

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 538.945:539.12.043

ВЛИЯНИЕ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ ВТСП-2 ЛЕНТ НА КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СВЕРХПРОВОДНИКА

© 2019 г. А. В. Троицкий^{а, *}, Т. Е. Демихов^б, Л. Х. Антонова^а, С. А. Кузьмичев^{б, с},
В. А. Скуратов^д, В. К. Семина^д, Г. Н. Михайлова^а

^аИнститут общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38

^бФизический институт им. П.Н.Лебедева РАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский проспект, 53

^сМГУ им. М.В.Ломоносова, 119991 Россия, Москва, ул. Ленинские горы, 1

^дЛаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова ОИЯИ, 141980 Россия, Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6

*e-mail: at@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 27.02.2018 г.

После доработки 12.07.2018 г.

Исследовано влияние радиационных дефектов, индуцированных ионами $^{132}\text{Xe}^{27+}$ (167 МэВ), $^{86}\text{Kr}^{17+}$ (107 МэВ) и $^{40}\text{Ar}^{8+}$ (48 МэВ), на критические свойства сверхпроводниковых лент 2 поколения на основе соединения $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ (без медной оболочки) отечественной компании SuperOx. Получены зависимости критического тока при $T = 77$ К в собственном магнитном поле, критической температуры и ширины сверхпроводящего перехода от флюенсов ионного облучения. Определена радиационная стойкость сверхпроводника к ионному излучению. Из величины критического флюенса ионов, при котором критическая температура обращается в ноль, оценены радиусы треков в сверхпроводнике.

Ключевые слова: высокотемпературные сверхпроводники 2 поколения, тяжелые ионы высоких энергий, радиационная стойкость, критический ток, критическая температура, радиационные дефекты

DOI: 10.1134/S0015323019010054

ВВЕДЕНИЕ

Высокотемпературный сверхпроводник $LaBa_2Cu_3O_{7-x}$ с критической температурой 36 К был открыт в 1986 г. [1], а в 1987 г. было открыто первое сверхпроводящее соединение с критической температурой выше точки кипения азота — $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ [2]. Впоследствии было показано, что иттрий можно заменить другими редкоземельными элементами и при этом свойства сверхпроводника не сильно изменяются. Появление “азотной” сверхпроводимости многократно повысило привлекательность использования нового класса материалов на практике.

Затем потребовалось еще около 20 лет для разработки сложнейших технологий, обеспечивших получение композитных лент-проводов, которые по своей надежности можно было бы сравнивать с металлическими проводниками тока, например, из меди. Венцом усилий ученых и инженеров всего мира было создание гибких длинномерных многослойных проводов ВТСП второго поколения (ВТСП-2), которые имеют плотность критического тока выше 1 MA/cm^2 при 77 К в собственном магнитном поле. В настоящее время улучшение

свойств уже сформированных проводов ВТСП-2 является одним из приоритетных направлений в развитии технологий их приготовления и использования.

Сверхпроводники очень чувствительны к наличию структурных дефектов, которые могут являться центрами пиннинга Абрикосовских вихрей и определять токонесущие свойства сверхпроводника в магнитных полях. Существует большое количество методов создания структурных дефектов [3–8]. Одним из таких методов, позволяющих направленно изменять дефектную структуру материала, является облучение сверхпроводника ионизирующими частицами различной природы. Поэтому одной из актуальных задач физики сверхпроводимости является изучение радиационных эффектов. Это принципиально важно и для радиационного материаловедения в плане модификации сверхпроводящих свойств для практических применений, и для прогнозирования поведения материала в экстремальных условиях, поскольку сверхпроводники широко применяются в установках физики высоких энергий. Для получения радиационных дефектов использовали быстрые нейтроны [6], про-

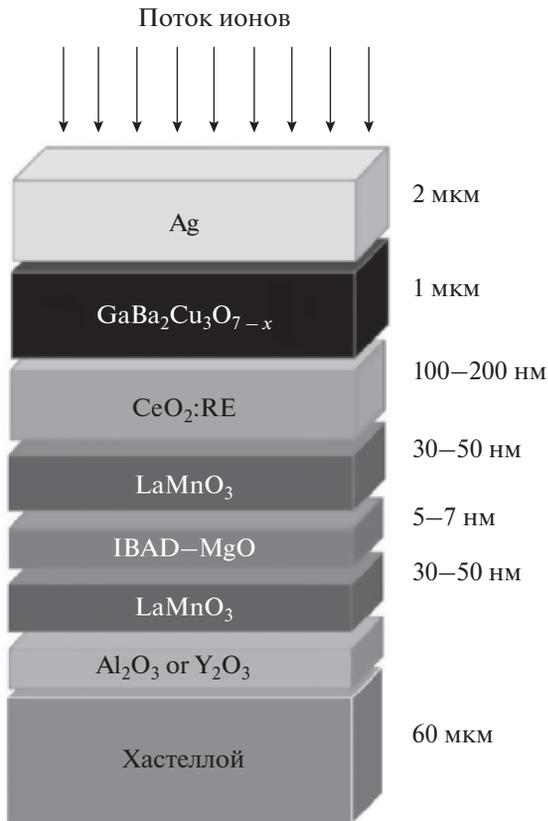


Рис. 1. Структура композитной ленты ВТСП-2 лент $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ и геометрия облучения.

тоны [7], тяжелые быстрые ионы [8]. В ряде работ наблюдали повышение критического тока в магнитных полях. Особенно сильным этот эффект был в объемных керамиках ВТСП с малой плотностью исходного критического тока. В современных лентах ВТСП второго поколения, где ленты имеют характеристики, близкие к теоретическому пределу, улучшение характеристик наблюдается редко.

Важно подчеркнуть, что радиационные дефекты можно использовать также, чтобы исследовать фундаментальные характеристики сверхпроводника. Например, особенности вызванного радиационным облучением уменьшения критической температуры зависят от механизма спаривания и симметрии сверхпроводящего параметра порядка $\Delta(\mathbf{p})$. В этом отношении изучение отклика купратов ВТСП на радиационный дефект может объяснить причину их необычных свойств в нормальном и сверхпроводящем состояниях [9].

Данная работа посвящена исследованию влияния радиационных дефектов, индуцированных быстрыми тяжелыми ионами, на критические свойства лент ВТСП-2 на основе соединения $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$, полученных в отечественной компании SuperOx [10]. Эти ленты были выбраны нами для исследования по двум причинам. Во-пер-

вых, они отечественного производства и поэтому более доступны для нас. Во-вторых, соединение $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ гораздо менее изучено, чем, например, $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, которое также используется для производства ВТСП лент. Образцы представляют собой высококачественные современные композитные наноструктурированные материалы, имеющие стабильные функциональные характеристики, поскольку в них сверхпроводник не имеет контакта с окружающей средой. Средняя плотность критического тока в этих образцах достигала 1.5×10^6 А/см², а критическая температура ~ 93 К.

Из литературы известно, что увеличение критического тока в результате ионного облучения наиболее заметно на структурно несовершенных образцах. В случае ВТСП-2 лент этот эффект мал или отсутствует. Однако в [11, 12] были обнаружены новые эффекты, приводящие к улучшению качества ленточных проводников на основе $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ в результате низкодозового облучения ионами $^{40}Ar^{8+}$ и $^{84}Kr^{17+}$, а именно, снятие напряжений в кристаллических решетках сверхпроводника и буферных слоев и улучшение адгезии между подложкой и пленкой ВТСП. Для необлученных образцов характерно образование трещин в слое ВТСП при резке и сгибании композитных лент, в то время как в облученных образцах не было выявлено трещин. Был получен патент “Способ обработки высокотемпературных сверхпроводников” [13].

ЭКСПЕРИМЕНТ

Облучали отрезки композитных $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ ВТСП-2 лент размером $0.1 \times 4 \times 20$ мм³ без медной оболочки. Архитектура образца и геометрия облучения приведена на рис. 1. Лента шириной 4 мм имеет многослойную структуру, содержащую металлическую подложку (хастеллой С276), 60 мкм, несколько буферных слоев оксидов металлов толщиной 200–300 нм, пленку сверхпроводника $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ 1 мкм, нанесенную методом лазерного напыления, сверху покрытую слоем серебра 2 мкм.

Радиационные дефекты в указанных образцах создавали быстрыми ионами, заряд, энергия и флюенсы которых представлены в таблице 1. Облучение проводили на ускорителе ионов ИЦ-100 в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова ОИЯИ (Дубна) при комнатной температуре со стороны сверхпроводника, при этом температура образцов не поднималась более 100°C.

Оценки проективных пробегов ионов¹ в композитной ленте показывают, что высокоэнерге-

¹ Оценки пробегов ионов были сделаны с помощью программы SRIM – Stopping and Range of Ions in Matter.

Таблица 1. Флюенсы облучения

Ион	Энергия, МэВ	Флюенс, ион/см ²								
		5.0×10^8	1.0×10^9	5.0×10^9	1.0×10^{10}	2.0×10^{10}	1.0×10^{11}	5.0×10^{11}	1.0×10^{12}	3.0×10^{12}
$^{132}\text{Xe}^{27+}$	167	5.0×10^8	1.0×10^9	5.0×10^9	1.0×10^{10}	2.0×10^{10}	1.0×10^{11}	5.0×10^{11}	1.0×10^{12}	3.0×10^{12}
$^{86}\text{Kr}^{17+}$	107	1.0×10^{10}		5.0×10^{10}		1.0×10^{11}	5.0×10^{11}	1.0×10^{12}	2.0×10^{12}	5.0×10^{12}
$^{40}\text{Ar}^{8+}$	48	1.0×10^{10}	5.0×10^{10}	1.0×10^{11}	5.0×10^{11}	1.0×10^{12}	5.0×10^{12}	1.0×10^{13}	2.0×10^{13}	5.0×10^{13}

тические ионы, попадая в композит ВТСП, тормозятся в подложке, при этом расплавляют слой ВТСП, образуя треки цилиндрической формы, так называемые колонарные дефекты. Считается, что каждый ион генерирует один дефект, так что концентрацию введенных радиационных дефектов X_d легко получить из флюенсов.

До и после облучения на каждом образце был измерен критический ток I_c при $T = 77$ К и снята зависимость $R(T)$ с целью определения критической температуры T_c и ширины перехода ΔT_c . Измерения критического тока были проведены четырехконтактным методом на постоянном токе с прижимными токовыми контактами с промежуточным слоем индия.

Чтобы получить наиболее точные результаты, в одних и тех же условиях облучали по два идентичных образца. Они, как правило, давали одинаковые, с точностью наших измерений (~ 0.5 К), значения T_c и близкие значения критического тока, но иногда по какой-то причине результаты существенно отличались. В этих случаях проводили повторное облучение другой пары образцов до тех пор, пока не получали совпадающие или близкие результаты. После этого вычисляли среднее значение критического тока по двум образцам.

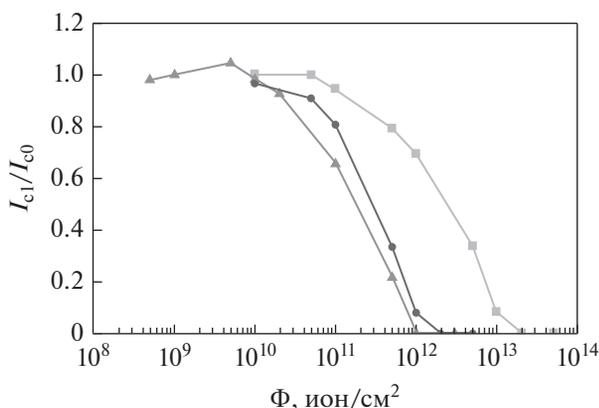


Рис. 2. Зависимость отношения критического тока I_{c1} при $T = 77$ К к исходному значению I_{c0} от флюенсов облучения ионами аргона (■), криптона (●) и ксенона (▲).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные зависимости критического тока и критической температуры от флюенсов ионов ксенона, криптона и аргона приведены на рис. 2 и 3. Рассмотрим зависимость критического тока при $T = 77$ К от флюенсов ионного облучения (рис. 2).

Обнаружено небольшое повышение критического тока при флюенсе ионов ксенона 5×10^9 ион/см², для остальных ионов повышение I_c не наблюдали. Для каждого иона определено значение флюенса, при котором критический ток близок к нулю. Это и есть радиационная стойкость данной сверхпроводящей ленты, а именно, $\Phi = 10^{12}$ ион/см² для ионов $^{132}\text{Xe}^{27+}$ (167 МэВ), 2×10^{12} ион/см² — $^{86}\text{Kr}^{17+}$ (107 МэВ) и 2×10^{13} ион/см² — $^{40}\text{Ar}^{8+}$ (48 МэВ).

Теперь рассмотрим зависимость критической температуры от флюенсов облучения (рис. 3). Критическая температура образцов сверхпроводника не изменяется до флюенса порядка 10^{10} ион/см² в случае ионов ксенона, 10^{11} ион/см² — криптона, 10^{12} ион/см² — аргона, затем начинает падать.

По моменту обращения T_c в ноль можно грубо оценить радиус трека, оставляемый ионами. Если предположить, что при флюенсах $\Phi > 10^{12}$ ион/см² распределение дефектов равномерно на площади

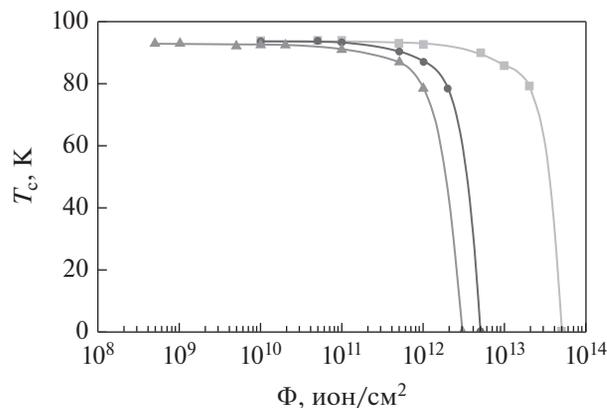


Рис. 3. Зависимость критической температуры от флюенсов облучения ионами аргона (■), криптона (●) и ксенона (▲).

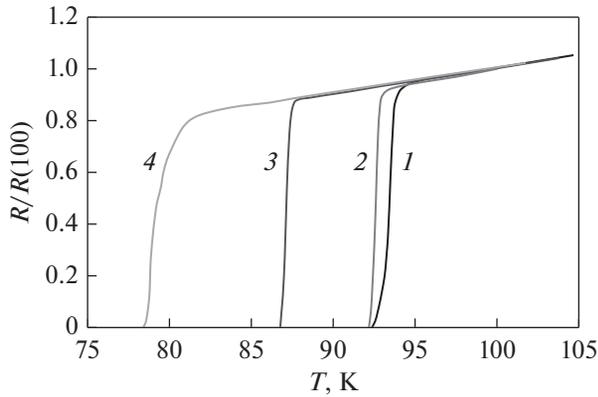


Рис. 4. Зависимость отношения $R/R(100)$ от температуры T для исходного образца ВТСП-2 ленты $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (1) и образцов той же ленты после облучения ионами ксенона с $\Phi = 2 \times 10^{10}$ ион/см² (2), $\Phi = 5 \times 10^{11}$ ион/см² (3), $\Phi = 1 \times 10^{12}$ ион/см² (4). $R(100)$ – сопротивление ленты при $T = 100$ К.

порядка $1/\Phi \approx 10 \times 10 \text{ nm}^2$, то при соприкосновении стенок соседствующих колонарных дефектов транспорт сверхпроводящих носителей в плоскости пленки на макроскопических размерах должен прекратиться. Это произойдет, когда площадь $1/\Phi$ станет примерно равна πr^2 , где r – радиус трека. Таким образом, из критического значения для флюенса Φ_c получим $r \approx (\pi\Phi_c)^{-1/2}$. Из рис. 3 можно оценить, что для $^{132}\text{Xe}^{27+}$ радиус трека составляет примерно 3.3 нм, для $^{86}\text{Kr}^{17+}$ $r \approx 2.5$ нм, для $^{40}\text{Ar}^{8+}$ – порядка 1 нм. Следует отметить, что данная оценка радиуса треков для криптона (2.5 нм) дает значение, близкое к экспериментально полученному с помощью ПЭМ в лентах YBCO: 3–5 нм [12].

На рис. 4 приведены кривые перехода в сверхпроводящее состояние исходного образца и при различных флюенсах после облучения ионами ксенона. Из рис. 4 видно, что в результате облучения изменяется не только T_c , но и ширина перехода. На рис. 5 приведены значения ширины перехода ΔT_c на полувысоте в зависимости от концентрации дефектов для всех ионов. Ширина перехода сверхпроводника дает информацию о его структурном совершенстве, причем чем круче зависимость $R(T)$ или чем меньше величина ΔT_c , тем более идеальной является кристаллическая решетка. Обращает на себя внимание зависимость ширины перехода для случая ионов ксенона, где наблюдается минимум ΔT_c при концентрации дефектов $X_d = 2 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

При облучении ионами криптона до $\Phi = 1 \times 10^{12}$ ион/см² был получен двухфазный сверхпроводник с различной критической температурой

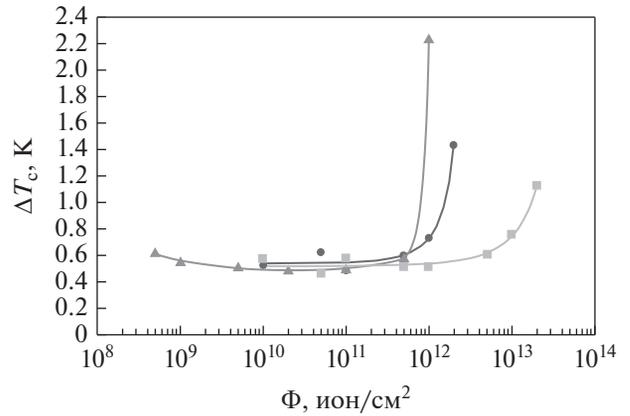


Рис. 5. Зависимость ширины перехода в сверхпроводящее состояние от флюенсов облучения ионами аргона (■), криптона (●) и ксенона (▲).

(~92 и 87 К), при этом кривая перехода имела ступенчатую форму.

ВЫВОДЫ

Итак, в экспериментах исследованы зависимости критического тока, критической температуры и ширины сверхпроводящего перехода от флюенсов, или концентрации дефектов, введенных при облучении $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ленты ВТСП-2 быстрыми ионами в широком диапазоне значений.

Из рисунков следует, что существенного повышения критического тока не обнаружено, но можно оценить радиационную стойкость данной ленты ВТСП к использованному облучению высокоэнергетическими тяжелыми ионами: ксеноном, криптоном и аргоном. Уменьшение критического тока при высоких флюенсах можно объяснить частичной аморфизацией сверхпроводника.

Что касается критической температуры, то ее понижение начинается при значительно более высоких флюенсах, чем снижение критического тока, причем меняется и ширина перехода. Была обнаружена немонотонная зависимость ΔT_c для ионов ксенона.

В настоящее время все чаще объясняют экспериментальные результаты по купратным ВТСП в рамках фононной модели спаривания куперовских пар [14–17], а именно, уменьшение T_c при высоких флюенсах может быть обусловлено сильной деформацией плоскости Cu-O , что приводит к уменьшению плотности состояний за счет размытия протяженной сингулярности Ван Хофа на поверхности Ферми [18, 19].

Авторы благодарят сотрудников СуперОкс С.В. Самойленкова, А.А. Молодыка, С. Ли за предоставление образцов сверхпроводников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bednorz J.C. and Müller K.A.* Possible High T_c Superconductivity in the Ba–La–Co–O System // *Phys. B: Condens. Matter.* 1986. V. 64. P. 189–193.
2. *Wu M.K., Ashburn J.R., Torng C.J., Hor P.H., Meng R.L., Gao L., Huang Z.J., Wang Y.Q. and Chu C.W.* Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y–Ba–Cu–O compound system at ambient pressure // *Phys. Rev. Letters.* 1987. V. 58. № 9: P.908–910.
3. *Maiorov B., Wang H., Foltyn S.R., Li Y., DePaula R., Stan L., Arendt P.N., Civalle L.* Influence of naturally grown nanoparticles at the buffer layer in the flux pinning in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ coated conductors // *Supercond. Sci. and Techn.* 2006. V. 19. P. 891–895.
4. *Crisan A., Fujiwara S., Nie J.C., Sundaresan A., Ihara H.* Sputtered nanodots: A costless method for inducing effective pinning centers in superconducting thin films // *Appl. Phys. Letters.* 2001. V. 79. P. 4547–4549.
5. *Бобылев И.Б., Герасимов Е.Г., Зюзева Н.А.* Влияние паров воды на формирование центров пиннинга в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ при низкотемпературном отжиге // *ФММ.* 2017. Т. 118. № 8. С. 779–789.
6. *Frischherz M.C., Kirk M.A., Farmer J., Greenwood L.R., Weber H.W.* Defect cascades produced by neutron irradiation in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ // *Physica C.* 1994. V. 232. P. 309–327.
7. *Jia Y., LeRoux M., Miller D.J., Wen J.G., Kwok W.K., Welp U., Rupich M.W., Li X., Sathyamurthy S., Fleshler S., Malozemoff A.P., Kayani A., Ayala-Valenzuela O., Civalle L.* Doubling the critical current density of high temperature superconducting coated conductors through proton irradiation // *Appl. Phys. Letters.* 2013. V. 103. P. 122601-1–122601-5.
8. *Moshchalkov V.V., Metlushko V.V., Güntherodt G., Goncharov I.N., Didyk A.Yu., Bruynseraede Y.* Irradiation-induced crossover from point defects to correlated disorder pinning in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ single crystals // *Phys. Rev. B.* 1994. V. 50. P. 639–642.
9. *Openov L.A.* Irradiation-induced suppression of the critical temperature in high- T_c superconductors: Pair breaking versus phase fluctuations // *JETP Lett.* 2005. V. 81. P. 43–46.
10. *Lee S., Petrykin V., Molodyk A., Samoilenkov S., Kaul A., Vavilov A., Vysotsky V. and Fetisov S.* Development and production of second generation high T_c superconducting tapes at SuperOx // *Supercond. Sci. Technol.* 2014. V. 27. 044022. (9PP).
11. *Антонова Л.Х., Воронов В.В., Михайлова Г.Н., Троицкий А.В., Демихов Т.Е., Дидык А.Ю., Суворова Е.И.* Релаксация внутренних напряжений в композитных ВТСП 2-го поколения с помощью высокоэнергетического ионного облучения. // *ФММ.* 2013. Т. 114. № 2. С. 161–163.
12. *Suvorova E.I., Cantoni M., Buffat P.A., Didyk A.Yu., Antonova L.K., Troitskii A.V., Mikhailova G.N.* Structure analysis of the YBCO layer in Ag/YBCO/metal oxide buffer/Hastelloy composite tape before and after 107 MeV Kr^{17+} irradiation // *Acta Mater.* 2014. V. 75. P. 71–79.
13. *Михайлова Г.Н., Воронов В.В., Троицкий А.В., Дидык А.Ю., Демихов Т.Е., Суворова Е.И.* Патент “Способ обработки высокотемпературного сверхпроводника” № 2477900 от 20 марта 2013 г.
14. *Kresin V.Z., Wolf S.A.* Electron-lattice interaction and its impact on high T_c superconductivity // *Reviews of Modern Physics.* 2009. V. 81. P. 481–501.
15. *Maksimov E.G., Kulić M.L., Dolgov O.V.* Bosonic Spectral Function and the Electron-Phonon Interaction in HTSC Cuprates // *Advances in Condensed Matter Physics.* 2010. V. 2010. ID423725.
16. *Ponomarev Ya.G., Mikheev M.G., Sudakova M.V., Tchesnokov S.N., Kuzmichev S.A.* Extended van Hove Singularity, Strong Electron-Phonon Interaction and Superconducting Gap in Doped Bi-2212 Single Crystals // *Phys. Status Solidi (c).* 2009. V. 6. №. 9. P. 2072–2075.
17. *Ponomarev Ya.G., Van H.H., Kuzmichev S.A., Kulbachiinskii S.V., Mikheev M.G., Sudakova M.V., Tchesnokov S.N.* Terahertz phonon spectroscopy of doped superconducting cuprates // *JETP Letters.* 2013. V. 96. № 11. P. 743–749.
18. *Abrikosov A.A., Campuzano J.C. and Gofron K.* Experimentally observed extended saddle point singularity in the energy spectrum of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$ and $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ and some of the consequences // *Physica C.* 1993. V. 214. P. 73–79.
19. *Abrikosov A.A.* Theory of high- T_c superconducting cuprates based on experimental evidence // *Int. J. Mod. Phys. B.* 1999. V. 13. P. 3405–3418.