

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 02.1.003.01, СОЗДАННОГО НА
БАЗЕ НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «КУРЧАТОВСКИЙ
ИНСТИТУТ» (ПРИНАДЛЕЖНОСТЬ – ПРАВИТЕЛЬСТВО РФ), ПО
ДИССЕРТАЦИИ СВЕТОГОРОВА РОМАНА ДМИТРИЕВИЧА «СТРУКТУРНЫЕ
ИЗМЕНЕНИЯ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ Nb₃Sn В
РЕЗУЛЬТАТЕ ПРОТОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ: ИССЛЕДОВАНИЯ
ДИФРАКЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ НА СИНХРОТРОННОМ ИЗЛУЧЕНИИ» НА
СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ
НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 09.06.2022, № 15

О присуждении СВЕТОГОРОВУ Роману Дмитриевичу, гражданину РФ, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Структурные изменения в низкотемпературных сверхпроводниках Nb₃Sn в результате протонного облучения: исследования дифракционными методами на синхротронном излучении» по специальности 1.3.8. — «Физика конденсированного состояния» принята к защите 17.03.2022, протокол № 8, диссертационным советом 02.1.003.01, созданным на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), 123182 г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1 (утвержден Приказом Минобрнауки России № 561/нк от 03.06.2021 г.).

Соискатель Светогоров Роман Дмитриевич, дата рождения: 26 апреля 1991 года.

В 2014 г. Светогоров Р.Д. окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» по специальности 14.03.01 «Физика конденсированного состояния вещества» с присвоением квалификации «Инженер-физик». Диплом специалиста 107724 № 0154858 выдан 31 марта 2014 г.

С 23 апреля 2014 г. по 22 апреля 2019 г. Светогоров Р.Д. обучался в заочной аспирантуре федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия», по специальности 01.04.07 — «Физика конденсированного состояния». Во время обучения Светогоров Р.Д. сдал кандидатские экзамены и получил оценки: иностранный язык (английский) — «отлично», история и философия науки — «отлично», физика конденсированного состояния (01.04.07) — «отлично».

Диссертационная работа Светогорова Р.Д. «Структурные изменения в низкотемпературных сверхпроводниках Nb₃Sn в результате протонного облучения:

исследования дифракционными методами на синхротронном излучении» по специальности 1.3.8. — «Физика конденсированного состояния» выполнена в Отделе синхротронных экспериментальных станций Курчатовского комплекса синхротронно-нейтронных исследований (ККСНИ) НИЦ «Курчатовский институт».

В период подготовки диссертации Светогоров Р.Д. работал в Отделе синхротронных экспериментальных станций Курчатовского комплекса синхротронно-нейтронных исследований (ККСНИ) НИЦ «Курчатовский институт» в должности инженера-исследователя.

В настоящее время Светогоров Р.Д. работает в Отделе синхротронных экспериментальных станций Курчатовского комплекса синхротронно-нейтронных исследований (ККСНИ) НИЦ «Курчатовский институт» в должности инженера-исследователя.

Научный руководитель: Зубавичус Ян Витаутасович, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.01 — «Приборы и методы экспериментальной физики», заместитель директора по научной работе Центра коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук», г. Новосибирск.

Официальные оппоненты:

- Чернышев Владимир Васильевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник химического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва;

- Руднев Игорь Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва
дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН), г. Новосибирск, в своем положительном заключении, подписанном заведующим Лабораторией 8-2, доктором технических наук, ведущим научным сотрудником Шкарубой В.А. и утверждённом директором ИЯФ СО РАН, доктором физико-математических наук, академиком РАН Логачевым П.В., указала, что представленная диссертационная работа является актуальной, так как предмет исследуемых в ней вопросов и полученные результаты важны для обоснования реализуемости и экономической целесообразности использования материала Nb_3Sn в рамках масштабной модернизации Большого адронного коллайдера в рамках проекта HL-LHC (ЦЕРН, Швейцария). Кроме того, вывод о параметре сна (смещений на атом) как универсальной характеристики развивающихся в образце структурных радиационных дефектов независимо от типа облучающих частиц могут быть использованы для оценки ресурса несверхпроводящих магнитных систем в установках «Мегасайенс» других типов.

Из наиболее важных научных результатов и достижений, обуславливающих научную новизну диссертационной работы, в отзыве ведущей организации отмечается:

- получены зависимости изменения основных структурных параметров Nb_3Sn в зависимости от эффективной дозы и значений количества смещений на атом при облучении быстрыми протонами;

- динамика изменения значений параметра порядка Брэгга-Уилльямса впервые численно охарактеризована с использованием порошковой дифракции на синхротронном излучении;

- впервые получено, что при значениях протонного флюенса до 10^{17} п/см² независимо от энергии частиц наблюдается рост объемной доли примесной фазы NbO за счет увеличения концентрации кристаллитов в объеме образца, последующее увеличение флюенса приводит к вымыванию оксида ниобия и уменьшению доли примеси (в 3 раза для максимального флюенса $1 \cdot 10^{18}$ п/см²);

- установлено, что протонное облучение подавляет низкотемпературный мартенситный переход в тетрагональную фазу.

В конце отзыва ведущей организации резюмируется: «Диссертация «Структурные изменения в низкотемпературных сверхпроводниках Nb_3Sn в результате протонного облучения: исследования дифракционными методами на синхротронном излучении» Светогорова Р.Д. представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Результаты представляют как фундаментальный интерес, так и практический в применении к современным сверхпроводящим устройствам в составе магнитных систем ускорителей частиц. Работа отвечает требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней (утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 в действующей редакции), предъявляемых к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. — «Физика конденсированного состояния».

Соискатель имеет 29 публикаций по теме диссертации, в том числе 5 статей в ведущих рецензируемых изданиях, индексируемых WoS, Scopus и в действующем Перечне ВАК:

В журналах, включенных в библиографические базы данных цитирования Web of Science и Scopus:

1. R. Flükiger, T. Spina, F. Cerutti, A. Ballarino, C. Scheuerlein, L. Bottura, Y. Zubavichus, A. Ryazanov, **R. D. Svetogorov**, S. Shavkin, P. Degtyarenko, Y. Semenov, C. Senatore, R. Cerny. Variation of T_c , lattice parameter and atomic ordering in Nb_3Sn platelets irradiated with 12 MeV protons: correlation with the number of induced Frenkel defects // Superconductor Science and Technology. – 2017. – Т. 30. – №. 5. – С. 054003.
2. А.И. Рязанов, **Р.Д. Светогоров**, Я.В. Зубавичус, В.Н. Унежев, С.Т. Латушкин, Е.В. Семенов. Использование синхротронного излучения для исследования

- сверхпроводящих образцов Nb_3Sn , облученных потоками быстрых частиц // Кристаллография. – 2020. – Т. 65. – №. 3. – С. 362-367.
3. **R.D. Svetogorov**, Y.V. Zubavichus, S.V. Shavkin, A.I. Ryazanov, R. Flukiger, E.V. Semenov, L. Bottura, C. Scheuerlein. Resonant diffraction study of structural disorder in Nb_3Sn // Acta Crystallographica A. – 2017. – Т. 73 – С. 557.
 4. V. V. Guryev, S. V. Shavkin, V. S. Kruglov, P. V. Volkov, A. L. Vasiliev, A. V. Ovcharov, I. A. Likhachev, E. M. Pashaev, **R. D. Svetogorov**, Y. V. Zubavichus. Apparent anisotropy effects of upper critical field in high-textured superconducting Nb-Ti tapes // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Т. 747. – С. 012034.
 5. Moritz-Caspar Schlegel, Daniel M Toebbens, **Roman Svetogorov**, Martin Krueger, Helge Reinsch, Norbert Stock, Dirk Wallacher, Ross Stewart, Margarita Russina. Conformation-controlled hydrogen storage in CAU-1 metal-organic framework. // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2016. – Т. 18. – №. 42. – С. 29258-29267.
- В других научных изданиях:*
6. Я.В. Зубавичус, Э.С. Кулик, А.И. Рязанов, **Р.Д. Светогоров**. Исследование микроструктуры НТСП – материалов на основе Nb_3Sn методами рентгеновской дифрактометрии на синхротронном излучении // XI Курчатовская молодежная научная школа, 12-15 ноября 2013, Москва, Сборник аннотаций работ, стр. 89.
 7. **Р.Д. Светогоров**, Э.С. Кулик, Я.В. Зубавичус, А.И. Рязанов. Исследование микроструктуры НТСП – материалов на основе Nb_3Sn , облученных на циклотроне быстрыми протонами, с помощью методов рентгеновской дифрактометрии на синхротронном излучении // II Национальная конференция по прикладной сверхпроводимости НКПС-2013, Москва, 26-28 ноября 2013, Тезисы докладов, стр. 87
 8. **Р.Д. Светогоров**, Э.С. Кулик Я.В. Зубавичус, А.И. Рязанов. Исследование микроструктуры НТСП – материалов на основе Nb_3Sn – с помощью методов рентгеновской дифрактометрии на синхротронном излучении // Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2014, 27 января – 1 февраля 2014, Москва, Аннотации докладов, том 2, стр. 131.
 9. **Roman Svetogorov**, Yan Zubavichus, Sergey Shavkin, Alexander Ryazanov, Rene Flukiger. The use of anomalous scattering to probe antisite disorder in superconducting Nb_3Sn -based materials after proton irradiation // 12th Biennial Conference on High-Resolution X-Ray Diffraction and Imaging ХТОР 2014, 14-19 Сентября 2014, Виллар де Лан, Франция, сборник тезисов, стр. 188.
 10. **Р.Д. Светогоров**, Я.В. Зубавичус, С.В. Шавкин, А.И. Рязанов, Rene Flukiger. Использование методов рентгеновской дифрактометрии и аномального рассеяния на синхротронном излучении для исследования процессов антиузельного разупорядочения в НТСП - материалах на основе Nb_3Sn в результате протонного облучения // Совещание и Молодежная конференция по использованию рассеяния нейтронов и синхротронного излучения в конденсированных средах РНСИ-КС - 2014, 27-31 октября 2014, Петергоф, сборник тезисов, стр. 150.

11. **Р.Д. Светогоров.** Низкотемпературное исследование микроструктуры образцов на основе Nb_3Sn методами рентгеновской дифрактометрии на синхротронном излучении // 57-я научная конференция МФТИ, 24-29 ноября 2014, Москва – Долгопрудный, сборник тезисов, том 78, секция Нано-, био-, информационных и когнитивных технологий, стр. 61-62.
12. **Р.Д. Светогоров, Я.В. Зубавичус, А.И. Рязанов, С.Т. Латушкин, Rene Flukiger, Luca Bottura.** Исследование особенностей применения метода резонансной рентгеновской дифракции для прецизионного определения антиузельного разупорядочения в образцах Nb_3Sn после протонного облучения // XIII Курчатовская молодежная научная школа, 27-30 октября 2015, Москва, сборник тезисов, стр. 224.
13. **Р.Д. Светогоров, Я.В. Зубавичус, А.И. Рязанов, С.В. Шавкин, Е.В. Семенов, Rene Flukiger, Luca Bottura.** Разработка комплементарной методики определения степени структурного разупорядочения в НТСП-материалах на основе ниобия рентгеновскими методами на синхротронном излучении // 58-я научная конференция МФТИ с международным участием, 23-28 ноября 2015, Москва — Долгопрудный, сборник тезисов, секция физики и физического материаловедения.
14. **Р.Д. Светогоров, Я.В. Зубавичус, А.И. Рязанов, С.В. Шавкин, Е.В. Семенов, Rene Flukiger, Luca Bottura.** Исследование особенностей дефектообразования в образцах Nb_3Sn под действием облучения быстрыми протонами с помощью метода резонансной рентгеновской дифракции на синхротронном излучении // III-я Национальная конференция по прикладной сверхпроводимости НКПС-2015, 25-26 ноября 2015, Москва, тезисы докладов, стр. 112.
15. **Р.Д. Светогоров, Я.В. Зубавичус, А.И. Рязанов, Е.В. Семенов, Rene Flukiger, Luca Bottura.** Исследование микроструктуры низкотемпературных сверхпроводящих материалов на основе Nb с использованием синхротронного излучения // 50-я Школа ПИЯФ по Физике Конденсированного Состояния, 14-19 марта 2016, Санкт-Петербург, Зеленогорск, сборник тезисов, стр. 69.
16. **R. Svetogorov, Y. Zubavichus, A. Ryazanov, E. Semenov, R. Flukiger, L. Bottura.** Investigation of a degree of structural disorder in Nb_3Sn after irradiation using resonant X-ray diffraction // REXS 2016 – The Hamburg Conference on Resonant Elastic X-ray Scattering, 12 – 18 июня 2016, Гамбург, Германия, сборник тезисов, стр. 15.
17. **R. Svetogorov, Y. Zubavichus, A. Ryazanov, E. Semenov, R. Flukiger, L. Bottura.** Synchrotron powder diffraction methods // 3rd European Crystallography School (ECS3), 25 сентября – 2 октября 2016, Бол, Хорватия, сборник тезисов, стр. 23.
18. **Р. Д. Светогоров, Я. В. Зубавичус, А. И. Рязанов, Е. В. Семенов, Rene Flukiger, Luca Bottura.** Исследование функционально-значимых характеристик сверхпроводника Nb_3Sn с помощью резонансной дифракции на синхротронном излучении // LI Школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния ФКС-2017, 11-16 марта 2017 года, Санкт-Петербург, сборник тезисов, стр. 80.
19. **R.D. Svetogorov, Y.V. Zubavichus, S.V. Shavkin, A.I. Ryazanov, R. Flukiger, E.V. Semenov, L. Bottura, C. Scheuerlein.** Resonant diffraction study of structural disorder in

Nb₃Sn // 24th Congress and General Assembly of the International Union of Crystallography IUCr-2017, 21-28 Августа 2017, Хайдерабад, Индия, e-abstracts №832.

20. А.И. Рязанов, Ковальчук М.В., Мухамеджанов Э.Х., Зубавичус Я.В., **Светогоров Р.Д.**, Семенов Е.В. Использование синхротронного излучения для исследования свойств материалов коллиматоров и сверхпроводников для Большого Адронного Коллайдера, облученных потоками быстрых частиц на циклотроне НИЦ КИ // XV Международная конференция “Мессбауэровская спектроскопия и ее применение” ICMSA 2018, 10 – 16 сентября 2018, Сочи, сборник тезисов, стр. 133.
21. **Светогоров Р.Д.** Свидетельство № 2018660965 на программу для ЭВМ “Dionis – Diffraction Open Integration Software” от 30.08.2018.
22. **Светогоров Р.Д.** Свидетельство № 2018660518 на программу для ЭВМ “DiVis – Diffraction Visualizer” от 23.08.2018.
23. **Светогоров Р.Д.** Свидетельство № 2018661057 на программу для ЭВМ “Diana – Diffraction Analyzer” от 31.08.2018.
24. **Светогоров Р.Д.** Свидетельство № 2018660707 на программу для ЭВМ “DiVis 2.0” от 28.08.2018.
25. **Светогоров Р.Д.** Свидетельство № 2018660964 на программу для ЭВМ “LattCalc” от 30.08.2018.
26. **Светогоров Р.Д.** Свидетельство № 2018661056 на программу для ЭВМ “SyberiaXRD” от 31.08.2018.
27. **Светогоров Р.Д.** Свидетельство № 2019662855 на программу для ЭВМ “DiffMerge” от 04.10.2019.
28. **Светогоров Р.Д.** Свидетельство № 2019663013 на программу для ЭВМ “DiffScan” от 08.10.2019.
29. **Светогоров Р.Д.** Свидетельство № 2019663362 на программу для ЭВМ “PolyCorr” от 15.10.2019.

По своему содержанию все опубликованные работы посвящены определению изучению радиационной стойкости материалов Nb₃Sn под протонным облучением, а также оптимизации комплекса использующихся в работе дифракционных методик.

На автореферат поступило 4 отзыва. Все отзывы положительные.

1. Отзыв из Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, подписан Ворониным В.И., кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником Лаборатории нейтронных исследований вещества. Содержит вопросы:

- В работах по радиационной физике материалов ядерного реактора термин «распухание» используют в области возникновения пор. Вы наблюдали такие дефекты?
- Существует мнение, что основными факторами, влияющих на изменение свойств материалов после протонного облучения, является образование новых примесей, радиационное дефектообразование и накопление атомов водорода. Связываете ли Вы

процессы в области брэгговских пиков только с радиационными дефектами или же допускаете комплексное воздействие? Как-то их можно различить вашим методом?

2. Отзыв из МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, подписан Акимовой О.В., кандидатом физико-математических наук, научным сотрудником кафедры физики твердого тела физического факультета. Замечаний не содержит.

3. Отзыв из Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск, подписан Шевелевым А.Э., кандидатом физико-математических наук, заместителем директора Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов. Содержит замечания:

- На графиках зависимости параметров решетки и микронапряжений от флюенса протонов (Рисунок 1) отсутствуют погрешности измерений.

- Из автореферата не понятна мотивация для выбора именно этого диапазона энергий протонов и флюенса облучения. Являются ли выбранные режимы типичными для условий HE-LHC?

- Автор указывает на необычное поведение несверхпроводящей примесной фазы NbO, заключающийся в заметном росте её доли в объеме образца для небольших протонных флюенсов независимо от энергии частиц. Однако в тексте автореферата отсутствует попытка описания причин подобного необычного поведения. Исследовалось ли распределение примесной фазы по глубине образца? При каком давлении проводилось облучение образцов, контролировалась ли температура поверхности?

4. Отзыв из МИРЭА – Российского технологического университета, г. Москва, подписан Кузьмичевой Г.М., доктором химических наук, профессором кафедры цифровых и аддитивных технологий института перспективных технологий и индустриального программирования. Содержит вопросы и замечания:

- В работе не описана предыстория исходных образцов Nb₃Sn, которые были предоставлены соискателю для изучения. В табл. 1 автореферата показано, что уже исходные образцы содержали в своем составе примесную фазу NbO в разном количестве. Судя по тексту, в образцах содержался и металлический ниобий, но его содержание не указано в табл. 2. Вопросы: Каким методом были синтезированы исходные образцы, что уже в них были примесные оксид ниобия и металлический ниобий? Можно ли ожидать, что эти примесные фазы есть или могут быть в реальном Nb₃Sn в виде катушек? Почему не был взят для эксперимента беспримесный Nb₃Sn? Какие сверхпроводящие характеристики были у исходных образцов? Нет ли опасения, что беспримесный и примесный образец проявят разные структурные свойства при облучении протонами?

- В диссертации показан довольно интересный и необычный результат: «разбухание» элементарной ячейки Nb₃Sn под действием облучения и высказаны разные гипотезы. Судя по рис. 5.2, был выполнен полнопрофильный анализ образца. Что получено в результате уточнения заселенности позиций? Не связано ли это с антиструктурными дефектами (Nb₃Sn), так как размеры ниобия существенно превышают размеры олова?

- Были ли измерены сверхпроводящие характеристики изученных образцов до и после облучения?

- Можно ли полученные результаты экстраполировать на другие фазы типа β -W (A15)? Другими словами, можно ли ожидать подобного структурного поведения у других фаз состава A_3B при аналогичных условиях облучения? Или что-то будет выполняться обязательно, а что-то нет или неочевидно?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что:

- Чернышев Владимир Васильевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, является одним из ведущих российских специалистов мирового уровня в области изучения структурных особенностей функциональных материалов с помощью рентгенодифракционных методов.

- Руднев Игорь Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва, является известным специалистом мирового уровня в области исследования магнитных и электрофизических характеристик низко- и высокотемпературных сверхпроводников.

- Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук является ведущим научно-исследовательским институтом в России в области физики высоких энергий и ускорителей, синхротронного излучения.

Диссертационный совет на основании выполненных соискателем исследований отмечает, что:

Для сверхпроводящих пластин из Nb_3Sn , облученных быстрыми протонами с энергиями 12 и 35 МэВ в диапазоне флюенсов $3 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{18}$ п/см²:

1. Определены закономерности изменений основных кристаллографических параметров исследованных образцов в зависимости от флюенса протонов, установлен монотонный рост параметра кубической решетки (радиационное распухание), микронапряжений и факторов Дебая-Валлера для атомов Sn и Nb;

2. Исследовано поведение несверхпроводящей примесной фазы NbO в Nb_3Sn под облучением, возникающей в результате частичного окисления материала, проанализированы характерные изменения ее объемной доли и размеров кристаллитов;

3. Продемонстрировано, что протонного облучения предотвращает осуществление структурного фазового перехода для Nb_3Sn из кубической в тетрагональную фазу в области низких температур, протекающего по бездиффузионному мартенситному механизму;

4. Наличие максимума радиационных повреждений на строго определенной глубине образца, соответствующей полной потере протонами своей кинетической энергии (брэгговский пик), впервые идентифицировано рентгенографически с помощью порошковой дифракции на синхротронном излучении;

Основные результаты:

1. Установлена динамика изменения параметра порядка Брэгга-Уилльямса, описывающего степень антиузельного разупорядочения сверхпроводящей фазы Nb_3Sn , в зависимости от флюенса протонов для всех исследованных образцов;

2. Показана универсальность параметра «сна» (количество смещений на атом) как интегрального критерия радиационного разупорядочения, возникающего в Nb_3Sn под воздействием ионизирующих излучений различного типа.

3. Разработаны алгоритмы дифракционных исследований облученных поликристаллических пластин Nb_3Sn , характеризующихся большими размерами кристаллитов, включая автоматизированную систему позиционирования и перемещения образца под пучком, а также комплекс программ для ЭВМ для ключевых этапов сбора и количественного анализа дифракционных данных;

4. Разработана прецизионная методика определения концентрации антиузельных радиационных дефектов, возникающих в образцах Nb_3Sn под протонным облучением, основанная на использовании эффекта резонансного рентгеновского рассеяния и позволяющая повысить точность получения параметра Брэгга-Уилльямса примерно в 10 раз;

Научная и практическая значимость диссертации заключается в том, что в работе впервые установлены закономерности структурных изменений, происходящих в сверхпроводниках Nb_3Sn при протонном облучении в диапазоне флюенсов $3 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{18}$ п/см². Установлено, что степень индуцированных облучением повреждений кристаллической структуры демонстрирует монотонный рост с увеличением протонного флюенса. При этом к фиксируемым эффектам облучения относятся: радиационное распухание, рост микронапряжений и эффективных значений факторов Дебая-Валлера атомов олова и ниобия, а также уменьшение значений параметра порядка Брэгга-Уилльямса – основной количественной характеристики возникающего в образцах антиузельного разупорядочения.

Полученные данные о структурных изменениях, проявляющихся под облучением, и вывод об универсальности параметра «сна» (количество смещений на атом) для характеристики радиационных повреждений в Nb_3Sn могут быть использованы для обоснования экономической целесообразности использования и предсказания предельного ресурса сверхпроводящих катушек в магнитных системах современных исследовательских установок класса Мегасайенс, изготовленных из данного материала.

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы подтверждается:

а) применением современных методов экспериментальной физики, таких как порошковая дифракция на синхротронном излучении и резонансное рентгеновское рассеяние;

б) сопоставлением полученных кристаллографических данных с результатами параллельных электрофизических и магнитных исследований на тех же образцах;

в) систематическим сопоставлением полученных результатов по динамике изменения параметра «сна» в условиях протонного облучения с данными других научных групп для других типов ионизирующего излучения, в частности, нейтронов.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертации результаты получены лично автором. Автор принимал непосредственное участие в дифракционных измерениях с применением синхротронного излучения, планировании экспериментов и интерпретации полученных данных. Автором лично создан пакет программ для ЭВМ, использовавшийся для обработки полученных экспериментальных данных. Подготовка публикации полученных результатов проводилась совместно с научным руководителем и соавторами.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

- Исследование радиационной стойкости Nb_3Sn при облучении быстрыми протонами проводилось на модельных массивных образцах, в то время как эффекты образования структурных дефектов и их влияние на изменение критических свойств сверхпроводника в модельных образцах и реальных технологических многожильных проводах могут существенно отличаться.

- Основная часть структурных исследований проведено при комнатной температуре, однако в реальных условиях сверхпроводящие катушки из Nb_3Sn будут эксплуатироваться при температуре жидкого гелия, что немного снижает практическую ценность полученных результатов.

- Из диссертации остается неясным выбор используемых в работе значений флюенса и энергии облучающих частиц, кроме того, значительный вклад в деградацию сверхпроводящих свойств Nb_3Sn будут играть не только протоны, но и многие другие высокоэнергетичные частицы, вклад которых в настоящей работе не учитывается.

Светогоров Р.Д. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

- Результаты работы, в частности, зависимости параметра элементарной ячейки материала и параметра порядка S от значений сна (количества смещений на атом), а также полученное коллегами на тех же образцах поведение T_c хорошо согласуется с результатами, полученными другими авторами. Именно наблюдение одинакового поведения параметров Nb_3Sn на разных типах образцов и при различном облучении позволяет сделать вывод об универсальности параметра сна для прогнозирования изменения свойств Nb_3Sn под воздействием нескольких источников высокоэнергетического излучения в будущих магнитных системах ускорителей. Кроме того, выбор именно поликристаллических пластин обусловлен значительно более маленьким разбросом содержания олова по образцу, по сравнению с проводами Nb_3Sn , что необходимо для точного определения значений параметра порядка.

- Используемое оборудование не позволяет проводить облучение и последующий прецизионный структурный анализ при криогенных температурах.

Однако необходимо отметить, что согласно существующим литературным источникам существенного отличия в результатах для низко- и высокотемпературного облучения не наблюдается.

- Значения флюенса и энергии протонов были подобраны специально, чтобы воспроизвести реальные условия эксплуатации Nb_3Sn в рамках проектов модернизации Большого адронного коллайдера. Полученная в работе универсальность параметра смещений на атом как интегрального критерия радиационного разупорядочения, возникающего в Nb_3Sn под воздействием ионизирующих излучений различного типа, что может быть использованы для обоснования экономической целесообразности использования и предсказания предельного ресурса сверхпроводящих катушек в магнитных системах современных исследовательских установок класса Мегасайенс, изготовленных из данного материала.

Диссертационный совет пришел к выводу, что диссертация Светогорова Р.Д. «Структурные изменения в низкотемпературных сверхпроводниках Nb_3Sn в результате протонного облучения: исследования дифракционными методами на синхротронном излучении», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. — «Физика конденсированного состояния», представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в действующей редакции).

На заседании 09 июня 2022 г. диссертационный совет принял решение за получение новых научных данных в области радиационной стойкости сверхпроводящих материалов на основе Nb_3Sn при облучении быстрыми протонами присудить Светогорову Роману Дмитриевичу учёную степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. — «Физика конденсированного состояния».

При проведении тайного электронного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек (в том числе присутствовали удаленно 8 человек), из них 7 докторов наук по специальности диссертации 1.3.8. — «Физика конденсированного состояния», из 27 человек, входящих в состав совета, проголосовал:

за присуждение учёной степени – 18,

против присуждения учёной степени – 1.

Заместитель председателя
диссертационного совета д.ф.-м.н. проф.

Учёный секретарь
диссертационного совета, к.ф.-м.н.

09.06.2022



П.К. Кашкаров
П.К. Кашкаров

В.А. Демин
В.А. Демин