

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата химических наук
Сотничука Степана Владимировича
на тему: «Электрохимическое формирование металлических нанонитей
для задач сверхпроводниковой микроэлектроники»
по специальностям 1.4.15. Химия твердого тела и 1.4.6. Электрохимия**

Актуальность темы

Одним из существенных препятствий на пути миниатюризации современных полупроводниковых вычислительных систем является проблема высокого тепловыделения, которая может быть решена переходом к сверхпроводящим устройствам, в которых заряд переносится без потери энергии. Ключевыми элементами таких устройств становятся сверхпроводящие гибридные структуры на основе эффекта Джозефсона, которые, в свою очередь, требуют создания джозефсоновских переходов в виде нитевидных наноструктур.

В рамках диссертационного исследования разработаны технологии получения металлических наноструктур и создания гибридных сверхпроводящих систем с использованием единичных нанонитей между ниобиевыми электродами, включая системы на основе золота, кобальта и сегментированные нанонити с чередующимися слоями золота и никеля. Инновационным методом производства нанонитей выступает темплатное электроосаждение в пористые матрицы анодного оксида алюминия.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация С.В. Сотничука состоит из введения, трех содержательных глав, заключения, списка сокращений, списка литературы, одного приложения и благодарностей. Диссертация изложена на 140 страницах, содержит 87 рисунков и 8 таблиц. Список цитируемой литературы включает 181 библиографическую ссылку.

Во **введении** приведены обоснования актуальности работы, сформулированы цели и задачи, отмечен личный вклад автора диссертации, приведены положения, выносимые на защиту.

В главе «**Обзор литературы**», состоящей из пяти разделов, проведен аналитический обзор существующих библиографических источников по теме диссертации. Последний раздел (**раздел 2.5**) посвящен выводам, сделанным на основе проведенного анализа; в данном разделе поставлены задачи исследования.

В главе «**Экспериментальная часть**» приведено подробное описание применяемой технологии электрохимического формирования сверхпроводящих металлических нанонитей, получены параметры и изучены особенности формирования таких наноструктур.

Автором диссертации самостоятельно осуществлен синтез применяемых пористых темплатов, электроосаждение наноструктур и формированием суспензий индивидуальных нанонитей.

Глава «**Результаты и обсуждения**» состоит из четырех разделов, которые следует рассмотреть по отдельности.

В **разделе 4.1** рассматриваются особенности изготовления пористых пленок анодного оксида алюминия (АОА), проведен анализ качества изготовленных пленок. Были получены темплаты АОА с различными геометрическими характеристиками, что позволит создать нитевидные наноструктуры с необходимыми параметрами.

В **разделе 4.2** приводятся результаты изучения особенностей осаждения золота на пористые темплаты АО. Были получены нанонити золота различных диаметров для дальнейшего применения в составе джозефсоновских SNS переходов. Проведен анализ полученных нанонитей с использованием как рентгенофазовых методов, так методов просвечивающей электронной микроскопии. Показано, что обнаруженные различия в структуре нанонитей, приводят к различным характеристикам джозефсоновских переходов.

Раздел 4.3 посвящен исследованию возможности проявления эффекта близости для гибридных систем на основе ферромагнитных нанонитей кобальта. Было подтверждено, что на больших расстояниях сверхпроводимость подавляется обменными взаимодействиями в сильном ферромагнетике. Тем самым был произведен выбор материала для

формирования сегментированных нанонитей. Был обоснован выбор никеля, а не кобальта в качестве ферромагнитной прослойки.

В разделе 4.4 предложена новая технология изготовления SFS-переходов на основе сегментированных нанонитей Au/Ni/Au с тонкой ферромагнитной прослойкой. Проведен полноценный анализ получившихся SNFNS джозефсоновских переходов на основе таких нанонитей: получены вольтамперные характеристики, температурные зависимости критотока и сопротивления таких структур. Изготовленные гибридные структуры Nb/Au/Ni/Au-нанонить/Nb являются первым примером SNFNS-контактов на основе единичных сегментированных нанонитей.

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

По результатам работы опубликовано 4 статьи в журналах, индексируемых в ведущих международных базах данных, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности.

Достоверность полученных результатов и обоснованность выносимых на защиту положений подтверждается использованием современных физико-химических аналитических методов, воспроизводимостью полученных результатов и их согласованностью с теоретическими моделями. Результаты диссертации апробированы на международных и всероссийских научных конференциях, опубликованы в ведущих рецензируемых журналах, входящих в категорию У1 Белого списка журналов. Приведенные в диссертации результаты получены впервые, что подтверждает **научную новизну работы**.

К **достоинствам** рассматриваемой диссертационной работы можно отнести следующие полученные результаты:

1. Изготовлены и проанализированы SNS джозефсоновские переходы Nb/Au/Nb на основе нанонитей золота, демонстрирующие высокие значения

плотности критического тока вплоть до $1,6 \cdot 10^6$ А/см² (при температурах 1,2 К).

2. Величины критических токов изготовленных переходов находятся в полном согласии с моделью Узаделя для длинных SN-N-NS переходов.

3. Продемонстрировано влияние морфологии и микроструктуры нанонитей золота на свойства формируемых сверхпроводящих систем.

4. Предложена методика автоматизированного изготовления сегментированных нанонитей Au/Ni/Au с возможностью варьирования толщины ферромагнитной прослойки от 7 до 50 нм.

5. Изготовлены SFS-контакты на основе единичных сегментированных нанонитей и продемонстрировано возникновение эффекта близости в таких структурах.

Практическая значимость полученных результатов заключается в создании усовершенствованной технологии производства джозефсоновских переходов SNS и SFS типа на основе нанонитей, необходимых для применения в ультрасовременных устройствах на основе сквидов, таких как магнетометры, усилители, считывающие цепи кубитов и иных. Отдельно следует отметить, предложенное сторонней группой исследователей применение разработанных джозефсоновских переходов в качестве био-подобных сверхпроводящих нейронов.

Тем не менее, диссертация не лишена недостатков:

1. Вольтамперные характеристики полученных переходов демонстрируют возможное гистерезисное поведение (например, рис. 4.13в для $L_{WL} = 280; 320; 430$ нм и рис. 4.15а для $L_{WL} = 165; 284$ нм). Скорее всего, данное поведение связано с емкостными свойствами полученных переходов, и следовало бы провести измерения ВАХ в режиме прямого и обратного хода для оценки емкостных характеристик. К данному замечанию следует добавить, что упомянутая в аналитическом обзоре RSJ модель джозефсоновского перехода, безусловно применимая к SNS переходам, должна быть дополнена учетом емкости перехода (RSCJ-модель).

2. В разделе 4.2.4 (а также в более ранних разделах) не приведена схема эксперимента по определению зависимости критического тока от величины приложенного магнитного поля. Хотя полученные результаты не вызывают сомнений в их достоверности (они совпадают с хорошо зарекомендовавшей себя моделью Узаделя), хотелось бы понимать каким образом задается внешнее магнитное поле и измеряется его напряженность в точке локализации перехода.

3. Имеется ряд замечаний по оформлению диссертационного исследования:

а. Структурирование диссертации вызывает вопросы: традиционно не нумеруемые пункты (Введение, Заключение, Благодарности и т.п.) пронумерованы; названия глав слишком общие; основная глава **«Результаты и обсуждения»** перенасыщена новыми результатами и могла бы быть разделена на две (SNS и SFS переходы).

б. Часть формулировок следовало бы изменить (например, в фразе «что подтверждает корректность [...] проведённых арифметических действий» (стр. 83) правильнее было бы использовать термин «расчетов»).

в. Список публикаций автора по материалам диссертации корректно приведен только в автореферате и отсутствует в тексте самой диссертационной работы.

Следует отметить, что указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова. Содержание диссертации соответствует специальностям 1.4.15. Химия твердого тела и 1.4.6. Электрохимия (по химическим наукам) и критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук,

на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Сотничук Степан Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата химических наук по специальностям 1.4.15. Химия твердого тела и 1.4.6. Электрохимия.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники
физического факультета
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Московский государственный университет имени
М.В.Ломоносова»

КОЛОТИНСКИЙ Николай Васильевич

« 16 » мая 2025

Контактные данные:

тел.: +7 (495) 939-43-51, e-mail: kolotinskij@physics.msu.ru.

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.04 – Физическая электроника

Адрес места работы:

199991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение выс
шего образования «Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова» (МГУ имени М.В. Ломоносова)

Тел.: +7 (495) 939-31-60; e-mail: info@physics.msu.ru