

Радиационные эффекты в тонких пленках ВТСП $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, облученных малыми дозами электронов с энергией 1 МэВ

Ю. В. Федотов, Б. А. Данильченко, И. С. Рогуцкий

Институт физики НАН Украины, пр. Науки, 46, г. Киев, 03028, Украина

E-mail: fedotov@iop.kiev.ua

Статья поступила в редакцию 1 февраля 2002 г., после переработки 1 марта 2002 г.

Исследованы радиационные эффекты в тонких эпитаксиальных пленках ВТСП $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, облученных малыми дозами электронов с энергией 1 МэВ. Максимальная доза облучения ($4 \cdot 10^{16}$ электронов/см²) выбрана из условия, чтобы уменьшением критической температуры $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, обусловленным дефектами, образованными в результате электронно-ядерных столкновений, можно было пренебречь. При выполнении этого условия основным источником радиационных эффектов в пленках ВТСП могут быть процессы, связанные с возбуждением электронной подсистемы $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. При облучении пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ дозами $(1-4) \cdot 10^{16}$ электронов/см² наблюдалось повышение их критической температуры T_c (в противоположность описанному в литературе уменьшению T_c при облучении дозами, большими 10^{18} электронов/см²), которая с течением времени после облучения релаксировала к своему исходному значению. Подобные эффекты аналогичны явлениям, наблюдавшимся при фотовозбуждении электронной подсистемы $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (фотостимулированная сверхпроводимость). Наблюдалось также понижение плотности критического тока в облученных пленках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, которое связано с радиационными изменениями прозрачности дислокационных стенок в малоугловых межблочных границах для сверхпроводящего тока.

Досліджено радіаційні ефекти в тонких епітаксійних плівках ВТНП $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, опромінених малими дозами електронів з енергією 1 МеВ. Максимальну дозу опромінення ($4 \cdot 10^{16}$ електронів/см²) обрано з умови, щоб зменшенням критичної температури $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, пов'язаним з дефектами, утвореними внаслідок електронно-ядерних зіткнень, можна було знехтувати. При виконанні цієї умови основним джерелом радіаційних ефектів в плівках ВТНП можуть бути процеси, пов'язані з збудженням електронної підсистеми $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. При опроміненні плівок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ дозами $(1-4) \cdot 10^{16}$ електронів/см² спостерігалось підвищення їх критичної температури T_c (в протилежність описаному у літературі зменшенню T_c при опроміненні дозами, більшими 10^{18} електронів/см²), яка з плином часу після опромінення релаксувала до свого вихідного значення. Подібні ефекти аналогічні явищам, що спостерігались при фотозбудженні електронної підсистеми $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (фотостимульована надпровідність). Спостерігалось також зменшення густини критичного струму в опромінених плівках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, яке пов'язано зі радіаційними змінами прозорості дислокаційних стінок в малокутових міжблокових межах для надпровідного струму.

PACS: 74.76.Bz, 74.72.Bk, 74.25.Na

Введение

Радиационное воздействие на сверхпроводники — один из наиболее удобных и контролируе-

мых методов модификации их основных параметров, таких, например, как критическая температура T_c или плотность критического тока J_c . Эти

особенности проявляются в первую очередь в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП), радиационная стойкость которых существенно ниже, чем низкотемпературных сверхпроводников [1]. Изучению возможности управления транспортными и магнитными свойствами ВТСП посвящено значительное количество исследований. Будучи актуальными, в прикладном плане эти исследования, однако, не исчерпывают всех аспектов радиационной физики ВТСП. Так, радиационно-стимулированная генерация дефектов заданного типа, модифицирующая определенную физическую характеристику ВТСП, например проводимость в нормальном состоянии или величину T_c , позволяет получать данные как о факторах, определяющих связь этих характеристик с особенностями электронной и кристаллической структуры ВТСП, так и о механизме высокотемпературной сверхпроводимости. Проведенные в [2] исследования радиационно-стимулированного изменения проводимости пленок $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) позволили получить сведения о симметрии параметра порядка в этих соединениях. Исследования влияния электронного облучения на понижение критической температуры YBCO [3] дали возможность установить связь между процессами рассеяния носителей на кислородных дефектах в плоскостях CuO_2 и разрывом куперовских пар. В результате исследования радиационных эффектов, стимулированных облучением электронами энергией порядка 20 кэВ, определена энергия образования кислородных дефектов в CuO -цепях YBCO [4].

В подобных исследованиях предпочтительным является облучение ВТСП либо быстрыми электронами, либо γ -квантами, поскольку в этом случае образуются (в особенности при низких температурах) в основном дефекты типа френкелевских пар. При этом существенно, что концентрация образовавшихся дефектов, информация о которой необходима для интерпретации полученных данных, может быть рассчитана аналитически. В подавляющем большинстве случаев подобные оценки производятся исходя из представлений о том, что основным механизмом образования радиационных дефектов являются соударения налетающих частиц с атомными ядрами. Так, полученные оценки понижения T_c , обусловленного рассеянием носителей вакансиями O в сверхпроводящих CuO_2 -плоскостях, созданными при облучении ВТСП YBCO электронами с энергией в интервале 20 кэВ–2,4 МэВ при дозе 10^{18} электронов/см² [3], дали результаты, согласующиеся с экспериментом. В большинстве исследований радиационных воздействий на YBCO электронов, имевших такую энергию,

для получения заметных эффектов требовались дозы облучения порядка 10^{18} – 10^{22} электронов/см² [3]. Это хорошо согласуется с оценками количества дефектов, образующихся при таких дозах по механизму электронно-ядерных соударений.

В подавляющем большинстве работ такого рода сообщалось, что увеличение количества радиационных дефектов в YBCO сопровождается понижением величины T_c вплоть до полного исчезновения сверхпроводящей (СП) фазы. В то же время имеется небольшое количество сообщений о радиационно-стимулированном повышении величины T_c в YBCO. Например, в работе [5] сообщалось, что дозовая зависимость T_c в поликристаллических образцах YBCO, облученных γ -квантами, ведет себя следующим образом: существует начальный участок уменьшения T_c , при дальнейшем увеличении дозы облучения T_c возрастает. Как правило, в таких исследованиях использовались либо дозы облучения существенно меньшие указанных выше [6], либо сравнительно малые энергии быстрых частиц [4]. Причем оказалось, что при таких условиях облучения могут существенно изменяться и другие параметры YBCO. Так, в [7] сообщалось о почти двукратном понижении величины J_c при облучении тонких пленок YBCO пучком электронов с энергией 4 МэВ при дозе облучения всего $3 \cdot 10^{16}$ электронов/см². Столь существенное влияние таких сравнительно небольших доз облучения на свойства YBCO и, в частности, противоположный, чем при больших дозах, характер изменений величины T_c , позволяет предположить, что наряду с образованием дефектов, обусловленных электронно-ядерными соударениями, возможен альтернативный механизм радиационного воздействия, эффективный при малых дозах облучения, но имеющий тенденцию к насыщению при увеличении дозы. Конкуренция между этими механизмами может приводить к тому, что при малых дозах облучения наблюдаемые эффекты будут связаны в основном с радиационными изменениями структуры ВТСП пленок вследствие альтернативного механизма, приводящего к росту величины T_c , тогда как при повышении дозы облучения начинает проявляться влияние дефектов, образованных в результате электронно-ядерных соударений. Поскольку образование таких дефектов приводит к уменьшению величины T_c [3], радиационные эффекты в YBCO при достаточно больших дозах облучения могут маскировать проявления альтернативных механизмов радиационных воздействий, эффективных при сравнительно небольших дозах.

Целью настоящей работы является исследование радиационных эффектов в YBCO в условиях, когда число дефектов, образованных вследствие электронно-ядерных соударений, настолько мало, что обусловленное ими изменение некоторого тестового параметра не превышает точности его измерений в наших экспериментах. Таким тестовым параметром выбрана величина T_c пленки YBCO, подвергнутой воздействию нарастающих доз электронного облучения. Этот выбор обусловлен наличием как теоретических [3], так и экспериментальных [2] работ, в которых установлена количественная связь между понижением T_c вследствие рассеяния СП носителей вакансиями в CuO_2 -плоскостях YBCO и количеством этих вакансий.

2. Эксперимент

Исследовано влияние облучения электронами на параметры тонких (500 Å) ВТСП пленок YBCO с $T_c = 89,3$ К. Эпитаксиальные YBCO пленки с осью c , перпендикулярной их плоскости, наносились на подложку LaAlO_3 методом совместного электронно-лучевого испарения Y, BaF_2 и Cu с последующим отжигом. Высокое значение плотности критического тока пленки ($\sim 10^6$ А/см²) и его независимость (в пределах погрешности измерений) от магнитного поля вплоть до полей порядка 10^{-2} Тл свидетельствует о достаточно высоком качестве пленки и практическом отсутствии влияния джозефсоновских межзлачковых связей на ее свойства. Облучение проводили на линейном ускорителе «Аргус» электронами с энергией 1 МэВ. В качестве начальной выбрана доза 10^{16} электронов/см² и далее через такие же интервалы была достигнута суммарная доза облучения $4 \cdot 10^{16}$ электронов/см². Плотность электронного пучка 0,1–0,2 мкА/см² выбирали такой, чтобы при облучении температура образца не превосходила 40°C.

Измерения параметров ВТСП пленок проводили методом низкочастотной магнитной восприимчивости на частоте 937 Гц в интервале температур 77–100 К в магнитном поле Земли. Амплитуда переменного магнитного поля, перпендикулярного плоскости пленки, изменялась в пределах 0,001–5 мТл. Регистрирующая система включала в себя *lock-in* усилитель SR-830, связанный с компьютером посредством интерфейса RS-232, что позволяло проводить накопление и усреднение полученных данных. Величину T_c определяли по максимальной температуре появления сигнала мнимой части комплексной магнитной восприимчивости χ'' . Используемая методика бесконтактных измерений плотности критического тока основана на анализе зависимости величины χ'' тонкой пленки от амплитуды переменного магнитного поля h . Со-

гласно [8], при определенном значении амплитуды переменного поля h_m величина χ'' достигает максимума. При этом для пленки, имеющей форму диска, связь между J_c и h_m определяется соотношением $J_c = 1,013 h_m/d$ (d – толщина пленки). В [9] показано, что это выражение хорошо описывает результаты экспериментов также и на пленках других изометрических форм, в том числе и на квадратных, как в нашем случае.

3. Результаты эксперимента

При электронном облучении пленок YBCO дозами в диапазоне 10^{18} – 10^{22} электронов/см² [3] с ростом дозы облучения наблюдалось непрерывное уменьшение величины T_c . В наших же экспериментах, в которых доза электронного облучения не превосходила $4 \cdot 10^{16}$ электронов/см², ситуация была обратной – с ростом дозы облучения величина T_c постепенно возрастала вплоть до максимальной использованной дозы, вблизи которой наблюдалась некоторая тенденция к насыщению (рис. 1).

Примечательно то, что в наших экспериментах величина T_c , которая при максимальной дозе облучения возрастала почти на 1 К (рис. 1), после облучения начала постепенно релаксировать к своему первоначальному значению. Этот процесс практически завершился за время около десяти суток (при хранении пленки при комнатной температуре). Более детальные исследования пострадиационной релаксации планируются, и их результаты будут опубликованы отдельно.

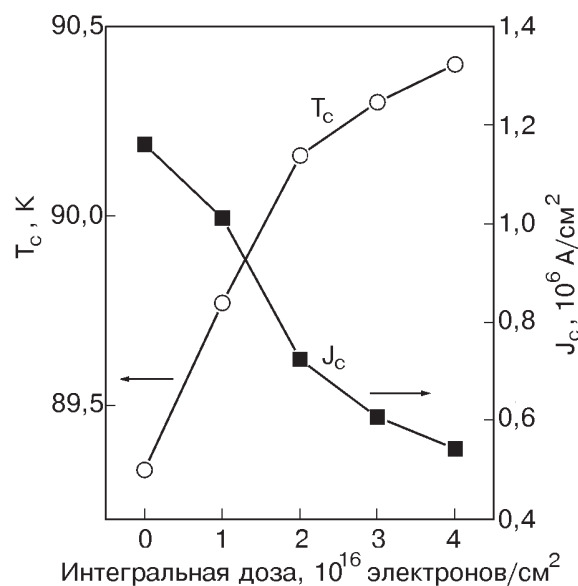


Рис. 1. Зависимости T_c и J_c (77 К) пленки YBCO от дозы облучения электронами с энергией 1 МэВ.

Плотность критического тока пленки YBCO также обнаружила существенную зависимость от дозы электронного облучения (рис. 1). При максимальной использованной дозе облучения наблюдалось почти двукратное уменьшение величины J_c . Необходимо отметить, что пострадиационное поведение величины J_c существенным образом отличается от поведения критической температуры облученной пленки YBCO. В то время как после завершения облучения величина T_c , как отмечено выше, достаточно быстро релаксировала к своему исходному значению, радиационно-стимулированные изменения J_c оказались гораздо более долгоживущими — в течение почти шести месяцев после окончания процедуры облучения не обнаружено изменений величины J_c облученной пленки YBCO в пределах точности наших измерений.

Стабильные во времени пострадиационные изменения наблюдались также в температурных зависимостях действительной χ' и мнимой χ'' составляющих комплексной восприимчивости. Так, при увеличении дозы облучения максимум зависимости $\chi''(T)$ не только сдвигался в сторону высоких температур (что соответствовало повышению T_c), но в низкотемпературной области этого максимума появлялся дополнительный вклад (рис. 2, кривая 3). Причем этот вклад, так же как и изменения J_c , оставался стабильным, по крайней мере не менее шести месяцев. Поэтому, когда за счет релаксации T_c к своему исходному

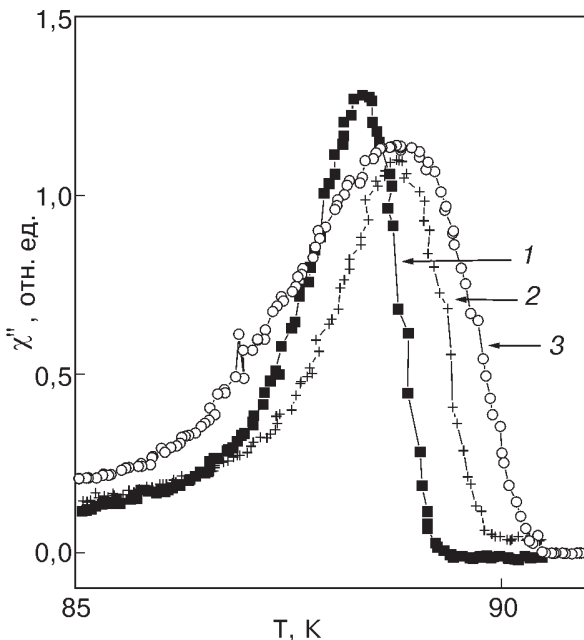


Рис. 2. Изменения вида зависимости $\chi''(T)$ пленки YBCO при увеличении дозы облучения электронами с энергией 1 МэВ: до облучения (1), после облучения дозами $1 \cdot 10^{16}$ (2) и $4 \cdot 10^{16}$ (3) электронов/см².

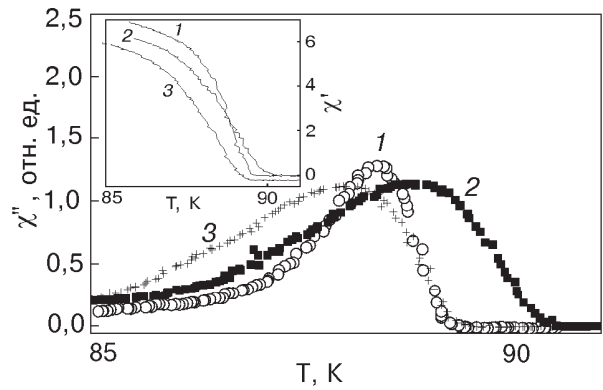


Рис. 3. Изменение мнимой части магнитной восприимчивости $\chi''(T)$ пленки YBCO со временем после облучения электронами с энергией 1 МэВ, дозой $4 \cdot 10^{16}$ электронов/см²: до облучения (1), сразу после облучения (2), через 30 суток после облучения (3). На вставке приведены соответствующие данные для действительной части восприимчивости $\chi'(T)$, полученные в идентичных условиях.

значению высокотемпературная часть зависимости $\chi''(T)$ возвращалась к своему исходному положению (по температуре), на ее низкотемпературном участке продолжал наблюдаться дополнительный остаточный сигнал поглощения (рис. 3). Этот дополнительный вклад соответствовал уширению (по температуре) области перехода пленки в сверхпроводящее состояние, что подтверждается также характером поведения зависимостей $\chi'(T)$, показанных на вставке рис. 3.

4. Обсуждение

В разд. 1 сформулирован критерий выбора максимальной дозы облучения, при которой количество дефектов в пленках YBCO, образованных вследствие электронно-ядерных соударений, не должно, согласно экстраполяции имеющихся оценок [3] к низким концентрациям созданных дефектов, привести к изменениям T_c , превосходящим точность, с которой эта величина измеряется в наших экспериментах ($\pm 0,1$ К). При выполнении этого требования все наблюдаемые радиационно-стимулированные изменения величины T_c должны быть обусловлены некоторыми процессами, альтернативными процессам образования дефектов за счет электронно-ядерных соударений.

Как правило, оценки связи дозы облучения с количеством радиационно-индуцированных за счет электронно-ядерных столкновений дефектов производят исходя из представлений о том, что необходимым условием возникновения дефекта

является передача ядру в процессе такого столкновения энергии, превосходящей энергию E_d , необходимую для образования дефекта данного типа. При этом требования сохранения полных энергии и импульса при таких столкновениях, а также необходимость учета релятивистских эффектов приводят к тому, что налетающий электрон, имеющий энергию E , может передать ядру энергию, не превосходящую величины

$$E_m = 2 \frac{m}{M} \left(2 + \frac{E}{mc^2} \right) E, \quad (1)$$

где M и m — массы ядра и электрона; c — скорость света. Энергия E_d , необходимая для образования дефектов типа кислородных вакансий в плоскостях CuO_2 и цепях CuO , была наиболее точно определена в работах [4,10] из анализа зависимости изменений транспортных свойств и температуры сверхпроводящего перехода T_c от энергии E электронов пучка. Для оценки количества дефектов определенного типа, созданных в образце при его облучении потоком электронов с энергией E и плотностью Φ , необходимо знать величину эффективного интегрального сечения рассеяния σ для процесса столкновения электрона с ядром данного типа, при котором ядру будет передана энергия в интервале от E_d до E_m . Для ядер с не очень большими атомными номерами для этой цели может быть использовано аппроксимационное выражение [11], в котором учтены релятивистские эффекты:

$$\begin{aligned} \sigma = \pi \left[\frac{Ze^2\gamma}{mc^2(\gamma^2 - 1)} \right]^2 \times \\ \times \left[\left(\frac{E_m}{E_d} - 1 \right) - \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2} \ln \frac{E_m}{E_d} + \right. \\ \left. + \alpha\pi Z \sqrt{\frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2}} \left(2 \sqrt{\frac{E_m}{E_d}} - 2 - \ln \frac{E_m}{E_d} \right) \right], \quad (2) \end{aligned}$$

где e — заряд электрона; Z — атомный номер ядра мишени; $1/\gamma = 1 - \beta^2$; $\beta = V/c$ (V — скорость электрона); $\alpha = Z/137$. В [10] было показано, что для атомов кислорода, находящихся в сверхпроводящих CuO_2 -плоскостях, энергия смещения E_d составляет ~ 8 эВ, а для атомов кислорода в CuO -цепочках эта энергия всего около 2 эВ. С учетом этих значений, используя выражения (1) и (2) для эффективного сечения рассеяния электронов с энергией $E = 1$ МэВ на ядрах ^{16}O в CuO_2 -плоскостях, получено значение $\sigma(\text{O}_{\text{pl}}) = 5 \cdot 10^{-23} \text{ см}^2$, а для ядер ^{16}O в CuO -цепочках — $\sigma(\text{O}_{\text{ch}}) = 2,5 \cdot 10^{-22} \text{ см}^2$. Ко-

личество дефектов данного типа N_i , приходящихся на элементарную ячейку, связано с дозой облучения Φ соотношением

$$N_i = n_i \sigma_i \Phi, \quad (3)$$

где n_i — число ядер i -го типа в элементарной ячейке; σ_i — эффективное сечение рассеяния для ядер i -го типа. Результаты, полученные в работе [3] на основании сопоставления большого количества экспериментальных данных с теорией, описывающей уменьшение T_c в YBCO за счет рассеяния носителей на дефектах в сверхпроводящих CuO_2 -плоскостях, показывают, что для понижения T_c на 1 К необходимо создать примерно 10^{-4} таких дефектов на элементарную ячейку. Как показано в [12], концентрация кислородных дефектов в CuO -цепочках, необходимая для понижения T_c в YBCO на такую же величину, как минимум, на порядок больше. Эти результаты позволяют, используя соотношение (3), совместно с приведенными выше сечениями рассеяния на ядрах ^{16}O , сделать вывод, что для того, чтобы понижение T_c в YBCO из-за дефектов, созданных при электрон-ядерных соударениях, не превосходило 0,1 К (т.е. точности измерения температуры в наших экспериментах), максимальная доза облучения не должна превышать $5 \cdot 10^{16}$ электронов/см². Эти соображения и обусловили выбор как начальной (10^{16} электронов/см²), так и максимальной ($4 \cdot 10^{16}$ электронов/см²) доз электронного облучения, использованных в наших экспериментах.

То обстоятельство, что, несмотря на выполнение этого требования, электронное облучение приводило к повышению T_c пленок YBCO (рис. 1), позволяет предположить, что наряду с дефектообразованием при электронно-ядерных соударениях, сопровождающихся понижением T_c , существует и другой механизм радиационного воздействия на свойства YBCO , эффективный при сравнительно небольших дозах облучения. Представляется вероятным, что такой механизм может быть связан с радиационным возбуждением электронной подсистемы YBCO . Поскольку сечение рассеяния электрона на электронной оболочке атома или иона на много порядков превышает сечение рассеяния на атомном ядре, основная часть энергии быстрого электрона, падающего на облучаемый объект, расходуется на возбуждение его электронной подсистемы. При этом возможно существование механизмов, благодаря которым энергия возбуждения электронной подсистемы не рассеивается в виде тепловой энергии, а переходит в энергию смещения атома из его равновесного положения и пере-

мещению в другой узел (радиационно-стимулированная диффузия). На реальность подобных механизмов влияния радиационного облучения на кристаллы указывает возможность создания радиационных дефектов типа вакансий, междоузельных атомов и ионов, а также их различных ассоциаций при возбуждении электронной системы в щелочно-галогидных кристаллах [13] и некоторых полупроводниках [13,14]. Более прямым свидетельством возможной роли явлений, связанных с возбуждением электронной системы ВТСП, является обнаружение в YBCO эффектов фотоиндуцированной проводимости (ФИП) и фотоиндуцированной сверхпроводимости (ФИСП) [15]. Хотя конкретный механизм, приводящий к явлению ФИСП, к настоящему времени пока надежно не установлен, энергия фотонов, используемых в таких экспериментах (1,5–3,5 эВ) однозначно указывает на связь этого механизма с возбуждением электронной подсистемы YBCO, согласно данным работы [17]. После облучения все фотоиндуцированные параметры релаксируют к своим исходным значениям за время, которое при комнатной температуре составляет примерно сутки. Основные особенности ФИСП — увеличение T_c недодопированных пленок YBCO, тенденция к ее насыщению и релаксация к первоначальному значению — аналогичны тем изменениям, которые наблюдаются нами в пленках YBCO, облученных малыми дозами быстрых электронов. При этом, судя по типичным данным для эпитаксиальных YBCO пленок, полученных по той же технологии, исследованную нами пленку следует считать недодопированной. Аналогия между ФИСП и наблюдаемым нами эффектом роста T_c при увеличении дозы облучения подтверждает сделанное предположение о существенной роли процессов возбуждения электронной системы в ходе радиационно-стимулированных изменений параметров YBCO.

Существенное уменьшение критического тока в облученных пленках YBCO и достаточно большое время жизни этого эффекта может быть интерпретировано на основе предложенного в [18,19] механизма ограничения критического тока в достаточно совершенных ВТСП эпитаксиальных пленках, которые, как правило, состоят из слабо разориентированных монокристаллических блоков. Границы раздела (ГР) между такими блоками представляют собой периодические цепочки краевых дислокаций (КД), расстояние между которыми зависит от угла взаимной разориентировки блоков θ и определяется известной формулой Франка: $d(\theta) = b/2 \sin(\theta/2) \approx b/\theta$, где b — модуль вектора Бюргерса, по порядку вели-

ны равный постоянной решетки. Вокруг каждой из них возникает область с повышенной концентрацией точечных дефектов (атмосфера Коттрела). Увеличение области, занятой атмосферой Коттрела, вследствие радиационно-стимулированной диффузии в область КД, как изначально имевшихся в кристалле дефектов, так и созданных, приводит, как обсуждалось в [19], к уменьшению ширины СП каналов и подавлению величины J_c . Поскольку КД являются весьма эффективными центрами захвата точечных дефектов, области вблизи КД с повышенной их концентрацией могут быть стабильными в течение достаточно длительного времени. Это согласуется с наблюдаемой долговременной стабильностью пострadiационных изменений J_c в пленках YBCO. Достаточно долгоживущие изменения величины J_c в облученных быстрыми электронами пленках YBCO были отмечены также в [19,20], где сообщалось о возвращении критического тока к исходному значению только по истечении 1,5 лет.

Заметим, что данный механизм действует в довольно широком интервале значений углов θ , вплоть до таких, при которых размеры областей Коттрела становятся равными $d(\theta)$, что будет приводить к полной потере сверхпроводимости междислокационных каналов и переходу к режиму прохождения СП тока через ГР типа сверхпроводник — изолятор — сверхпроводник. Поскольку зависимость $J_c(\theta)$ имеет квазиэкспоненциальный характер, при достаточно больших углах θ (более 20°) величина J_c уменьшается на несколько порядков [18]. Отсюда можно сделать вывод, что высокое значение плотности критического тока исследуемой пленки ($\sim 10^6$ А/см² при 77 К) свидетельствует об отсутствии в ней высокоугловых ГР.

Подобные радиационно-стимулированные изменения структуры пленок YBCO коррелируют с наблюдавшимися пострadiационными изменениями температурной зависимости мнимой части восприимчивости $\chi''(T)$. Как видно на рис. 2, зависимость $\chi''(T)$ после облучения не только смещается в область высоких температур (что обусловлено радиационно-стимулированным повышением T_c), но и существенно уширяется, в основном в низкотемпературной области, причем это уширение растет при увеличении дозы облучения. Появление дополнительного сигнала поглощения $\chi''(T)$ в области низких температур естественно связать с увеличением размеров области вокруг КД, где параметр порядка подавлен и, следовательно, T_c понижена. В итоге это приводит к увеличению степени неоднородности пленки и результирующему уширению СП перехода. Причем рост низкотемпе-

ратурного «хвоста» χ'' при увеличении дозы облучения (рис. 2) согласуется с уменьшением плотности критического тока (рис. 1). Такая корреляция подтверждает сделанное выше предположение, что наблюдавшееся радиационно-стимулированное уменьшение величины J_c обусловлено уменьшением (вследствие диффузии дефектов в область ядер КД) СП каналов, образованных дислокационными стенками.

В отличие от критической температуры облученной пленки YBCO , которая примерно через десять суток вернулась к своей первоначальной величине, низкотемпературный «хвост» зависимости $\chi''(T)$, появившийся после электронного облучения и отражающий уширение СП перехода по температуре, в течение всего периода наблюдений существенно не изменился (рис. 3). Подобная стабильность радиационно-индуцированных изменений характера зависимости $\chi''(T)$ может служить дополнительным подтверждением предположения о связи этих изменений с увеличением области, занимаемой ядрами КД.

Поскольку КД являются эффективными центрами стока точечных дефектов [21], дефекты, продиффундировавшие в область ядер КД, оказываются довольно стабильно захваченными в этой области. В результате стабильным оказывается и уменьшение эффективной ширины СП каналов, образованных дислокационными стенками (спад J_c), и дополнительное появление областей с пониженной T_c («хвост» $\chi''(T)$), т.е. уширение СП перехода).

5. Заключение

В тонких эпитаксиальных пленках ВТСП $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, облученных электронами с энергией 1 МэВ и максимальной дозой облучения $4 \cdot 10^{16}$ электронов/см², наблюдалось увеличение критической температуры примерно на 1 К и почти двукратное уменьшение плотности критического тока. Эти эффекты описаны исходя из представлений о возможной роли механизмов дефектообразования в YBCO при возбуждении электронной подсистемы. В отличие от обратимых радиационных эффектов, наблюдавшихся для T_c , связанных с достаточно удаленными от межблочных границ областями пленки, радиационные изменения в самих межблочных границах имели необратимый характер и приводили к устойчивому понижению плотности критического тока пленки YBCO и уширению СП перехода по температуре. Это может быть результатом стабильного сужения СП каналов в дислокационных стенках в результате радиационно-стимулирован-

ного роста атмосфер Коттрела ядер КД в межблочных границах.

Авторы благодарны С. М. Рябченко за постоянный интерес к работе и плодотворное обсуждение её основных положений.

Работа в определенной степени продолжает исследования, поддержанные грантом CRDF UP1-306, и выполнена в рамках тем 1.4.1.В/77 и В 63/34 НАН Украины.

1. B. D. Weaver, E. J. Jackson, G. P. Summers, and E. A. Burke, *Phys. Rev.* **B46**, 1134 (1992).
2. J. Giapintzakis, D. M. Ginzberg, M. A. Kirk, and S. Ockers, *Phys. Rev.* **B50**, 15967 (1994).
3. E. M. Jackson, B. D. Weaver, G. P. Summers, P. Shapiro, and E. A. Burke, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 3033 (1995).
4. S. K. Tolpygo, J. Y. Lin, M. Gurvitch, S. Y. Hou, and J. M. Phillips, *Physica* **C269**, 207 (1996).
5. B. I. Belevtsev, I. V. Volchok, N. V. Dalakova, V. I. Dotsenko, L. G. Ivanchenko, A. V. Kuznichenko, and L. I. Logvinov, *Phys. Status Solidi* **A181**, 437 (2000).
6. F. M. Sauerzopf, *Phys. Rev.* **B57**, 10959 (1998).
7. Ю. В. Федотов, С. М. Рябченко, А. П. Шахов, *ФНТ* **26**, 638 (2000).
8. J. R. Clem and A. Sanchez, *Phys. Rev.* **B50**, 9355 (1994).
9. M. Wurlitzer, M. Lorenz, K. Zimmer, and P. Esquinazi, *Phys. Rev.* **B55**, 11816 (1995).
10. S. K. Tolpygo, J.-Y. Lin, M. Gurvitch, S. J. Hou, and J. M. Phillips, *Phys. Rev.* **B53**, 12462 (1996).
11. Ж. Бургун, М. Ланно, *Точечные дефекты в полупроводниках*, Мир, Москва (1985).
12. R. J. Cava, B. Batlogg, C. H. Chen, E. A. Reitman, S. M. Zahurak, and D. Werder, *Phys. Rev.* **B36**, 5719 (1987).
13. М. И. Клингер, Ч. Б. Луцик, Т. В. Машовец, Г. А. Холодарь, М. К. Шейнкман, М. А. Эланго, *УФН* **147**, 523 (1985).
14. M. S. Yunusov, M. A. Zaikovskaja, and B. L. Oksengendler, *Phys. Status Solidi* **A35**, K145 (1976).
15. V. I. Kudinov, I. L. Chaplygin, A. I. Kirilyuk, N. M. Kreines, R. Laiho, E. Lahderanta, and C. Ajahe, *Phys. Rev.* **B47**, 9017 (1993).
16. M. Kall, M. Osada, M. Kakihana, L. Borjesson, T. Frello, J. Madsen, N. Andersen, R. Liang, P. Dosanjh, and W. Hardy, *Phys. Rev.* **B57**, R14072 (1998).
17. J. Zaanen, A. Paxton, O. Jepsen, and O. Andersen, *Phys. Rev. Lett.* **60**, 2685 (1988).
18. A. Gurevich and E. A. Pashitskii, *Phys. Rev.* **B57**, 13878 (1998).
19. Э. А. Пашицкий, В. И. Вакарюк, С. М. Рябченко, Ю. В. Федотов, *ФНТ* **27**, 131 (2001).
20. Ю. В. Федотов, А. В. Бондарь, С. М. Рябченко, В. В. Сафронов, А. П. Шахов, *УФЖ* **46**, 211 (2001).
21. Д. Хирт, И. Лоте, *Теория дислокаций*, Атомиздат, Москва (1972).

Effects of small doses irradiation by 1 MeV electrons in thin HTSC $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ films

Yu. V. Fedotov, B. A. Danilchenko,
and I. S. Rogutskii

The radiation effects in thin epitaxial HTSC $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ films, irradiated with small doses of 1 MeV electrons are investigated. The maximum irradiation dose ($4 \cdot 10^{16}$ electrons/cm²) was selected proceeding from the condition, that the decrease in the critical temperature of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ caused by defects, created by electronic-nuclear collisions could be negligible. Under this condition, the radiation effects in HTSC films can be caused by

the processes connected with excitation of the electronic subsystem in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. With the irradiation doses $(1-4) \cdot 10^{16}$ electrons/cm² the films $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ their critical temperature was observed to increase (as opposed to the decrease in T_c at doses larger, than 10^{18} electrons/cm² mentioned in literature). The T_c relaxed to its initial value some time after irradiation. Such effects are similar to those observed at photoexcitation of the electronic subsystem of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (photostimulated superconductivity). The density of the critical current in the irradiated $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ films decreased too. It was connected with the radiation-caused modifications of the dislocation wall transparency in the low-angle boundaries between the crystalline blocks for superconducting current flow.