

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу ДЗЮБЫ Александра Викторовича «Влияние физико-химических свойств поверхности сверхпроводящих радиочастотных резонаторов на максимальное значение добротности и ускоряющего напряжения», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника и 02.00.04 – физическая химия

Актуальность работы обусловлена, в первую очередь, потребностями в расширении области применения сверхпроводящих радиочастотных резонаторов в ускорителях различного назначения. Важнейшей характеристикой резонатора является добротность. В реальных резонаторах, как правило, не удается достичь теоретически возможных значений добротности из-за диссипативных процессов, протекающих в материале резонатора. В свою очередь эти диссипативные процессы определяются характеристиками реальной структуры и состава поверхностного слоя резонатора, роль которых однако недостаточно изучена. Вследствие неполноты фундаментальных знаний о причинах, приводящих к потере энергии электромагнитных колебаний в стенках резонаторов, технологии их изготовления и обработки включают некоторые эмпирически установленные приемы улучшения качества резонаторов, не имеющие достаточного научного обоснования. Таким образом, представленная к защите работа затрагивает как фундаментальные научные аспекты проблемы диссипативных явлений в сверхпроводящих структурах, так и практически важные особенности технологии изготовления радиочастотных ниобиевых резонаторов требуемого качества.

Цель диссертационной работы Дзюбы А.В. состояла в установлении связи диссипативных процессов в локальной области рабочей поверхности металлического сверхпроводника с состоянием его микроструктуры, а именно с плотностью дислокаций и степенью шероховатости этой локальной области.

Содержание работы изложено на 98 страницах, включающих 90 страниц основного текста, 52 рисунка, 3 таблицы. Диссертация имеет традиционную структуру и состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, содержащего 74 наименования.

**Во введении** диссертантом обоснована актуальность выбранной тематики, сформулированы цели и задачи, основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** является обзором литературных данных, имеющихся по тематике работы в настоящее время. В главе изложены базовые теоретические представления о взаимодействии радиочастотного поля со сверхпроводником. Описаны устройство сверхпроводящих радиочастотных резонаторов и известные технологии изготовления радиочастотных резонаторов. Приведены литературные данные о диссипативных процессах в стенках резонаторов и возможных причинах

их появления. Обзор литературы по объему занимает практически половину текста диссертации, что в данном случае представляется оправданным. Подробный анализ литературных данных, касающихся исследования диссипативных процессов, ограничивающих максимальные значения добротности и ускоряющего напряжения, позволили диссертанту очень конкретно сформулировать цель и задачи своего исследования.

**Во второй главе** подробно описаны процедуры подготовки образцов и основные методики, применявшиеся в процессе выполнения диссертационной работы. Исследования проводились на ниобиевых образцах, вырезанных из исходных материалов, используемых для изготовления резонаторов, и непосредственно из резонаторов. Задачи исследования решались путем привлечения физических методов, пригодных для изучения структуры поверхности, таких как растровая электронная микроскопия с дифракцией отраженных электронов, контактная профилометрия. Проводились измерения электросопротивления и магнитной восприимчивости. Тестировались технологические приемы обработки резонаторов, предложенные для улучшения их целевых характеристик.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований, их анализ и обсуждение. Показано, что условием возникновения потерь по механизму HFQS является наличие разориентации субмикронных участков поверхности металлического ниобия и соответствующая его микроструктура. С использованием метода дифракции обратно-рассеянных электронов надежно показано, что в образцах, вырезанных из стенок резонатора, присутствуют кластеры дислокаций. На основе измерений электропроводности сделан вывод о том, что наличие дислокаций способствует повышению степени поглощения водорода ниобием и формированию кластеров гидридных фаз. Предложены технологические приемы, позволяющие улучшить характеристики резонаторов за счет уменьшения плотности дислокаций и, соответственно, степени загрязнения в процессе электрополировки.

**В Заключении** представлены основные результаты и выводы по работе.

**Научная новизна работы.** Диссертантом

- разработан новый метод описания шероховатости, состоящий в вычислении углов, соответствующих изломам поверхности субмикронных пространственных масштабов;
- впервые изучено влияние дислокаций на степень поглощения водорода ниобием в процессе проведения электрополировки и химического травления;
- впервые дано непротиворечивое объяснение снижения добротности при высокой амплитуде радиочастотного поля (HFQS);
- дано новое толкование влияния процедуры отжига резонаторов на подавление потерь энергии электромагнитных колебаний.



**Научно-практическая значимость.** Развита представления о механизмах возникновения радиочастотных потерь в стенках резонаторов, изготовленных из сверхпроводящего ниобия. Даны объяснения механизмов структурных изменений, происходящих при использовании традиционных технологических приемов. Эти новые знания позволили дать прямые рекомендации по усовершенствованию технологии обработки резонаторов.

В целом можно резюмировать, что диссертант успешно справился с задачами, поставленными при выполнении диссертационной работы, и получил результаты, имеющие как научную, так и практическую значимость. Важно отметить, что в работе использован достаточно разнообразный комплекс исследовательских физических методов, что характеризует высокую квалификацию соискателя.

Автореферат диссертации полностью соответствует самой диссертационной работе.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 4 статьях в рецензируемых российских и зарубежных журналах, входящих в список ВАК по направлению «Физика», и доложены на 5-ти международных конференциях.

Надежность результатов базируется на использовании адекватных методик исследования в сочетании с базовыми теоретическими представлениями об изучаемых объектах и явлениях.

Все основные результаты диссертационной работы получены лично автором. Результаты, полученные в диссертационной работе А.В.Дзюбы, могут использоваться при проведении научных исследований в Национальном исследовательском центре "Курчатовский институт", МГТУ им. Н.Э.Баумана, Объединенном институте ядерных исследований.

Вместе с тем, по диссертационной работе имеются некоторые замечания и вопросы:

1. В диссертационной работе присутствуют существенные погрешности оформительского характера: имеется довольно большое число опечаток; обозначения переменных и констант, входящих в приведенные в тексте формулы (например, стр.10-11), не всегда расшифровываются, что необходимо делать даже, если речь идет об общеупотребимых обозначениях; список литературы оформлен небрежно, отсутствует единообразие в описании ссылок.
2. В литературном обзоре отсутствуют ссылки на ряд российских работ, которые, видимо, стоило бы упомянуть. В частности, близкие к теме диссертационной работы исследования проводились в МГТУ им. Н.Э.Баумана (работы И.А.Архарова и соавторов, диссертационная работа С.С.Кошелева, 2013 г.). При обсуждении структурных особенностей окисленной поверхности ниобия, возможно, полезно было бы провести сопоставление с

данными работы Кузнецова М.В. и соавторов «Фотоэлектронная спектроскопия и дифракция поверхности наноразмерных структур NbO/Nb (110). ЖСХ, 2009, т.50, №3, с.536-543.

3. В некоторых случаях диссертант использует жаргонные выражения или неверно использует некоторые термины. Так корректный и общепринятый термин «щероховатость поверхности» почему-то в формулировке цели работы заменен на «неровности». На стр. 30-32 оксид NbO<sub>4</sub> отнесен к субоксидам, что не соответствует химической классификации оксидов.

Высказанные замечания имеют характер пожеланий и не затрагивают существа выполненной работы. Работа выполнена на высоком методическом и научном уровне. Диссертация, в целом, написана хорошим профессиональным языком. Полученные результаты отличаются новизной и оригинальностью. Диссертационная работа «Влияние физико-химических свойств поверхности сверхпроводящих радиочастотных резонаторов на максимальное значение добротности и ускоряющего напряжения» соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а диссертант, Дзюба Александр Викторович, заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.20 – физика заряженных частиц и ускорительная техника и 02.00.04 – физическая химия.

Заведующий лабораторией  
структурных методов исследования  
ФГБУН Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН  
доктор физико-математических наук, профессор

 С.В. Цыбуля

Сергей Васильевич Цыбуля, д.ф.-м.н., профессор,  
ФГБУН «Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН», лаборатория структурных  
методов исследования, заведующий лабораторией.

Адрес: пр. академика Лаврентьева 5, Новосибирск, Россия, 630090

e-mail: tsybulya@catalysis.ru

Телефон: +7-(383) 326-95-97

«Подпись Цыбули С.В. заверяю»

Ученый секретарь ИК СО РАН, д.х.н.



 Д.В. Козлов