

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.

Исследование сверхпроводимости в тонких плёнках тетрагонального селенида железа интеркалированного теллуром $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ (далее FeSeTe или FST) имеет научную значимость как в фундаментальном, так и в поисково-прикладном аспектах. 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. С другой стороны, с точки зрения прикладных исследований важно получение новой информации о физических характеристиках пленок, напыленных на необычную - аморфную - подложку. Поскольку для использования сверхпроводимости в практических крупномасштабных энергетических приложениях требуются проводники в виде гибких проводов или лент, необходимо компенсировать хрупкость сверхпроводящего материала, изготавливая их в так называемой архитектуре проводника с покрытием. Эта технология основана на сложной многослойной структуре буферных слоев (до 7 слоев) и двухосно текстурированных сверхпроводящих пленок на металлических подложках. Однако такая сложная структура ограничивает применение из-за высокой стоимости и временных затрат на производство. Кроме того, плотность критического тока в проводниках с покрытием на основе редкоземельных металлов сильно снижается при увеличении разориентации зерен буферного слоя и, соответственно, пленок выше 4 угловых градусов, и сильно зависит от угла приложенного магнитного поля к плоскости провода вследствие большой анизотропии. Исследования безбуферных пленок на аморфной подложке крайне актуальны, поскольку разработка сверхпроводящих проводов на основе тонких плёнок FeSeTe предлагает потенциально недорогую и интересную альтернативу проводам на основе купратных сверхпроводников на основе редкоземельных элементов для

применений в магнитах и современной электронике при гелиевом уровне охлаждения.

Цель работы состояла в формировании сверхпроводящих плёнок тетрагонального селенида железа интеркалированного теллуром $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ на аморфных диэлектрических подложках без буферного слоя и исследовании их физических характеристик при низких температурах.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 106 страниц текста, содержащих 33 рисунка, 3 таблиц и 84 наименований цитируемых источников.

Во введении приведены общие данные по классу железосодержащих сверхпроводников, вызывающих большой интерес с момента их открытия и приведены характеристики железосодержащих сверхпроводников так называемой группы 11, к которому относятся сверхпроводники тетрагонального халькогенида железа $\text{Fe}_{1+\delta}\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x$, обладающие простейшей кристаллографической структурой, облегчающей фундаментальные исследования в связи со своей низкой токсичностью и низкой структурной анизотропией. В заключительной части введения показана актуальность выбранной темы, степень ее обоснованности, сформулирована цель и поставлены основные задачи для ее достижения, приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, а также положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена аналитическому обзору научной литературы по железосодержащим сверхпроводникам с акцентом на систему $\text{FeSe}/\text{FeSeTe}$. Рассмотрены основные семейства железосодержащих сверхпроводников, их кристаллоструктурные особенности, а также место соединений FeSe среди железосодержащих сверхпроводящих материалов. 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.

Во второй главе диссертационной работы описываются экспериментальные методы, использованные в данной работе, в частности

подготовке мишеней, подложек и получение тонких плёнок FeSeTe методом импульсного лазерного осаждения. Глава содержит описание разработанной установки для импульсно-лазерного осаждения пленок FeSeTe. В данной работе использовались две вакуумные камеры и один лазер. В первой камере ранее напылялись сверхпроводники YBCO, диэлектрики и металлы. Поскольку осаждение железосодержащих сверхпроводников и оксидных YBCO невозможно в одной камере в силу сильного загрязнения всей камеры первыми, была разработана и создана новая вакуумная камера для осаждения селенида железа. Основное отличие от камеры для нанесения оксидных купратов YBCO заключалось в отказе от использования зеркала и диафрагмы, что позволило автору добиться большей плотности энергии, также был произведен тщательный подбор материалов более высокого качества с целью улучшения качества и чистоты процесса лазерной абляции. Также был уменьшен объем камеры, что значительно сократило время откачки с атмосферного до рабочего давления. Были рассчитаны параметры, необходимые для получения максимальной плотности энергии лазера на мишени. По этим параметрам была изготовлена новая фокусирующая линза. В главе приведено описание лабораторного технологического маршрута для воспроизводимого получения пленок. Приведены методы исследования полученных образцов. Для измерения электродинамических характеристик образцов использовалась измерительная установка Quantum Design PPMS (Physical Property Measurement System) с применением четырёхзондового метода. Магнитометрические измерения выполнялись с использованием встроенного вибрационного магнитометра на той же установке, а также на установке MPMS (СКВИД-магнитометр). Рентгеноструктурный анализ пленочных образцов FeSeTe на аморфных стеклянных подложках был выполнен на дифрактометре Empyrean PANalytical в излучении CoK_α . Микроструктура образца была исследована методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе TESKAN MIRA с приставкой для микроанализа Ultim MAX. Морфология поверхности полученных пленок FeSeTe была исследована на сканирующем электронном микроскопе TESKAN MIRA с приставкой для рентгеновского микроанализа Ultim Max Oxford Instruments и прописями на сканирующих зондовых

микроскопах Solver Next и AIST-NT. Для контроля стехиометрического состава пленок на разном расстоянии от интерфейса с подложкой использовалась рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия. Таким образом, автор применил целый набор современных экспериментальных методов для характеристики и исследования синтезированных пленок.

В третьей главе представлены основные экспериментальные результаты по плёнкам FeSeTe, полученным методом импульсного лазерного осаждения на аморфных подложках K-208. Подробно описаны структурные и морфологические характеристики плёнок FeSeTe, приведены данные энергодисперсионного анализа состава плёнки, оказавшегося близким к номинальному FeSe_{0.5}Te_{0.5}. Описаны результаты комплексного исследования сверхпроводящих и транспортных свойств плёнок FeSe_{0.5}Te_{0.5}, рассмотрены особенности электродинамики микромостиков плёнок FeSeTe вольт-амперных характеристик с гистерезисом и без гистерезиса и результаты стехиометрического анализа плёнок FeSeTe методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с профилированием по толщине.

В четвертой главе приводится обсуждение полученных результатов для плёнок FeSe_{0.5}Te_{0.5} на аморфной подложке K-208. Остановимся на наиболее интересных с моей точки зрения результатах. Показано, что плёнки со стехиометрией, близкой к FeSe_{0.5}Te_{0.5}, характеризуются однородной морфологией, хорошей адгезией и зернистой структурой: основной размер зёрен 30–100 нм, имеются редкие включения порядка 200 нм. Среднеквадратичная шероховатость составляет 4–6 нм (поле 1×1 мкм²) и 7–10 нм (поле 10×10 мкм²). В совокупности с низкой анизотропией электродинамических параметров и высокими H_{c2} это указывает на благоприятное сочетание структурных и функциональных свойств. 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 $3\text{--}5 \times 10^4$ А/см² в собственном поле и $3\text{--}5 \times 10^3$ А/см² в поле до 4 Т при 2 К. Величина поля необратимости H_{it} при 4 К указывает на возможность бездиссипативного переноса тока в полях до 10 Тл. Сравнение контактных и бесконтактных оценок j_c показало их согласие по

порядку величины, что подтверждает корректность интерпретации транспортных и магнитных данных. В заключительной части главы перечислены основные полученные результаты.

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, разработанная технологическая схема прямого PLD-осаждения на стекло K-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 по безбуферному осаждению на аморфную подложку, обнаружению квазидвумерного поведения полученных пленок, нахождении значений физических параметров пленок, полученных на аморфной подложке, при низких температурах.

Научная значимость заключается в разработке комплексной методики формирования и исследования тонких сверхпроводящих пленок FeSeTe на аморфных диэлектрических подложках, включающей подготовку образцов, 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.

Практическая значимость заключается в демонстрации возможности получения сверхпроводящих FeSeTe - плёнок с $T_c \approx 9,5$ K, высокими значениями H_{c2} , H_{lt} и плотности критического тока при низкотемпературном (300 °C) 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 длинномерные 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. Экспериментальные исследования проведены с использованием современного технологического и измерительного оборудования с использованием признанных методик, что позволяет отнести диссертацию к работам высокого уровня. Основные выводы находятся в соответствии с известными теориями и публикациями других авторов по тематике исследований.

Замечания к диссертационной работе.

1. В работе получены оценки значений длин когерентности из известных выражений теории Гинзбурга–Ландау для анизотропных сверхпроводников, которые оказались меньше известных для монокристаллов (см. раздел 3.2.3). Автор ограничился констатацией этого факта без какого-либо обсуждения возможных причин, а нужно было указать и обсудить почему так происходит.
2. Анализ представленных на рисунке 30 зависимостей нормированной плотности силы пиннинга от нормированного на поле необратимости магнитного поля показывает, что максимум для всех исследованных случаев приходится на область $h_{\max} \approx 0,31-0,34$. По классификации такие значения характерны для коррелированного (линейного) пиннинга на протяжённых дефектах. Это могут быть границы доменов, столбчатые или планарные неоднородности. Автор только предполагает, что в исследуемых плёнках пиннинг происходит на коррелированных дефектах на границах зёрен или при структурных

неоднородностях, возникающих в процессе роста плёнки, но никаких подтверждений не приведено.

3. В разделе 3.3 третьей главы на рисунке 31(а) приведены гистерезисные вольтамперные характеристики (ВАХ) микромостика в нулевом магнитном поле, имеющие так называемый S-образный вид, и приведена рассеиваемая мощность в точках срыва с низкоомной ветви ВАХ на высокоомную при различных температурах. В известных публикациях возникновение флуктуационной гистерезисной области на ВАХ в тонких пленках металлических сверхпроводников объясняют либо классической теорией перегрева электронного газа, либо существованием чисто сверхпроводящих флуктуаций. Вызывает сожаление отсутствие какой-либо трактовки полученных результатов.

4. В разделе «Основные результаты» главы 4 автор утверждает, что понижение температуры перехода пленок (T_c) в сверхпроводящее состояние по отношению к температуре перехода мишени обусловлено переходом Березинского–Костерлица–Таулеса. При этом не упоминаются другие возможные причины этого явления, например, наличие несвязанного железа, обнаруженного при рентгенофазовом спектральном анализе.

5. Есть ряд неточностей и опечаток. Например, в подписи к рисунку 31 присутствует обозначение (г), хотя на рисунке его нет. На стр. 41 классическая термопара хромель-алюмель названа как хромель-алюминий.

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
доктор физико-математических наук
профессор
Подпись

В.А. Кульбачинский

«17» апреля 2026 г.

Кульбачинский Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор.

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена докторская диссертация: 01.04.07 – физика конденсированного состояния
119991 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2, Физический факультет МГУ, 8(495)939-3160, dean@phys.msu.ru, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (физический факультет МГУ), профессор кафедры низких температур

Подпись проф. Кульбачинского В.А.
и.о. декана физического факультета
профессор