

Краткие сообщения

Влияние облучения электронами на рассеяние носителей заряда в монокристаллах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

Н.А. Азаренков¹, В.Н. Воеводин^{1,2}, Р.В. Вовк¹, Г.Я. Хаджай¹

¹Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина
E-mail: rvovk2017@gmail.com; gkhadjai@univer.kharkov.ua

²Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий, ННЦ «ХФТИ»
ул. Академическая, 1, г. Харьков, 61108, Украина

Статья поступила в редакцию 13 марта 2018 г., опубликована онлайн 27 июня 2018 г.

Исследовано влияние облучения электронами при $T \lesssim 10$ К (энергия 0,5–2,5 МэВ, доза 10^{18} см⁻²) на параметры рассеяния носителей заряда и характеристики сверхпроводящего перехода в оптимально допированном монокристалле Y-Ba-Cu-O ($T_c = 91,74$ К). Облучение электронами приводит к значительному возрастанию остаточного сопротивления и температуры Дебая. Последнее обусловлено изотропизацией фононного спектра из-за возрастания концентрации дефектов. Облучение приводит также к уменьшению T_c и увеличению длины когерентности.

Досліджено вплив опромінення електронами при $T \lesssim 10$ К (енергія 0,5–2,5 МеВ, доза 10^{18} см⁻²) на параметри розсіювання носіїв заряду та характеристики надпровідного переходу в оптимально допованому монокристалі Y-Ba-Cu-O ($T_c = 91,74$ К). Опромінення електронами призводить до значного зростання залишкового опору та температури Дебая. Останнє обумовлено ізотропізацією фононного спектра через зростання концентрації дефектів. Опромінення призводить також до зменшення T_c та збільшення довжини когерентності.

PACS: 74.72.-h Купратные сверхпроводники;
74.62.Dh Влияние дефектов кристаллической структуры, допирования и примесей замещения;
74.72.Ek Электронно-допированный.

Ключевые слова: ВТСП, электрическое сопротивление, облучение, электроны, фононы, температура Дебая, сверхпроводящий переход.

Модификация электронным облучением структурных и электрофизических свойств современных материалов полифункционального назначения [1,2] и, в частности, высокотемпературных сверхпроводящих купратов (ВТСП) [3,4] является актуальной задачей современной физики твердого тела. Наряду с применением высоких давлений [5,6], быстрого [7,8] и долговременного [9,10] отжига, электромагнитной и плазменной обработки [11] применение облучения быстрыми электронами позволяет не только проверить адекватность многочисленных теоретических моделей, но и находить эмпирические пути улучшения технологических характеристик ВТСП мате-

риалов [11,12]. Последнее является особенно важным с точки зрения их практического применения [11].

С фундаментальной точки зрения представляет интерес выяснение механизма и степени влияния облучения на ряд необычных явлений, наблюдаемых в ВТСП соединениях в нормальном состоянии [13], таких как псевдощелевая аномалия (ПЩ) [14,15], флуктуационная парапроводимость (ФП) [16,17], некогерентный электротранспорт [18,19], переходы вида «металл–изолятор» (МИ) [20,21] и др. Согласно современным представлениям [13,22], именно эти явления могут служить ключом к пониманию микроскопической природы ВТСП, которая остается невыясненной, несмотря

на более чем тридцатилетнюю историю интенсивных экспериментальных и теоретических исследований [11,23]. Важнейшую роль при этом играет точное понимание механизмов рассеяния нормальных [24] и флуктуационных [22,25,26] носителей заряда.

Ранее [27] мы исследовали влияние облучения электронами на избыточную проводимость и псевдощелевое состояние оптимально допированного монокристалла $Y-Ba-Cu-O$ с $T_c = 91,74$ К и обнаружили некоторое расширение температурного интервала существования псевдощелевого состояния.

В данном сообщении проанализировано влияние облучения электронами на параметры рассеяния носителей заряда и сверхпроводящий переход в этом же монокристалле.

Облучение проводили электронами с энергиями 0,5–2,5 МэВ при $T \lesssim 10$ К, использованная доза 10^{18} см^{-2} вызывает концентрацию дефектов 10^{-4} дпа [28].

Для адекватного описания температурной зависимости сопротивления в ab -плоскости в нормальном состоянии, $\rho_{nab}(T)$, оказалось достаточным учесть рассеяние носителей заряда на фононах и дефектах, а также избыточную проводимость:

$$\rho_{nab}(T) = \frac{1}{\frac{1}{\rho_0 + \rho_{ph}} + b_1 \cdot (e^{T_1/T} - 1)}. \quad (1)$$

Здесь ρ_0 характеризует рассеяние носителей заряда на дефектах,

$$\rho_{ph} = C_3 \left(\frac{T}{\theta} \right)^3 \cdot \int_0^{\theta/T} \frac{e^x x^3 dx}{(e^x - 1)^2} \quad (2)$$

— соотношение Блоха–Грюнайзена [29]. Член $b_1 \cdot (e^{T_1/T} - 1)$ описывает избыточную проводимость [27]. На рис. 1 указанная аппроксимация показана линиями.

В таблице 1 приведены подгоночные параметры, обеспечивающие погрешность указанной аппроксимации не хуже чем 1%.

Температура Дебая θ увеличивается из-за облучения примерно в 5 раз, что также может быть связано с увеличением дефектности образца. Дело в том, что малая величина θ обусловлена, вероятно, анизотропией образца, так как взаимодействие между слоями намного меньше, чем взаимодействие внутри слоев. Поэтому θ , связанная с поперечными колебаниями, распространяющимися вдоль оси c , намного меньше, чем θ , связанная с поперечными колебаниями, распространяющимися в слоях [30]. Резкое увеличение дефектности образца приводит к изотропизации фононного спектра, что и вызывает увеличение температуры Дебая. Отметим, что усредненная по элементам с учетом стехиометрии температура Дебая составляет $\langle \theta \rangle \approx 345$ К.

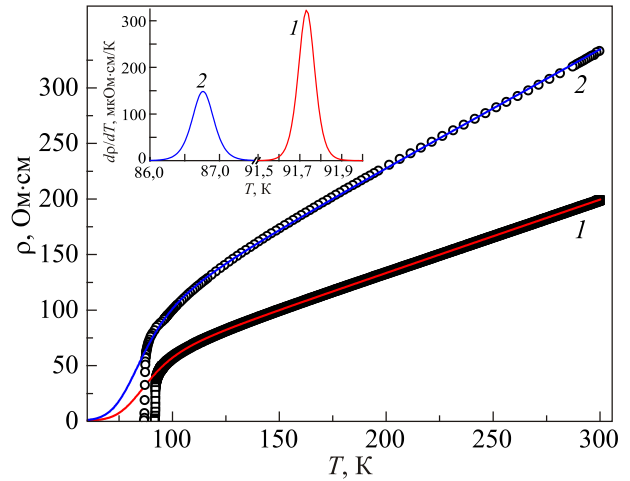


Рис. 1. Температурные зависимости сопротивления ВТСП $Y-Ba-Cu-O$. (\square) — исходное состояние ($T_c = 91,74$ К); (\circ) — после облучения ($T_c = 86,79$ К). Линии — аппроксимации по (1)–(2). На вставке: производные $d\rho/dT$ в области сверхпроводящего перехода.

Коэффициент фононного сопротивления C_3 также возрастает после облучения, что хорошо согласуется с данными, приведенными в [31] для переходных металлов.

Облучение практически не влияет на параметры b_1 и T_1 , характеризующие избыточную проводимость. Поэтому можно предположить, что избыточная проводимость слабо зависит от дефектности образца.

На вставке в рис. 1 приведены производные, $d\rho/dT$, в области сверхпроводящего перехода. Кривые $d\rho(T)/dT$ были аппроксимированы соотношением [32]

$$\frac{d\rho(T)}{dT} = \frac{\rho_1 e^{-z}}{w(1 + e^{-z})^2}, \quad \text{где } z = \frac{T - T_c}{w}. \quad (3)$$

На вставке в рис. 1 и из табл. 1 видно, что из-за облучения ширина сверхпроводящего перехода на половине высоты, $\Delta T_{c0,5} \approx 3,5w$, значительно увеличилась, величина $\frac{d\rho}{dT}_{T=T_c} = \frac{\rho_1}{4w}$ существенно уменьшилась, но максимум остался симметричным. Такие изменения свидетельствуют о том, что вследствие облучения образовалось некоторое число дефектов, но их пространственное распределение осталось макроскопически однородным.

В [33] для флуктуационной проводимости в плоскости слоев в непосредственной близости СП перехода получено выражение

$$\sigma_{ab} = \frac{e^2}{16\hbar d} \frac{1}{\sqrt{\epsilon(\epsilon + r)}}, \quad (4)$$

где $d = 11,7 \text{ \AA}$ — межслоевое расстояние [34]; $\epsilon = \frac{T - T_c}{T_c} \ll 1$; $r = \frac{4\xi_c^2(0)}{d^2}$.

Таблица 1. Подгоночные параметры $\rho_{nab}(T)$ по (1), (2) и dp/dT в области сверхпроводящего перехода по (3)

| YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} | T_c , К | ρ_0 , мкОм·см | θ , К | C_3 , мкОм·см | T_1 , К | $b_1 \cdot 10^{-8}$ | ΔT , К | $\rho_1(4w)$, мкОм·см/К |
|---|-----------|--------------------|--------------|-----------------|-----------|---------------------|----------------|--------------------------|
| Исходный образец | 91,74 | 1,95 | 41,5 | 54,6 | 1132 | 3,2 | 0,093 | 323 |
| После облучения | 86,79 | 29,05 | 198 | 408,4 | 1065 | 3,2 | 0,365 | 148 |

Формула (4) описывает 2D–3D кроссовер, происходящий в некотором интервале температур: при $\varepsilon \ll r$ $\sigma_{ab} \propto (\varepsilon, r)^{-1/2}$ (3D режим), но при $\varepsilon \gg r$ $\sigma_{ab} \propto \varepsilon^{-1}$ (2D режим).

На рис. 2 изображены зависимости $\Delta\sigma_{ab}(\varepsilon)$ при различных r как полученные из (4), так и определенные экспериментально из соотношения $\Delta\sigma_{abexp}(T) = 1/\rho_{exp}(T) - 1/\rho_{nab}(T)$ до и после облучения.

Видно, что в исходном состоянии $\Delta\sigma_{ab}(\varepsilon) \approx \Delta\sigma_{abexp}(\varepsilon)$ для $r \approx 0,02-0,03$ в интервале $\varepsilon \leq 0,01$ ($91,7 < T < 92,5$ К). Это дает $\xi_c(0) = 0,5dr^{1/2} \approx 0,5-0,8$ Å. После облучения $\Delta\sigma_{ab}(\varepsilon) \approx \Delta\sigma_{abexp}(\varepsilon)$ для $r \approx 0,5-5$ в том же интервале $\varepsilon \leq 0,01$ ($86,8 < T < 87,5$ К) получаем $\xi_c(0) \approx 4-13$ Å. Таким образом, облучение приводит к существенному увеличению длины когерентности $\xi_c(0)$.

Отметим, что как в исходном состоянии, так и после облучения $r \gg \varepsilon$, т.е. движение флуктуационных пар является трехмерным.

Суммируя полученные результаты, можно сделать вывод, что облучение электронами приводит к возникновению значительного числа дефектов, а это вызывает существенное снижение анизотропии, осязательное возрастание рассеяния на фононах, уменьшение T_c и увеличение длины когерентности. Избыточная проводимость при использованном облучении не изменяется.

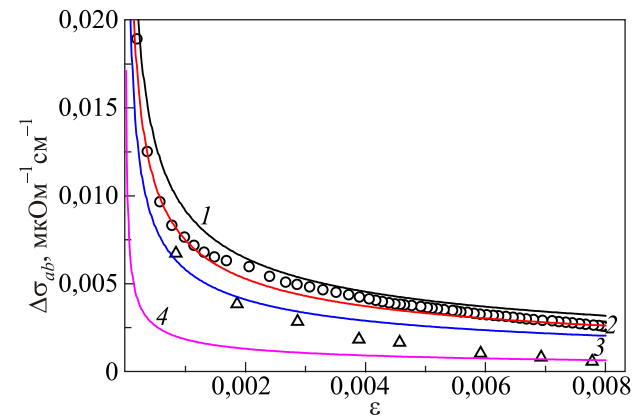


Рис. 2. Зависимость флуктуационной проводимости, $\Delta\sigma_{ab}$, от приведенной температуры ε . (○) — исходное состояние, Δ — после облучения, вычислено как $\Delta\sigma_{abexp}(T) = 1/\rho_{exp}(T) - 1/\rho_{nab}(T)$; линии — вычислено по (4) для $r = 0,02$ (1), $r = 0,03$ (2), $r = 0,5$ (3), $r = 5,0$ (4).

- O.V. Dobrovolskiy, M. Huth, V.A.Shklovskij, and R.V. Vovk, *Scientific Rep.* **7**, 13740 (2017).
- O.V. Dobrovolskiy, V.V. Sosedkin, R. Sachser, V.A. Shklovskij, R.V. Vovk, and M.J. Huth, *Supercond. Nov. Magn.* **30**, 735 (2017).
- J.M. Valles, Jr., A.E. White, K.T. Short, R.C. Dynes, J.P. Garno, A.F.J. Levi, M. Anzlowar, and K. Baldwin, *Phys. Rev. B* **39**, 11599 (1989).
- T. Siegrist, S. Sunshine, D.W. Murphy, R.J. Cava, and S.M. Zahurak, *Phys. Rev. B* **35**, 7137 (1987).
- S. Sadewasser, J.S. Schilling, A.P. Paulikas, and B.M. Veal, *Phys. Rev. B* **61**, 741 (2000).
- R.V. Vovk, N.R. Vovk, G.Ya. Khadzhai, O.V. Dobrovolskiy, and Z.F. Nazyrov, *Current Appl. Phys.* **14**, 1779 (2014).
- J.D. Jorgensen, P. Shiyou, P. Lightfoot, H. Shi, A.P. Paulikas, and B.M.W. Veal, *Physica C* **167**, 571 (1990).
- R.V. Vovk, N.R. Vovk, and O.V. Dobrovolskiy, *J. Low Temp. Phys.* **75**, 614 (2014).
- B. Martinez, F. Sandiumenge, S. Pinol, N. Vilalta, J. Fontcuberta, and X. Obradors, *Appl. Phys. Lett.* **66**, 772 (1995).
- D.A. Lotnyk, R.V. Vovk, M.A. Obolenskii, A.A. Zavgorodniy, J. Kováč, M. Kaňuchová, M. Šefciková, V. Antal, P. Diko, A. Feher, and A. Chroneos, *J. Low Temp. Phys.* **161**, 387 (2010).
- С.И. Бондаренко, В.П. Коверя, А.В. Кревсун, С.И. Линк, *ФНТ* **43**, 1411 (2017) [*Low Temp. Phys.* **43**, 1125 (2017)].
- И.В. Берман, Н.Б. Брандт, *ФНТ* **16**, 1227 (1990) [*Low Temp. Phys.* **16**, 707 (1990)].
- J. Ashkenazi, *J. Supercond. Nov. Magn.* **24**, 1281 (2011).
- M.V. Sadovskii, I.A. Nekrasov, E.Z. Kuchinskii, Th. Pruschke, and V.I. Anisimov, *Phys. Rev. B* **72**, 155105 (2005).
- R.V. Vovk, N.R. Vovk, G.Ya. Khadzhai, and O.V. Dobrovolskiy, *Solid State Commun.* **204**, 64 (2015).
- T.A.Friedmann, J.P. Rice, J. Giapintzakis, and D.M. Ginsberg, *Phys. Rev. B* **39**, 4258 (1989).
- R.V. Vovk, M.A. Obolenskii, A.A. Zavgorodniy, A.V. Bondarenko, I.L. Goulatis, and A.A. Chroneos, *J. Mater. Sci: Mater. Electron.* **18**, 811 (2007).
- P.W. Anderson and Z. Zou, *Phys. Rev. Lett.* **60**, 132 (1988).
- R.V. Vovk, G.Ya. Khadzhai, and O.V. Dobrovolskiy, *Appl. Phys. A* **117**, 997 (2014).
- K. Widdera, D. Bernera, H.P. Geserich, W. Widder, and H.F. Braun, *Physica C* **251**, 274 (1995).

21. R.V. Vovk, M.A. Obolenskii, A.A. Zavgorodniy, I.L. Goulatis, and A.I. Chronos, *J. Mater. Sci: Mater. Electron.* **22**, 20 (2011).
22. P.B. Вовк, А.Л. Соловьев, *ФНТ* **44**, 111 (2018) [*Low Temp. Phys.* **44**, 81 (2018)].
23. A.L. Solovyov, L.V. Omelchenko, V.B. Stepanov, R.V. Vovk, H.-U. Habermeier, P. Przyslupski, and K. Rogacki, *Phys. Rev. B* **94**, 224505 (2016).
24. R.V. Vovk, N.R. Vovk, G.Ya. Khadzhai, I.L. Goulatis, A. Chronos, *Solid State Commun.* **190**, 18 (2014).
25. R.V. Vovk, N.R. Vovk, G.Ya. Khadzhai, O.V. Dobrovolskiy, and Z.F. Nazyrov, *J. Mater. Sci: Mater. Electron.* **25**, 5226 (2014).
26. R.V. Vovk, N.R. Vovk, G.Ya. Khadzhai, O.V. Dobrovolskiy, and Z.F. Nazyrov, *J. Mater. Sci: Mater. Electron.* **26**, 1435 (2015).
27. N.A. Azarenkov, V.N. Voevodin, R.V. Vovk, G.Ya. Khadzhai, S.V. Lebedev, V.V. Sklyar, S.N. Kamchatnaya, and O.V. Dobrovolskiy, *J. Mater. Sci: Mater. Electron.* **28**, 15886 (2017).
28. A.V. Bondarenko, A.A. Prodan, Y.T. Petrusenko, V.N. Borisenko, F. Dworschak, and U. Dedek, *Phys. Rev. B* **64**, 092513 (2001).
29. L. Colquitt, *J. Appl. Phys.* **36**, 2454 (1965).
30. Н.В. Аншукова, Ю.В. Бугославский, В.Г. Веселаго, А.И. Головашкин, О.В. Ершов, И.А. Зайцев, О.М. Иваненко, А.А. Кордюк, А.А. Минаков, К.В. Мицен, *Письма в ЖЭТФ* **48**, 152 (1988).
31. В.И. Хоткевич, Б.А. Мерисов, А.М. Ермолаев, А.В. Краснокутский, *ФНТ* **6**, 1056 (1983) [*Low Temp. Phys.* **6**, 546 (1983)].
32. Б.Н. Ролов, В.Э. Юркевич, *Физика размытых фазовых переходов*, Изд-во РГУ, Ростов н/Д. (1983).
33. A. Larkin and A. Varlamov, *Theory of Fluctuations in Superconductors*, Oxford University Press, USA (2009).
34. A. Kebede, C.S. Jee, J. Schwegler, J.E. Crow, T. Mihalisin, G.H. Myer, R.E. Salomon, P. Schlottmann, M.V. Kuric, S.H. Bloom, and R.P. Guertin, *Phys. Rev. B* **40**, 4453 (1989).

Effect of electron irradiation on the scattering of carriers in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ single crystals

N.A. Azarenkov, V.N. Voevodin, R.V. Vovk, and G.Ya. Khadzhai

The effect of electron irradiation at $T \lesssim 10$ K (energy 0.5–2.5 MeV, dose 10^{18} cm⁻²) on the parameters of charge carrier scattering and superconducting transition characteristics in an optimally doped Y–Ba–Cu–O single crystal ($T_c = 91.74$ K) was studied. Irradiation with electrons leads to a significant increase in the residual resistance and the Debye temperature. The latter is associated with the isotropization of the phonon spectrum due to an increase in the concentration of defects. Irradiation also leads to a decrease in T_c and an increase in the coherence length.

PACS: 74.72.-h Cuprate superconductors;
74.62.Dh Effects of crystal defects, doping and substitution;
74.72.Ek Electron-doped.

Keywords: high-temperature superconductors, electrical resistivity, irradiation, electrons, phonons, Debye temperature, superconducting transition.