

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу Петрова Андрея Владимировича «Тонкие пленки FeSeTe на аморфных подложках при низких температурах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.10. Физика низких температур.

### **Актуальность темы диссертации**

Исследование сверхпроводимости в тонких плёнках тетрагонального селенида железа интеркалированного теллуром  $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$  (далее FeSeTe) имеет научную значимость как в фундаментальном аспекте, так и в поисково-прикладном аспекте. Для фундаментальных исследований важно, что в этом материале, имеющем очень простую кристаллическую структуру и две анизотропных щели в спектре возбуждений, до сих пор не раскрыт механизм образования куперовских пар и получение новой информации о физических характеристиках пленок, напыленных на необычную - аморфную - подложку исключительно актуально.

В поисково-прикладном физическом аспекте актуальность заключается в том, что разработка сверхпроводящих проводов на основе тонких плёнок FeSeTe предлагает потенциально недорогую и интересную альтернативу проводам на основе купратных сверхпроводников на основе редкоземельных элементов (REBCO) для применений в магнитах и современной электронике при охлаждении жидким гелием.

Таким образом, актуальность работы, посвященной формированию сверхпроводящих плёнок FeSeTe на аморфных диэлектрических подложках без буферного слоя и исследованию их физических характеристик при низких температурах сомнений не вызывает.

### **Содержание диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 106 страниц текста,

содержащих 33 рисунка, 3 таблицы и 84 наименования цитируемых источников.

**Во введении** приведены общие данные по классу железосодержащих сверхпроводников, вызывающих большой интерес с момента их открытия в 2008 году, и рассмотрены особенности железосодержащих сверхпроводников так называемой "группы 11", к которой относятся сверхпроводники тетрагонального халькогенида железа  $Fe_{1+\delta}Se_{1-x}Te_x$ : простейшая кристаллографическая структура, облегчающая фундаментальные исследования, низкая токсичность, и низкая структурная анизотропия. Еще одним свойством, которое делает  $FeSeTe$  чрезвычайно привлекательным материалом, несмотря на невысокие критические температуры - около 15 К для объемного  $FeSeTe$ , – является низкая температура осаждения, 200 – 400 °С в условиях вакуума с использованием одного буферного слоя.

**Первая глава** диссертации представляет собой аналитический обзор научной литературы по железосодержащим сверхпроводникам. Проанализировано влияние состава, стехиометрии, и внешних воздействий на параметры сверхпроводящего состояния. Изложены ключевые представления о смешанном состоянии сверхпроводников второго рода, вихревой динамике и термоактивированных механизмах диссипации. Рассмотрены механизмы пиннинга в тонких плёнках и связь эффективности закрепления вихрей с типом дефектной структуры. Представлены данные о проявлениях квазидвумерности в плёнках  $FeSeTe$ , включая влияние толщины пленки и типа подложки на характеристики сверхпроводящего перехода. В технологической части главы сопоставлены основные методы получения плёнок и обоснован выбор импульсного лазерного осаждения как базового метода исследования.

**Вторая глава** диссертационной работы посвящена описанию экспериментальной части: подготовке исходных материалов, получению тонких плёнок  $FeSeTe$  методом импульсного лазерного осаждения и комплексу методов их исследования. В ней приведена методика подготовки

поликристаллических мишеней Fe(Se,Te) и аморфных подложек К-208. Описана проверка стабильности мишени при контакте с воздухом, а также результаты рентгенофазового анализа, подтвердившие преобладание фазы FeSeTe с незначительной примесью оксида железа. Обоснован выбор стекла К-208 как подложки и подтверждён его аморфный характер по данным рентгеноструктурного анализа.

**В третьей главе** представлены основные экспериментальные результаты по плёнкам FeSeTe, полученным методом импульсного лазерного осаждения на аморфных подложках К-208. В ней подробно описаны структурные и морфологические характеристики плёнок FeSeTe, полученных на аморфных подложках К-208 методом импульсного лазерного осаждения. Приведены данные энергодисперсионного анализа состава плёнки, оказавшегося близким к номинальному FeSe<sub>0.5</sub>Te<sub>0.5</sub>, при локальном разбросе содержания элементов по поверхности не превышающем ~5%.

**В четвертой главе** приводится обсуждение полученных результатов для плёнок FeSe<sub>0.5</sub>Te<sub>0.5</sub> на аморфной подложке К-208. Сопоставление зависимостей нормированной силы пиннинга,  $f_p(h)$ , и энергии активации вихрей Абрикосова,  $U(H)$ , показывает доминирование коррелированного линейного пиннинга на протяжённых дефектах. Измеренные значения  $j_c$  составляют  $3-5 \times 10^4$  А/см<sup>2</sup> в собственном поле и  $3-5 \times 10^3$  А/см<sup>2</sup> в поле до 4 Тл при 2 К; величина поля необратимости  $H_{irr}(4 \text{ К})$  указывает на возможность бездиссипативного переноса тока в полях до 10 Тл.

В разделе **Заключение** подведены итоги работы, показывающей, что аморфные диэлектрические подложки могут служить перспективной основой для формирования сверхпроводящих проводников на основе железосодержащих сверхпроводящих плёнок FeSeTe без применения сложной многослойной буферной архитектуры. Совокупность структурных и электрофизических данных подтверждает воспроизводимость получения сверхпроводящего состояния, выявляет роль приповерхностного слоя с изменённой стехиометрией в формировании квази-двумерного режима и

БКТ-перехода, а также показывает, что вихревая динамика и механизмы пиннинга согласуются с доминированием планарных дефектов. Таким образом, продемонстрированная технологическая схема прямого PLD-осаждения на стекло К-208 является перспективной для дальнейшего развития подходов к созданию сверхпроводящих элементов и прототипов длинномерных ВТСП-проводов третьего поколения на гибких аморфных диэлектрических подложках.

**Автореферат** полностью отражает содержание, основные результаты и выводы диссертационной работы, а публикации автора достаточно полно ее представляют. Диссертация в достаточной степени апробирована.

**Научная новизна** работы состоит в получении принципиально новых результатов, а именно:

- Разработана лабораторная методика воспроизводимого получения FeSeTe плёнок с устойчивой сверхпроводящей фазой с критической температурой перехода,  $T_c$ , до 9.5 К при безбуферном осаждении на аморфное боросиликатное стекло К-208, что выше известных результатов.
- Обнаружено, что в отличие от ситуации с FeSeTe пленками на монокристаллических подложках, демонстрирующих более высокие  $T_c$ , чем у распыляемой мишени с  $T_c \sim 14$  К, полученные значения  $T_c$  для пленок на аморфной подложке ниже, чем у мишени.
- Показано, что сверхпроводящее состояние в плёнках FeSe<sub>0.5</sub>Te<sub>0.5</sub> на аморфной подложке К-208 носит квазидвумерный характер несмотря на то, что длина когерентности  $\xi_c(0) \approx 1,9$  нм больше межплоскостного расстояния в пленке, составляющего  $\approx 0.60$  нм. Квазидвумерный характер поведения подтверждается наличием перехода Березинского–Костерлица–Таулеса (БКТ) и поведением зависимостей сопротивления пленки на переходе  $R(T,H)$  от температуры и магнитного поля.
- Показано, что возможной причиной квазидвумерного поведения пленок является измененная стехиометрия в слое с толщиной менее 40 нм от

интерфейса, приводящая к отсутствию сверхпроводимости в нем и уменьшению эффективной сверхпроводящей толщины пленки. Результат подтвержден методами рентгеновской дифракции и глубинным рентгено-фотоэлектронным спектроскопическим анализом, продемонстрировавшими, что в образцах с более тонким слоем (40 нм) возникают заметные отклонения фазового состава и размеров кристаллической ячейки от оптимальных.

- Найдены значения физических параметров полученных пленок при низких температурах - верхнего критического поля  $H_{c2}(0)$  для двух ориентаций магнитного поля относительно плоскости плёнки, поля необратимости  $H_{irr}$ , значения энергии термической активации вихрей  $U(H)$ , длин когерентности, лондоновских глубин проникновения, анизотропии плёнок  $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ .

- Показано, что в исследуемых плёнках доминирует коррелированный пиннинг на протяжённых дефектах, причём характер полевой зависимости нормированной плотности силы пиннинга  $f_p(h)$  отличается от пленок сверхпроводников с преобладающим точечным пиннингом.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Научная значимость заключается в разработке комплексной методики формирования и исследования тонких сверхпроводящих пленок  $FeSeTe$  на аморфных диэлектрических подложках, включающей подготовку образцов, оптимизацию режимов импульсно-лазерного осаждения, получение оценок температурной зависимости энергии активации вихрей Абрикосова, верхнего критического поля, поля необратимости, плотности критического тока, результаты измерений морфологических, структурных и электродинамических характеристик пленок, определение анизотропии сверхпроводящих параметров пленок - длин когерентности и лондоновских глубин проникновения, анализ нормированной плотности силы пиннинга. Научная значимость заключается также в полученных данных о механизме самотекстурирования осаждаемой пленки и размеров элементарной кристаллической ячейки без эпитаксии к подложке, обнаружении

двумерности в поведении пленки, величине энергии активации вихрей и доминировании коррелированного пиннинга на протяжённых дефектах, что дополняет фундаментальные представления о вихревой динамике и устойчивости сверхпроводящего состояния в железосодержащих плёнках.

Практическая значимость заключается в демонстрации возможности получения сверхпроводящих плёнок FeSeTe с  $T_c \approx 9,5$  К, высокими значениями  $H_{c2}$ ,  $H_{irr}$  и плотности критического тока при низкотемпературном (300 °С) импульсном лазерном осаждении в вакууме на аморфных подложках без применения буферных слоёв. Данный подход может быть адаптирован для гибких диэлектрических подложек типа световодов, что позволит формировать длиномерные сверхпроводящие элементы при сохранении ключевых характеристик и снижении себестоимости. Реализация этой технологии создаёт предпосылки для разработки гибких ВТСП-проводов третьего поколения, способных передавать сигналы и ток с низкими потерями.

**Достоверность** результатов диссертационного исследования и сформулированных выводов не вызывает сомнений. Все экспериментальные данные в диссертации получены на современных установках с соблюдением единых процедур подготовки образцов и повторения измерений на разных сериях образцов. Основные положения работы обсуждались на научных семинарах кафедры и докладывались на научных конференциях, а ключевые результаты опубликованы в рецензируемых журналах. Такая комплексная верификация и внешнее рецензирование подтверждают научную обоснованность и достоверность полученных выводов.

### **Замечания к диссертационной работе**

1. В диссертации плёнки FeSeTe рассматриваются как перспективный материал для создания сверхпроводящих проводников следующего поколения. В этой связи представляется желательным более чётко показать

преимущества и ограничения исследованных плёнок в сравнении не только с проводниками второго поколения на основе REBCO, но и с низкотемпературными плёночными сверхпроводниками Nb и NbN. Поскольку рабочий температурный диапазон исследованных образцов ближе именно к этим материалам, было бы полезно сопоставить значения критической температуры, плотности критического тока в собственном поле и во внешнем магнитном поле, анизотропии и чувствительности к разориентации зёрен при одинаковых температурах. Это позволило бы яснее обозначить реальное место плёнок FeSeTe среди уже используемых сверхпроводящих материалов.

2. В работе приведены результаты ограниченного числа репрезентативных образцов: двух плёнок толщиной 120 нм (тип А и тип Б) и одной плёнки толщиной 40 нм. В связи с этим хотелось бы видеть более развёрнутое обсуждение воспроизводимости процесса: сколько всего было получено серий, сколько образцов входило в одну серию, каков разброс параметров внутри серии и от серии к серии, а также чем, помимо различий в электродинамических характеристиках, отличаются образцы типа А и типа Б. Такое обсуждение существенно усилило бы раздел о достоверности полученных результатов.

3. В работе обсуждается квазидвумерный характер сверхпроводящего состояния плёнок FeSeTe, однако различие между квазидвумерным электродинамическим режимом и истинно двумерным случаем в тексте изложено не вполне явно. С учётом того, что рассматриваются плёнки разной толщины, было бы полезно более чётко пояснить, в каком именно физическом смысле в работе используется термин «квазидвумерность» и почему он применим к исследуемым образцам. Такое уточнение сделало бы интерпретацию результатов более понятной.

4. Имеются и отдельные замечания редакционного характера. На части рисунков присутствуют подписи и обозначения на английском языке, что выглядит нежелательно для текста диссертации, представляемой на русском

языке. Кроме того, на стр. 21 формулировка «подбор давления в камере» при дальнейшем описании процесса как осаждения в вакууме выглядит не вполне удачной и требует редакционного уточнения.

### **Заключение**

Приведенные замечания не снижают ценности работы, поскольку не являются критичными, не затрагивают принципиальных моментов диссертации, не касаются основных результатов и выводов и не снижают высокую оценку проведенного исследования. Результаты работы опубликованы в изданиях, индексируемых в системах Scopus и WoS и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ, доложены на XXIV Всероссийской школе-семинаре по проблемам физики конденсированного состояния вещества и на научной конференции МГУ «Ломоносовские чтения-2026».

Считаю, что работа Петрова А.В. «Тонкие пленки FeSeTe на аморфных подложках при низких температурах», является законченным исследованием, выполненным на актуальную тему, написана грамотным языком, аргументировано и логично, содержит научную новизну и практическую значимость.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.10. Физика низких температур (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено 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 Петров Андрей Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.10. Физика низких температур.

Официальный оппонент  
кандидат физико-математических наук  
Подпись

П.Б. Можаяев

« 28 » 04 \_\_\_\_\_ 2026 г.

Можаяев Петр Борисович, кандидат физико-математических наук, Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах. Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Центр перспективной микроэлектроники, отделение физико-технологических исследований имени К.А. Валиева, лаборатория технологии микро- и наносистем, старший научный сотрудник

Официальный адрес с почтовым индексом и адресом электронной почты организации:

117218, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36 к. 1, pbmzh@bk.ru

Подпись Можаяева П.Б. заверяю