

Терагерцовая ЛОВ-спектроскопия сверхпроводящих плёнок

Б.П. Горшунов, А.С. Прохоров, В.Б. Анзин, Е.С. Жукова, В.С. Ноздрин
отдел субмиллиметровой спектроскопии ИОФ РАН

Механизмы сверхпроводимости в известных на сегодня двух основных классах высокотемпературных сверхпроводников – на основе меди и железа – остаются до конца невыясненными. Их понимание важно для развития представлений о возможностях и путях дальнейшего повышения критической температуры сверхпроводящего (СП) перехода различных соединений, что, в свою очередь, чрезвычайно актуально в отношении их практических применений. Помимо собственно механизма спаривания, в самом конденсате куперовских пар возможно возникновение экзотических коллективных возбуждений, таких, например, как продольные и поперечные плазмоны. Вместе с фундаментальным интересом, изучение природы таких возбуждений важно для выяснения устойчивости сверхпроводящего состояния. Среди существующих оптических методов исследования сверхпроводников монохроматическая терагерцовая ЛОВ-спектроскопия по своим возможностям находится вне конкуренции: а) в рабочую спектральную область ЛОВ-спектрометров попадают наиболее фундаментальные проявления СП состояния (энергетическая щель в спектре проводимости, индуктивный отклик СП конденсата в спектре диэлектрической проницаемости, коллективные возбуждения); б) ЛОВ-спектрометры обеспечивают высокую точность *бесконтактного* определения *абсолютных* величин характеристик СП фазы (лондоновская глубина проникновения магнитного поля, плазменная частота СП конденсата и др.). Это достигается, в частности, благодаря обеспечению наиболее эффективного взаимодействия с исследуемым материалом зондирующего излучения, которое не отражается от поверхности образца, взаимодействуя лишь с весьма тонким скин-слоем, а проходит *сквозь* образец. В эксперименте это реализуется путем измерения комплексного коэффициента пропускания СП плёнок на диэлектрических подложках, которые играют роль резонаторов (Фабри-Перо), значительно увеличивая чувствительность метода. Именно такие достоинства ЛОВ-спектроскопии позволили нам получить ряд новых результатов о фундаментальных характеристиках сверхпроводящего состояния типичного представителя класса многозонных высокотемпературных сверхпроводников на основе железа $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$, а также *впервые* наблюдать в разупорядоченных СП плёнках NbN и InO возбуждение, отвечающее модуляции амплитуды СП параметра порядка, так называемую моду Хиггса – амплитудное возбуждение, приобретающее оптическую активность в двумерной

геометрии (плёнка!) вблизи квантового фазового перехода диэлектрик-сверхпроводник.

Основные результаты представляемой серии работ сводятся к следующему.

1. На примере $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.9}\text{Co}_{0.1})_2\text{As}_2$, впервые для железосодержащих сверхпроводников напрямую наблюдается пороговое поглощение в терагерцовых спектрах проводимости, отвечающее минимальной СП щели величины $2\Delta=3.7$ мэВ. Определены спектральный вес СП конденсата $1.94 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$ и лондоновская глубина проникновения $\lambda_L=3\,600 \text{ \AA}$. В СП фазе соединения обнаружено значительное «подщелевое» поглощение пока неизвестной природы.

2. На основе совместного анализа терагерцовых спектров и литературных данных по фотоэлектронной эмиссии $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.9}\text{Co}_{0.1})_2\text{As}_2$ установлена принадлежность энергетической щели $2\Delta=3.7$ мэВ к электронной зоне, а также наличие щели $2\Delta=7.9$ мэВ в дырочной зоне. Определены параметры носителей заряда в нормальной и в СП фазах в обеих зонах.

3. Разработана обобщённая – для случая *многозонных* сверхпроводников – полуфеноменологическая БКШ-подобная, так называемая альфа-модель сверхпроводимости. На её основе проанализированы терагерцовые спектры электродинамического отклика $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.9}\text{Co}_{0.1})_2\text{As}_2$, совместно с известными данными по фотоэлектронной эмиссии и теплоёмкости соединений $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$. Показано, что наилучшее согласие с экспериментальными данными демонстрирует *трехзонная* альфа-модель со слабо анизотропным взаимодействием ($s+d$)-симметрии в зоне с промежуточной сверхпроводящей щелью, симметричными параметрами порядка в двух других зонах и со слабым межзонным взаимодействием. Полученные результаты существенно уточняют имеющиеся представления о структуре сверхпроводящего состояния многозонных соединений семейства $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$.

4. Выполнены измерения терагерцовых спектров проводимости и диэлектрической проницаемости, а также туннельные измерения плотности состояний серии СП плёнок NbN и InO с различной степенью разупорядочения. Обнаружено дополнительное пороговое поглощение терагерцового излучения на энергиях ниже энергии СП щели. Установлено, что величина поглощения уменьшается по мере приближения к точке квантового фазового перехода диэлектрик-сверхпроводник. Природа дополнительного поглощения связывается с модой Хиггса, существование которой предсказывалось ранее для случая двумерных разупорядоченных сверхпроводящих плёнок с квантовым фазовым переходом диэлектрик-сверхпроводник, но экспериментально подтверждено не было.

Список публикаций

1. **B.Gorshunov**, D.Wu, **A.A.Voronkov**, P.Kallina, K.Iida, S.Haindl, F.Kurth, L.Schultz, B.Holzapfel, M.Dressel. Direct observation of a nodeless superconducting energy gap in the optical conductivity of iron-pnictides. *Physical Review B, Rapid Communication*, vol.81, 060509 (2010).
2. **B.Gorshunov**, D.Wu, A.A.Voronkov, P.Kallina, K.Iida, S.Haindl, F.Kurth, L.Schultz, B.Holzapfel, M.Dressel. Direct observation of a nodeless superconducting energy gap in the optical conductivity of iron-pnictides. *Physical Review B, Rapid Communication*, vol.81, 060509 (2010).
3. D.Wu, N.Barisic, N.Drichko, P.Kallina, A.Faridian, **B.Gorshunov**, M.Dressel, L.J.Li, X.Lin, G.H.Cao, Z.A.Xu. Superfluid density of $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{M}_x)_2\text{As}_2$ from optical experiments. *Physica C*. 470, S399-S400 (2010).
4. M.Dressel, D.Wu, N.Barisic, **B.Gorshunov**. Looking at the superconducting gap in iron pnictides. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol.72, p.514-518 (2011).
5. E.G.Maksimov, A.E.Karakozov, **B.P.Gorshunov**, **V.S.Nozdryn**, **A.S.Prokhorov**, A.A.Voronkov, **E.S.Zhukova**, S.S.Zhukov, Dan Wu, M. Dressel, S. Haindl, K. Iida, B. Holzapfel. Two-band Bardeen-Cooper-Schrieffer superconducting state of the iron pnictide compound $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.9}\text{Co}_{0.1})_2\text{As}_2$. *Physical Review B, Rapid Communication*. 83, 140502(R) (2011).
6. Е.Г.Максимов, А.Е.Каракозов, А.А.Воронков, **Б.П.Горшунов**, С.С.Жуков, **Е.С.Жукова**, **В.С.Ноздрин**, S.Haindl, B.Holzapfel, L.Schultz, D.Wu, M.Dressel, K.Iida, P.Kallina, F.Kurth. Двухзонный механизм сверхпроводимости БКШ в высокотемпературном сверхпроводнике $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.9}\text{Co}_{0.1})_2\text{As}_2$. Письма в ЖЭТФ, том 93, выпуск 12, стр. 818-825 (2011).
7. E.G.Maksimov, A.E.Karakozov, **B.P.Gorshunov**, **E.S.Zhukova**, Ya.G. Ponomarev, M.Dressel. Electronic specific heat of two-band layered superconductors: Analysis within the generalized two-band α model. *Physical Review B*. B 84, 174504 (2011).
8. Ю.А.Алещенко, А.В.Муратов, В.М.Пудалов, **Е.С.Жукова**, **Б.П.Горшунов**, Ф.Курт, К.Айда. Наблюдение нескольких сверхпроводящих щелей в инфракрасных спектрах отражения $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.9}\text{Co}_{0.1})_2\text{As}_2$. Письма в ЖЭТФ, том 94, вып. 9, стр.779-782, 2011.
9. Е.Г.Максимов, А.Е.Каракозов, **Б.П.Горшунов**, Я.Г.Пономарев, **Е.С.Жукова**, M.Dressel. Теоретический анализ 2-х щелевой сверхпроводимости диборидов магния и пниктидов железа в обобщенной α -модели. ЖЭТФ, том 141, вып 6, стр.1-12, 2012.

10. S.Zapf, **B.Gorshunov**, D.Wu, **E.Zhukova**, **V.S.Nozdryn**, S.Haindl, K.Iida, M.Dressel. Intra-gap absorption in superconducting $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ thin films studied by a Fabry-Pérot resonant technique. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, vol.26, N4, 1227-1231 (2013).
11. U.S.Pracht, E.Heintze, C.Clauss, D.Hafner, R.Bek, D.Werner, S.Gelhorn, M.Scheffler, M.Dressel, D.Sherman, **B.Gorshunov**, K.S. Il'in, D.Henrich, and M.Siegel. Electrodynamics of the Superconducting State in Ultra-Thin Films at THz Frequencies. *IEEE Transactions On Terahertz Science And Technology*, Vol. 3, No. 3, 269-280 (2013).
12. D.Sherman, **B.Gorshunov**, S.Poran, N.Trivedi, E.Farber, M.Dressel, and A.Frydman. Effect of Coulomb interactions on the disorder-driven superconductor-insulator transition. *Physical Review B* 89, 035149 (2014).
13. A.E.Karakozov, S.Zapf, **B.Gorshunov**, Ya.G.Ponomarev, M.V.Magnitskaya, **E.Zhukova**, **A.S.Prokhorov**, **V.B.Anzin**, M.Dressel, and S.Haindl. Temperature dependence of the superfluid density as a probe for multiple gaps in $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.9}\text{Co}_{0.1})_2\text{As}_2$: Manifestation of one electron and two weakly interacting hole condensates. *Physical Review B* 90, 014506 (2014).
14. А.Е.Каракозов, **Б.П.Горшунов**, Я.Г.Пономарев, **А.С.Прохоров**, **В.С.Ноздрин**, М.В.Магницкая, **Е.С.Жукова**, К.Айда, М.Дрессель, С.Цапф, С.Хаиндл. Исследование структуры сверхпроводящего состояния допированных Со многозонных соединений BaFe_2As_2 . Письма в ЖЭТФ, том 100, вып.5, стр. 366-373, 2014.
15. D.Sherman, U.S.Pracht, **B.Gorshunov**, S.Poran, J.Jesudasan, P.Raychaudhuri, M.Swanson, A.Auerbach, N.Trivedi, M.Scheffler, A.Frydman, and M.Dressel. Observation of the Higgs Mode in Disordered Superconductors Close to a Quantum Phase Transition. *Nature Physics* 11, 188–192 (2015).
16. И.С.Блохин, С.Ю.Гаврилкин, **Б.П.Горшунов**, В.А. Дравин, **Е.С.Жукова**, О.М. Иваненко, К. Айда, С.И. Красносвободцев, Ф. Курт, К.В. Мицен, А.Ю. Цветков. Влияние радиационных дефектов на магнитотранспортные свойства ВТСП $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{As})_2$. Письма в ЖЭТФ, том **101**, вып. 4, 265 – 268 (2015).