

FeSe 基超导体的探索与物性研究

王乃舟 石孟竹 雷彬 陈仙辉

Exploration and physical investigation of FeSe-based superconductors

Wang Nai-Zhou Shi Meng-Zhu Lei Bin Chen Xian-Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 207408 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181496

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181496>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I20>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高质量 FeSe 单晶薄膜的制备及相关性能表征

Preparation and characterization of high-quality FeSe single crystal thin films

物理学报.2018, 67(20): 207401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180940>

122 型铁基超导线带材实用化研究进展

Recent progress of 122-type iron-based superconducting wires and tapes

物理学报.2018, 67(20): 207402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181256>

空心圆柱形永磁体内径对单畴 GdBCO 超导块材磁悬浮力的影响

Effect of inner diameter of hollow cylindrical permanent magnet on levitation force of single domain GdBCO bulk superconductor

物理学报.2018, 67(7): 077401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172418>

压力下铁砷基化合物的超导电性研究

Superconductivities of pressurized iron pnictide superconductors

物理学报.2017, 66(3): 037402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.037402>

时效 Ag-7wt.%Cu 合金的微观组织、电阻率和硬度

Microstructure, resistivity, and hardness of aged Ag-7wt.%Cu alloy

物理学报.2017, 66(2): 027401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.027401>

专题: 铁基高温超导体发现十周年

## FeSe基超导体的探索与物性研究

王乃舟<sup>1)2)</sup> 石孟竹<sup>1)2)</sup> 雷彬<sup>1)2)</sup> 陈仙辉<sup>1)2)3)4)†</sup>

1) (中国科学技术大学物理系, 合肥 230026)

2) (中国科学技术大学, 中国科学院强耦合量子材料物理重点实验室, 合肥 230026)

3) (南京大学, 人工微结构科学与技术协同创新中心, 南京 210093)

4) (中国科学院超导电子学卓越创新中心, 上海 200050)

(2018年8月7日收到; 2018年9月11日收到修改稿)

自从2008年铁基超导体发现以来, 人们探索并发现了一系列的铁基高温超导材料, 其中FeSe基超导体因其具有的独特性质而引起了人们的广泛关注. 本文主要介绍了两类新的铁基超导体, 即水热合成法合成的(Li, Fe)OHFeSe及电化学插层方法合成的(CTA)<sub>x</sub>FeSe的晶体结构及超导性质; 对近年发展起来的利用电双层场效应晶体管技术以及固态离子导体调控FeSe的电子态性质的研究做了简要介绍.

**关键词:** 非常规超导体, 铁基超导体, FeSe基超导体, 栅压调控

**PACS:** 74.25.-q, 74.25.F-, 74.70.Xa

**DOI:** 10.7498/aps.67.20181496

## 1 引言

自从1911年荷兰莱顿大学(University of Leiden)的卡末林·昂纳斯(Heike Kamerlingh Onnes)在汞中发现超导电性以来<sup>[1]</sup>, 超导材料的研究就一直是凝聚态物理学中最为核心的研究领域之一. 在这之后的很长一段时期里, 众多物理学家和材料学家都在想方设法提高超导体的超导转变温度( $T_c$ ). 转机出现在1986年, IBM实验室的瑞士物理学家贝德诺尔茨(Johannes Georg Bednorz)和米勒(K. Alex Müller)<sup>[2]</sup>在具有钙钛矿结构的铜氧化物材料La<sub>2-x</sub>Ba<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>中发现了远高于当时已知的常规超导体的超导临界温度, 进而打开了高温超导材料研究的大门. 二十年后的2008年, 日本东京工业大学的细野秀雄(H. Hosono)教授研究组<sup>[3]</sup>在LaFeAsO<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub>中发现了26 K的超导电性. 紧接着, 中国科学技术大学的陈仙辉研究组通过元素替换的方法, 得到了常压下超导温度为43 K的SmFeAsO<sub>0.85</sub>F<sub>0.15</sub><sup>[4]</sup>, 突破传统超导理论的麦克米兰极限; 中国科学院物理

研究所的王楠林研究组<sup>[5]</sup>也发现了 $T_c = 41$  K的超导材料CeFeAsO<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub>; 随后, 中国科学院物理研究所的赵忠贤院士研究组合成了超导转变温度在50 K左右的NdFeAsO<sub>0.85</sub>F<sub>0.15</sub><sup>[6]</sup>和PrFeAsO<sub>0.85</sub>F<sub>0.15</sub><sup>[7]</sup>样品, 在利用高压技术直接合成的含有氧空位的SmFeAsO<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub>样品中发现了高达55 K的超导转变温度<sup>[8]</sup>. 这些结果意味着铁基超导体成为了继铜氧化物超导体之后的第二类高温超导材料. 目前, 铁基超导体主要可以分为两大类, 即铁砷(FeAs)基超导体与铁硒(FeSe)基超导体. 铁砷基超导体的母体是一个具有反铁磁性的坏金属(bad metal)<sup>[9,10]</sup>, 通过化学掺杂或是施加外加压力的方法可以诱导出超导电性. 而与铁砷基化合物不同, FeSe本身就是一个超导体<sup>[11]</sup>, 其超导转变温度为8 K, 这也使得它成为了铁基超导体家族中结构最为简单的成员, 从而引起了超导学术界广泛的研究兴趣. 然而, FeSe材料本身的超导转变温度比较低, 这在一定程度上限制了对它的研究. 因此, 科学家们试图利用与铁砷基化合物相同的方法, 在FeSe中进行化学掺杂或是加压的方法, 进而提高它的超导转变温度. 起初, 文

† 通信作者. E-mail: chenxh@ustc.edu.cn

献[12—15]通过固相反应的方法,在FeSe层间插入碱金属或碱土金属,制得了 $A_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$  ( $A$ 为碱金属或碱土金属),其最高的超导转变温度可以达到46 K.然而,中子散射的研究表明在这一系列材料中存在严重的相分离,重电子掺杂的 $A\text{Fe}_2\text{Se}_2$ 超导相与呈现反铁磁绝缘态的 $A_2\text{Fe}_4\text{Se}_5$ 相共存,这就导致了这一类材料的性质始终是混合的性质,从而使得对其物理性质的研究变得十分困难[16].在这之后,他们又使用液氨插层的方法,在FeSe层间同时插入了液氨分子与碱金属,从而制备得到了 $A_x(\text{NH}_3)_y\text{Fe}_2\text{Se}_2$ 等一系列化合物[17],最高的超导转变温度能达到46 K.在这类材料中,FeSe面没有明显的Fe空位,但是这一类材料在空气中极其不稳定,这使得对其研究同样变得十分困难.2012年,清华大学薛其坤研究组[18]率先报道了在单层FeSe/SrTiO<sub>3</sub>薄膜中发现可能高达65 K的超导电性,这又激起了人们对于这一体系的研究兴趣.但是,FeSe单层薄膜在空气中也十分不稳定,因此,能够制备出一种具有高超导转变温度、在空气中稳定、同时没有铁空位的铁硒基超导材料就显得十分迫切.

## 2 几种FeSe基高温超导材料的发现与研究

### 2.1 水热合成(Li,Fe)OHFeSe

2014年,我们研究组首次使用水热法合成了新型FeSe基超导体, $(\text{Li}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})\text{OHFeSe}$ ,超导转变温度高达43 K,且在空气中比较稳定,这为FeSe基高温超导材料的物理研究提供了一个良好的

材料体系[19,20]. $(\text{Li}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})\text{OHFeSe}$ 的晶体结构如图1所示, $(\text{Li}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})\text{OH}$ 层与反PbO结构的FeSe层沿着 $c$ 方向交替堆垛, $(\text{Li}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})\text{OH}$ 层中的Li和Fe随机占据相同的原子位置, $(\text{Li}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})\text{OH}$ 层中的H原子会与FeSe层中的Se形成微弱的氢键.由于H原子在X射线下无法分辨,而 $(\text{Li}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})$ 这一原子位置的中子散射振幅为零,导致该原子位置在中子衍射中不可见,因此我们结合X光散射(XRD)、中子衍射(NPD)及固体核磁共振(NMR)技术解出了该材料的晶体结构.此外,通过磁化率测量及磁场下的比热测量,发现在(Li, Fe)OHFeSe中存在一个倾斜的反铁磁序,反铁磁转变温度为10 K,且反铁磁序与超导共存.通过在FeSe层的Se位采用等价的S替换的方法,制备得到了系列(Li,Fe)OHFeSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>样品[21].随着S的掺杂,超导转变温度会逐渐降低并最终消失,但反铁磁序却始终存在且温度没有明显的变化,这说明在(Li,Fe)OHFeSe材料中的反铁磁序主要来源于(Li,Fe)OH层.在这之后,中国科学院物理研究所赵忠贤和董晓莉研究组利用离子交换的方法制备了大尺寸的(Li,Fe)OHFeSe单晶[22],进一步为相关的物性研究提供了帮助.随后的电子能带研究结果表明,(Li,Fe)OHFeSe超导体具有与单层FeSe类似的费米面结构,这在很大程度上表明这两种超导体具有相同的高温超导相[23,24].在(Li,Fe)OHFeSe中, $(\text{Li}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})\text{OH}$ 层被认为是库电层,通过霍尔系数的测量发现,在(Li,Fe)OHFeSe中其主要载流子类型为电子型[24].因此,可以推断,(Li,Fe)OH作为库电层向FeSe层进行电子注入可能是在该体系中实现高温超导的一个主要原因.

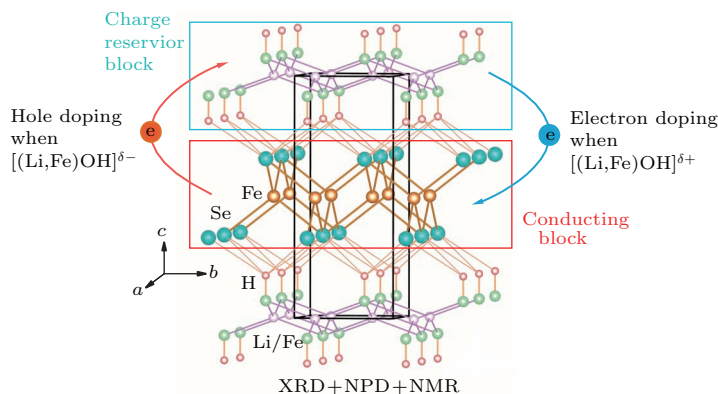


图1 (Li, Fe) OHFeSe的晶体结构与电荷转移情况的示意图 该结构是结合了XRD, NPD及NMR而得到(Li, Fe) OH层为库电层, FeSe层为导电层[19]

Fig. 1. The schematic view of crystal structure and charge transfer for (Li,Fe)OHFeSe. The structure is determined by the combination of powder X-ray diffraction (XRD), neutron powder diffraction (NPD) and nuclear magnetic resonance (NMR). The (Li,Fe)OH layer is the charge reservoir block, while the FeSe layer is the conducting block [19].

## 2.2 电化学插层 (CTA)<sub>x</sub>FeSe

前文介绍了低温水热法制备了 (Li<sub>0.8</sub>Fe<sub>0.2</sub>)OHFeSe 超导体, 使得 FeSe 基超导体的  $T_c$  从不到 10 K 提高到了 43 K. 在 FeAs 基超导体中, 通过改变库电层的成分,  $T_c$  会逐渐演化, 例如, LaO<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub>FeAs ( $x \approx 0.05-0.12$ ) 的  $T_c$  为 26 K [3], 而 SmO<sub>0.85</sub>F<sub>0.15</sub>FeAs [4] 和 PrO<sub>0.89</sub>F<sub>0.11</sub>FeAs [7] 的  $T_c$  分别为 55 K 和 52 K, 这使得研究人员考虑是否可以通过低温合成手段替换 (Li<sub>0.8</sub>Fe<sub>0.2</sub>) OH 层来实现  $T_c$  的调控. 此外, 通过改变库电层, 可以改变引入 FeSe 层的电荷转移量. 现有的文献报导中, 低温法合成 FeSe 基超导体主要包括液氨法 [17] 和电化学插层法 [25,26], (溶剂化的) 碱金属离子可以插入 FeSe 层间, 通过向 FeSe 层注入电子实现  $T_c$  的提

高. 但是, 碱金属的反应活性较强, 产物容易产生 A<sub>2</sub>Se 杂相 [27], 并且这些插层产物的结晶度普遍较差, 难以进行后续的物理表征. 基于此, 我们研究组采用电化学插层的方法, 将更加化学惰性的有机离子 CTA<sup>+</sup> (十六烷基三甲基铵, C<sub>16</sub>H<sub>33</sub>(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>N<sup>+</sup>) 成功插入 FeSe 层间, 并且实现了 45 K 的  $T_c$  [28]. 图 2 (a) 为 (CTA)<sub>0.3</sub>FeSe 产物的 X 射线衍射谱, 产物显示出明显的择优取向和尖锐的衍射峰, 表明产物的结晶度较高. 指标化后的  $c$  轴晶胞参数为 1.47 nm, 这与一层 FeSe (0.55 nm) 加两层 CTA<sup>+</sup> 离子 (0.42—0.46 nm) 的厚度相一致, 意味着一个双层 CTA<sup>+</sup> 有机离子层被插入到 FeSe 层间. 随后的高分辨透射电子显微镜和扫描透射显微镜-高角环形暗场像图像进一步证实了双层 CTA<sup>+</sup> 结构 [28].

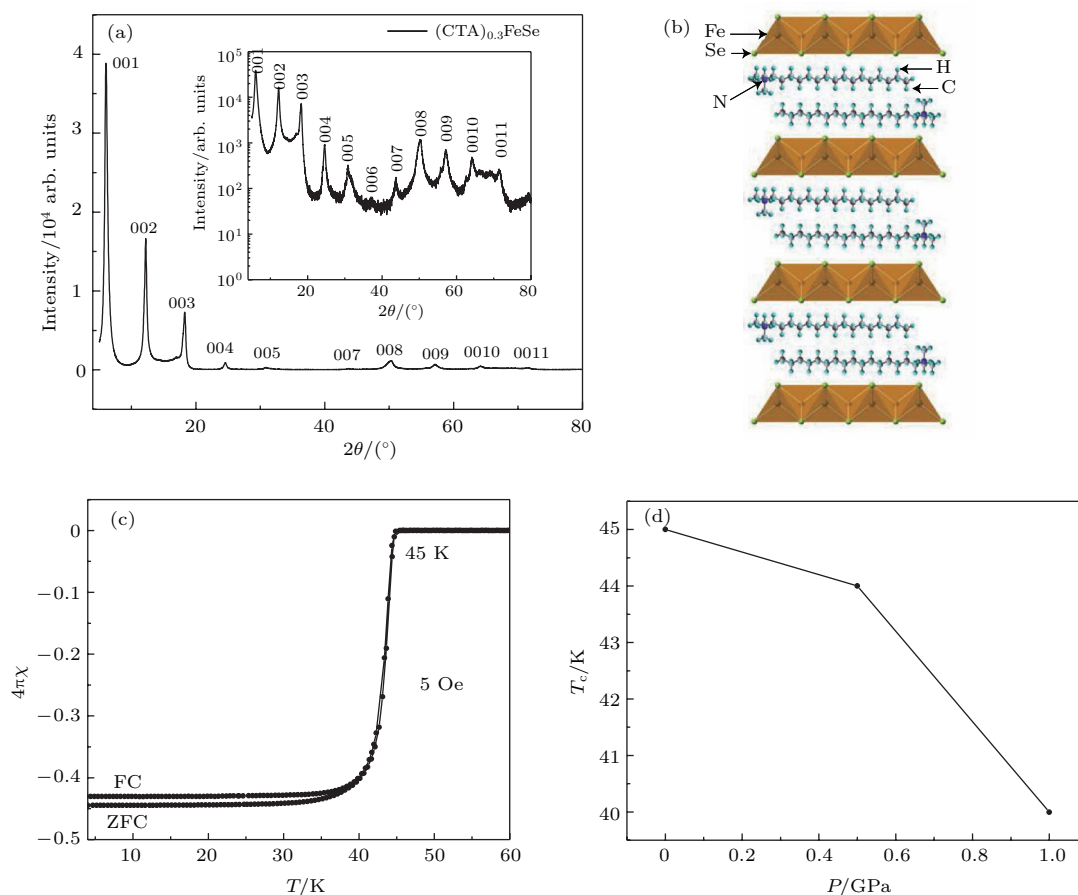


图 2 (a) (CTA)<sub>0.3</sub>FeSe 的 XRD 衍射图谱; (b) (CTA)<sub>0.3</sub>FeSe 的晶体结构示意图, 一个双层的 CTA 离子插入到两层 FeSe 层间; (c) (CTA)<sub>0.3</sub>FeSe 的磁化率曲线, 超导转变温度为 45 K; (d) (CTA)<sub>0.3</sub>FeSe 的超导转变温度随外加压力的变化, 随着压力升高, 超导转变温度降低 [28]

Fig. 2. (a) The XRD pattern of (CTA)<sub>0.3</sub>FeSe; (b) the crystal structure of (CTA)<sub>0.3</sub>FeSe, which consists one layer of FeSe and two layers of CTA; (c) the magnetic susceptibility of (CTA)<sub>0.3</sub>FeSe. The superconducting temperature is 45 K; (d) the relationship of  $T_c$  and applied pressure for (CTA)<sub>0.3</sub>FeSe, by applying pressure, the  $T_c$  is gradually suppressed [28].



磁化率测量显示, 在 5 Oe 磁场下, 样品在 45 K 处展现出尖锐的超导转变, 并且插层产物的磁化率曲线在 8 K 附近没有转变, 证实产物实现了均匀的插层. 通过外部加压磁化率测量,  $(\text{CTA})_{0.3}\text{FeSe}$  的超导转变温度从常压下的 45 K 被逐渐压制到 1 GPa 压力下的 40 K.

### 3 门电压调控 FeSe 高温超导电性

#### 3.1 电双层场效应晶体管调控 FeSe 高温超导电性

以上介绍了使用两种不同的合成方法, 在 FeSe 层间分别插入了无机与有机离子的库电层, 对 FeSe 层实现了电荷转移从而诱导出高温超导电性. 但是, 在 FeSe 层间插入库电层不可避免地也会使得 FeSe 层的晶体结构有一定程度上的变化, 从而使得人们产生一个疑问, FeSe 中的高温超导电性是否可以由单纯的载流子掺杂而诱导? 基于这种思考, 借助于近年来发展的电双层场效应管 (electric-double-layer transistor, EDLT) 栅压调控技术, 我们制备了基于 FeSe 薄层的场效应管器件, 使用离子液体 DEME-TFSI (N, N-二乙基-N-甲基-N-乙基 (2-甲氧基) 季胺-二 (三氟甲基磺酰) 亚胺) 做栅介质对制备的 FeSe 器件进行载流子调控<sup>[29]</sup>. EDLT 电场调控技术的优势在于它是通过纯粹的电荷积累从而单纯地调控样品的载流子浓度, 相比于以前使用的氧化物做栅介质的传统场效应管, 它拥有更大的载流子调控能力, 最大可以达到约  $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ . 图 3(a) 是基于 FeSe 的 EDLT 器件的示意图以及 FeSe 通道的电阻随栅压 ( $V_g$ ) 的变化关系. 随着栅压的增加, 原本超导转变温度低于 10 K 的 FeSe 薄层的超导转变温度逐渐上升, 最高可达 48 K, 如图 3(b) 所示. 这是第一次在没有外压或外延界面的情况下, 实现了如此高的超导转变, 证明了简单的电子掺杂过程能够在 FeSe 中实现 48 K 的高温超导电性. 这一结果不但可以解释 FeSe 系列高温超导材料中的高温超导相, 而且对于人们理解单层 FeSe/SrTiO<sub>3</sub> 薄膜的高温超导也有重要的意义. 有趣的是, 我们实验中的霍尔数据表明, 样品突然从低  $T_c$  超导相变成高  $T_c$  超导相的过程中伴随着发生了 Lifshitz 转变. 这些结果有助于建立一个统一图像来理解所有 FeSe 基超导体的高温超导电性, 为进一步追求更高的  $T_c$  指明了方向.

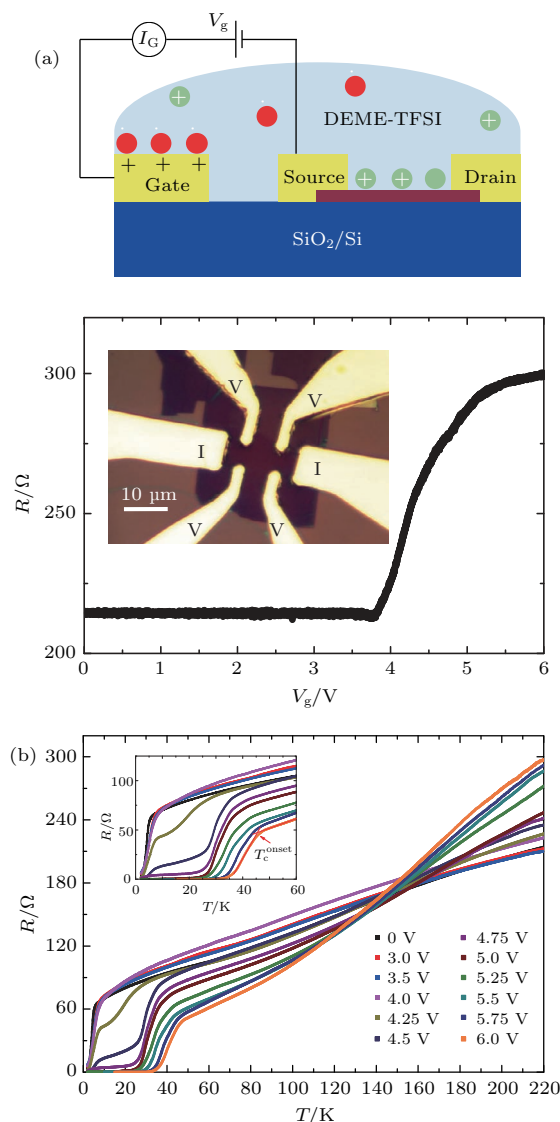


图 3 (a) FeSe 薄层场效应晶体管的器件示意图及器件的电阻随栅压 ( $V_g$ ) 的变化关系; (b) FeSe 薄层样品的电阻曲线随栅压的变化, 随着栅压的增加, 原本超导转变温度低于 10 K 的 FeSe 薄层的超导转变温度逐渐上升, 最高可以达到 48 K<sup>[29]</sup>

Fig. 3. (a) The schematic illustration of the FeSe thin flake EDLT device and the gate voltage dependent resistance of an FeSe thin flake; (b) temperature dependence of the resistance for a FeSe thin flake at different  $V_g$  with the increase of  $V_g$ , the  $T_c$  is gradually increasing with the maximum of 48 K<sup>[29]</sup>.

#### 3.2 固态离子导体场效应晶体管 (SIC-FET) 调控 FeSe 高温超导电性

基于 EDLT 器件的电场调控技术能有效地调控 FeSe 薄层的电子型载流子浓度, 在 FeSe 中成功诱导出了高  $T_c$  的超导电性. 然而实验中我们发现, 当栅压增大到接近离子液体的电化学窗口时, FeSe 和离子液体之间会发生严重的电化学反应而被损

坏, 很难进一步提高其载流子掺杂浓度. 这是因为离子液体的电化学窗口较窄, 在高栅压下易被电解, 导致栅介质与通道的界面不稳定. 为了克服这些困难, 在 FeSe 中探索更高的  $T_c$ , 我们使用固体锂离子导体做栅介质, 设计了一种新型的 SIC-FET 器件 [30], 如图 4(a) 所示. 当施加正栅压时, 电场可以驱动栅介质中的锂离子插入 FeSe 中, 对 FeSe 薄层进行电子掺杂. 随着插入 Li 含量的增加, 观察到一个圆拱形的超导相图, 如图 4(b) 所示, 最佳超导转变温度为 46.6 K, 在极度过掺杂区域, 样品变为了绝缘体. 霍尔测量显示, 样品的载流子浓度达到了  $10^{22} \text{ cm}^{-3}$ , 超过了 EDLT 对 FeSe 调控的最大载流子浓度, 表明 SIC-FET 相较于 EDLT 拥有更大的载流子调控能力. 同时发现随着  $\text{Li}^+$  的插入,

样品会从初始的 FeSe 11 相变成低掺杂的  $\text{Li}_x\text{Fe}_2\text{Se}_2$  122 phase-I 相, 然后变成高掺杂的 122 phase-II 相. 当撤回电压时, 样品重新回到 11 相, 观察到了电场控制的可逆结构相变. 我们使用固体离子导体作栅介质构建的 SIC-FET 器件开辟了一种探索新材料或发现亚稳结构的新型超导体的新方法.

#### 4 总结与展望

一直以来, 人们都渴望能够用统一的理论框架来理解铁基超导, 而 FeSe 基高温超导体所具有的独特且一致的电子结构, 即费米能级附近只有电子口袋以及无节点的超导能隙结构 [23,24], 似乎对当前铁基超导体超导电性统一图像发出了挑战. 但从另外一种层面, 这也表现了 FeSe 基高温超导材料所具有的独特之处, 从而使得对于 FeSe 系列的研究成为当前的热点. 另外, 二维材料研究的兴起也为 FeSe 材料的研究提供了更多的机会. 人们可以利用界面或门电压调控的手段精细调控 FeSe 材料的性质 [29,30], 进而在这一体系中发现更多更丰富的物理性质. 此外, 一系列的研究表明在单层 FeSe/SrTiO<sub>3</sub> 薄膜中, SrTiO<sub>3</sub> 衬底与 FeSe 薄膜之间的电声耦合作用影响也是关键 [31-33], 而这种耦合是否通过改变衬底类型, 或是将相似的思路应用于块材 FeSe 超导体的探索合成 [34], 仍有待于后续的研究. 总而言之, FeSe 系列超导体的研究只是刚刚开始, 还有更多的未知等着人们去发现和探索.

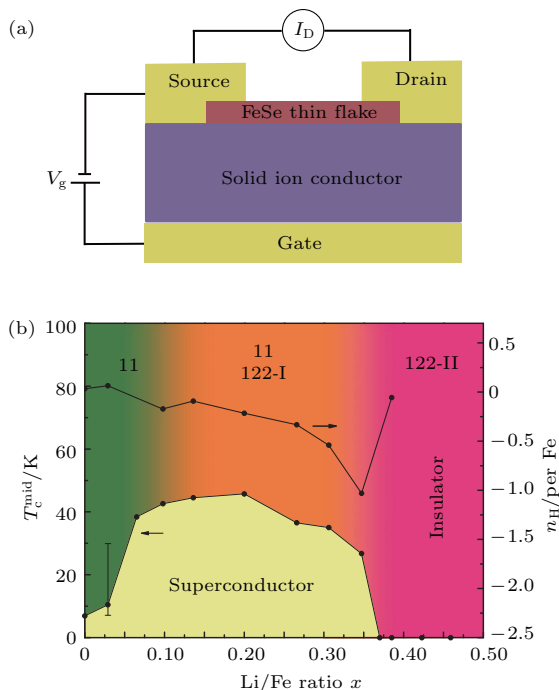


图 4 (a) 使用固体离子导体作栅介质的 SIC-FET 器件示意图; (b) 锂插层 FeSe 薄层样品随 Li/Fe 比例的相图, 随着 Li/Fe 比例的增加,  $T_c$  呈现出圆拱形的行为, 一个超导到绝缘体的相变发生在 Li/Fe 比为 0.37 附近, 随着锂离子不断的插入样品中, 样品发生了一系列的结构相变, 从 FeSe 11 相到  $\text{Li}_x\text{Fe}_2\text{Se}_2$ -I 相, 再到  $\text{Li}_x\text{Fe}_2\text{Se}_2$ -II 相 [30].  
Fig. 4. (a) The schematic diagram of a SIC-FET device with a solid ion conductor as the gate dielectric. (b) The phase diagram of the Li-intercalated FeSe thin flake as a function of the Li/Fe ratio. The  $T_c$  shows a domelike behavior with increasing Li/Fe ratio. A phase transition from superconductor to insulator occurs around a Li/Fe ratio of 0.37. A series of structural phase transitions from the FeSe 11 phase to the  $\text{Li}_x\text{Fe}_2\text{Se}_2$ -I phase, then to the  $\text{Li}_x\text{Fe}_2\text{Se}_2$ -II phase, takes place [30].

#### 参考文献

- [1] Onnes H K 1911 *Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden.* 120b, 122b, 124c
- [2] Bednorz J G, Müller K A 1986 *Zeitschrift für Phys. B: Condens. Matter* **64** 189
- [3] Kamihara Y, Watanabe T, Hirano M, et al. 2008 *J. Am. Chem. Soc.* **130** 3296
- [4] Chen X H, Wu T, Wu G, et al. 2008 *Nature* **453** 761
- [5] Chen G F, Li Z, Wu D, et al. 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 247002
- [6] Ren Z A, Yang J, Lu W, et al. 2008 *Europhys. Lett.* **82** 57002
- [7] Ren Z A, Che G C, Dong X L, et al. 2008 *Europhys. Lett.* **83** 17002
- [8] Ren Z A, Lu W, Yang J, et al. 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 2215

- [9] Cruz C, Huang Q, Lynn J W, et al. 2008 *Nature* **453** 899
- [10] Liu R H, Wu G, Wu T, et al. 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 087001
- [11] Hsu F C, Luo J Y, Yeh K W, et al. 2008 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **105** 14262
- [12] Guo J G, Jin S, Wang G, et al. 2010 *Phys. Rev. B* **82** 180520
- [13] Maziopa A, Shermadini Z, Pomjakushina E, et al. 2011 *J. Phys: Condens. Matter* **23** 052203
- [14] Wang A F, Ying J J, Yan Y J, et al. 2011 *Phys. Rev. B* **83** 060512
- [15] Fang M H, Wang H D, Dong C H, et al. 2011 *Europhys. Lett.* **94** 27009
- [16] Ye F, Chi S, Bao W, et al. 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 137003
- [17] Ying T P, Chen X L, Wang G, et al. 2012 *Sci. Rep.* **2** 426
- [18] Wang Q Y, Li Z, Zhang W H, et al. 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 037402
- [19] Lu X F, Wang N Z, Wu H, et al. 2015 *Nature Mater.* **14** 325
- [20] Lu X F, Wang N Z, Zhang G H, et al. 2013 *Phys. Rev. B* **89** 020507
- [21] Lu X F, Wang N Z, Luo X G, et al. 2014 *Phys. Rev. B* **90** 214520
- [22] Dong X, Jin K, Yuan D, et al. 2015 *Phys. Rev. B* **92** 064515
- [23] Niu X H, Peng R, Xu H C, et al. 2015 *Phys. Rev. B* **92** 060504
- [24] Zhao L, Liang A, Yuan D, et al. 2016 *Nat. Commun.* **7** 10608
- [25] Hatakeda T, Noji T, Kawamata T, et al. 2013 *J. Phys. Soc. Jpn.* **82** 123705
- [26] Hosono S, Noji T, Hatakeda T, et al. 2014 *J. Phys. Soc. Jpn.* **83** 113704
- [27] Wei D, Liang J, Zhu Y, et al. 2014 *Electrochem. Commun.* **38** 124
- [28] Shi M Z, Wang N Z, Lei B, et al. 2018 *Phys. Rev. Mater.* **2** 074801
- [29] Lei B, Cui J H, Xiang Z J, et al. 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 077002
- [30] Lei B, Wang N Z, Shang C, et al. 2017 *Phys. Rev. B* **95** 020503
- [31] Lee J, Schmitt F, Moore R, et al. 2014 *Nature* **515** 245
- [32] Yang S, Sobota J A, Leuenberger D, et al. 2015 *Nano Lett.* **15** 4150
- [33] Xiang Y Y, Wang F, Wang D, et al. 2012 *Phys. Rev. B* **86** 134508
- [34] Coh S, Lee D H, Louie S G, et al. 2016 *Phys. Rev. B* **93** 245138

SPECIAL TOPIC — Tenth anniversary of the discovery of iron-based high temperature superconductors

# Exploration and physical investigation of FeSe-based superconductors

Wang Nai-Zhou<sup>1)2)</sup> Shi Meng-Zhu<sup>1)2)</sup> Lei Bin<sup>1)2)</sup> Chen Xian-Hui<sup>1)2)3)4)†</sup>

1) (*Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

2) (*CAS Key Laboratory of Strongly-coupled Quantum Matter Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

3) (*Collaborative Innovation Center of Advanced Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

4) (*CAS Center for Excellence in Superconducting Electronics (CENSE), Shanghai 200050, China*)

( Received 7 August 2018; revised manuscript received 11 September 2018 )

## Abstract

Since the high- $T_c$  superconductivity in iron-based superconductors was found in 2008, numerous new iron-based superconductors have been discovered. Of them, FeSe-based superconductors receive the most attention due to their unique properties. Here, we briefly introduce the structure and physical properties of two newly found FeSe-based superconductors, i.e. (Li, Fe) OHFeSe and (CTA) $_x$ FeSe. The former is synthesized by the hydrothermal method, while the latter is synthesized by electrochemical intercalation method. Moreover, we also introduce the tuning of electronic properties of FeSe by electric-double-layer and solid-ion-conductor based transistors.

**Keywords:** unconventional superconductors, iron-based superconductors, FeSe-based superconductors, gate-voltage tuning

**PACS:** 74.25.-q, 74.25.F-, 74.70.Xa

**DOI:** [10.7498/aps.67.20181496](https://doi.org/10.7498/aps.67.20181496)

---

† Corresponding author. E-mail: [chenxh@ustc.edu.cn](mailto:chenxh@ustc.edu.cn)