

## 物理所揭示三层铜氧化物超导体高临界温度的电子结构起源

自1986年铜氧化物高温超导体发现以来,探讨高温超导机理和进一步提高超导转变温度是凝聚态物理研究的核心问题。铜氧化物高温超导体的母体是反铁磁Mott绝缘体。高温超导电性是通过向母体掺入适量的载流子得以实现。有研究表明,超导转变温度 $T_C$ 不仅取决于铜氧面 $\text{CuO}_2$ 的掺杂浓度,而且依赖于晶胞中 $\text{CuO}_2$ 面的层数( $n$ ),且在三层体系( $n=3$ )中超导转变温度 $T_C$ 最高。此外,三层铜氧化物超导体表现出不寻常的相图,其 $T_C$ 在最佳掺杂达到最高后在过掺杂区域几乎保持不变,这与通常单层或双层铜氧化物超导体中 $T_C$ 在过掺杂区域显著降低形成明显区别。上述研究表明,除掺杂浓度之外,存在其他控制 $T_C$ 的关键因素。剖析三层铜氧化物超导体中 $T_C$ 最大化及其在过掺杂区域 $T_C$ 维持不变的电子结构起源,对于探究高温超导机理和进一步提高 $T_C$ 具有重要意义。

角分辨光电子能谱是研究材料电子结构最直接的实验手段之一。长期以来,由于高质量三层铜氧化物超导体单晶合成困难,相关的角分辨光电子能谱研究难以广泛开展,高分辨角分辨光电子能谱研究更是稀少。中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心超导国家重点实验室周兴江研究组博士生罗翔宇、陈浩和李颖昊,联合德国马克斯·普朗克研究所教授林成天、凝聚态理论与材料计算重点实验室研究员向涛,利用自主研制的深紫外激光角分辨光电子能谱高分辨和高精度的优势,对三层铜氧化物超导体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$  ( $\text{Bi}2223$ )的电子结构进行研究,为研究其高临界温度的起源提供了重要信息。

该研究首次在过掺杂的 $\text{Bi}2223$ 样品( $T_C=108\text{ K}$ )中观察到费米面三层劈裂的现象。三个费米面、和对应的掺杂浓度分别为0.37、0.22和0.08(图1)。研究在能带结构中可以清晰地看到、和三个主能带(图2),并观测到显著的选择性Bogoliubov能带杂化现象。能带在超导态产生的Bogoliubov回弯与能带相交并发生杂化,其杂化强度随动量表现出奇特的依赖关系。对于费米面的超导能隙测量表明、、和三个费米面对应的超导能隙显著不同,其最大能隙分别为17、29和62meV(图3)。由于Bogoliubov能带杂化,反节点区域附近费米面的超导能隙出现了不连续跳跃(图3)。

理论分析表明,上述成果可以用三层模型很好地描述。三层模型包括一个内部(inner)铜氧面层和两个外部(outer)铜氧面层(图2e)。该模型既考虑了层内的电子跃迁和电子配对,又考虑了层间的电子跃迁( $t_{io}$ 和 $t_{oo}$ )和电子配对( $\Delta_{io}$ 和 $\Delta_{oo}$ )。两个外层之间的电子跃迁 $t_{oo}$ 决定和两个费米面以及能带间的劈裂,内层与外层间的电子跃迁 $t_{io}$ 主要控制Bogoliubov能带杂化的程度,而两个外层之间的电子配对 $\Delta_{oo}$ 主要决定和两个费米面上超导能隙的差别。对于 $\text{Bi}2223$ 的费米面、Bogoliubov能带杂化和超导能隙的测量,可以确定三层模型中的各个微观参数,从而揭示各种层内和层间电子跃迁和配对的微观过程。

该工作为理解三层铜氧化物超导体超导温度最大化提供了重要信息。超导电性是通过电子配对和电子对相干两个过程实现的,而电子配对强度和电子对相干温度直接决定超导转变温度。在单层和双层铜氧化物中,电子配对和电子对相干是在同一个铜氧面中实现,难以分别优化。有理论提出,如果有两种铜氧面,其中一种具有强烈的电子配对强度,另一种具有极高的电子对相干温度,这两种铜氧面耦合后可能实现高超导转变温度。该成果和这种复合图像(Composite Picture)相符。在过掺杂 $\text{Bi}2223$ 中,内层铜氧面极度欠掺杂( $p \approx 0.08$ ),对应的费米面具有很大的超导能隙,而外层铜氧面则是极度过掺杂( $p \approx 0.30$ ),对应的费米面具有极高的电子配对相干温度。这样的复合结构中,内层和外层铜氧面的耦合实现了任何单个铜氧面都无法达到的高温超导电性。这个复合图像能够很好地解释 $\text{Bi}2223$ 在过掺杂区域超导温度基本不变的现象。 $\text{Bi}2223$ 的超导转变温度主要由费米面的载流子浓度(决定电子对相干温度)和费米面上的超导能隙(决定电子配对强度)决定,在从最佳掺杂到过掺杂演变中,因三层劈裂,额外的载流子主要被费米面吸收,使得和费米面对应的载流子浓度和费米面上的超导能隙基本不变,因此超导转变温度 $T_C$ 基本不变。复合图像不仅能够解析三层铜氧化物超导体超导转变温度的最大化和在过掺杂区域基本不变的现象,而且为设计和发现更高 $T_C$ 的超导体提供了新途径。

近期,相关研究成果发表在《自然-物理》(Nature Physics)上。研究工作得到国家自然科学基金委员会、科学技术部和中国科学院战略性先导科技专项(B类)等的支持。

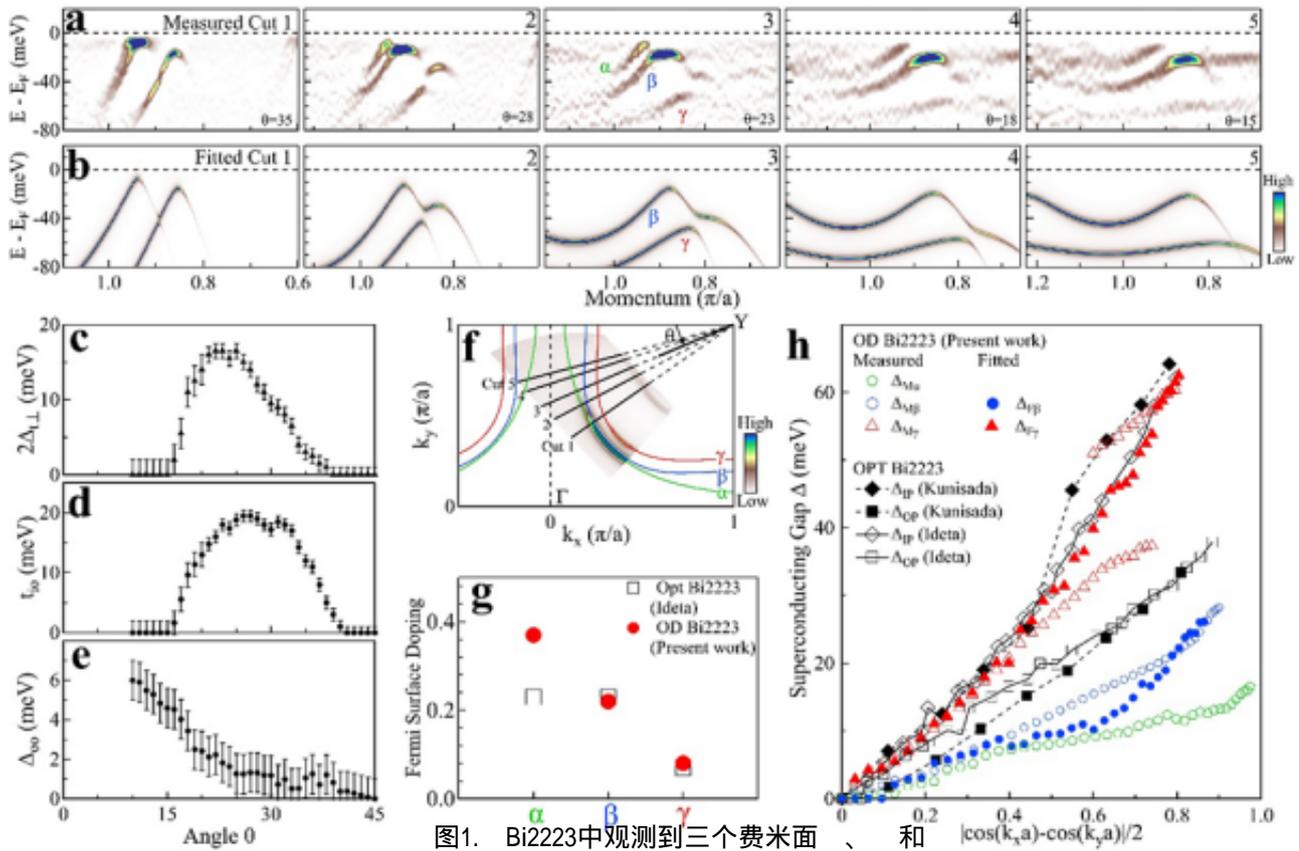


图1. Bi2223中观测到三个费米面、和  $|\cos(k_x a) - \cos(k_y a)|/2$

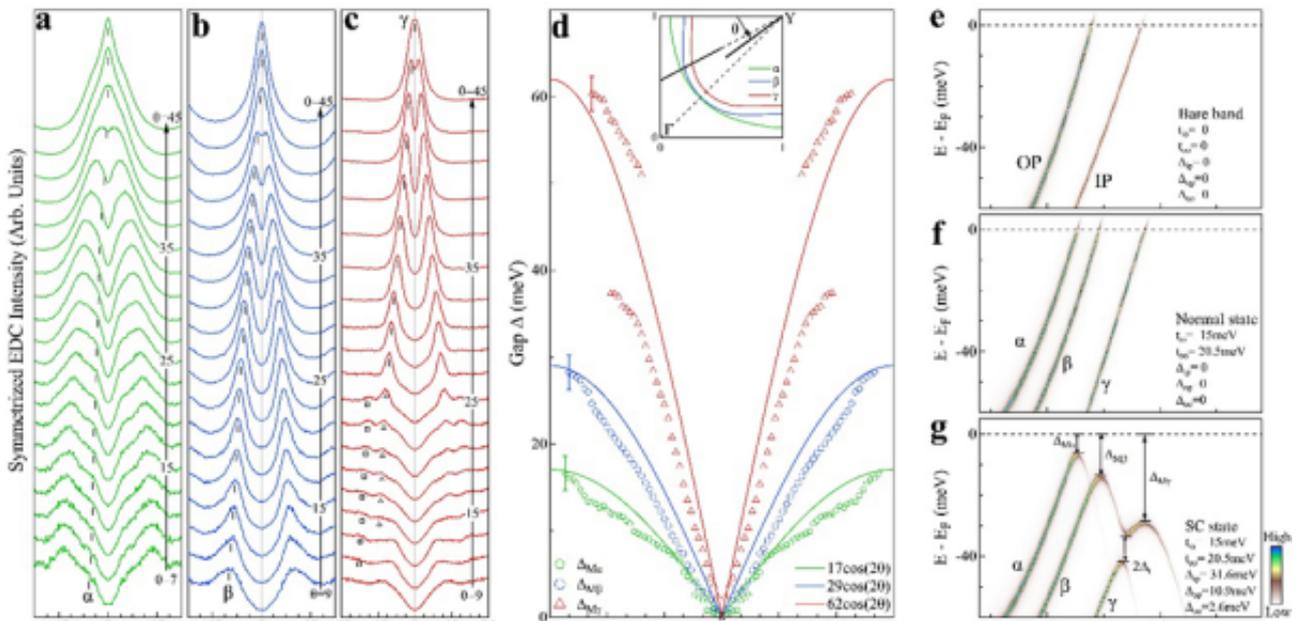


图2. 超导态下Bi2223的能带结构随动量的演变及利用三层相互作用模型对其进行全局模拟

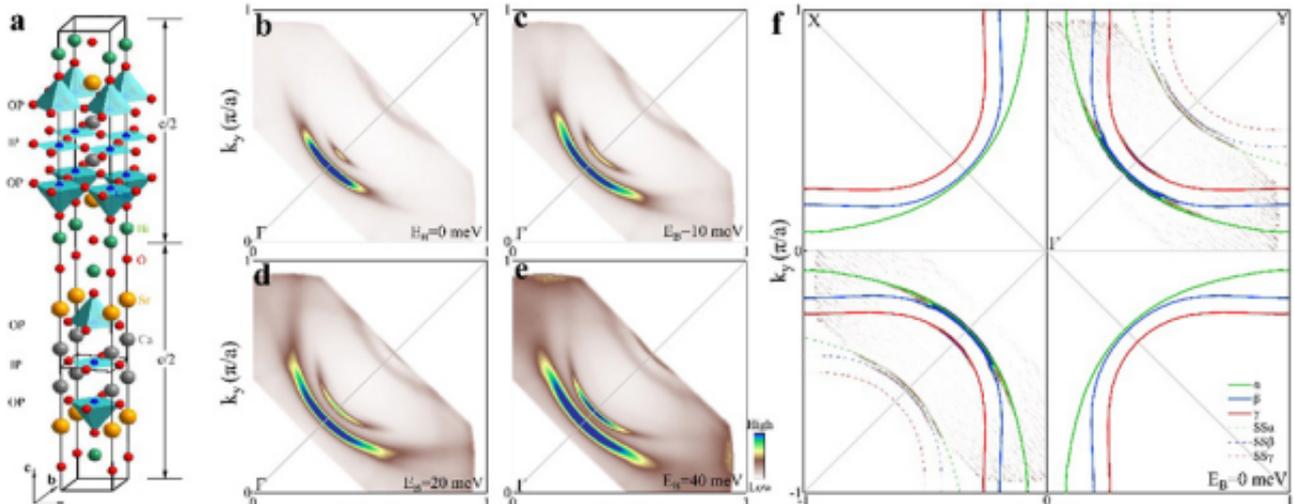


图3.  $k_x$ -Bi2223三个不同费米面上的对称化能量分布曲线和超导能隙测量

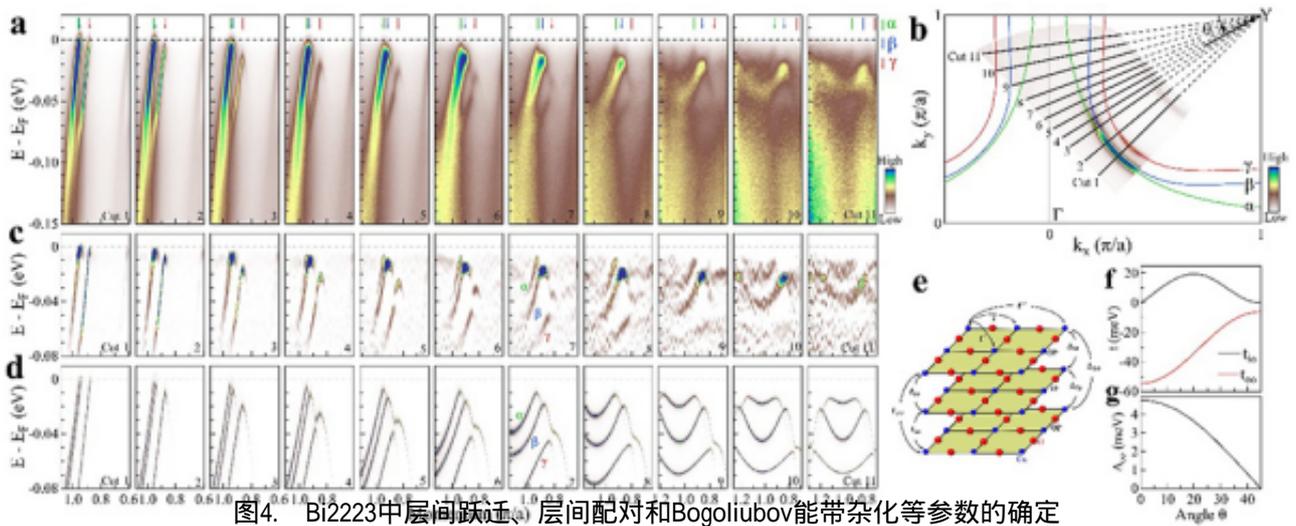


图4. Bi2223中层间跃迁、层间配对和Bogoliubov能带杂化等参数的确定

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/201508.html>