 $\text{LaO}_{0.6}\text{F}_{0.4}\text{BiS}_2$ 的磁化率随温度的变化图.

 Fig. 9 Temperature dependence of the magnetic susceptibility of $\text{LaO}_{0.6}\text{F}_{0.4}\text{BiS}_2$ at low temperature.

际社会上并没有达成一致,并且还有很多截然不同的结果,所以仍然存在很大的争议性.图10为由磁穿透深度测量结果拟合得出的超流密度随温度的变化曲线,根据实验所得数据与理论曲线拟合的结果可知,该材料的超导能隙与 s 波能隙的结果拟合的最为接近^[21].图11为电子比热系数随磁场变化的测量数据,无论温度的高低,在 $0 \sim 0.2$ T 时,电子比热系数随着磁场的增加而线性增加,这就表明该材料的超导能隙为常规的 s 波的全能隙^[20].通过以上两种测量方式均得到统一的结果,即 $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ 的超导能隙为常规的 s 波的全能隙.图12横场 μ 子自旋弛豫测量结果,由穿透波长的实验数据和理论

曲线拟合的结果可知, $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ 的超导能隙的对称性存在两种情况,分别是 $s+s$ 波和各向异性的 s 波^[22].国际社会上还有许多学者利用能谱来测量 $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ 的能隙情况.如图13为点接触能谱图,可以看出该材料的超导能隙体现了非常规的超导能隙的对称性^[23],即在费米表面存在节点.

综上所述,针对 $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ 的超导微观机制问题,对已有研究结果进行整理如图14所示,分别为常规全能隙 s 波;存在节点与反节点的非常规 d 波;存在能隙各向异性的 s 波;以及同时存在两种不同的配对机制.无论通过哪种测量方式,针对 $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ 的超导微观机制仍旧存在争论,国际社会上并没有达成共识,所以研究该材料超导微观机制的问题,也就成了国际上学者争相探索的难题.

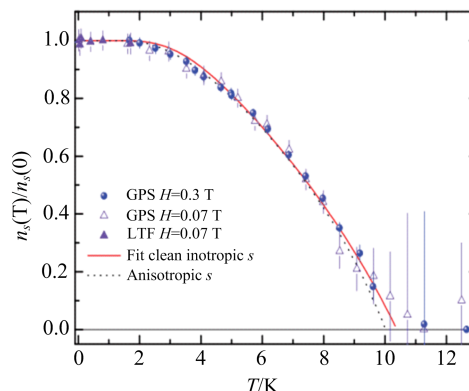

 图 10 $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ 的超流密度随温度的变化图.

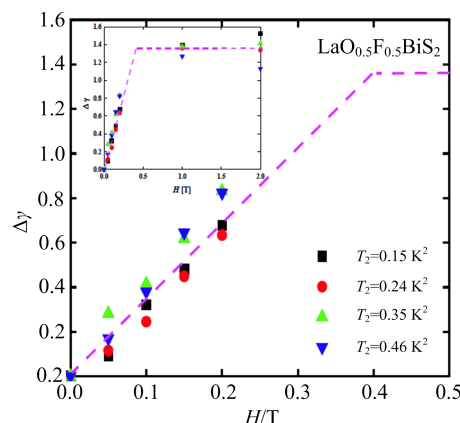
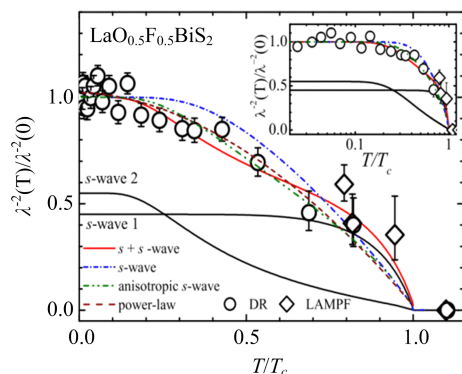
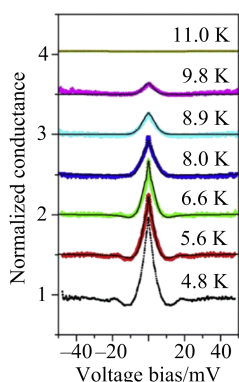
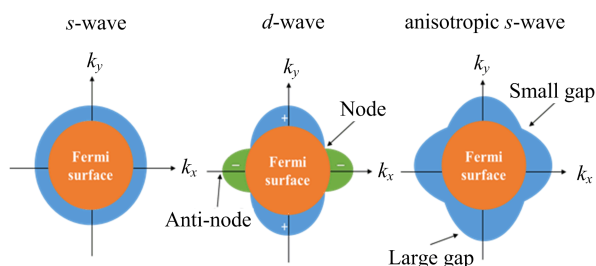
 Fig. 10 Temperature dependence of the normalized superfluid density of $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$.

 图 11 $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ 的电子比热系数随磁场的变化图.

 Fig. 11 $\Delta\gamma$ vs H of $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$.

图 12 $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ 的穿透波长随温度的变化图.Fig. 12 Penetration depth dependence of T/T_c of $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$.图 13 $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ 的点接触能谱图.Fig. 13 Point contact spectroscopy of $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$.图 14 不同的 $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ 的超导能隙配对机制汇总.Fig. 14 The plot of different pairing symmetries of superconducting gap of $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$.

4 总结与展望

本文利用助熔剂法合成 $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ ($x=0.4, 0.5$) 单晶样品, 并研究该系列样品的结构、电阻率、磁化率, 同时对镧系铋硫基系列材料发现至今的一些研究情况, 包括晶体结构、压力效应、体超导电性、超导临界温度、超导微观机制五方面内容进行了研究对比, 表明 $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ ($x=0.4, 0.5$) 系列材料为四方结构, 且空间群均为 $P4/nmm$, 当 $x=0.4, 0.5$ 时结构参数区别并不明显, 经计算面内化学压力约为 1.005, 表明面内化学压力较小, 对超导临界温度的提高不存在积极的效应, 经过电阻率、磁化率、比热的测量, $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ 的超导临界温度为 2.7 K 左右, 但当氟含量为 0.4 时, 材料的超导电性有了一定程度的退化, 所以我们认为氟含量为 0.4 时可能为超导现象的临界值. 虽然 $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ ($x=0.4, 0.5$) 系列材料的临界温度均属于较低的温度, 但当 $x=0.5$ 时, 电子比热存在较为明显的跳跃现象, 这也表明 $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ 具有体超导电性, 且其电子比热在磁场的作用下呈现线性增加的现象, 也表明了其超导能隙为常规的全能隙 s 波.

镧系铋硫基系列材料因其简单的结构得到了学者们的广泛关注, 但该系列超导临界温度并未达到高温的范畴, 所以学者们将研究的重点转向了超导的微观机制方面, 期待可以解释产生超导电性的原理, 但到目前为止关于超导微观机制的认识并没有达成一致, 探寻解密的道路仍然任重道远, 这也是我们持续努力奋斗的动力, 期待产生新的研究成果.

参 考 文 献

- [1] J. G. Bednorz, K. A. Miller, *Z. Phys. B: Condens. Matter.*, **64** (1986), 189
- [2] Y. Kamihara, H. Hiramatsu, M. Hirano, R. Kawamura, H. Yanagi, T. Kamiya, H. Hosono, *J. Am. Chem. Soc.*, **128** (2006), 10012
- [3] D. Li, K. Lee, B. Y. Wang, M. Osada, S. Crossley, H. R. Lee, Y. Cui, Y. Hikita, H. Y. Hwang, *Nature*, **572** (2019), 624

- [4] Y. Mizuguchi, H. Fujihisa, Y. Gotoh, K. Suzuki, H. Usui, K. Kuroki, S. Demura, Y. Takano, H. Izawa, O. Miura, *Phys. Rev. B*, **86** (2012), 220510
- [5] Y. Mizuguchi, S. Demura, K. Deguchi, Y. Takano, H. Fujihisa, Y. Gotoh, H. Izawa, O. Miura, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **81** (2012), 114725
- [6] M. Tanaka, T. Yamaki, Y. Matsushita, M. Fujioka, S. J. Denholme, T. Yamaguchi, H. Takeya, Y. Takano, *Appl. Phys. Lett.*, **106** (2015), 112601
- [7] M. Fujioka, M. Tanaka, S. J. Denholme, T. Yamaki, H. Takeya, T. Yamaguchi, Y. Takano, *Europhys. Lett.*, **108** (2014), 47007
- [8] G. K. Selvan, G. Thakur, K. Manikandan, A. Banerjee, Z. Haque, L. C. Gupta, A. Ganguli, S. Arumugam, *J. Phys. D*, **49** (2016), 275002
- [9] D. Yazici, K. Huang, B. D. White, A. H. Chang, A. J. Friedman, M. B. Maple, *Philos. Mag.*, **93** (2013), 673
- [10] C. T. Wolowiec, B. D. White, I. Jeon, D. Yazici, K. Huang, M. B. Maple, *J. Phys. : Condens. Matter.*, **25** (2013), 422201
- [11] C. T. Wolowiec, D. Yazici, B. D. White, K. Huang, M. B. Maple, *Phys. Rev. B*, **88** (2013), 064503
- [12] M. Fujioka, M. Nagao, S. J. Denholme, M. Tanaka, H. Takeya, T. Yamaguchi, Y. Takano, *Appl. Phys. Lett.*, **105** (2014), 052601
- [13] D. Yazici, K. Huang, B. D. White, I. Jeon, V. W. Burnett, A. J. Friedman, I. K. Lum, M. Nallaiyan, S. Spagna, M. B. Maple, *Phys. Rev. B*, **87** (2013), 174512
- [14] Y. Mizuguchi, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **88** (2019), 041001
- [15] R. Sagayama, H. Sagayama, R. Kumai, Y. Murakami, T. Asano, J. Kajitani, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **84** (2015), 123703
- [16] K. Nagasaka, A. Nishida, R. Jha, J. Kajitani, O. Miura, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, H. Usui, K. Kuroki, Y. Mizuguchi, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **86** (2017), 074701
- [17] T. Yildirim, *Phys. Rev. B*, **87** (2013), 477-487
- [18] Y. Mizuguchi, T. Hiroi, J. Kajitani, H. Takatsu, H. Kawawaki, O. Miura, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **83** (2014), 053704
- [19] Y. Mizuguchi, A. Miura, J. Kajitani, T. Hiroi, O. Miura, K. Tadanaga, N. Kumada, E. Magome, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, *Sci. Rep.*, **5** (2015), 14968
- [20] Y. Wang, S. Takahashi, T. Suda, T. Tamura, H. Ohta, T. Kurosawa, M. Oda, M. Ido, N. Momono, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **89** (2020), 094708
- [21] G. Lamura, T. Shiroka, P. Bonfa, S. Sanna, R. De Renzi, C. Baines, H. Luetkens, J. Kajitani, Y. Mizuguchi, O. Miura, K. Deguchi, S. Demura, Y. Takano, M. Putti, *Phys. Rev. B*, **88** (2013), 180509
- [22] J. Zhang, K. Huang, Z. F. Ding, D. E. MacLaughlin, O. O. Bernal, P. C. Ho, C. Tan, X. Liu, D. Yazici, M. B. Maple, L. Shu, *Phys. Rev. B*, **94** (2016), 224502
- [23] F. Giubileo, F. Romeo, A. Di Bartolomeo, Y. Mizuguchi, P. Romano, *J. Phys. Chem. Solids.*, **118** (2018), 192-199