

FeSe 原子層薄膜の高温超伝導

中山 耕輔 〈東北大学大学院理学研究科, 高度教養教育・学生支援機構〉

佐藤 宇史 〈東北大学大学院理学研究科〉

高橋 隆 〈東北大学原子分子材料科学高等研究機構, 大学院理学研究科〉

鉄系高温超伝導体の1つである FeSe を1層(原子3個分の厚さ)だけ SrTiO₃ 基板上に作成すると、超伝導転移温度 (T_c) が 100 K に達する可能性が報告され、大きな注目を集めている。FeSe バルク試料の T_c は約 8 K であり、単層にすることで T_c が一桁も上昇することになる。また、これまで発見されたバルク鉄系高温超伝導体における T_c の最高値 (56 K) をも遙かに凌駕している。はたして、この高温超伝導は本物だろうか? この点を明らかにするため精力的な研究が行われており、これまでに中国と米国の3つの研究グループが独立に FeSe 単層膜の作成に成功し、いずれも超伝導の発現を支持する結果を報告している。このことから、超伝導が発現していることは間違いないと考えられる。しかし、FeSe 単層膜の作成が難しいことに加えて、作成した単層膜が大気中で不安定なことなどから、正確な T_c の決定は難しいのが現状である。これまでに報告された T_c は、20 K から 100 K 以上まで大きなばらつきがあり、“高温”超伝導が起きているかについて統一的な見解は得られていない。

もし単層膜で高温超伝導が実現しているとする、自然に浮かぶ疑問は、「バルク体から単層膜まで、どのように超伝導が変化するか?」である。この点について、2層以上の多層膜では超伝導が完全に消失するという興味深い結果が報告されている。単層膜の上にもう1層 FeSe 膜を追加しただけで、なぜ劇的な T_c の変化が起こるのか、また、それが本質的な変化であるのかどうかは明らかになっていない。この問題の解決は、「なぜ FeSe 単層膜が高温超伝導を示

すか?」を理解する上で極めて重要である。

本稿では、膜厚を系統的に変化させた FeSe の高品質薄膜を SrTiO₃ 基板上に作成し、角度分解光電子分光法 (Angle-Resolved PhotoEmission Spectroscopy; ARPES) を用いて電子状態のその場観察を行った研究について紹介する。1番目の重要な成果として、単層膜において超伝導の発現を示す超伝導ギャップを直接観測し、その温度変化から、 T_c が約 60 K であることを見出した。この T_c は、バルク FeSe の 8 K を遙かに超えて高温超伝導と呼べるほど高い。2番目の成果として、FeSe 薄膜の表面に K 原子を吸着させることで、薄膜中の電子量を広い範囲にわたって制御できることを見出した。この手法を用いて、これまで超伝導を発現しないとされてきた多層膜においても $T_c \sim 50$ K の高温超伝導を発現させることに成功した。3番目の成果として、超伝導相図の膜厚・ドープ量依存性を確立した。膜厚が薄いほど T_c は高く、FeSe と SrTiO₃ との界面が高温超伝導の実現に重要な役割を果たしていることを明らかにした。また、電子ドープ量に対して、 T_c がドーム型を示すことも見出した。さらに、単層膜で電子量を増やすことで、60 K よりも高い T_c が実現される可能性を示した。

このように、SrTiO₃ 上の FeSe 薄膜は、さらなる高温超伝導の探索や、二次元超伝導の研究に魅力的なプラットフォームを提供する。また、FeSe に限らず他の超伝導体においても、それを原子層薄膜化することで、バルクを超える高い T_c を実現する可能性もあり、今後さらなる研究の進展が期待される。

—Keywords—

鉄系高温超伝導体:

2008年に、東京工業大学の細野教授らの研究グループによって発見された超伝導体 LaFeAsO_{1-x}F_x とその類型物質のこと。発見当初 26 K であった T_c は、元素置換や圧力印加、および異なる結晶構造を持つ類型物質の発見によって短期間で上昇し、2008年の末には Gd_{1-x}Th_xFeAsO において最高値 56 K が報告された。類型物質は、いずれも Fe を含む二次元伝導面を持っており、FeSe は二次元伝導面だけからなる最も単純な結晶構造を持つ。56 K という T_c は、銅酸化物高温超伝導体(常圧における T_c の最高値が 135 K) に次いで高い値である。

角度分解光電子分光:

結晶の表面に紫外線を照射して、外部光電効果により結晶外に放出される電子(光電子)のエネルギーと運動量を同時に測定する実験手法のこと。物質中の電子の状態(電子構造)を直接決定することができる。ARPES (Angle-Resolved PhotoEmission Spectroscopy) と呼ばれる。近年その分解能が急速に向上し、超伝導ギャップの直接観測も可能になった。また最近、電子のスピンまでも観測できるようになった。