УДК 538.945

Статья

Влияние ионного облучения O^+ на магнитные свойства сверхпроводящих композитов диборида магния

С. В. Веселова[1,3], П. А. Федин[2], И. В. Янилкин[1], М. А. Черосов[1], А. И. Гумаров[1], Д. С. Увин[1], Д. Н. Селезнев[2], Т. В. Кулевой[2], Р.Г. Батулин[1,*]

1 Институт физики, Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Кремлевская, 16а, 420008, Казань, Россия
2 НИЦ «Курчатовский институт», пл. Академика Курчатова, 1, 123182, Москва, Россия
3 Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Каширское шоссе, 31, 115409, Москва, Россия
* e-mail: tokamak@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.07.25, после переработки 09.07.25, принята к публикации 10.07.25.

Представлены результаты исследования влияния ионного облучения (ионами O^+ E = 20 кэВ) в режимах создания радиационных дефектов на критическую температуру и ток высокотемпературных сверхпроводящих композитов диборида магния MgB_2. Проведен анализ, как интегрального критического тока, полученного из измерений суммарной намагниченности образцов, так и определение критической температуры из данных вибрационной магнитометрии. Показано, что при флюенсе ионов $1 \cdot 10^{13}$ ион/см^2 наблюдается повышение критического тока J_c в 3.5 раза в режиме создания радиационных дефектов, тогда как при флюенсе $1 \cdot 10^{14}$ ион/см^2 наблюдается небольшое падение J_c и отсутствие мейсснеровской фазы в объеме сверхпроводника по данным вибрационной магнитометрии. Полученные результаты указывают на значительную роль дополнительных центров пиннинга для вихрей магнитного поля при облучении небольшими дозами ионов O^+ и являются важными для разработки методов повышения критического тока в сверхпроводящих композитах диборида магния.

Ключевые слова: диборид магния; высокотемпературный сверхпроводник; облучение; радиационные дефекты; критический ток; намагниченность.

DOI: 10.62539/2949-5644-2025-7-2-60-72

1. Введение

В классе металлических сверхпроводников диборид магния (MgB_2) занимает особое положение, обусловленное уникальным сочетанием эксплуатационных характеристик и экономических преимуществ, что обеспечивает его высокий потенциал для практического применения.

Среди большого количества сверхпроводников диборид магния выделяется благодаря ряду фундаментальных и технологических преимуществ. Ключевым достоинством является его относительно высокая критическая температура сверхпроводящего перехода $T_c \approx 39$ K [1], что существенно превышает аналогичный показатель для традиционных низкотемпературных сверхпроводников (НТСП) на базе Nb-Ti или интерметаллида Nb_3Sn. Эта особенность открывает возможность использования для охлаждения не только жидкий гелий (4.2 K), но и другие хладагенты, такие как жидкий водород (20 K) или неон (27 K), а также значительно упрощает применение замкнутых криокулерных систем, снижая общие эксплуатационные расходы. Помимо этого, MgB_2 демонстрирует исключительные транспортные свойства, выражающиеся в высокой критической плотности тока J_c, достигающей значений порядка 10^7 А/см^2 даже в присутствии значительных внешних магнитных полей (до 10 Тл при температуре жидкого гелия) [2–5].

Уникальные физические свойства MgB_2 напрямую связаны с его простой двухзонной электронной структурой и кристаллическим строением. Материал кристаллизуется в гексагональной структуре типа AlB_2, где плоские слои атомов бора, образующие графитоподобные гексагональные сетки, разделены и чередуются со слоями атомов магния. Такая слоистая структура обеспечивает высокую подвижность электронов, особенно в плоскостях бора, что является ключевым фактором, определяющим высокие значения J_c и T_c.

Важнейшим технологическим преимуществом MgB_2 является его низкая себестоимость. Это обусловлено широкой распространенностью и доступностью исходных элементов (магния и бора) в природе, а также относительной простотой методов синтеза и обработки по сравнению с высокотемпературными сверхпроводниками (ВТСП), требующими сложных технологий и дорогостоящих редкоземельных элементов. Таким образом, MgB_2 представляет собой редкий пример сверхпроводника, успешно сочетающего достаточно высокую критическую температуру (позволяющую относить его к классу «среднетемпературных» сверхпроводников), выдающиеся токонесущие способности, технологичность производства и низкую стоимость.

Благодаря этому уникальному сочетанию свойств MgB_2 рассматривается как перспективный материал для широкого спектра «среднетемпературных» применений. К ним относятся, прежде всего, системы магнитно-резонансной томографии (МРТ), высокоэффективные силовые кабели для передачи электроэнергии, электродвигатели и генераторы нового поколения, а также различные криогенные системы и датчики. Совокупность фундаментальных преимуществ и экономической эффективности обеспечивает диборид магния статус перспективного материала для реализации масштабных инноваций в таких стратегически важных областях, как энергетика и медицинская диагностика.

Однако ключевой проблемой тонких пленок MgB_2, обусловленной их практически идеальной кристаллической структурой с минимальным количеством исходных дефектов, является отсутствие эффективных естественных центров пиннинга магнитных вихрей Абрикосова. В сверхпроводящем состоянии при приложении внешнего магнитного поля вихри стремятся к движению под действием силы Лоренца, создаваемой транспортным током. Отсутствие структурных неоднородностей (таких как дислокации, границы зерен, наноразмерные включения второй фазы или точечные дефекты), способных выступать в роли энергетических ловушек для вихрей, приводит к их практически неограниченному лавинообразному движению. Это движение сопровождается диссипацией энергии, что обусловливает значительную и быструю деградацию критической плотности тока J_c — ключевого параметра, определяющего практическую применимость сверхпроводника в силовых устройствах (магнитах, ЛЭП, электромоторах). Степень деградации $J_c(H)$ особенно выражена при низких температурах и в сильных магнитных полях, что существенно ограничивает эксплуатационный потенциал необлученных пленок MgB_2.

Многочисленные экспериментальные исследования [6–8] убедительно продемонстрировали, что контролируемое ионное облучение представляет собой высокоэффективный метод целенаправленного введения управляемых дефектов в кристаллическую решетку MgB_2, приводящий к существенному повышению J_c, особенно в магнитных полях. Физический механизм этого улучшения заключается в создании центров пиннинга, где проникающие ионы передают свою кинетическую энергию атомам матрицы MgB_2 при упругих столкновениях. Это приводит к образованию каскадов атомных смещений, генерирующих разнообразные дефекты кристаллической решетки: вакансии, межузельные атомы, их кластеры. Именно эти наноразмерные дефекты выступают мощными искусственными центрами пиннинга магнитных вихрей.

Вводимые облучением дефекты создают локальные вариации параметра порядка сверхпроводника. Вихри пиннингуются в областях с пониженной энергией связи или там, где их движение требует преодоления дополнительного энергетического барьера, связанного с деформацией решетки вокруг дефекта. Увеличение плотности эффективных центров пиннинга

напрямую приводит к значительному росту J_c в магнитных полях. Экспериментально установлено [6, 8], что оптимально облученные пленки MgB_2 демонстрируют J_c на 1–2 порядка величины выше, чем необлученные образцы, при температурах 4.2–20 K и полях до нескольких Тл. Этот рост обусловлен резким увеличением силы пиннинга F_p и, как следствие, критической силы Лоренца $J_c \propto F_p$, необходимой для отрыва вихрей от дефектов и начала их движения. Следовательно, всестороннее и детальное исследование влияния параметров ионного облучения (вид иона, энергия, флюенс, температура мишени) на микроструктуру, фазовый состав, дефектообразование и, как итог, на $J_c(H)$ тонких пленок MgB_2 представляет не только фундаментальный научный интерес для понимания механизмов пиннинга в двухзонных сверхпроводниках, но и имеет первостепенное практическое значение. Результаты таких исследований критически важны для разработки технологий создания высокопроизводительных MgB_2-проводов и пленочных устройств с улучшенными эксплуатационными характеристиками в реальных магнитных полях.

Актуальность исследования обусловливается фундаментальной зависимостью сверхпроводящих свойств, в частности критической плотности тока J_c в магнитных полях, от дефектной структуры материала. Сверхпроводники, включая MgB_2, демонстрируют высокую чувствительность к структурным нарушениям кристаллической решетки. Такие нарушения, выступая в роли центров пиннинга вихрей Абрикосова, играют решающую роль в подавлении вихревого движения и, следовательно, в сохранении высоких значений J_c при наличии внешнего магнитного поля. Как следует из анализа моделирования петель гистерезиса, выполненного А. Мороз и соавт. [9], эффективное закрепление вихрей, характеризуемое более высокой жесткостью вихревой решетки и более низкой скоростью выхода вихрей при внедрении искусственных дефектов (легирующих примесей, радиационных дефектов и т. д.), способно оказывать более значительное влияние на намагниченность и критический ток в MgB_2, по сравнению с высокотемпературными сверхпроводниками 2-го поколения на основе купратов ($REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, где RE — редкоземельный элемент).

Метод ионного облучения представляет собой инструмент для изменения структуры сверхпроводящих материалов [10]. Выбор типа ионизирующих частиц (легкие: протоны, альфа-частицы [11, 12]; тяжелые: ионы металлов [6–8, 12–13]), их кинетической энергии и интегральной дозы (флюенса), позволяет контролируемо генерировать в объеме материала специфические дефекты: от точечных (вакансии, межузельные атомы) до протяженных (дислокационные петли, каскады смещений, наноразмерные аморфные зоны). Ключевым параметром является удельная энергия потерь dE/dx, определяющая характер и плотность создаваемых радиационных повреждений: легкие ионы при умеренных энергиях преимущественно генерируют разреженные точечные дефекты посредством упругих столкновений (ядерные потери), в то время как тяжелые ионы способны формировать плотные треки смещений с высоким dE/dx.

Влияние ионного облучения на сверхпроводящие свойства MgB_2 носит комплексный и зачастую неоднозначный характер. С одной стороны, создаваемые дефекты служат эффективными центрами пиннинга, приводя к значительному росту J_c, особенно в сильных магнитных полях. С другой стороны, дестабилизация кристаллической решетки и увеличение рассеяния носителей тока неизбежно приводят к подавлению критической температуры перехода T_c. Данный компромисс между усилением пиннинга и деградацией T_c подчеркивает необходимость тщательной оптимизации параметров облучения для конкретных приложений. Поэтому всестороннее исследование радиационных эффектов в MgB_2, включая зависимость от типа иона, энергии и флюенса, остается одной из важнейших задач современной физики сверхпроводимости.

Изучение радиационной стойкости и возможностей модификации свойств MgB_2 облучением имеет принципиальное значение для радиационного материаловедения по ключевым направлениям, таким как возможность модифицировать сверхпроводящие свойства для прак-

тического применения, а также прогнозирование поведения в экстремальных условиях, в том числе оценка деградации характеристик в долговременной перспективе.

Исходя из всего вышеперечисленного, целью настоящего исследования является экспериментальная реализация метода модификации структуры композитных пленок диборида магния MgB_2 посредством контролируемого ионного облучения. Для этого произведено воздействие пучком ионов кислорода (O^+) с энергией 20 кэВ в диапазоне флюенсов от $1 \cdot 10^{13}$ до $1 \cdot 10^{15}$ ион/см^2 на образцы, синтезированные методом магнетронного распыления. Объектом исследования выступают многослойные структуры, сформированные на подложке Хастеллой С276 с предварительно нанесенной буферной архитектурой $Al_2O_3/Y_2O_3/MgO/LaMnO_3$, обеспечивающей требуемую адгезию для сверхпроводящего слоя MgB_2.

2. Использованные материалы и/или методы

Образцы тонких пленок диборида магния были синтезированы методом совместного магнетронного распыления мишеней бора и магния на горячую (280 °C) подложку Хастеллой с напыленными буферными слоями $Al_2O_3/Y_2O_3/MgO/LaMnO_3$. Методика синтеза образцов гибкую подложку Хастеллой С276 с буферными слоями подробно описана в работе Янилкина и др. [5], толщина слоя MgB_2 — 75 нм. Характерные температуры переходов сверхпроводящих композитов составляли ~ 9–15 К без дополнительной процедуры отжига.

Один образец MgB_2 устанавливается в сборку, которая имеет прямоугольное окно размером 4 × 6 мм (см. рис. 1а). Сборка с образцом облучалась пучком O^+ с энергией 20 кэВ, генерируемым ионным источником на электрон-циклотронном резонансе [14], на оборудовании Центра коллективного пользования «КАМИКС» [15] в НИЦ «Курчатовский институт». Сборка с образцом устанавливается в мишенный блок, схема которого представлена на рис. 1б. Мишенный блок оборудован системой измерения тока пучка с подавлением вторичных электронов и диафрагмой ø10мм перед сборкой с образцом. Диафрагма необходима для отсечения периферийной области пучка с большой неравномерностью плотности тока. Горизонтальный и вертикальный профили пучка в области диафрагмы представлены на рис. 1в (вертикальные линии указывают границы диафрагмы).

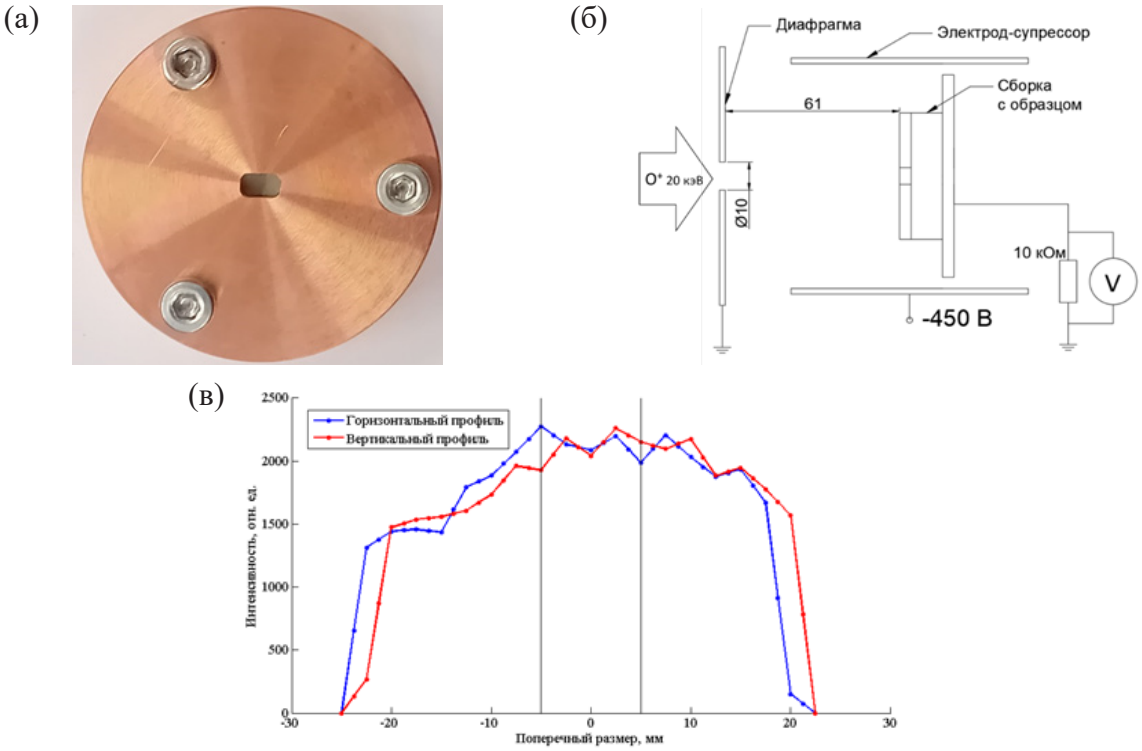


Рис. 1. (а) — внешний вид сборки с образцом диборида магния до облучения, (б) — схема облучения [14], (в) — горизонтальный и вертикальный профили пучка O^+.

Было облучено 3 образца на флюенсы $1 \cdot 10^{13}$, $1 \cdot 10^{14}$, $1 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$ со следующими параметрами: энергия пучка 20 кэВ, длительность импульса: T = 400 мкс, частота повторения 0.25 Гц, средний ток пучка после диафрагмы 16 мкА, вакуум при облучении $5 \cdot 10^{-6}$ Торр, неравномерность плотности тока пучка ± 5%. Во время облучения сборка с образцом находится под слаботочным малоэнергетичным пучком (средняя мощность нагрева ≈ 50 мкВт), поэтому нагрев образца от пучка пренебрежимо мал.

Критические характеристики сверхпроводящих композитов определялись методом вибрационной магнитометрии (опция VSM) на установке для измерения физических свойств PPMS-9 (Quantum Design, США). Критический ток определялся в режиме измерения намагниченности в поле 10 мТл (100 Э) в интервале 5–300 К и предварительном охлаждении в “нулевом” магнитном поле (ZFC режим). Критический ток определялся с помощью измеренных петель гистерезиса в интервале магнитных полей от – 1 Тл (-10 кЭ) до +1 Тл (+10 кЭ) при 5 К в рамках модели Бина.

3. Результаты

3.1. Расчет глубин имплантации кислорода

Низкоэнергетическое облучение (до 100 кэВ) влечет поверхностную модификацию или создание дефектов, что способствует умеренному увеличению плотности критического тока за счёт создания центров пиннинга, а также незначительное снижение критической температуры.

Моделирование облучения ионами кислорода в тонкую плёнку MgB_2 толщиной порядка 100 нм с использованием SRIM-2013 (Stopping and Range of Ions in Matter) с использованием модуля TRIM включало в себя несколько этапов. В первую очередь — это подготовка материала в SRIM: вводился состав мишени, состоящий из Mg (33.3 ат. %) и B (66.6 ат. %) с плотностью MgB_2: 2.57 г/см^3. Толщина плёнки составила 100 нм. Пленка испытывала воздействие ионами кислорода с энергией 20–50 кэВ и зарядом по умолчанию + 1 (данные энергии были выбраны исходя из возможностей ускорительной установки). Расчёт был выполнен с помощью модуля TRIM: "Detailed Calculation with Full Damage Cascades". Энергия смещения (Displacement Energy): Mg: ~ 25 эВ и B: ~ 20 эВ (литературные данные). Количество ионов: 5000 для хорошей статистики. Температура мишени: 25 °C (по умолчанию). Анализ результатов расчета состоял из определения длины пробега ионов (не более 100 нм) и определения количества смещённых атомов и их распределение по глубине. SRIM предполагает аморфную структуру, поэтому результаты усреднены. Для учёта кристаллической структуры MgB_2 требуются дополнительные методы (молекулярная динамика). Результаты помогли оценить радиационную стойкость, имплантацию кислорода и модификацию свойств плёнки.

Были проведены расчеты облучения тонких пленок диборида магния ионами кислорода с различной энергией (рис. 2). Исходя из литературных данных [10] и результатов расчета в качестве экспериментального варианта облучения была выбрана энергия 20 кэВ. Выбор флюенсов также был обусловлен литературными данными, где эти значения варьировались от 10^{12} до 10^{15} см$^{-2}$. Средняя глубина проникновения ионов (Projected Range) 40 ± 10 нм с продольным ΔR_p и поперечным ΔR_t разбросом порядка 20 нм. Ядерные потери около 60% (доминируют на малых энергиях), а электронные потери около 40%. Ионы кислорода внедряются в MgB_2 на глубину ~ 70 нм, создавая зону повреждений с пиком на ~ 40 нм. Высокие ядерные потери энергии указывают на доминирование упругих столкновений. Тем не менее SRIM не учитывает химические реакции между O^+ и MgB_2, а также модель предполагает аморфную структуру мишени (реальные кристаллы могут вести себя иначе).

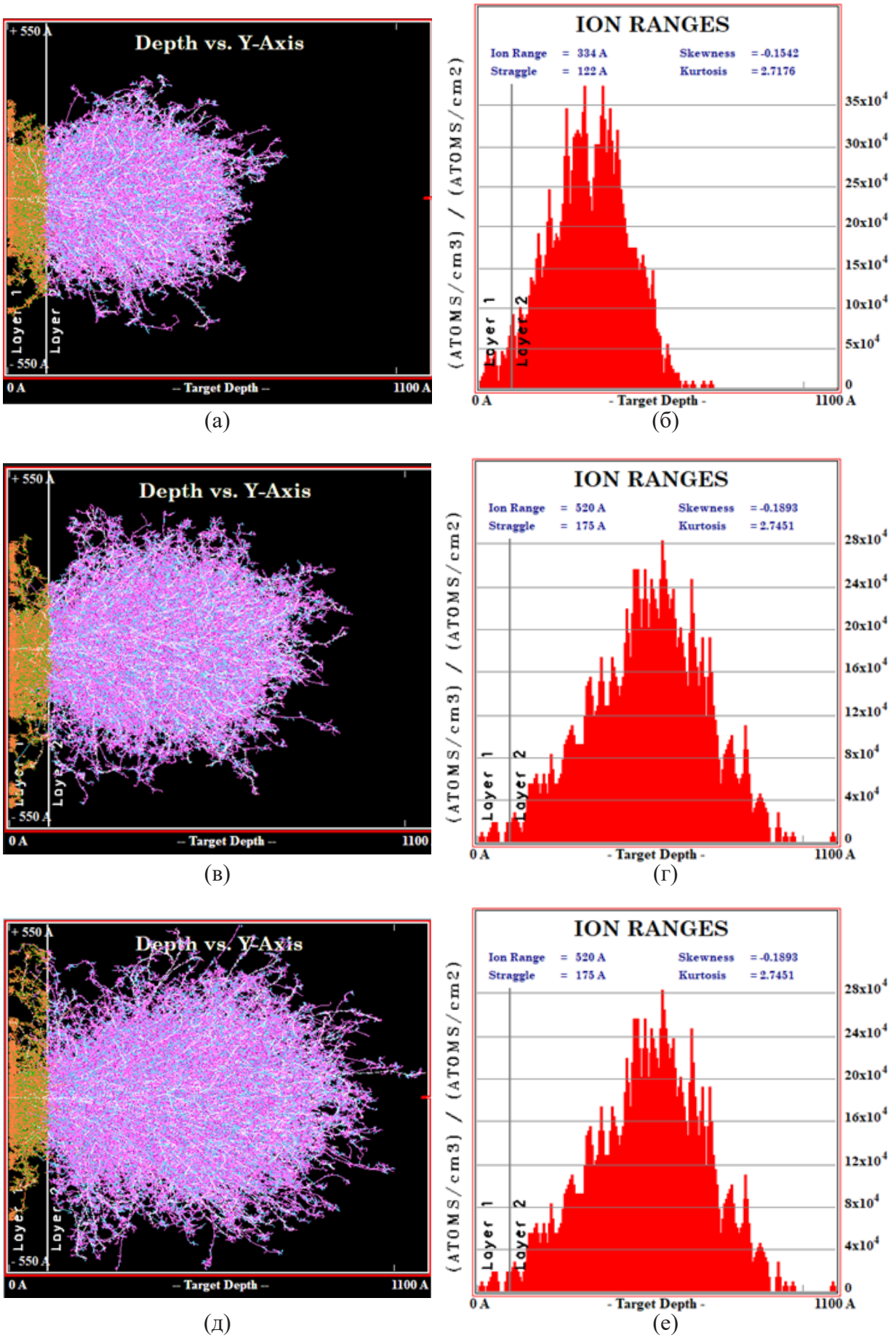


Рис. 2. Расчет облучения MgB_2 толщиной 100 нм и покрытием Si 10 нм ионами O^+: (а) и (б) — с энергией 15 кэВ; (в) и (г) — с энергией 20 кэВ; (д) и (е) — с энергией 25 кэВ.

3.2. Данные магнитометрии

На рис. 3 изображены температурные зависимости намагниченности для образцов, облученных различными флюенсами, и для сравнения температурная зависимость намагниченности подложки Хастеллой с буферными слоями [16], нормированные на площадь образца. Как мы видим заметный вклад в намагниченность слоя диборида магния толщиной порядка 75 нм заметно проявляется ниже критической температуры. Как видно из графика по характерному для мейсснеровской фазы (величина приложенного внешнего магнитного поля значительно меньше H_{c1} для диборида магния) диамагнетизму величина критической температуры сверхпроводника составила 9 К для флюенса 10^{13} частиц/см^2, а при больших значениях флюенса диамагнетизм не проявляется, что свидетельствует об отсутствии сверхпроводящей фазы в объеме сверхпроводника.

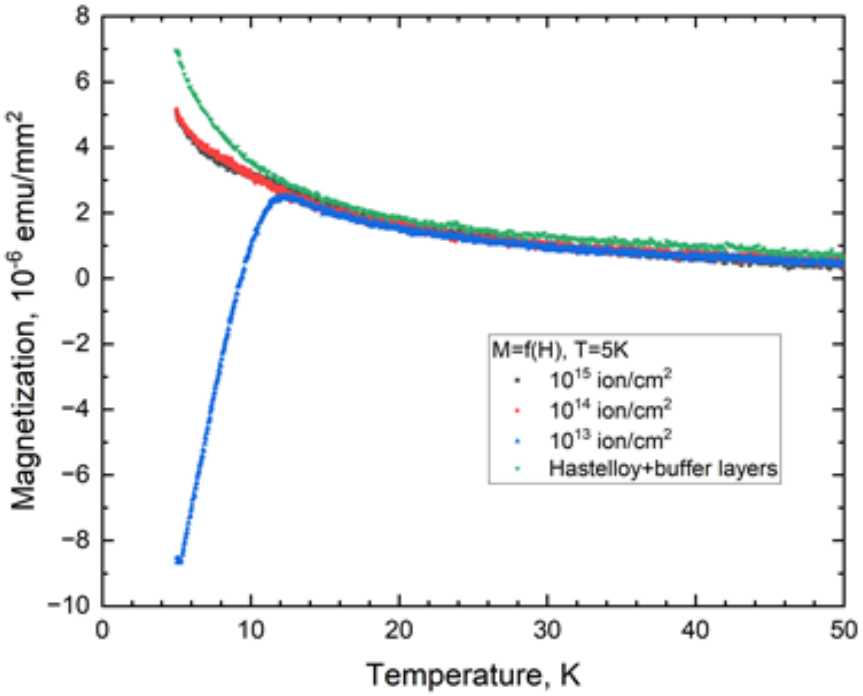
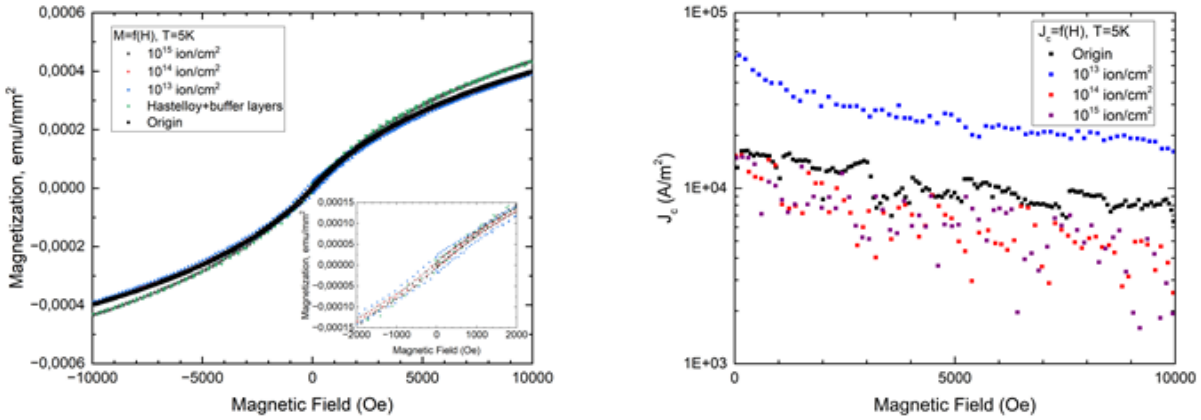


Рис. 3. Зависимости величины магнитного момента облученных ионами кислорода в интервале 10^{13}–10^{15} ион/см^2 образцов диборида магния от температуры $M(T)$ во внешнем магнитном поле 10 мТл (ZFC режим), приложенном перпендикулярно плоскости образцов. Для сравнения приведены данные намагниченности подложки с буферными слоями [16].

На рис. 4а изображены петли намагниченности при температуре 5 К и в интервале приложенных магнитных полей - 1Тл; + 1 Тл. Из графика видно, что в полях свыше 0.2 Тл и флюенс 10^{15} частиц/см^2 намагниченность композита и намагниченность подложки с буферными слоями практически совпадают, тогда как при флюенсах 10^{13} и 10^{14} проявляется магнитный вклад от слоя диборида магния. На рис. 4б представлены зависимости критического тока исходного и облученного образцов, нормированные на площадь поперечного сечения сверхпроводника и полученных из петель гистерезиса в рамках модели Бина, рассчитанные по формуле 1 [17]:

$$\Delta M = \frac{bJ}{2}\left(1-\frac{b}{3a}\right). \quad (1)$$



(а) (б)

Рис. 4. (а) Зависимости величины намагниченности облученных ионами кислорода образцов диборида магния от величины магнитного поля - 1 Тл;+ 1 Тл при температуре 5 К (внешнее поле перпендикулярно плоскости образцов). Для сравнения приведены данные намагниченности подложки с буферными слоями [16]. В увеличенном масштабе изображен диапазон - 0.2 Тл; + 0.2 Тл; (б) Зависимость критического тока в рамках модели Бина от величины приложенного магнитного поля.

4. Обсуждение

Результаты компьютерного моделирования распределения радиационных повреждений предсказывают, что при облучении тонких плёнок MgB_2 ионами кислорода (O^+) с энергией 20 кэВ, профиль возникающих дефектов характеризуется выраженным максимумом на глубине приблизительно 40 нм от поверхности. Данный пространственный пик повреждений обусловлен областью максимальных потерь энергии ионами на упругие (ядерные) столкновения с атомами мишени, где происходит генерация наиболее интенсивных каскадов атомных смещений. На основании этих симуляций (выполненных, например, с использованием кода SRIM/TRIM) был определен диапазон экспериментально исследованных флюенсов от 10^{12} до 10^{15} ион/см$^{-2}$, направленных на создание контролируемой дефектной структуры в сверхпроводящих композитных образцах. Фундаментальные различия в отклике MgB_2 и высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) на основе редкоземельных купратов (REBCO, где RE = Y, Gd и др.) на радиационные дефекты были теоретически предсказаны в работе А. Мороз и соав. [18]. Расчеты, выполненные в рамках теории функционала плотности (DFT), демонстрируют, что влияние точечных дефектов на электронную структуру и сверхпроводящий параметр порядка в двухзонном MgB_2 принципиально отличается от механизмов, характерных для сильно коррелированных электронных систем REBCO. Это различие предопределяет потенциально более выраженный эффект управляемого дефектообразования на свойства MgB_2.

Экспериментальные данные вибрационной магнитометрии (VSM) подтверждают существенное влияние дефектов на транспортные характеристики материала [19]. Большие значение флюенсов ухудшают сверхпроводящие свойства и приводят к разрушению объемной сверхпроводимости. Снижение критической температуры является характерным явлением при облучении сверхпроводящих лент [20, 21].

Данный результат является прямым следствием эффективного пиннинга магнитных вихрей Абрикосова на введенных радиационных дефектах (преимущественно точечных), что подавляет диссипативное движение вихрей. Рост J_c свидетельствует о значительной модификации электронных свойств материала, приводящей к улучшению его транспортных свойств

в сверхпроводящем состоянии. Однако повышение флюенса облучения выше оптимального уровня ($\geq 10^{15}$ ион/см$^{-2}$) индуцирует противоположный эффект — деградацию сверхпроводящих свойств. Это проявляется в систематическом снижении критической температуры перехода T_c, что является универсальным откликом сверхпроводников на сильное радиационное повреждение и связано с усилением рассеяния носителей тока на дефектах и подавлением параметра порядка. Кроме того, это проявляется в разрушении объемной сверхпроводимости и выраженному снижению J_c. Данное явление обусловлено достижением пороговой плотности радиационных дефектов (кластеров смещений, зон аморфизации), при которой происходит нарушение дальнего сверхпроводящего порядка и локализация куперовских пар.

5. Выводы

Проведено исследование влияния ионного облучения на ключевые сверхпроводящие характеристики композитов на основе диборида магния MgB_2. Облучение осуществлялось ионами кислорода (O^+) с энергией 20 кэВ в режимах, целенаправленно ориентированных на создание управляемых радиационных дефектов в кристаллической структуре материала. Основное внимание уделялось воздействию этих дефектов на критическую температуру перехода в сверхпроводящее состояние T_c и критический ток J_c.

Экспериментальные данные указывают на выраженную корреляцию между эффектами и флюенсом облучения (ионной плотностью потока). При относительно низком флюенсе 10^{13} ион/см^2 наблюдается значительное улучшение транспортных свойств сверхпроводника. А именно, критический ток при температуре 5 К и в отсутствие внешнего магнитного поля («нулевое» поле) возрастает в 3.5 раза по сравнению с необлученным образцом. Этот рост J_c является прямым следствием изменений электронных свойств материала, индуцированных облучением. Физический механизм улучшения связывается с образованием дополнительных центров пиннинга — дефектов структуры, которые эффективно «закрепляют» вихри Абрикосова внутри сверхпроводника. Пиннинг, вызванный как точечными (вакансии, межузельные атомы) так и протяженными (каскады смещений) дефектами, предотвращает движение вихрей под действием транспортного тока, что и приводит к повышению критического тока, то есть тока, при котором сверхпроводимость разрушается.

Однако, дальнейшее увеличение флюенса облучения приводит к кардинально противоположным результатам. Высокие дозы ионов O^+ вызывают не улучшение, а выраженное ухудшение сверхпроводящих свойств композитов MgB_2. Чрезмерная концентрация радиационных дефектов начинает разрушать саму сверхпроводящую фазу материала. Это проявляется в значительном снижении критической температуры T_c и критического тока J_c. В экстремальных случаях интенсивное облучение может привести к полной деградации объемной сверхпроводимости и разрушению явления сверхпроводимости в материале в целом.

Таким образом, полученные результаты подчеркивают двойственную роль ионного облучения O^+ в модификации сверхпроводящих композитов MgB_2. С одной стороны, они однозначно указывают на значительную роль дополнительных центров пиннинга, эффективно формирующихся при облучении малыми дозами (флюенсом ~ 10^{13} ион/см^2). Эти центры являются ключевым фактором для радиационного упрочнения сверхпроводника против магнитного потока и повышения его транспортного тока. С другой стороны, результаты четко определяют границы применимости метода — превышение оптимальной дозы облучения катастрофически ухудшает свойства. Данные исследования имеют важное практическое значение для разработки и оптимизации методов управления пиннингом с целью повышения критического тока в перспективных сверхпроводящих композитах на основе диборида магния для различных приложений.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10088, https://rscf.ru/ project/22-72-10088/.

Заявление

С 2022 года правительства США и Германии ввели строгий экспортный контроль в отношении передачи технологий в Россию. Техническая поддержка научного оборудования PPMS-9 рассматривается как экспорт знаний, известная как "предполагаемый экспорт". Техническая поддержка производителем оборудования Quantum Design официально была полностью прекращена, и работа установки поддерживается сотрудниками НИЛ Квантовые симуляторы Института физики при содействии стратегических партнеров.

Литература

[1] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, J. Akimitsu, Nature **410**, 63 (2001). DOI: 10.1038/35065039

[2] S. Y. Xu, Q. Li, E. Wertz, Y. F. Hu, A. V. Pogrebnyakov, X. H. Zeng, X. X. Xi, J. M. Redwing, Physical Review B **68**, 224501 (2003). DOI: 10.1103/PhysRevB.68.224501

[3] T. Iwanaka, T. Kusunoki, H. Kotaki, M. Kodama, H. Tanaka, A. Matsumoto, S. Horii, I. Kawayama, T. Doi, Japanese Journal of Applied Physics **60**, 123004 (2021). DOI: 10.35848/1347-4065/ac38fa

[4] T. Kusunoki, H. Yamamoto, M. Kodama, H. Kotaki, H. Tanaka, G. Nishijima, S. Horii, T. Doi, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **27**, 1 (2016). DOI: 10.1109/TASC.2016.2642049

[5] I. V. Yanilkin, A. I. Gumarov, I. A. Rudnev, L. R. Fatikhova, A. G. Kiiamov, A. E. Denisov, S. A. Khokhorin, D. A. Tayurskii, R. G. Batulin, Superconductor Science and Technology **37**, 085015 (2024). DOI: 10.1088/1361-6668/ad5c09

[6] T. Le, H. H. Pham, N. T. Nghia, N. H. Nam, T. Miyanaga, D. H. Tran, W.-N. Kang, Ceramics International **49**, 2715 (2023). DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.09.252

[7] D. T. Tran, T. Le, H. G. Lee, T. Park, N. T. Nghia, B. T. Hoa, D. H. Tran, W. N. Kang, J. Hwang, Current Applied Physics **66**, 30 (2024). DOI: 10.1016/j.cap.2024.06.011

[8] D. T. Tran, T. Le, Y.-S. Seo, D. H. Tran, T. Park, S.-G. Jung, T. Miyanaga, C. Kim, S. Yeo, W. N. Kang, J. Hwang, Journal of Alloys and Compounds **968**, 172144 (2023). DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.172144

[9] A. Moroz, I. Rudnev, V. Kashurnikov, S. Khokhorin, R. Batulin , Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. **36**, 1335 (2023). DOI: 10.1007/s10948-023-06588-3

[10] D. Pham, S.-G. Jung, D. H. Tran, T. Park, W. N. Kang, Journal of Applied Physics 1**25**, 023904 (2019). DOI: 10.1063/1.5061772

[11] S. G. Jung, S.-K. Son, D. Pham, W. C. Lim, J. Song, W. N. Kang, T. Park, Progress in Superconductivity and Cryogenics **21**, 13 (2019). DOI: 10.9714/PSAC.2019.21.3.013

[12] S. G. Jung, D. Pham, J. M. Lee, Y. Han, W. N. Kang, T. Park, Current Applied Physics **22**, 14 (2021). DOI: 10.1016/j.cap.2020.11.008

[13] L. Liu, J. M. Lee, Y. Han, J. Song, C. Kim, J. Suk, W. N. Kang, J. Liu, S. G. Jung, T. Park, Chinese Physics B **32**, 127402 (2023). DOI: 10.1088/1674-1056/acf5d3

[14] Д.Н. Селезнев, А.Б. Зарубин, Н.Н. Виноградский, К.Е. Прянишников, Т.В. Кулевой, Ядерная физика и инжиниринг **15**, 372 (2024). DOI: 10.56304/S2079562923030302

[15] ЦКП КАМИКС. Официальный сайт // kamiks.itep.ru, 2025. URL: http://kamiks.itep.ru/

[16] R.G. Batulin, M.A. Cherosov, A.G. Kiiamov, I.A. Rudnev, S.A Khokhorin, D.S. Uvin, A.M. Rogov, D.A. Tayurskii, Cryogenics **137**, 103776 (2024). DOI: 10.1016/j.cryogenics.2023.103776

[17] Handbook of Superconducting Materials / Ed. by D.A. Cardwell, D.S. Ginley. – Boca Raton: IOP Publishing Ltd., 2003.

[18] A. Moroz, I. Rudnev, A. Stepanenko, A. Maksimova, V. Kashurnikov, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism **37**, 339 (2024). DOI: 10.1007/s10948-024-06693-x

[19] D. A. Abin, I. A. Rudnev, A. S. Starikovskii, S. V. Pokrovskii, S. V. Veselova, M. A. Osipov, R. G. Batulin, A. G. Kiiamov, P. A. Fedin, K. E. Pryanishnikov, T. V. Kulevoy, Physics of Atomic Nuclei **86**, 1985 (2023). DOI: 10.1134/S1063778823090016
[20] I. A. Rudnev, A. I. Podlivaev, D. A. Abin, S. V. Pokrovskii, A. S. Starikovskii, R. G. Batulin, P. A. Fedin, K. E. Prianishnikov, T. V. Kulevoy, Physics of the Solid State **65**, 379 (2023). DOI: 10.21883/PSS.2023.03.55577.540
[21] I. Rudnev, D. Abin, S. Pokrovskii, I. Anishchenko, A. Starikovskii, M. Osipov, T. Kulevoy, P. Fedin, K. Pryanishnikov, R. Batulin, A. Kiiamov, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **32**, 1 (2022). DOI: 10.1109/TASC.2022.3164629

Effect of O^+ ion irradiation on the magnetic properties of superconducting magnesium diboride composites

S. V. Veselova[1,3], P. A. Fedin[2], I.V. Yanilkin[1], M.A. Cherosov[1], A.I. Gumarov[1], D.S. Uvin[1], T. V. Kulevoy[2], R.G. Batulin[1,*]

1 Institute of Physics, Kazan (Volga Region) Federal University, Kremlyovskaya, 16a, 420008, Kazan, Russian
2 National Research Center "Kurchatov Institute", Akademika Kurchatova square, 123182, Moscow, Russian
3 National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoe Highway, 31, 115409, Moscow, Russian
* e-mail: tokamak@yandex.ru

The results of a study on the effect of ion irradiation (O^+ ions, E = 20 keV) in radiation defect generation modes on the critical temperature and current of high-temperature superconducting magnesium diboride (MgB_2) composites are presented. An analysis was performed, including both the integral critical current derived from sample magnetization measurements and the determination of the critical temperature from vibrating sample magnetometry data. It is shown that at an ion fluence of $1 \cdot 10^{13}$ ions/cm², a 3.5-fold increase in the critical current density (Jc) is observed in the radiation defect generation regime. In contrast, at a fluence of $1 \cdot 10^{14}$ ions/cm², a slight decrease in Jc is observed, along with the absence of a Meissner phase in the superconductor bulk, as indicated by vibrating sample magnetometry.

Keywords: magnesium diboride; high-temperature superconductor; irradiation, radiation defects; critical current; magnetization.

Светлана Владимировна Веселова — инженер-исследователь НИЛ Сверхпроводящие энергетические систем Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

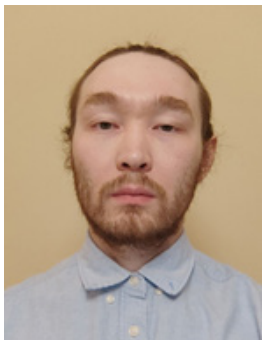
Svetlana Veselova— research engineer National Research Nuclear University MEPhI

Петр Алексеевич Федин — младший научный сотрудник Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Petr Fedin — junior researcher National Research Centre "Kurchatov Institute"

Игорь Витальевич Янилкин — доцент кафедры физики твердого тела, Институт физики, ФГАОУ ВО КФУ

Igor Yanilkin — associate professor of the department of solid state physics, Institute of Physics, Kazan Federal University



Михаил Андреевич Черосов — научный сотрудник, НИЛ Квантовые симуляторы, Институт физики, ФГАОУ ВО КФУ

Mikhail Cherosov — researcher SRL Quantum Simulators, Institute of Physics, Kazan Federal University

Амир Ильдусович Гумаров — старший научный сотрудник НИЛ магнитной радиоспектроскопии и квантовой электроники им. С.А. Альтшулера

Amir Gumarov — senior researcher SRL Magnetic radiospectroscopy and quantum electronics Institute of Physics, Kazan Federal University

Денис Сергеевич Увин — Младший научный сотрудник, НИЛ Квантовые симуляторы Институт физики, ФГАОУ ВО КФУ

Denis Uvin — Junior researcher, SRL Quantum Simulators, Institute of Physics, Kazan Federal University

Дмитрий Николаевич Селезнев — ведущий инженер, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Dmitriy Seleznev — lead Engineer National Research Centre "Kurchatov Institute"

Тимур Вячеславович Кулевой — заместитель руководителя по прикладным научным исследованиям и экспериментальным установкам ККТЭФ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Timur Kulevoy — Deputy Head of Applied Research and Experimen
National Research Centre "Kurchatov Institute" Facilities KCTEP

Руслан Германович Батулин — доцент, руководитель НИЛ Квантовые симуляторы, Институт физики, ФГАОУ ВО КФУ

Ruslan Batulin — Associate Professor, Head of SRL Quantum Simulators, Institute of Physics, Kazan Federal University