



УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИЯФ СО РАН

Логачев П.В.

«26» апреля 2022 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН) на диссертационную работу

**Светогорова Романа Дмитриевича**

**«Структурные изменения в низкотемпературных сверхпроводниках Nb<sub>3</sub>Sn в результате протонного облучения: исследования дифракционными методами на синхротронном излучении»**, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния.

Диссертация Светогорова Романа Дмитриевича посвящена экспериментальному исследованию структурных изменений, происходящих в сверхпроводниках Nb<sub>3</sub>Sn при облучении быстрыми протонами с энергиями 12 и 35 МэВ в диапазоне флюенсов  $3 \cdot 10^{16}$  -  $1 \cdot 10^{18}$  п/см<sup>2</sup>.

### **Актуальность и практическая значимость работы**

В течение последних десятилетий наблюдается устойчивый рост спроса на использование сверхпроводящих магнитных устройств на основе Nb<sub>3</sub>Sn для их использования при строительстве и модернизации современных научных установок класса «Мегасайенс», включая ускорители частиц различного типа, а также источники синхротронного излучения. В процессе эксплуатации подобные устройства неизбежно будут подвергаться постоянному облучению пучками частиц высоких энергий. Подобное радиационное воздействие может приводить к образованию специфических дефектов в материале, нарушению его упорядоченной структуры и, как следствие, ухудшению критических характеристик (температуры

перехода в сверхпроводящее состояние, критического тока и критических полей и пр.). Таким образом, изучение стабильности  $Nb_3Sn$  в условиях радиационного воздействия является актуальной научно-технологической задачей.

Полученные в работе диссертанта результаты важны, в частности, для обоснования реализуемости и экономической целесообразности использования данного материала в рамках масштабной модернизации Большого адронного коллайдера в рамках проекта HL-LHC (ЦЕРН, Швейцария). Кроме того, вывод о параметре *сна* (смещений на атом, англ. *dpa*) как универсальной характеристики развивающихся в образце структурных радиационных дефектов независимо от типа облучающих частиц могут быть использованы для оценки ресурса сверхпроводящих магнитных систем в установках «Мегасайенс» других типов.

### **Структура и содержание работы**

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Работа изложена на 133 страницах, содержит 67 рисунков и 10 таблиц. Список литературы содержит 149 наименований.

**Первая глава** посвящена описанию исследуемого материала — сверхпроводящего интерметаллида  $Nb_3Sn$ , принадлежащего к структурному типу A15. Изложена история открытия данного соединения, а также первого наблюдения в нем низкотемпературной сверхпроводимости, дана характеристика его структурных особенностей и основных механических и электрофизических свойств. Приведены существующие литературные данные о деградации структуры материала при облучении различными частицами и ее связи с изменением критических характеристик.

Во **второй главе** дано описание основного метода экспериментального исследования, используемого в диссертационной работе — порошковой рентгеновской дифракции на синхротронном излучении. Приведены физические принципы и основы метода, история открытия, развития и особенности его применения для получения структурных характеристик исследуемых материалов. Показаны особенности применения порошковой дифракции с использованием эффектов резонансного рассеяния вблизи края поглощения нужного элемента.

Суммированы преимущества данного метода для получения значений параметра порядка Брэгга-Уилльямса, анализируемого в диссертационной работе.

**Третья глава** представляет собой описание установки, использованной для проведения экспериментальных исследований в диссертационной работе – станции «Структурное материаловедение» Курчатовского источника синхротронного излучения на базе накопителя электронов Сибирь-2. Приведена оптическая схема и характеристики основных узлов и компонентов станции. Дано описание разработанной соискателем автоматизированной системы позиционирования образца под пучком, а также комплекса программ, написанных для обработки экспериментальных данных в рамках диссертационной работы.

**Четвертая глава** посвящена описанию структурных искажений в образцах  $Nb_3Sn$ , развивающихся в материале при облучении протонами с энергиями 12 и 35 МэВ и в диапазоне флюенсов  $3 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{18}$  п/см<sup>2</sup>. Показана динамика изменения значений параметров элементарной ячейки и микронапряжений в образцах. Установлено, что образцы с пиком дефектов (брэгговским пиком) характеризуются значительно более высокой концентрацией радиационных дефектов. Дана характеристика изменений, происходящих в несверхпроводящей примесной фазе NbO в зависимости от эффективной дозы. Описаны особенности низкотемпературного структурного перехода  $Nb_3Sn$  из кубической в тетрагональную фазу в зависимости от типа и предыстории образцов.

**Пятая глава** посвящена экспериментальному исследованию параметра порядка Брэгга-Уилльямса – численной характеристики возникающих в образце антиузельных радиационных дефектов. Сопоставлены результаты, получаемые различными методами, в частности, с помощью оригинальной методики, основанной на анализе кривых резонансной дифракции. Приведена зависимость значений параметра порядка от протонного флюенса. Установлено, что в пересчёте на значения *sna* зависимость имеет линейный характер и хорошо соотносится с известными литературными данными для случаев облучения другими частицами, что подтверждает важность *sna*, как универсальной характеристики возникающих в  $Nb_3Sn$  под облучением радиационных дефектов структуры.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы работы.

## Научная новизна

Научная новизна результатов проведённых исследований заключается в следующем:

- Получены зависимости изменений основных структурных параметров  $Nb_3Sn$  в зависимости от эффективной дозы и значений *сна* 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/см<sup>2</sup> независимо от энергии частиц наблюдается рост объёмной доли примесной фазы  $NbO$  за счет увеличения концентрации кристаллитов в объёме образца. Последующее увеличение флюенса приводит к вымыванию оксида ниобия и уменьшения доли примеси (в 3 раза для максимального флюенса  $1 \cdot 10^{18}$  п/см<sup>2</sup>);
- Установлено, что протонное облучение подавляет низкотемпературный мартенситный переход в тетрагональную фазу.

## Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных экспериментальных методов, таких как дифрактометрия на синхротронном излучении в нормальном и резонансном режимах, а также хорошим согласием полученных результатов с литературными данными по облучению  $Nb_3Sn$  различными высокоэнергетичными частицами.

## Соответствие содержания диссертационной работы паспорту специальности

Содержание диссертационной работы полностью соответствует паспорту специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния как в контексте формулы специальности (теоретическое и экспериментальное исследование природы кристаллических и аморфных, неорганических и органических веществ в

твёрдом и жидком состояниях и изменение их физических свойств при различных внешних воздействиях), так и направлений исследований:

1. Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы и свойств металлов и их **сплавов**, неорганических и органических соединений, диэлектриков и, в том числе, материалов световодов как в твёрдом (кристаллы, **поликристаллы**), так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления.

2. Теоретическое и экспериментальное исследование **физических свойств упорядоченных** и неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы, дисперсные, и квантовые системы.

3. Теоретическое и экспериментальное исследование **воздействия различных видов излучений**, высокотемпературной плазмы на **природу изменений физических свойств конденсированных веществ**.

### **Апробация**

Результаты диссертационной работы представлены в 5 статьях в рецензируемых журналах, 15 тезисах конференционных докладов и 9 зарегистрированных результатах интеллектуальной деятельности (Программы для ЭВМ). Положения, выносимые диссертантом на защиту, в полной мере отражены в печатных работах.

### **Замечания по диссертационной работе**

Несмотря на безусловно положительную оценку диссертационной работы, можно сделать замечания, а именно:

1) Все исследования проведены на модельных поликристаллических пластинках, а не на многожильных проводах с  $Nb_3Sn$  в качестве сверхпроводящей фазы, непосредственно используемых для изготовления катушек магнитных устройств, что несколько снижает технологическую значимость обсуждаемых автором результатов ввиду того, что количественные закономерности

возникновения и эволюции радиационных дефектов могут заметно отличаться в образцах разной формы и размера.

2) Условия протонного облучения, использованные в диссертационной работе, также скорее соответствуют модельному эксперименту: в реальных ускорителях обмотки сверхпроводящих соленоидов подвергаются радиационному воздействию в условиях криогенных температур, когда материал находится в сверхпроводящем состоянии. Применимость непосредственного распространения результатов, полученных при комнатной температуре (как с точки зрения облучения, так и структурного исследования), на реалистичные условия несколько ограничена.

3) В диссертационной работе метод рентгеновской дифракции на синхротронном излучении является, по сути, единственным. Выводы из дифракционных измерений систематически не сопоставляются ни с данными других экспериментальных методов (в частности, электронной микроскопии), ни с результатами электрофизических измерений, прежде всего, характеризующих качества материала как сверхпроводника.

4) Некоторые статьи, включённые диссертантом в список публикаций, довольно слабо связаны по смыслу с основным содержанием диссертации.

5) На многих рисунках результаты экспериментальных измерений приведены без статистических оценок погрешности; экспериментальные точки соединены ломаной линией без функциональной аппроксимации (в рамках определённой модели, описывающей явление).

6) В тексте диссертации и автореферата встречаются опечатки. На некоторых рисунках сосуществуют русско- и англоязычные подписи.

### **Заключение**

Отмеченные замечания, однако, не снижают научную и практическую значимость полученных результатов и общую положительную оценку диссертационной работы. Результаты представляют как фундаментальный интерес, так и практический в применении к современным сверхпроводящим устройствам в

составе магнитных систем ускорителей частиц. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертация Р.Д. Светогорова является законченным, оригинальным исследованием, выполненном на высоком научном уровне, которое соответствует паспорту специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния и отвечает требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней (утверждённого постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 в действующей редакции). Светогоров Р.Д. заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния.

Диссертация и проект отзыва ведущей организации на диссертационную работу заслушаны, рассмотрены и одобрены на семинаре лаборатории 8-2 ИЯФ СО РАН, протокол от 05.04.2022 №7 (на семинаре присутствовало 19 человек, в том числе 6 докторов наук).

Заведующий лабораторией 8-2  
ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,  
Д.т.н., ведущий научный сотрудник



«26» апреля 2022 г.

Подпись заверяю: Резниченко А.В.

Учёный секретарь ИЯФ СОРАН,

К.ф.н. М.П.



«26» апреля 2022 г.

Отзыв составил: Шкаруба Виталий Аркадьевич, доктор технических наук. Заведующий лабораторией 8-2 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН)

Почтовый адрес: 630090 Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 11.

Телефон: +7 (383) 329-49-76

E-mail: V.A.Shkaruba@inp.nsk.su