

МАГНИТНЫЙ КРУГОВОЙ ДИХРОИЗМ В $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ И ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ НЕВЗАИМНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ, ПРЕДСКАЗЫВАЕМЫХ АНИОННОЙ МОДЕЛЬЮ ВТСП

Б.Б.Кричевцов, В.В.Павлов, Р.В.Писарев, А.Б.Шерман

ФТИ им. А.Ф.Иоффе АН СССР
194021, Ленинград

Поступила в редакцию 11 июня 1991 г.

Проведены первые прямые измерения магнитного кругового дихроизма (МКД) в пленках в видимой области спектра. На основании полученных значений удельного МКД сделана оценка величины невязимных оптических явлений, предсказываемых анионной моделью ВТСП.

Согласно анионной модели ¹⁻⁵, при некоторой температуре $T_{tr} \geq T_c$ в ВТСП материалах может происходить фазовый переход, сопровождающийся одновременным исчезновением таких элементов симметрии как инверсия пространства \bar{I} и операция обращения времени I' . Исчезновение операции I' свидетельствует о появлении в ВТСП материалах внутренних магнитных полей H_{int} или определенной магнитной структуры, что, в принципе, может привести к существованию спонтанных невязимных оптических явлений, например, таких как круговое двупреломление (эффект Фарадея - ЭФ) или круговой дихроизм (КД) ³.

В самое последнее время появилось несколько сообщений о целенаправленных поисках таких явлений в ВТСП материалах ⁶⁻⁸. В ⁶ сообщалось о наблюдении поляриметрическим методом КД в экспериментах по отражению света. КД возникал при температурах $T \approx 200 \div 300$ К и при $T \approx 55$ К достигал значений $(1 \div 3) \cdot 10^{-4}$. В ⁷ сообщалось о наблюдении КД значительно большей величины $\sim 6 \cdot 10^{-2}$ в экспериментах по отражению и кругового двупреломления $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ в экспериментах на пропускание в монокристаллах и пленках ВТСП. В отличие от ^{6,7}, в ⁸ при поисках невязимного кругового двупреломления в сверхпроводящих пленках $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ был получен отрицательный результат. Эти эксперименты, проведенные на волоконно-оптическом гироскопе, исключают проявление взаимных оптических эффектов, показали отсутствие невязимного кругового двупреломления в диапазоне температур $11 \div 300$ К при чувствительности установки $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ рад. Отрицательные результаты по поиску внутренних магнитных полей были также получены в экспериментах по вращению спинов мюонов (μSR) ⁹.

В связи с противоречивыми результатами работ ⁶⁻⁸ принципиальное значение приобретает вопрос об оценке величины возможных эффектов. Хотя анионная теория ⁵ дает порядок величины внутренних магнитных полей $H_{int} \sim 10$ Гс, обоснованные оценки величины возможных невязимных оптических явлений отсутствуют. По нашему мнению, такую оценку можно получить, исходя из величины невязимных эффектов, возникающих в ВТСП материалах при приложении к ним внешнего магнитного поля. Насколько нам известно, такие исследования до настоящего времени не проводились. В данной работе мы сообщаем о первых измерениях МКД в сверхпроводящих пленках $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ и даем оценку ожидаемых спонтанных оптических явлений, следующих из анионной модели ВТСП.

В качестве измеряемого невзаимного оптического явления мы выбрали магнитный круговой дихроизм (МКД) $\Delta\alpha = \alpha^+ - \alpha^-$, определяемый как разность коэффициентов поглощения света с правой α^+ и левой α^- круговой поляризацией при распространении света вдоль магнитного поля. Этот эффект имеет место лишь в тех участках спектра, где имеется поглощение. Измерения МКД имеют очень важные преимущества перед измерениями ЭФ, наблюдаемого и при отсутствии поглощения в материале, поскольку в последнем случае очень трудно надежно отделить ЭФ непосредственно в тонкой сверхпроводящей пленке ($t \sim 10^{-5}$ см) от накладывающегося на него ЭФ в значительно более толстых подложках, в окнах криостата и в других оптических элементах схемы ($t \sim 10^{-1} - 10^0$ см). Разработанная нами методика позволяла измерять МКД на длине волны $\lambda = 0,6328$ мкм с чувствительностью $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ при точности $\pm 30\%$. Описание методики будет дано в другой публикации. В качестве объекта исследования были использованы пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ на подложках MgO (100), полученные методом магнетронного распыления, с температурой перехода $T_c = 92$ К при ширине перехода ~ 1 К на уровне 10 - 90% изменения сопротивления. Толщина пленок t изменялась от 1000 до 3000 Å, коэффициент поглощения $\alpha \sim 10^5$ см $^{-1}$. Для устранения интерференционных явлений в подложке, последняя представляла собой клин с углом $\sim 1^\circ$.

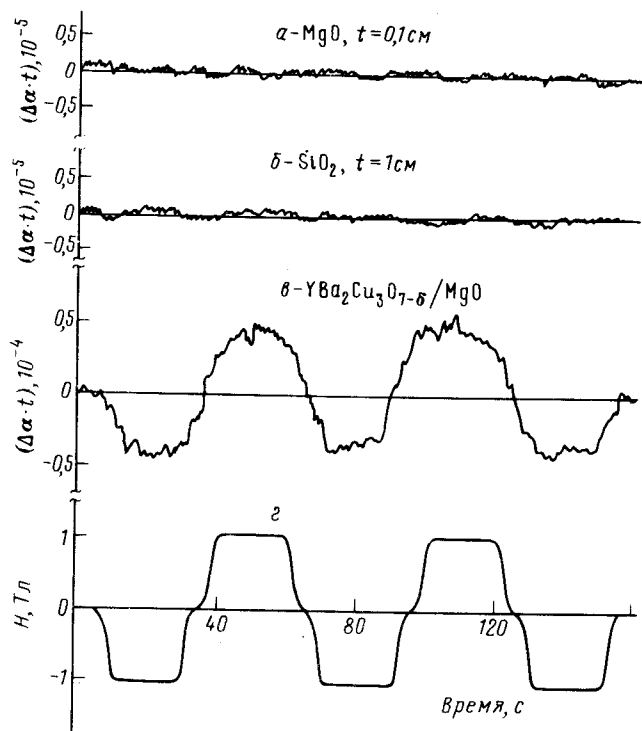


Рис. 1. Сигнал МКД на длине волны $\lambda = 0,6328$ мкм при периодическом сканировании магнитного поля H (кривая 2) в различных материалах при $T = 294$ К: а - MgO , б - SiO_2 , в - $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} / \text{MgO}$

На рис. 1 представлены изменения сигнала МКД в различных исследованных объектах при изменении магнитного поля от +1 Тл до -1 Тл. Отсутствие сигнала в MgO ($t = 0,1$ см) и в кварцевом стекле SiO_2 ($t = 1,5$ см) и наблюдение сигнала МКД в сверхпроводящей пленке на подложке MgO говорит о том, что источником наблюдаемого сигнала МКД является ВТСП

пленка. При $T = 295$ К в пленке $t \approx 3 \cdot 10^{-5}$ см (3000 \AA) в поле $H = 1$ Тл наблюдаемый эффект составляет $(\Delta\alpha t) \approx 5 \cdot 10^{-5}$ или $\Delta\alpha \approx 2 \text{ см}^{-1}$. Следует учитывать, что в ромбической ВТСП модификации $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ имеет место сильная оптическая анизотропия¹⁰, которая, в принципе, может уменьшить величину наблюдаемого МКД. Но поскольку размер микрзерен в пленке ($200 \div 500 \text{ \AA}$) значительно меньше длины волны света, пленку можно рассматривать практически как изотропную среду. Это подтверждается и тем, что при прохождении света через пленку мы не наблюдали сильной деполяризации света. Напротив в эпитаксиальных пленках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, как показали расчеты, при $t = 3000 \text{ \AA}$ двупреломление может занизить измеряемую величину МКД примерно в два раза.

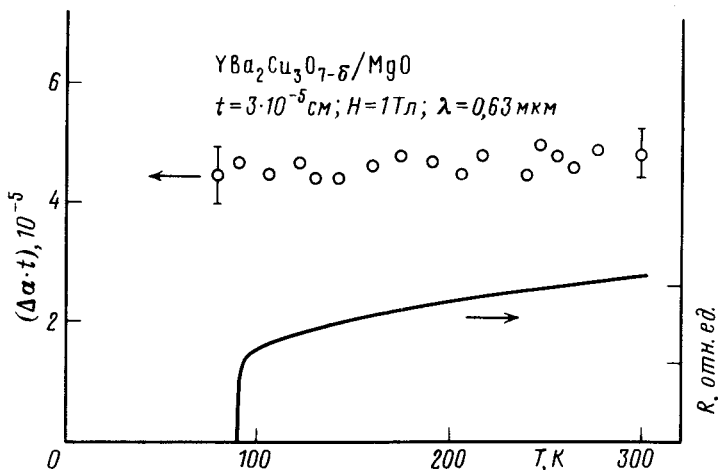


Рис. 2. Температурная зависимость МКД в пленке $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}/\text{MgO}$ толщиной $t \approx 3000 \text{ \AA}$ в магнитном поле $H = 1$ Тл на длине волны $\lambda = 0,6328$ мкм. Внизу приведена температурная зависимость сопротивления пленки, измеренная одновременно с МКД

На рис. 2 показана температурная зависимость МКД. В пределах точности эксперимента мы не наблюдали каких-либо аномалий ни при $T_c = 92$ К, ни при более высоких температурах, при которых наблюдались аномалии КД в^{6,7}. Поле $H = \pm 1$ Тл проникает в пленку при температурах как выше, так и ниже T_c , но сверхпроводящее состояние при этом не разрушается. Это следует из измерений сопротивления, проводившихся одновременно с измерениями МКД.

Полученное значение удельного МКД $\Delta\alpha = 2 \text{ см}^{-1}$ при $\lambda = 0,6328$ мкм позволяет оценить величину спонтанного невязимного КД, предсказываемого анионной теорией, в предположении, что внешние и внутренние поля одинаковым образом воздействуют на электронные состояния, определяющие оптическую поляризуемость ВТСП-материала. Если $H_{int} \cong 10$ Гс⁵, то в случае сверхпроводящей пленки толщиной $t \sim 3 \cdot 10^{-5}$ см получаем для возможного спонтанного невязимного КД значение $(\Delta\alpha t) \approx 5 \cdot 10^{-8}$ ($\Delta\alpha \approx 0,02 \text{ см}^{-1}$). Это значение более чем на два порядка меньше, чем чувствительность $\sim (1-3) \cdot 10^{-5}$ использованных в⁶⁻⁸ оптических методик.

С другой стороны, исходя из полученного нами значения удельного МКД, можно оценить внутренние поля H_{int} , необходимые для создания кругового дихроизма (КД), наблюдавшегося в^{6,7}. Для получения эффектов КД

$\sim 10^{-4} \div 10^{-2}$ требуются поля $H \sim 2 \div 200$ Тл. Такие значения полей характерны для магнитоупорядоченных материалов и несомненно, что их наличие проявилось бы в различных физических экспериментах. Однако прецизионные исследования, в частности по μSR , говорят о том, что внутренние поля не превосходят значений $H_{int} \simeq 0,8$ Гс⁹. Отметим, что как показал расчет, приведенные оценки справедливы для эффектов как на пропускание, так и на отражение.

Таким образом, результаты измерений МКД показывают, что при исчезновении операции I' следует ожидать появления невзаимных эффектов на уровне $\sim 10^{-8} - 10^{-7}$. Это позволяет объяснить отрицательный результат в экспериментах с лазерным гироскопом⁸, поскольку даже в этом случае чувствительность измерений была ниже ожидаемого эффекта. Можно предположить, что наблюдавшиеся в^{6,7} оптические эффекты являются взаимными и в этом случае их нельзя рассматривать как подтверждение анионной теории.

Авторы выражают искреннюю признательность Аронову А.Г., Шенесу И. (J.Schoenes) и Вахтеру П. (Wachter) за полезные обсуждения затронутых в статье вопросов.

-
1. Laughlin R.B. Science, 1988, 242, 525.
 2. Halperin B.I., March-Russel J., Wilczek F. Phys. Rev. B, 1989, 40, 8726.
 3. Wen V.G., Zee A. Phys. Rev. B, 1990, 41, 240.
 4. March-Russel J., Wilczek F. Phys. Rev. Lett., 1988, 61, 2066.
 5. Halperin B.I. Proc. Int. Seminar on Theory of HTSC, Dubna, 1990, USSR.
 6. Lyons K.B., Kwo J., Dillon J.F., Jr. et al. Phys. Rev. Lett., 1990, 64, 2949.
 7. Weber H.J., Weitbrecht D., Brach D. et al. Sol. state Comm., 1990, 76, 511.
 8. Spielman S., Fesler K., Eom C.B. et al. Phys. Rev. Lett., 1990, 65, 123.
 9. Kiefl R.E., Brewer J.H., Affleck I. et al. Phys. Rev. Lett., 1990, 64, 2082.
 10. Петров М.П., Грачев А.И., Красинькова М.В. и др. Письма в ЖЭТФ, 1989, 50, 25.