

DOI: 10.18721/JPM.11401

УДК 538.945

**ОСОБЕННОСТИ ПРОВОДИМОСТИ
НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ВТСП-СТРУКТУР****М.П. Фараджева¹, А.В. Приходько¹, О.И. Коньков²**¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация;² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Проведены исследования транспортных характеристик наноструктур, состоящих из микрокристаллического порошка $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ и нанопорошка того же состава, в наносекундном интервале длительностей импульсного напряжения, приложенного к наноструктуре. Установлено, что при 20%-м содержании нанопорошка наблюдается повышение критической температуры перехода T_c в сверхпроводящее состояние. Полученные экспериментальные результаты трактуются в рамках теории перколяции, согласно которой оптимальная концентрация нанопорошка в наномодифицированных структурах приводит к возникновению максимального количества джозефсоновских контактов микропорошок – нанопорошок. Увеличение пористости структуры при отклонении от оптимальной концентрации приводит к разрушению перколяционного кластера и уменьшению значения T_c , а также к уширению области температур, в которой происходит переход в сверхпроводящее состояние.

Ключевые слова: наноструктура, высокотемпературная сверхпроводимость, перколяционный кластер, критическая температура

Ссылка при цитировании: Фараджева М.П., Приходько А.В., Коньков О.И. Особенности проводимости наномодифицированных ВТСП-структур // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 4. С. 7–14. DOI: 10.18721/JPM.11401

CONDUCTIVITY FEATURES OF THE NANOMODIFIED HTSC STRUCTURES**M.P. Faradzheva¹, A.V. Prikhod'ko¹, O.I. Kon'kov²**¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation;²The Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, Russian Federation

The transport characteristics of nanostructures consisting of microcrystalline $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ powder and nanopowder of the same composition have been studied in the nanosecond duration interval of the pulse voltages applied to the nanostructure. An increase in the critical temperature T_c of the transition to the superconducting state was established to occur at the 20% nanopowder content. The obtained experimental data was interpreted in terms of the percolation theory. This theory holds that the optimal nanopowder content in the nanomodified material causes a

rise of the maximum number of micropowder-nanopowder Josephson's contacts. An increase in the structure porosity when the content falls off from the optimum, leads to a break-down of a percolation cluster and to a decrease in the T_c value; moreover, the temperature range where the transition to the superconducting state takes place, spreads.

Keywords: nanostructure, high-temperature superconductivity, percolation cluster, critical temperature

Citation: M.P. Faradzheva, A.V. Prikhod'ko, O.I. Kon'kov, Conductivity features of the nanomodified HTSC structures, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 11 (4) (2018) 7–14. DOI: 10.18721/JPM.11401

Введение

Изучение механизма протекания тока в материалах с высокотемпературной сверхпроводимостью (ВТСП) представляет повышенный интерес ввиду проявления нелинейных электрических свойств при варьировании их химического состава, характера взаимодействия между их гранулами и особенностей межгранульной среды. Среди указанных объектов следует выделить «модифицированные» наноматериалы как близкие к перколяционным структурам [1 – 3]. Физические свойства в неоднородных перколяционных структурах, такие как электропроводность, диффузия, подвижность носителей заряда, намагниченность и другие, можно описать с позиций теории протекания (перколяции).

Известно, что в теории протекания ключевую роль играют как характеристики среды, так и параметры взаимодействия областей с одинаковыми свойствами. При этом появляется возможность управлять электрическими свойствами таких перколяционных структур, в частности проводимостью. Например, в работе [2] показано, что наноструктуры на основе серебра обладают нелинейными вольт-амперными характеристиками, т. е. при повышении напряжения на кривой зависимости силы тока от приложенного напряжения $I(U)$ наблюдается область с отрицательным дифференциальным напряжением. В работе [3] изучено протекание тока в композите сверхпроводник – манганит. При этом установлено, что когда концентрация ферромагнетика достигает критического значения, нарушаются перколяционные пути и образуется сетка контактов сверхпроводник – ферромагнетик – сверхпроводник. Наличие сетки приводит к резкому возрастанию удельного сопротив-

ления композита и уширению сверхпроводящего фазового перехода (с сохранением ферромагнитных свойств). Подобные соединения рассматриваются как сверхпроводники с размытой температурой фазового перехода (далее для краткости эта область сопротивлений и температур будет именоваться $R(T)$ -переход). При добавлении в диборид магния MgB_2 более 10% магнитного материала $La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_3$ (LSMO), транспортные характеристики такого соединения определяются протеканием тока по цепочкам LSMO – MgB_2 – LSMO – MgB_2 , что объясняет уширение $R(T)$ -перехода на 10 К. В работе [4], где измерения выполнялись на постоянном токе, было установлено, что если получать ВТСП-керамику $YBa_2Cu_3O_{7-8}$ путем смешивания микрокристаллического порошка и нанопорошка такого же состава (с концентрацией более 20 %), то повышается как абсолютное значение электросопротивления, так и температура сверхпроводящего перехода (по отношению к соответствующим свойствам микрокристаллов).

Цель настоящей работы – установить влияние состава ВТСП-керамики $YBa_2Cu_3O_{7-8}$, полученной путем смешивания порошков с разным размером частиц, на критическую температуру и ширину перехода ВТСП-материалов в сверхпроводящее состояние.

В связи с поставленной целью, в работе изучены особенности протекания тока в таких структурах в зависимости от содержания нанопорошка и представлены результаты анализа транспортных характеристик модифицированных ВТСП-материалов на основе микрокристаллического порошка $YBa_2Cu_3O_{7-8}$ и нанопорошка того же состава в наносекундном интервале длительностей

напряжения, приложенного к таким структурам.

Методика эксперимента

Для проведения исследований использовались образцы, состоящие из сверхпроводящего микрокристаллического порошка оксида иттрия-бария-меди YBCO, полученного по обычной керамической технологии спеканием порошков углекислого бария BaCO_3 , оксида иттрия Y_2O_3 и оксида меди CuO в твердой фазе, и сверхпроводящего нанопорошка YBCO [4, 5], полученного путем сжигания нитрат-органических прекурсоров. Нитраты иттрия, бария и меди смешивались в соответствующих мольных долях и растворялись в воде в соотношении 0,03 : 1,00. В качестве «топлива» добавлялся глицерин в количестве 0,5 – 1,5 % от общей массы водного раствора нитратов. Полученный раствор выпаривался при непрерывном помешивании до желеобразного состояния. Этот осадок воспламенялся и горел до образования аморфного сыпучего прекурсора. После этого полученный продукт подвергался термообработке до 350 – 915 °С с выдержкой при этих температурах в течение 1 – 20 ч для удаления недогоревшей органики и формирования соответствующего распределения размеров частиц. Размеры частиц нанопорошка составляли примерно 35 – 70 нм [5], а микрокристаллов, полученных методом твердофазного спекания, – 0,5 – 2,0 мкм.

Дифракционный анализ синтезированных соединений, исследование морфологии образцов, а также их фазового состава представлены ранее в работе [5].

Образцы модифицированных структур получали путем смешивания двух порошкообразных компонентов в массовом соотношении. Компоненты не подвергались спеканию, чтобы избежать взаимодиффузии и нежелательных химических реакций, а также прессованию, чтобы исключить вклад механического воздействия в исследуемые характеристики. Мы рассматривали модельную систему – смесь порошков с искусственно созданными джозефсоновскими слабыми связями, образующимися на естественных межгранульных границах.

Нормальное сопротивление указанных границ составляет примерно 3 Ом и не отражается на выводах работы.

Для оценки транспортных характеристик образцов проводились исследования температурных зависимостей сопротивления $R(T)$ в области сверхпроводящего фазового перехода в наносекундном интервале длительностей приложенного напряжения, по методике, описанной в работе [6]. Образец помещали в цилиндрическую диэлектрическую ячейку между двумя прижимными контактами из стеклоуглерода и сжимали этими электродами с давлением не более 1 МПа. Длительность импульса составляла 1 – 20 нс при напряжении до 1 В на частоте 100 Гц. Особенность такого наносекундного эксперимента состоит в управляемом контроле термического перегрева каналов протекания, который позволяет выявить особенности протекания тока в неоднородной системе без ее разрушения. Сопротивление образца в измерительной ячейке доводилось до 100 – 200 Ом (при комнатной температуре) путем его сжатия стеклоуглеродными электродами; это было необходимо для обеспечения наибольшей чувствительности методики. Степень такого сжатия не влияла на плотность упаковки порошкообразного образца, так как прикладываемые усилия ничтожно малы (на это указывала воспроизводимость полученных нами результатов для одного и того же образца). Значение критической температуры T_c определялось как точка начала перехода. Для системы с 100%-м микрокристаллическим порошком $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ точка начала резистивного перехода составляла примерно 94 К, т. е. была близкой к значению температуры Кюри, найденной с помощью магнитных измерений в работе [7], и это значение является стандартным.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены температурные зависимости сопротивления образцов $R(T)$ в области перехода в сверхпроводящее состояние для образцов с различным содержанием нанопорошка (0 – 100 %), при длительности импульса приложенно-

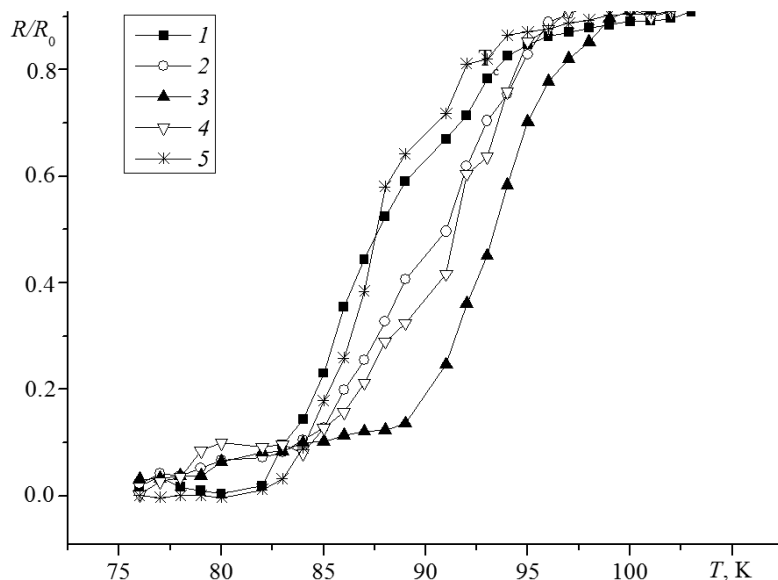


Рис. 1. Температурная зависимость сопротивления образцов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ в области сверхпроводящего перехода для различных концентраций введенного нанопорошка, %: 0 (1), 10 (2), 20 (3), 30 (4), 100 (5)

го напряжения 5 нс. Результаты измерений представлены в относительных единицах, где R_0 – значение сопротивления при $T = 100$ К.

Исследования в стационарном режиме [5] показали, что для керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, полученной твердофазным спеканием, температура перехода в сверхпроводящее состояние составляет 89,0 К, а добавление нанопорошка в концентрации более 20 % повышает эту температуру до 96,6 К. Однако наносекундные исследования показали, что повышение критического значения температуры T_c примерно на 5 К наблюдается только для образца с 20%-м содержанием нанопорошка, тогда как существенного повышения T_c для других концентраций не зарегистрировано.

На рис. 2 приведены зависимости величины T_c от концентрации нанопорошка (N , %) в стационарном режиме (кривая 1, [5]) и в наносекундном (кривая 2). Значения T_c для чисто микрокристаллических образцов ($N = 0$ %) в стационарном и наносекундном режимах различаются, так как в первом случае авторы работы [5] исследовали керамику $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, полученную методом твердофазного спекания, тогда

как во втором (настоящая статья) – смесь микрокристаллических порошков.

В таблице приведены значения критической температуры (T_c , К), ширины сверхпроводящего перехода (ΔT , К) и наклона кривой температурной зависимости сопротивления (B , K^{-1}) для образцов с различным содержанием нанопорошка (N , %). Наклон зависимости $R(T)$ (параметр B) вычислялся как угловой коэффициент касательной в точке кривой, где значение R/R_0 составляло половину максимального значения, т. е. $(1/2) (R/R_0)_{\max}$ (середина сверхпроводящего перехода), с погрешностью 5 %. Установлено, что наклон кривой зависимости сопротивления от температуры для образца 3 с 20%-м содержанием нанопорошка отличается от других образцов (1, 2, 4, 5).

Для образца с 20%-м содержанием нанопорошка величина B выше, чем для образцов других составов, что свидетельствует о более резком переходе в сверхпроводящее состояние. Для этого же состава наблюдается и наибольшее значение T_c , равное 99 К.

В работах [8, 9] установлено, что при добавлении наночастиц BaTiO_3 [8] и BaHfO_3 [9] в микрокристаллическое соединение $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ температура перехода в сверх-

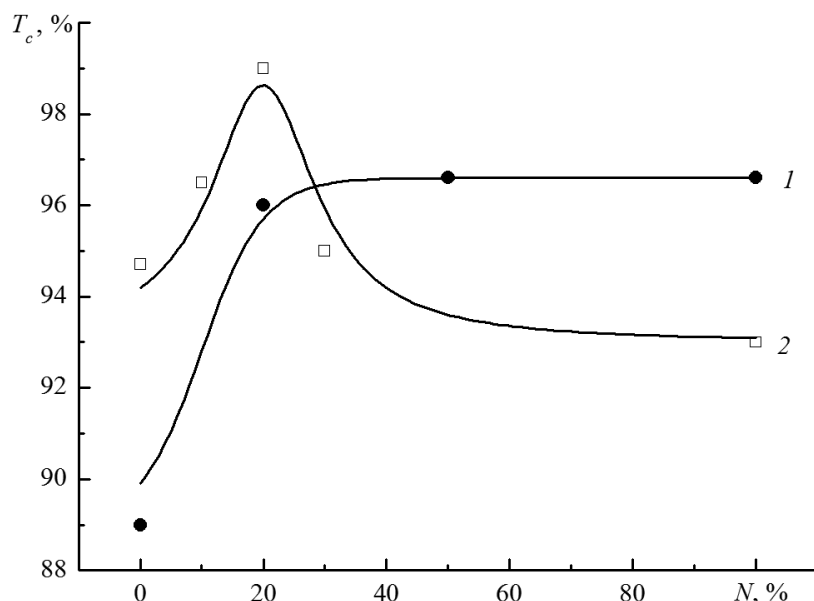


Рис. 2. Зависимости критической температуры перехода образцов в сверхпроводящее состояние от концентрации нанопорошка в статическом (1 [5]) и наносекундном (2) режимах; данные получены для керамики (1) и для смеси порошков (2)

проводящее состояние повышается до 103 и 107 К соответственно.

Введение наночастиц других элементов в керамику YBCO, как правило, снижает критическую температуру перехода в сверхпроводящее состояние T_c [10 – 12], тогда как для наших наноструктурированных материалов значение T_c увеличивается.

Согласно теории перколяции, проводимость в неоднородных средах зависит от концентрации примеси в исходном образце и ее порогового значения (N_c – критическая концентрация, при которой наблюдается порог протекания тока). В исследуемых нами структурах нанодисперсный порошок

выступает в качестве связующего, образуя сеть слабых связей джозефсоновского типа в микрокристаллическом ВТСП. Нанодисперсный наполнитель, располагаясь между микрочастицами ВТСП, обеспечивает формирование сверхпроводящего перколяционного кластера в неоднородной среде.

Пороговое значение концентрации, при котором наблюдается повышение T_c (см. рис. 2), приходится на 20%-е содержание нанопорошка, выше которого, вероятно, в системе происходит «переключение» механизма проводимости. Согласно теории протекания, в объемной двухкомпонентной системе при 26%-й объемной доле частиц

Таблица

Параметры фазового перехода в сверхпроводящее состояние для образцов модифицированного $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ с различным содержанием нанопорошка

N , %	0	10	20	30	100
T_c , К	94,7	96,0	99,0	95,0	93,0
ΔT , К	14	14	10	12	13
B , K^{-1}	0,064	0,064	0,090	0,070	0,071

Обозначения: T_c – критическая температура; ΔT – ширина сверхпроводящего перехода; B – наклон кривой температурной зависимости сопротивления; N – содержание нанопорошка.

меньшего размера существует максимальное значение плотности упаковки [13] (минимальная пористость). При этом возможно создание благоприятных условий для проявления джозефсоновских свойств. Такая концентрация в наномодифицированных структурах приводит к возникновению максимального количества джозефсоновских контактов микропорошок – нанопорошок. С увеличением концентрации, нанодисперсный наполнитель, обволакивая микрокристаллы $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, образует оболочку из нанопорошка того же состава. При значении N свыше 20 % образуется «прослойка» из нанопорошка и исчезает прямой контакт между микрогранулами. Увеличение пористости структуры при отклонении от оптимальной концентрации приводит к нарушению джозефсоновской сетки, разрушению перколяционного кластера и наблюдаемому нами уменьшению значения T_c , а также к уширению области температур, где имеет место переход в сверхпроводящее состоя-

ние. Отметим, что в случае стационарных токов такой эффект отсутствует ввиду длительного теплового воздействия.

Заключение

Проведенное исследование транспортных характеристик при наносекундных длительностях напряжения позволяет выявить особенности изменения температуры и крутизны перехода (наклона кривых) ВТСП-структур неоднородного состава. Установлено, что в структурах, состоящих из микрокристаллического порошка $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ и нанопорошка того же состава, наблюдается повышение критической температуры перехода T_c в сверхпроводящее состояние и сужение сверхпроводящего перехода при концентрации нанопорошка примерно 20 %. Путем добавления нанопорошка в различной концентрации появляется возможность управления критической температурой и шириной перехода в сверхпроводящее состояние.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мицен К.В., Иваненко О.М. U -центры, перколяция и переход диэлектрик – металл в ВТСП // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2000. Т. 118. № 3. С. 666–675.
2. Гладских И.А., Полищук В.А., Варгания Т.А. Серебряные структуры на пороге перколяции, полученные с помощью лазерного отжига // Физика твердого тела. 2017. Т. 59. № 3. С. 582–587.
3. Кононенко В.В., Таренков В.Ю., Дьяченко А.И., Варюхин В.Н. Транспортные характеристики композита сверхпроводник – ферромагнетик // Физика низких температур. 2014. Т. 40. № 3. С. 247–249.
4. Гаджимагомедов С.Х., Фараджева М.П., Табит А.Ф.А., Гамматаев С.Л., Хашафа А.Х.Д., Палчаев Д.К. Получение наноструктурированных материалов на основе $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ // Вестник Дагестанского государственного университета. Сер. Естественные науки. 2014. № 1. С. 36–42.
5. Гаджимагомедов С.Х., Палчаев Д.К., Рабаданов М.Х., Мурлиева Ж.Х., Шабанов Н.С., Палчаев Н.А., Мурлиев Э.К., Эмиров Р.М. Керамические материалы на основе $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, полученные из нанопорошков // Письма в Журнал технической физики. 2016. Т. 42. № 1. С. 9–16.
6. Приходько А.В., Коньков О.И. Модифи-

кация структуры и протекание тока в массиве углеродных однослойных нанотрубок // Физика твердого тела. 2014. Т. 56. № 7. С. 1411–1414.

7. Балаев Д.А., Дубровский А.А., Шайхутдинов К.А., Попков С.И., Гохфельд Д.М., Гохфельд Ю.С., Петров М.И. Механизм гистерезисного поведения магнитосопротивления гранулярных ВТСП. Универсальность ширины гистерезиса магнитосопротивления // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2009. Т. 135. № 2. С. 271–279.

8. Rejith P.P., Vidya S., Thomas J.K. Effect of addition of $BaTiO_3$ nano particles on the electrical transport properties of YBCO superconductor // IOP Conference Series: Material Science and Engineering. 2015. Vol. 73. Pp. 1–4.

9. Rejith P.P., Vidya S., Thomas J.K., Solomon S. Enhancement of vortex pinning in $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ - $BaHfO_3$ superconductor-insulator system // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. 2012. Vol. 25. No. 6. Pp. 1817–1822.

10. Hamrita A., Ben Azzouz F., Dachraoui W., Ben Salem M. The effect of silver inclusion on superconducting properties of $YBa_2Cu_3O_y$ prepared using planetary ball milling // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. 2013. Vol. 26. No. 4. Pp. 879–884.

11. Missak Swarup Raju P., Devendra Kumar N.,



Pavan Kumar Naik S., Rajasekharan T., Seshubai V. Introduction of nano ceria into infiltration growth processed YBCO superconducting composites // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. 2014. Vol. 27. No. 10. Pp. 2277–2282.

12. **Turkoz M.B., Nezir S., Terzioglu C., Varilci A., Yildirim G.** Investigation of Lu effect on

YBa₂Cu₃O_{7-δ} superconducting compounds // Journal of Materials Science: Materials of Electronics. 2013. Vol. 24. No. 3. Pp. 896–905.

13. **Дик И.Г., Дьяченко Е.Г., Минков Л.Л.** Моделирование случайной упаковки шаров // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. № 4. С. 63–69.

Статья поступила в редакцию 07.05.2018, принята к публикации 25.09.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФАРАДЖЕВА Мислимат Пиралиевна — ассистент Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
mpfaradzheva@physics.spbstu.ru

ПРИХОДЬКО Александр Владимирович — доктор физико-математических наук, профессор Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
aleks@physics.spbstu.ru

КОНЬКОВ Олег Игоревич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-химических свойств полупроводников Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
oleg-1705@yandex.ru

REFERENCES

[1] **K.V. Mitsen, O.M. Ivanenko**, Negative U centers, percolation, and the insulator-metal transition in high- T_c superconductors, Journal of Experimental and Theoretical Physics. 91 (3) (2000) 579–587.

[2] **I.A. Gladskikh, V.A. Polishchuk, T.A. Vartanyan**, Silver structures at the percolation threshold, prepared by laser annealing, Physics of the Solid State. 59 (3) (2017) 601–606.

[3] **V.V. Kononenko, V.Yu. Tarenkov, A.I. D'yachenko, V.N. Varyuhin**, Transport characteristics of a superconductor–ferromagnet composite, Low Temperature Physics. 40 (3) (2014) 211–214.

[4] **S.Kh. Gadzhimagomedov, M.P. Faradzheva, A.F.A. Tabit, et al.**, Nanostructured materials producing based on YBa₂Cu₃O_{7-δ}, Herald of Dagestan State University, Ser. Natural Sciences. (1) (2014) 36–42.

[5] **S.Kh. Gadzhimagomedov, D.K. Palchayev, M.Kh. Rabadanov, et al.**, YBa₂Cu₃O_{7-δ}-based ceramic materials manufactured from nanopowders, Technical Physics Letters. 42 (1) (2016) 4–7.

[6] **A.V. Prikhod'ko, O.I. Kon'kov**, Modification of the structure and percolation of current in an array of single-walled carbon nanotubes, Physics of

the Solid State. 56 (7) (2014) 1463–1466.

[7] **D.A. Balayev, A.A. Dubrovskii, K.A. Shaikhutdinov, et al.**, Mechanism of the hysteretic behavior of the magnetoresistance of granular HTSCs: The universal nature of the width of the magnetoresistance hysteresis loop, Journal of Experimental and Theoretical Physics. 108 (2) (2009) 241–248.

[8] **P.P. Rejith, S. Vidya, J.K. Thomas**, Effect of addition of BaTiO₃ nano particles on the electrical transport properties of YBCO superconductor, IOP Conference Series: Material Science and Engineering. 73 (2015) 1–4.

[9] **P.P. Rejith, S. Vidya, J.K. Thomas, S. Solomon**, Enhancement of vortex pinning in YBa₂Cu₃O_{7-δ}-BaHfO₃ superconductor–insulator system, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. 25 (6) (2012) 1817–1822.

[10] **A. Hamrita, F. Ben Azzouz, W. Dachraoui, M. Ben Salem**, The effect of silver inclusion on superconducting properties of YBa₂Cu₃O_y prepared using planetary ball milling, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. 26 (4) (2013) 879–884.

[11] **P. Missak Swarup Raju, N. Devendra**

Kumar, S. Pavan Kumar Naik, et al., Introduction of nano ceria into infiltration growth processed YBCO superconducting composites, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 27 (10) (2014) 2277–2282.

[12] **M.B. Turkoz, S. Nezir, C. Terzioglu, et al.**, Investigation of Lu effect on $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

superconducting compounds, *Journal of Materials Science: Materials of Electronics*. 24 (3) (2013) 896–905.

[13] **I.G. Dik, E.G. Dyachenko, L.L. Minkov**, Modelirovaniye sluchaynoy upakovki sharov [Simulation of the random packing spheres], *Physical Mesomechanics Journal*. 9 (4) (2006) 63–69.

Received 07.05.2018, accepted 25.09.2018.

THE AUTHORS

FARADZHEVA Mislimat P.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
mpfaradzheva@physics.spbstu.ru

PRIKHOD'KO Aleksandr V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
aleks@physics.spbstu.ru

KON'KOV Oleg I.

The Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences
26 Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation
oleg-1705@yandex.ru