

УДК 537.3

DOI: 10.18384/2310-7251-2018-4-66-83

КОНСТРУИРОВАНИЕ НОВЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ ПО МОДЕЛИ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ НА ДВОЙНИКОВЫХ ГРАНИЦАХ

Чижов В.А.¹, Зайцев Ф.С.², Бычков В.Л.²

¹ ООО «ЭНОМ» (энергетическая обработка материалов)

117525, г. Москва, ул. Чертановская, д. 34А, Российская Федерация

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, Российская Федерация

Аннотация. Авторами статьи обсуждена новая модель сверхпроводимости (СП), предложенная в работах В.А. Чижова. Новая модель позволяет глубже понять механизм возникновения СП и объяснить многие экспериментальные факты на основе теории процессов, происходящих в идеальном дефекте кристаллической решётки – двойниковой границе (МСП-ДГ). С помощью МСП-ДГ дана трактовка эффекта Мейснера-Оксенфельда, изучено образование, эволюция и разрушения вихрей Абрикосова и связанных с ними крип токов. Проведено количественное сопоставление теоретических оценок МСП-ДГ с экспериментальными данными. Показано хорошее соответствие. Предложены способы борьбы с крип током. Описаны материалы, в том числе новые, которые в соответствии с теорией МСП-ДГ должны обладать улучшенными свойствами высокотемпературной сверхпроводимости. Сформулированы перспективные направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: сверхпроводимость, двойниковая граница, эффект Мейснера-Оксенфельда, вихри Абрикосова, крип ток.

CONSTRUCTION OF NEW HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS USING THE MODEL OF SUPERCONDUCTIVITY ON TWIN BOUNDARIES

V. Chizhov¹, F. Zaitsev², V. Bychkov²

¹ ENOM LLC (energy processing of materials)

ul. Chertanovskaya 34A, 117525 Moscow, Russian Federation

² Physical Department, Lomonosov Moscow State University

Leninskie Gory 1, 119991 Moscow, Russian Federation

Abstract. A new model of superconductivity (SC) proposed in the works of V.A. Chizhov (superconductivity model at the twin boundary) is discussed. This model allows us to understand the mechanism of the SC formation and to explain the experimental facts on the basis of the theory of processes that take place in the ideal defect of the crystal lattice, i.e. the twin boundary. With a help of MSC-TB, the Meissner–Ochsenfeld effect interpretation is presented, and the formation, evolution and destruction of Abrikosov vortices and associated creeper currents are studied. A quantitative comparison of theoretical estimates of MSC-TB with experimental data

is carried out. A good correspondence is shown. Methods for eliminating the creep current are suggested. Materials, including new ones, are described, which, in accordance with the MSC-TB theory, should have improved properties of high-temperature superconductivity. Promising lines of further research are formulated.

Key words: superconductivity, twin boundary, Meissner–Ochsenfeld effect, Abrikosov vortices, creep current.

Введение

Прошло более 100 лет со дня открытия сверхпроводимости (СП) в ртути при температуре $T_c = 4.2$ К, а секрет эффекта СП остаётся непонятным. Подтверждением этого может служить открытие высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) в купратной керамике в 1986 г.: Йх. Беднорц и К. Мюлер, проводя исследования в Цюрихском филиале фирмы IBM, обнаружили, что керамика на основе оксида меди, лантана и бария при $T_c = 30$ К переходит в сверхпроводящее состояние. Это сообщение потрясло весь учёный мир. В 1987 г. аналогичное соединение иттрийбариевого купрата показало переход в сверхпроводящее состояние выше температуры жидкого азота $T_c = 92$ К. Открылись новые перспективы применения СП, т.к. стоимость жидкого азота на много дешевле, чем жидкого гелия.

В 2005 г. СП обнаружена в ферратосодержащих соединениях – пниктидах при 4К, где появления СП никто не ожидал, т.к. считалось, что ферромагнетизм и сверхпроводимость несовместимы. В 2008 г. частичная замена в пниктидах кислорода O_2 на фтор F привела к повышению критической температуры в несколько раз $T_c = 26$ К. Причина повышения T_c осталось неясной.

Хорошо известны следующие теории сверхпроводимости: Лондонов (1935); Гинзбурга-Ландау (1950); Бардина-Купера-Шриффера (БКШ, 1957). См., например, библиографию в [14, с. 32; 15, с. 92]. На сегодняшний день общепризнанной считается теория БКШ. Однако ни одна из данных теорий не предсказала эксперименты по СП и ВТСП, не может до конца объяснить их и спрогнозировать возникновение СП в новых материалах. Фактически все открытия СП, начиная с самого первого в 1911 г. – дело случая. Такая же тенденция продолжается и в настоящее время. Поиск новых сверхпроводящих материалов интенсивно продолжается, но общепризнанный системный подход не выработан.

В традиционных теориях, например, не находит объяснение отсутствие СП в очень хороших электропроводных материалах (золото, серебро, платина, медь) и в то же время наличие меди во многих ВТСП соединениях – купратах. Нет полноценного описания механизма эффекта Мейснера-Оксенфельда. Указывается только на выталкивание магнитного поля из объёма сверхпроводника или левитацию – «гроб Магомета». Однако в реальности в этом эффекте наблюдаются одновременно и левитация постоянного магнита над сверхпроводником, и притяжение, и зеркальность, и память от предыдущего воздействия внешним магнитным полем. Также нет понимания механизма деградации сверхпроводника.

Основной причиной отсутствия убедительных объяснений экспериментов с помощью теории БКШ является, видимо, невыполнение в реальности условий применимости этой теории. Теория БКШ разработана для идеальных кристаллов, а использовать такие кристаллы в экспериментах не удаётся. Кроме того, в теории БКШ расстояния, на которых должны взаимодействовать куперовские пары, получаются намного больше характерного размера кристаллической решётки. В результате между парами оказываются множество структурных элементов кристалла (точечные доноры, акцепторы, вакансии; дислокации; малоугловые границы; двойники), но в теории БКШ влияние таких элементов на взаимодействие пар не учитывается.

Сверхпроводники по отклику на магнитное поле разделяются на первого (СП-1) и второго (СП-2) рода. СП-1 имеют одно критическое значение магнитного поля H_c , выше которого они теряют сверхпроводимость. Для СП-2 при достаточно низкой температуре есть два критических значения H_{c1} и H_{c2} . Приложенное магнитное поле H в диапазоне $H_{c1} < H < H_{c2}$ частично проникает в СП-2, но сверхпроводящие свойства сохраняются. При $H > H_{c2}$ сверхпроводимость теряется, см., например, наглядный рисунок на ресурсе [6].

СП-2 имеют широкое практическое применение, т.к. выдерживают в сотни и тысячи раз большие нагрузки магнитных полей по сравнению с СП-1. Однако в смешанном состоянии $H_{c1} < H < H_{c2}$ (фаза Шубникова) в СП-2 возникает так называемый крип ток (ползущий ток), приводящий к паразитным шумам в электронных устройствах, а при высоких силовых нагрузках и к деградации их сверхпроводящих свойств.

Свойства смешанного состояния объясняются возникновением вихрей Абрикосова (рис. 1, 2), открытых в 1957 г. [1, с. 1442–1452]. За это открытие и другие работы по сверхпроводимости А.А. Абрикосов был удостоен в 2003 г. Нобелевской премии [13].

Исследованию вихрей Абрикосова посвящена обширная литература, см., например: [4; 5; 10–12] и приведённые там ссылки. С увеличением напряжённости H от H_{c1} к H_{c2} плотность СП тока уменьшается, развивается вихревая структура. С превышением $H > H_{c2}$ вихри исчезают вместе с СП. Однако причины возникновения и исчезновения вихрей Абрикосова, способы уменьшения их негативного влияния на сверхпроводимость остаются не до конца выясненными. Правильное понимание механизма эволюции вихрей Абрикосова является крайне важным как для теории СП, так и для промышленных приложений.

В модели МСП-ДГ предлагается единый механизм возникновения сверхпроводимости первого, второго и других родов [14–16]. Суть этого процесса состоит в следующем. С понижением температуры кристалла энергия энергетической ямы двойниковой границы (ДГ) возрастает и становится выше кинетической энергии значительного числа электронов. Это приводит к захвату электронов двойниковой границей и выбросу их на поверхность кристалла. В результате в приповерхностном слое образуется вихревой ток и магнитное поле. Выброшенные электроны удерживаются от разлёта поляризовавшимся приповерхностным слоем кристалла. Приложенное электрическое поле при достаточ-

но низкой температуре переносит электроны вдоль поверхности проводника практически без сопротивления, возникает сверхпроводимость.

В настоящей работе с помощью модели МСП-ДГ изучено возникновение сверхпроводимости, эффекта Мейснера-Оксенфельда, образование и эволюция вихрей Абрикосова, объяснено их негативное влияние на СП, выяснены причины разрушения вихрей одновременно с потерей сверхпроводимости при перегрузке магнитным полем, обсуждены способы борьбы с крип током, предложены принципы конструирования новых материалов, которые в соответствии с теорией МСП-ДГ должны обладать улучшенными свойствами высокотемпературной сверхпроводимости.

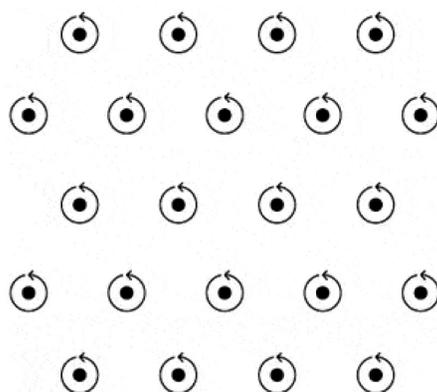


Рис. 1. Схема идеализированного распределения вихрей Абрикосова на поверхности СП. Вид сверху. Стрелками показан ток электронов, точками – магнитное поле.

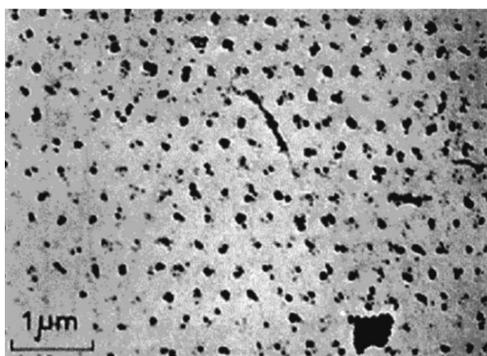


Рис. 2. Снимок решётки вихрей Абрикосова в охлаждённом до сверхпроводящего состояния свинце, легированном индием. Вихри визуализированы на электронном микроскопе за счёт «прилипших» к ним частиц ферромагнетика кобальта [12].

Краткое описание модели МСП-ДГ

На практике не удаётся добиться создания идеального кристалла без дефектов. Вся сверхпроводимость была обнаружена в поликристаллах. В современных экспериментах по СП также обычно работают с поликристаллами, где всег-

да присутствуют идеальные дефекты кристаллической решётки – двойники или двойниковые границы (см. рис. 3, 4). Даже, специально выращенные самые высокочистые монокристаллы с СП свойствами имеют остаточное содержание примеси более 10^{14} см⁻³, которое может создать энергетические ямы типа двойниковых границ.

Рассмотрим течение квазисвободных электронов металлической фазы в ДГ. Введём обозначения (см. рис. 4): $\Delta E_{\partial T}$ – энергия энергетической ямы двойниковой границы по отношению к энергии кристалла $E_{кр}$; $W_{ке}$ – кинетическая энергия электрона; E_{ϕ} – энергия фононов; T – температура.

Представим «работу» двойниковой границы в динамическом режиме как $\Delta E_{\partial z} = \partial E_{\partial z} / \partial T$. Энергия «ям» двойниковой границы $|\Delta E_{\partial z}|$ увеличивается при понижении температуры T и становится больше кинетической энергии электрона $W_{ке}$. Электрон захватывается «ямой» и выбрасывается на поверхность, т.к. направление движения наружу является более энергетически выгодным. Данное действие происходит не с одним электроном, а со всеми, которые удовлетворяют условию захвата $|\Delta E_{\partial z}| \geq W_{ке}$, где $W_{ке} = m_e V_d^2 / 2$ (см. рис. 4, 5).

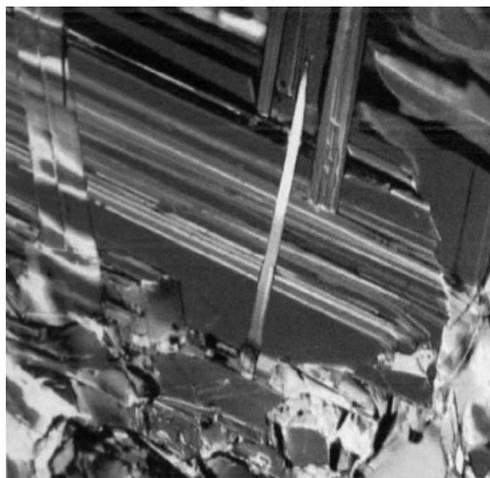


Рис. 3. Фото кристалла с двойниковыми границами.

Необходимо отметить влияние на этот процесс энергии поверхности $E_{нов}$, которая должна позволить электронам «выходить» из ДГ, т.е. для $E_{нов}$ должно выполняться условие $E_{нов} < \Delta E_{\partial z} < E_{кр}$ (более подробно см. [14, с. 37–43]). Выброшенные практически беспрепятственно из ДГ электроны уходят опять в объём кристалла из-за их избыточной плотности над его поверхностью, но под действием той же ДГ опять выбрасываются на поверхность. Таким образом, в приповерхностном слое посредством ДГ и её энергетической ямы $|\Delta E_{\partial z}|$ возникает вихревой ток, а, следовательно, и магнитное поле $rot \mathbf{B} = \mathbf{j} + \partial \mathbf{D} / \partial t$ (см. рис. 5, 6). Более подробно действие ДГ на электронную систему в кристалле при понижении его температуры описано в [14, с. 55–121].

Эффект СП и эффект Мейснера-Оксенфельда

МСП-ДГ позволяет объяснить многие экспериментальные факты [1; 2]. Остановимся в этом пункте лишь на кратком объяснении эффекта СП («отсутствия» сопротивления) и эффекта Мейснера-Оксенфельда.

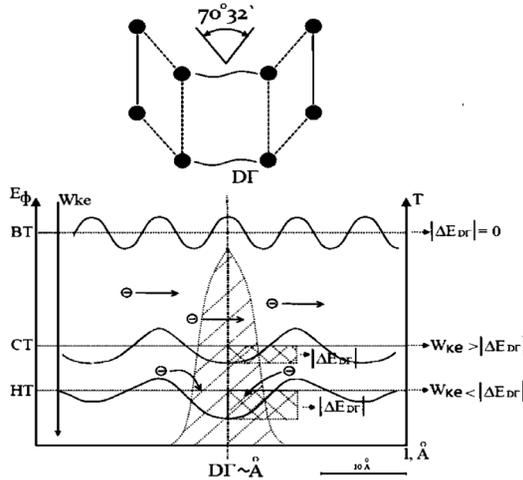


Рис. 4. Захват электрона в ДГ при понижении температуры. По вертикали отложена интегральная энергетическая характеристика кристалла $E_{\phi} = C_p \sim aT^3$, T – температура, C_p – теплоёмкость, a – некоторый коэффициент. По горизонтали – характерное расстояние. ВТ, СТ и НТ – высокие, средние и низкие температуры. $W_{ке}$ – кинетическая энергия электрона.

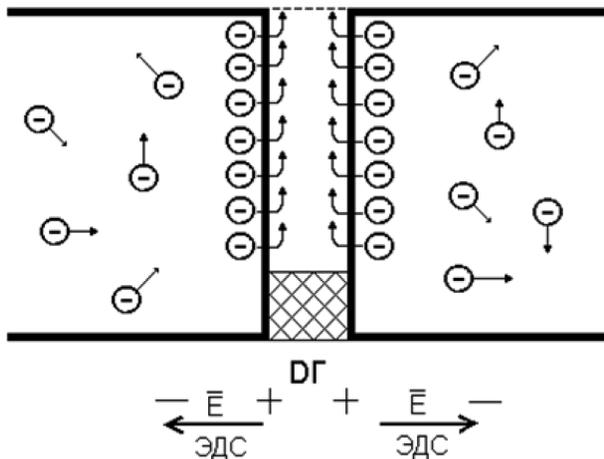


Рис. 5. Схема захвата электронов двойниковой границей.

Учтём, что в поликристалле имеется множество двойниковых граней. Проведённые оценки [14; 15] показывают, что на 1 см^{-2} должно приходиться более 10^8 двойниковых границ или аналогичных им, то есть имеется $N_{дг} \geq 10^8 - 10^{10} \text{ см}^{-2}$ каналов выброса электронов, см. рис. 7.

Если при понижении температуры выполняются условие перекрытия при-поверхностных вихревых токов (см., например, рис. 15 в [15]), а к кристаллу приложено электрическое или вихревое магнитное поле, то между вихрями над ДГ осуществляется практически беспрепятственный обмен электронами. Возникает эффект СП, рис. 8.

Эффект Мейснера-Оксенфельда в модели МСП-ДГ объясняется возбуждением и ориентацией вихревых токов ДГ при приложении внешнего магнитного поля, которые из-за практически, отсутствия диссипации ($K_{дис} = \text{менее } 10^{-14}$, см. [15, с. 60–72]) текут затем «бесконечно» долго. Это убедительно объясняет свойства левитации, притяжения, зеркальности и памяти (см. рис. 9, 10). На рис. 9 P – вес тела магнита; F_A – сила Ампера; $H_{вн}$ – напряжённость внешнего магнитного поля постоянного магнита; H_l – напряжённость магнитного поля левого вихревого тока двойниковой границы (ДГ) – притяжение; H_p – напряжённость магнитного поля правого вихревого тока двойниковой границы (ДГ) – отталкивание (левитация). Более подробный анализ данных эффектов представлен в [14, с. 96–112; 15, с. 18–27].

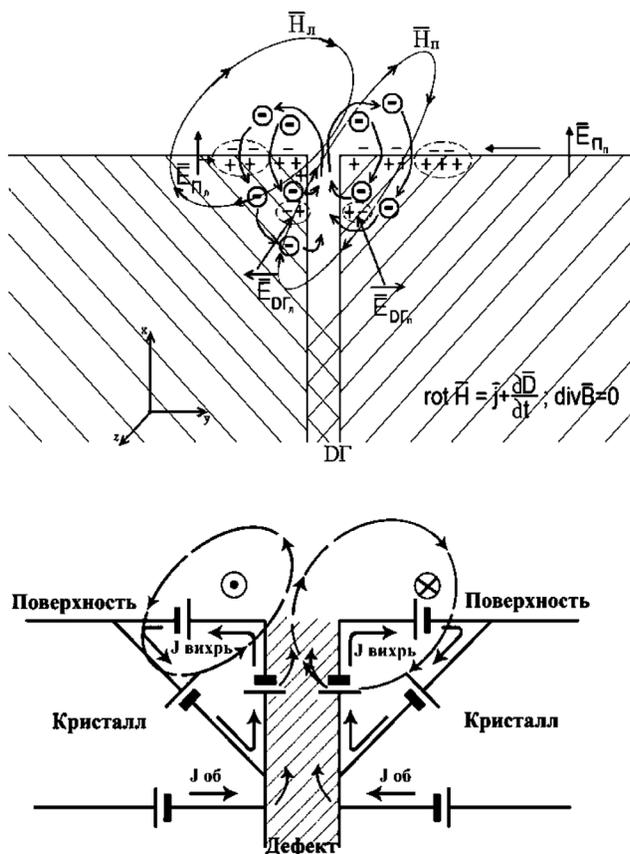


Рис. 6. Вверху – схема образования вихревых токов и магнитного поля посредством ДГ. Внизу – эквивалентная электрическая схема.

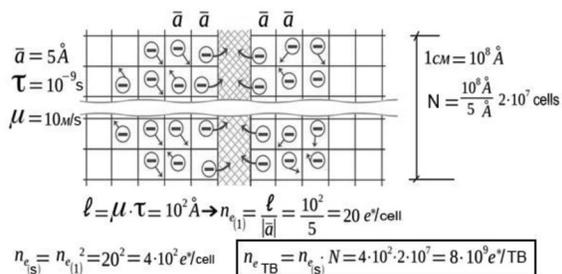


Рис. 7. Параметры захвата электронов одной ДГ и оценка плотности ДГ на 1 cm^{-2} . При этих параметрах, где: \bar{a} – параметр решётки кристалла; e^* – квази-свободный электрон; τ – время релаксации электронного потока; μ – подвижность носителей заряда или дрейфовая скорость электронов и объёме кристалла 1 cm^3 . Одна ДГ может захватить $8 \cdot 10^9$ электронов за время τ , тогда для полного захвата $3 \cdot 10^{21} - 7 \cdot 10^{22} \text{ e/cm}^3$ надо иметь порядка $10^8 - 10^{10}$ ДГ/ cm^2 .

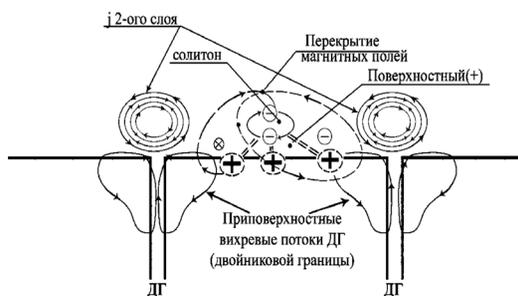


Рис. 8. Схема электронного обмена между приповерхностными вихревыми токами, созданными ДГ. Возбуждённый вихрь одной ДГ передаёт не возбуждённому вихрю заряд.

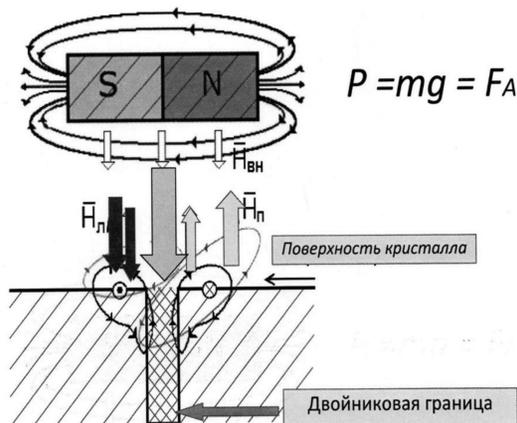


Рис. 9. Схема действия сил в эффекте Мейснера-Оксенфельда согласно модели МСП-ДГ. (P – вес магнита; F_A – сила Ампера; $H_{вн}$ – напряжённость внешнего магнитного поля; $H_{л}$ и $H_{п}$ – действие левого и правого магнитных полей вихревых токов двойниковой границы (ДГ)).

Возникновение, эволюция и разрушение вихрей Абрикосова в модели МСП-ДГ. Крип ток

К СП-1 относятся простые металлы Hg, Al, Pb и др., которые состоят из атомов одного сорта, имеющих близкие энергетические состояния электронов внешнего уровня. Здесь это состояние можно рассматривать как некоторое состояние с одним уровнем кинетической энергии. СП-2 обычно представляет собой сплав металла и полупроводника или полуметалла: Nb_3Ge , V_3Ga , V_3Si , $NbSe_2$ и др. Сплавы с СП-2 свойствами и ВТСП структуры ($YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, $HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$ и др.) имеют более сложное многоатомное строение, а, значит, и более широкий диапазон кинетических энергий электронов.

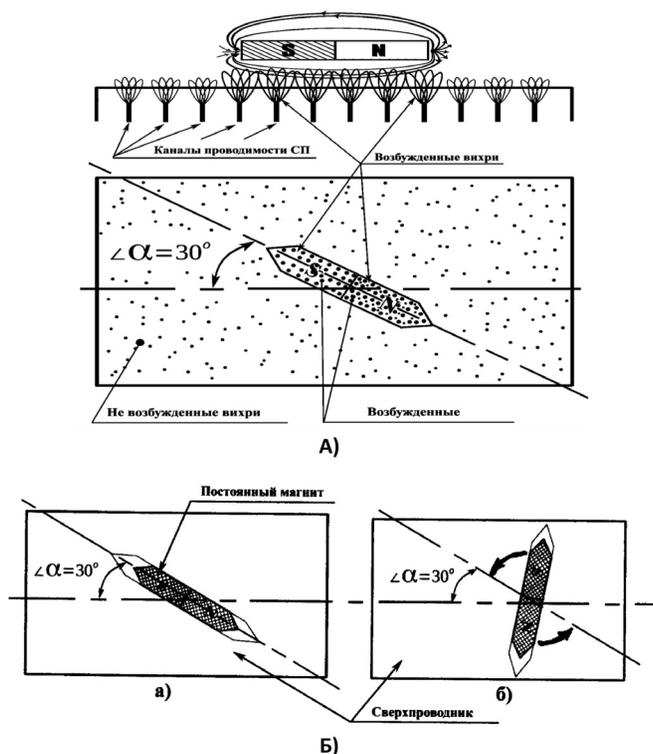


Рис. 10. Схемы, поясняющие эффект Мейснера-Оксенфельда в различных его проявлениях (более детально в [14, с. 96–112; 15, с. 18–27]):

- А) левитация – возбуждение вихревых токов ДГ магнитным полем;
 Б) память и зеркальность эффекта.

В многоуровневой электронной системе СП-2 сверхпроводимость при понижении температуры начинается с захвата двойниковой границей электронов, имеющих самую минимальную кинетическую энергию. С них начинается образование приповерхностных вихревых токов, созданных двойниковой границей. Флюксонный обмен между приповерхностными вихревыми токами ДГ создаёт эффект практически без диссипативной передачи заряда – сверхпроводимость,

рис. 8 [14, с. 88; 15, с. 17]. Затем с понижением температуры энергия ямы ДГ увеличивается и в неё захватываются электроны с большей кинетической энергией, тем самым усиливаются приповерхностные вихревые токи и плотность тока СП, созданные ДГ или каналами проводимости типа двойниковых границ. Описанные эффекты были зафиксированы в принстонском эксперименте 2007 г. [9].

С увеличением значения внешнего магнитного поля $H > H_{к1}$ электроны начинают двигаться по ларморовским окружностям и запираются в этом поле. Эффект усиления запираения электронов с ростом магнитного поля очень наглядно продемонстрирован в эксперименте с вакуумной лампой [3, с. 478–480], в котором добиваются полного исчезновения анодного тока при увеличении магнитного поля. Причём в первую очередь ток уменьшается за счёт электронов с меньшей поперечной к магнитному полю скоростью, так как они имеют меньший ларморовский радиус. Удерживание заряженных частиц магнитным полем широко применяется в различных магнитных ловушках, например, в токамаках.

Согласно, МСП-ДГ, наибольшая плотность электронов на поверхности СП имеется вблизи ДГ, которые производят эмиссию электронов. Поэтому в магнитном поле именно около ДГ должно создаваться наиболее заметное круговое движение электронов по ларморовским окружностям. Образование таких структур в модели МСП-ДГ и трактуются как образование вихрей Абрикосова (рис. 11). Данный вывод подтверждается соответствием поверхностных плотностей вихрей Абрикосова и двойниковых границ, а также соответствием размера вихрей Абрикосова характерному ларморовскому радиусу электронов в приложенном магнитном поле (см. следующий пункт).

Ослабление тока в СП-2 при наложении внешнего магнитного поля можно трактовать как результат отрыва слабосвязанных электронов от ДГ вихрей и образование свободно двигающихся по кристаллической решётке вихрей (см. рис. 11). Возникающие свободные вихри уже не связаны с вихрями двойниковых границ. Свободные вихри (СВ) во внешнем магнитном поле будем также называть свободными вихрями Абрикосова или кратко вихрями Абрикосова по аналогии с закреплёнными на решётке вихрями Абрикосова.

Как уже отмечалось, в СП-2 имеется более широкий диапазон энергий электронов, чем в СП-1, поэтому процесс прекращения тока происходит не мгновенно при $H_{к}$, как в СП-1, а в некотором промежутке значений поля $H_{к1} < H < H_{к2}$. Причём расширение диапазона $[H_{к1}, H_{к2}]$ с уменьшением температуры обусловлено вовлечением в СП электронов с большей кинетической энергией.

Вихрь Абрикосова заряжен отрицательно, т.к. состоит из электронов. Поверхность поликристалла СП-2 имеет сложную структуру и поэтому не эквипотенциальна. Кроме того, имеются тепловые, механические, радиационные, электромагнитные и другие возмущения. В результате под действием локального и внешнего электрических полей, свободные вихри могут перемещаться в направлении энергетического минимума, а также разрушаться в процессе движе-

ния. Такой эффект и наблюдается, например, в экспериментах [7; 13]. При этом СП ток уменьшается, т.к. часть электронов перестанет участвовать во флюксонидном обмене между ДГ (рис. 8). Это приводит к искажению СП и паразитным эффектам в устройствах.

Движение электронов в СВ по кругу образует ток только вместе с движением всего вихря. Ток СВ вихрей и связанное с ними движение электронов называют крип током (рис. 12). Крип ток является нежелательным эффектом, т.к. приводит к искажению СП и паразитным эффектам в устройствах.

При приближении магнитного поля к критическому $H_{к2}$ происходит уменьшение ларморовского радиуса и сокращение электронной структуры вихря. Размеры вихрей ДГ, закреплённых и свободных вихрей Абрикосова уменьшаются. По достижении полем критического значения $H_{к2}$ обмен электронами между соседними ДГ прекращается, вихри Абрикосова вырождаются (деградируют) по причине взаимодействия электронов с атомами кристаллической решётки и сверхпроводимость теряется.

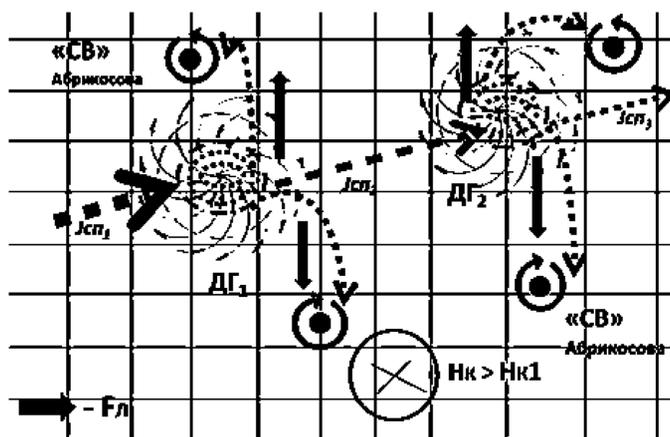


Рис. 11. Схема возникновения свободных вихрей в плоскости поверхности кристалла по модели МСП-ДГ, где: ДГ₁ и ДГ₂ – каналы захвата и выброса электронов на поверхность кристалла с образованием приповерхностных вихревых токов и магнитного поля (см. рис. 7, 9 – флюксонидный обмен между вихрями ДГ [14, с. 27–32; 55–95]); H – внешнее магнитное поле над поверхностью СП; F_l – сила Лоренца; $J_{сп1}$ – СП ток без действия H ; «СВ» – оторванный от ДГ свободный вихрь; $J_{сп2}$, $J_{сп3}$ – СП ток при $H_{к1} < H < H_{к2}$.

Таким образом, по модели МСП-ДГ при наложении магнитного поля решетка вихрей Абрикосова возникает в СП-2 за счёт эмиссии электронов двойниковыми границами в режиме сверхпроводимости. При этом из-за наличия локальных неоднородностей и внешних факторов, при движении СВ вихрей Абрикосова, появляется крип ток.

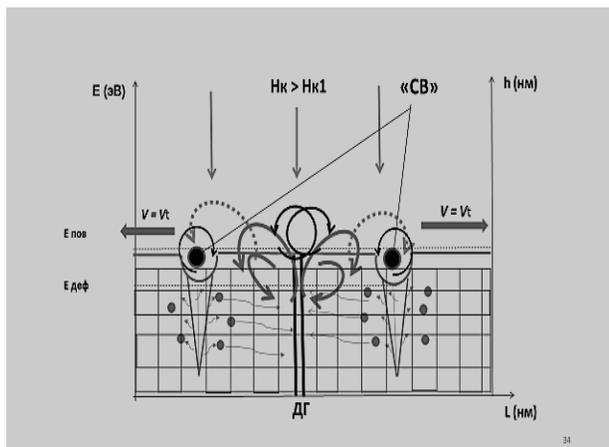


Рис. 12. Схема деградации свободного вихря по модели МСП-ДГ. Показана двойниковая граница с вихревой поверхностной электронной токовой структурой. СВ – свободные вихри; H_k – внешнее магнитное поле; V – скорость движения вихрей. Электроны при взаимодействии с кристаллической решёткой выходят из СВ и захватываются ДГ.

Сопоставление количественных оценок МСП-ДГ с экспериментальными данными о вихрях Абрикосова

Детальное сопоставление теории МСП-ДГ и опытных данных требует разработки подробной математической модели и проведения вычислительного эксперимента. Такие исследования планируется провести в ближайшем будущем. Здесь остановимся на сравнении характерных величин, предсказанных теорией МСП-ДГ и определённых опытным путём.

Плотность двойниковых границ оценена в работах [14; 15] и составляет в поликристалле порядка $\sim 10^{10}$ шт/см². Плотность вихрей Абрикосова можно оценить, исходя из многочисленных непосредственных наблюдений. Например, из фотографии на рис. 2 видно, что плотность вихрей составляет ~ 20 шт / 10^{-8} см² = $\sim 2 \cdot 10^9$ шт/см². То есть плотность вихрей Абрикосова соответствует по порядку величины плотности ДГ.

В [7] экспериментально оценена скорость движения вихрей Абрикосова $\sim 2 \cdot 10^4$ м/с. Этот результат оказался неожиданным для традиционных теоретических представлений о сверхпроводимости. Однако в модели МСП-ДГ такая скорость вполне объяснима. Средняя скорость электронов, определённая из условия равенства их кинетической энергии и тепловой энергии $mV^2/2 = 3/2kT$, при 10 – 100 К составляет $V \sim 2 - 5 \cdot 10^4$ м/с.

Таким образом, в СП-2 при возникновении условий для перемещения вихря, составляющие его электроны имеют возможность двигаться с наблюдаемой в эксперименте скоростью.

Электроны, оторванные от вихря ДГ, образуют СВ вихри за счёт силы Лоренца, которые взаимодействуют со скоростью $V \sim 2 \cdot 10^4$ м/с с кристаллической решёткой, и СВ вихри самоуничтожаются (деградируют), теряя электроны, отдавая их

кристаллу (рис. 12). Эти электроны затем опять захватываются стационарным вихрем ДГ (рис. 11, 12), который (вихрь ДГ) в дальнейшем или пополняет подошедший к ДГ ослабленный вихрь Абрикосова или создаёт новый СВ вихрь Абрикосова.

Во внешнем магнитном поле ~ 0.3 Т ларморовский радиус электрона с поперечной к магнитному полю скоростью 10^4 м/с составляет $\sim 0.2 \cdot 10^{-6}$ м, что соответствует по порядку величины характерному размеру вихрей Абрикосова, см., например, рис. 2.

Сравним теперь магнитную энергию электронной структуры, возникающей над ДГ, с энергией магнитного поля $B_{к2}$, необходимой для разрушения вихрей Абрикосова. В [15] показано, что 1 см^2 сверхпроводника создаёт магнитное поле ~ 0.1 - 1 Т. Для разрушения структуры над ДГ требуется затратить энергию $S(B^2/\mu_0)$. Именно такой по порядку величины является энергия поля $B_{к2}$.

Таким образом, полученные по теории МСП-ДГ и в эксперименте различные количественные оценки порядка значений характерных параметров вихрей Абрикосова сопоставимы.

Способы борьбы с крип током

Для борьбы с крип током надо не допустить его возникновения, т.е. максимально повысить $H_{к1}$, а в случае его появления создать условия для нераспространения этого тока по линии СП. В настоящее время для минимизации крип тока применяется несколько способов: введение в кристалл легирующей примеси (пиннинг), которая сдерживает движение вихрей Абрикосова; введение точечных ферромагнетиков под СП плёнку; локальное лазерное воздействие на поверхность СП. Модель МСП-ДГ даёт наглядное объяснение известным методам и позволяет предложить новые способы подавления крип тока.

Будем исходить из того, что отрыв вихря от ДГ происходит сначала для электронов с самой низкой поперечной к магнитному полю кинетической энергией, для которых в силе Лоренца $e(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B})$ электрическая компонента играет более существенную роль по сравнению с магнитной. Тогда, чем выше энергия самых малоэнергетических электронов, тем большую нагрузку внешнего магнитного поля H кристалл СП-2 может выдержать, не образуя заметный крип ток. Таким образом, уменьшить крип ток можно за счёт повышения энергии электронов, эмитируемых из ДГ, и воздействием на вихрь электромагнитного поля. Обсудим эти способы более подробно.

1. Создание ДГ с большей глубиной энергетической ямы $|\Delta E_{ДГ}|$, рис. 4, повышает энергетику эмитируемых электронов. Хорошую перспективу здесь имеют конструирование новых СП материалов на основе ВТСП. Поиск можно вести в системах с сильной химической связью: ионной, например, во фторидных системах; ковалентной, например, в алмазе, графене и фулере. Глубокие энергетических ямы типа ДГ могут образовываться на межфазных границах.

2. Выяснение, какие из элементов (атомов) сложной структуры СП соединений, таких как $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$, создают слабоэнергетические электроны, и их замена на атомы, которые поднимут энергетику электронов.

3. Конструирование кристалла с системой энергетических барьеров, подавляющих возникновение вихрей Абрикосова и распространение крип тока. Известный способ пиннинга объясняется в модели МСП-ДГ созданием с помощью легирующей примеси дополнительного электрического потенциала (энергетической ямы) и введением в систему дополнительных электронов, которые могут приводить к увеличению плотности тока СП.

По теории МСП-ДГ примесные центры в кристалле могут как улучшить, так и ухудшить свойства СП. Если примесь вблизи ДГ создаёт положительный потенциал, то вихрь электронов легче оторвать от ДГ. При высоком положительном потенциале вихрь может удерживаться примесью, а при низком продолжить движение, повышая крип ток.

Введение в кристалл примеси, создающий отрицательный потенциал, также может иметь двойные последствия для крип тока. Отрицательный потенциал вблизи ДГ создаёт барьер для отрыва вихря электронов от ДГ. Однако при слишком высоком барьере СП может исчезнуть, т.к. нарушится обмен электронами между соседними ДГ (рис. 8).

4. Введение внешнего энергетического воздействия, изменяющего энергию электронов в ДГ и положение вихрей Абрикосова. Обсудим известные опыты в этом направлении с позиций теории МСП-ДГ.

4.1. Лазерным облучением СП-2 удаётся манипулировать положением одиночных вихрей Абрикосова, группируя их и освобождая от них поверхность кристалла [8]. Скопление вихрей происходит в той области, куда направлен луч лазера. Авторы опыта не дают этому ясного объяснения. Модель МСП-ДГ позволяет наглядно интерпретировать данный эффект. Выброс электронов из ДГ при подогреве её лазерным излучением уменьшается. Возникающий градиент электрического потенциала сдвигает вихрь Абрикосова в область подогрева. Лазерное воздействие может успешно применяться в микрокриогенных системах и для цифровой быстродействующей записи информации, но его локальность не позволяет подавить крип ток в больших силовых устройствах [8].

4.2. Уменьшения крип тока можно добиться введением точечных постоянных магнитов под кристаллический СП-2 слой. Такой способ создания магнитных ловушек для вихрей уже используется в опытах [2]. По модели МСП-ДГ действие ферромагнетиков сходно ловушкам пиннинга. Однако здесь, в отличие от пиннинга, в систему не вводятся дополнительные электроны (носители тока), что может уменьшить эффективность данного метода с точки зрения повышения плотности СП тока.

5. На основе МСП-ДГ можно предложить ещё один способ подавления крип тока: разрушение вихрей Абрикосова и выравнивание неоднородности возмущений в линиях СП посредством кратковременного создания токов высокой частоты порядка 1–10 МГц. Можно ожидать, что при кратковременном «встряивании» системы СП произойдёт нивелирование неоднородности плотности вихрей за счёт выравнивания возбуждения участков СП. Однако в данном варианте имеется опасение негативного влияния кратковременных электромагнитных импульсов на поведение приёмных устройств.

Выводы

Предлагаемая модель МСП-ДГ основана на анализе данных всех основных экспериментов по СП и использует самые базовые физические понятия и законы. В ней дан единый механизм возникновения СП 1-го, СП 2-го рода и СП 1.5-го рода. При этом не используются понятия куперовских пар, бозонов, поляризованных фононов и Бозе-Эйнштейновского конденсата.

По модели МСП-ДГ для получения эффекта сверхпроводимости необходимо создать: 1) квазисвободные электроны типа металлической фазы; 2) каналы проводимости на поверхность кристалла типа двойниковых границ; 3) условия захвата электронов в двойниковые границы и выброса их на поверхность; 4) устойчивость каналов выброса к деградации.

Поэтому новые высокотемпературные материалы следует искать в кристаллах с сильными межатомными связями, например щёлочно-фтористыми системами типа $(d(x) + f(y) + MgF(z-\delta))$, (... CaF), (..... CsF), (..... RbF) с большим периодом решётки \hat{a} ; в кристаллах с сильной ионно-ковалентной связью – халькогениды металлов; в кристаллах с сильной ковалентной связью типа алмаза.

С использованием модели сверхпроводимости на двойниковых границах МСП-ДГ изучены механизмы возникновения, эволюции и разрушения вихрей Абрикосова. Показано хорошее соответствие количественных теоретических оценок МСП-ДГ с экспериментальными данными.

Проанализированы известные способы борьбы с крип током и предложены новые. Одним из перспективных вариантов борьбы с крип током представляется создание периодически расположенных энергетических барьеров, ориентированных поперёк движения СП тока. Такое деление проводящей СП ленты будет действовать как демпфер. Барьеры могут создаваться как примесями, так и магнитными полосками.

Рассмотренные методики требуют работы над достаточно сложными высоко научно-технологичными задачами. Однако их решение даст огромный экономический эффект, т.к. выведет линии СП на совершенно новый качественный уровень как по характеристикам, так и по применению в различных областях: электронике, приборостроении, силовых устройствах передачи электричества и магнитных полей.

Статья поступила в редакцию 28.08.2018 г.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа частично выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-07-00897).

ACKNOWLEDGMENTS

This work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 18-07-00897).

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрикосов А.А. О магнитных свойствах сверхпроводников второй группы // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. 1957. Т. 32. Вып. 6. С. 1442–1453.

2. Захаров М.С. Подавление магнитной релаксации в массивных высокотемпературных сверхпроводниках: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург, 2015. 100 с. [Электронный ресурс]. URL: http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/34475/1/urgu1476_d.pdf (дата обращения: 10.03.2018).
3. Кортнев А.В., Рублёв Ю.В., Куценко А.Н. Практикум по физике. М.: Высшая школа, 1965. 568 с.
4. Козлов В.А., Самохвалов А.В. Замкнутые вихри Абрикосова в сверхпроводниках второго рода // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1991. Т. 53. № 3. С. 150–153.
5. Kozlov V.A., Samokhvalov A.V. Stabilization of toroidal Abrikosov Vortex in a Non-uniform Superconductor // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. 1993. Vol. 6. Iss. 2. P. 63–68.
6. Сверхпроводимость [Электронный ресурс] // Медкриосервис : [сайт]. URL: http://www.medcryoservice.ru/s_conduct.htm (дата обращения: 06.11.2018).
7. Imaging of super-fast dynamics and flow instabilities of superconducting vortices / Embon L., Anahory Y., Jelic Ž.L., Lachman E.O., Myasoedov Y., Huber M.E., Mikitik G.P., Silhanek A.V., Milošević M.V., Gurevich A., Zeldov E. // Nature Communications. 2017. Vol. 8. Article number 85 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-017-00089-3#additional-information> (дата обращения: 20.07.2017).
8. Физики сложили вихри Абрикосова в буквы с помощью лазерного пинцета [Электронный ресурс] // Планета сегодня : [сайт]. URL: <http://planet-today.ru/novosti/nauka/item/57546-fiziki-slozhili-vikhri-abrikosova-v-bukvy-s-pomoshchyu-lazernogo-pintseta> (дата обращения: 15.10.2018).
9. Открыты очаги сверхпроводимости при температуре выше критической [Электронный ресурс] // MEMBRANA : [сайт]. www.membrana.ru/particle/11534 (дата обращения: 31.05.2007).
10. Решётка вихрей Абрикосова // Физическая энциклопедия; под ред. акад. Прохорова А.М. Т. 1. М.: Советская энциклопедия, 1988. С. 389.
11. Тихомиров И.В., Югай К.Н. Динамика замкнутых вихрей Абрикосова в сверхпроводниках второго рода // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. 2008. Т. 3. № 1. С. 105–108.
12. Essmann U., Trauble H. The direct observation of individual flux lines in type II superconductors // Physical Letters. 1967. Vol. 24 A. P. 526.
13. Нобелевская премия по физике 2003 г. [Электронный ресурс] // Учебно-методическая газета «Физика» : [сайт]. URL: http://fiz.1september.ru/2003/43/no43_1.htm (дата обращения: 09.08.2018).
14. Чижов В.А. Снова о сверхпроводимости, или эксперименты ждут ответа. М.: «Спутник+», 2015. 128 с.
15. Чижов В.А. Снова о сверхпроводимости, или эксперименты ждут ответа. Ч. II. М.: «Спутник+», 2017. 95 с.
16. Chizhov V.A., Zaitsev F.S., Bychkov V.L. Model of superconductivity formation on ideal crystal lattice // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 996. P. 012016.

REFERENCES

1. Abrikosov A.A. [On the magnetic properties of superconductors of the second group]. In: *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki* [Journal of Experimental and Theoretical Physics], 1957, vol. 32, no. 6, pp. 1442–1453.
2. Zakharov M.S. *Podavlenie magnitnoi relaksatsii v massivnykh vysokotemperaturnykh*

- sverkhprovodnikakh: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk* [Suppression of magnetic relaxation in the massive high-temperature superconductors: PhD thesis in Physical and Mathematical Sciences]. Ekaterinburg, 2015. 100 p. Available at: http://elar.uafu.ru/bitstream/10995/34475/1/urgu1476_d.pdf (accessed: 10.03.2018).
3. Kortnev A.V., Rublev Yu.V., Kutsenko A.N. *Praktikum po fizike* [Workshop on physics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1965. 568 p.
 4. Kozlov V.A., Samokhvalov A.V. [Closed Abrikosov vortices in type-II superconductors]. In: *Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki* [JETP Letters], 1991, vol. 53, no. 3, pp. 150–153.
 5. Kozlov V.A., Samokhvalov A.V. Stabilization of toroidal Abrikosov vortex in a non-uniform superconductor. In: *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 1993, vol. 6, iss. 2, pp. 63–68.
 6. [Superconductivity]. In: *Medkrioservis* [Medcryoservice]. Available at: http://www.medcryoservice.ru/s_conduct.htm (accessed: 06.11.2018).
 7. Embon L., Anahory Y., Jelić T.L., Lachman E.O., Myasoedov Y., Huber M.E., Mikitik G.P., Silhanek A.V., Milošević M.V., Gurevich A., Zeldov E. Imaging of super-fast dynamics and flow instabilities of superconducting vortices. In: *Nature Communications*, 2017, vol. 8, article number 85. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41467-017-00089-3#additional-information> (accessed: 20.07.2017).
 8. [Physicists piled Abrikosov vortices into letters with laser tweezers]. In: *PLANET TODAY*. Available at: <http://planet-today.ru/novosti/nauka/item/57546-fiziki-slozhili-vikhri-abrikosova-v-bukvy-s-pomoshchyu-lazernogo-pintseta> (accessed: 15.10.2018).
 9. [Foci of superconductivity have been opened at temperatures above the critical one]. In: *MEMBRANA*. Available at: <http://www.membrana.ru/particle/11534> (accessed: 31.05.2007).
 10. [Abrikosov vortex lattice]. In: Prokhorov A.M., ed. *Fizicheskaya entsiklopediya*. T. 1 [Physical encyclopedia. Vol. 1]. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1988. pp. 389.
 11. Tikhomirov I.V., Yugai K.N. [The dynamics of closed Abrikosov vortices in superconductors of the second kind]. In: *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika* [Vestnik Novosibirsk State University. Series: Physics], 2008, vol. 3, no. 1, pp. 105–108.
 12. Essmann U., Trauble H. The direct observation of individual flux lines in type II superconductors. In: *Physical Letters*, 1967, vol. 24 A, pp. 526.
 13. [Nobel Prize in Physics, 2003]. In: *Uchebno-metodicheskaya gazeta «Fizika»* [Educational newspaper “Physics”]. Available at: http://fiz.1september.ru/2003/43/no43_1.htm (accessed: 09.08.2018).
 14. Chizhov V.A. *Snova o sverkhprovodimosti, ili eksperimenty zhдут otveta* [Again about superconductivity, or experiments are waiting for an answer]. Moscow, Sputnik+ Publ., 2015. 128 p.
 15. Chizhov V.A. *Snova o sverkhprovodimosti, ili eksperimenty zhдут otveta. Ch. II* [Again about superconductivity, or experiments are waiting for an answer. Part II]. Moscow, Sputnik+ Publ., 2017. 95 p.
 16. Chizhov V.A., Zaitsev F.S., Bychkov V.L. Model of superconductivity formation on ideal crystal lattice. In: *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 996, pp. 012016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чижов Владимир Александрович – кандидат технических наук, заведующий отделом ООО «ЭНОМ» (энергетическая обработка материалов);
e-mail: Chizhov_va@bk.ru;

Зайцев Фёдор Сергеевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительных систем Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова;
e-mail: fza@mail.ru;

Бычков Владимир Львович – доктор физико-математических наук, доцент кафедры физической электроники Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова;
e-mail: bychvl@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir A. Chizhov – PhD in Engineering Sciences, Head of Department, ENOM LLC (energy processing of materials);
e-mail: Chijov_va@bk.ru;

Fedor S. Zaitsev – Doctor in Physical and Mathematical Sciences, Professor at the Department of Computing Systems, Lomonosov Moscow State University;
e-mail: fza@mail.ru;

Vladimir L. Bychkov – Doctor in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Physical Electronics, Lomonosov Moscow State University;
e-mail: bychvl@gmail.com.

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Чижов В.А., Зайцев Ф.С., Бычков В.Л. Конструирование новых высокотемпературных сверхпроводников по модели сверхпроводимости на двойниковых границах // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2018. № 4. С. 66–83.

DOI: 10.18384/2310-7251-2018-4-66-83

FOR CITATION

Chizhov V.A., Zaitsev F.S., Bychkov V.L. Construction of new high-temperature superconductors using the model of superconductivity on twin boundaries. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2018, no. 4, pp. 66–83.

DOI: 10.18384/2310-7251-2018-4-66-83