

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.

Состав диссертационной работы:

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 объяснены причины интереса к классу железосодержащих сверхпроводников, возникшему с открытием сверхпроводимости в 2008 году в оксипниктидах железа, слоистых соединениях, аналогичных по структуре с купратными сверхпроводниками. Введение содержит также описание свойств тетрагонального халькогенида железа $Fe_{1+\delta}Se_{1-x}Te_x$ (в дальнейшем FeSeTe или FST), используемого для получения тонких пленок в представленной диссертационной работе и описание проблем на пути получения сверхпроводящих пленок FST на аморфных подложках. Сформулированы научная новизна, практическая ценность работы и положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой литературный обзор основных свойств железосодержащих сверхпроводников, входящих в так называемое семейство 11, в котором наибольший интерес представляет соединение FeSe и его интеркалированный вариант $FeSe_{1-x}Te_x$, обладающий широким стехиометрическим диапазоном существования сверхпроводимости, использованный в диссертации для получения тонких сверхпроводящих пленок. Глава содержит общее описание кристаллической структуры, сверхпроводящих свойств, пиннинга вихрей Абрикосова, второго критического поля, линии необратимости, длины когерентности этого соединения, квази-двумерных эффектов и перехода Березинского–Костерлица–Таулеса в тонких пленках FeSeTe.

Во второй главе приведена лабораторная технологическая последовательность подготовки мишеней, подложек и осаждения пленок $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ на стекло К-208. Описаны использованные методы исследования,

электродинамических характеристик пленок. Часть образцов измерялась непосредственно в виде исходных плёнок, а для более детального анализа на некоторых образцах с помощью оптической литографии и последующего травления ионами аргона были изготовлены микромостики длиной 100 мкм и шириной 20 мкм.

Глава содержит результаты рентгеноструктурного анализа полученных образцов пленок FeSeTe на аморфных подложках и их микроструктуры. Для определения стехиометрического состава пленок на разном расстоянии от интерфейса с подложкой использовалась рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия.

Третья глава посвящена результатам исследований электрофизических характеристик пленок, оценки второго критического поля $H_{c2}(T)$, положения линии необратимости $H_{irr}(T)$, значения длин когерентности, глубин проникновения магнитного поля, анализ энергии активации и механизмов пиннинга вихрей, оценку плотности критического тока в приближении однородного распределения тока по сечению образца. Уделено внимание проявлению квази-двумерных эффектов в исследуемых сверхпроводящих плёнках. Экспериментальные исследования показывают, что в тонких слоях FeSeTe наблюдается существенное отклонение сверхпроводящих свойств от объёмного поведения.

Четвертая глава посвящена обсуждению полученных в настоящей работе результатов со свойствами пленок FeSeTe на кристаллических и металлических подложках, включая CaF_2 , что является корректным и необходимым этапом работы, поскольку позволяет сравнить характеристики пленок FeSe_{0.5}Te_{0.5} на аморфной подложке K-208 с известными для пленок FeSeTe на монокристаллических подложках и на металлических лентах по критической температуре, T_c , параметрам кристаллической решетки, значениям верхнего критического поля, H_{c2} , поля необратимости, H_{irr} , плотности критического тока, j_c , и характеристикам вихревой динамики.

В заключении оценены ключевые сверхпроводящие параметры плёнок FeSeTe на аморфных подложках. В целом полученные результаты демонстрируют, что аморфные диэлектрические подложки могут служить основой для формирования 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.

Актуальность темы выполненной работы

В поисково-прикладном физическом аспекте актуальность работы 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 гелиевом уровне охлаждения. Этому способствуют отсутствие токсичности, возможность напыления при температурах $\sim 300^\circ\text{C}$ в вакууме вместо 760°C в кислородной среде, присущие железосодержащим сверхпроводникам высокие значения верхнего критического поля, не зависящие практически от направления приложенного поля по отношению к кристаллографическим плоскостям пленки. В фундаментальном аспекте 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 плёнок, напыленных на необычную - аморфную - подложку исключительно актуально.

Оценка научной новизны исследования.

В диссертационной работе Петрова А.В. получен ряд новых результатов:

- 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 с 2% примесью окиси церия CeO_2 .

- Показано, что сверхпроводящее состояние в плёнках $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ 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 ≈ 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 глубинным рентгено-фотоэлектронным спектроскопический анализом, продемонстрировавшим, что в более толстых плёнках (120 нм) поверхностная стехиометрия $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ практически совпадает с составом мишени, тогда как 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 на аморфной подложке 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 полученных результатов.

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, характеризацию пленок при низких температурах.

Практическая значимость заключается в демонстрации возможности получения сверхпроводящих FeSeTe - плёнок с $T_c \approx 9,5$ К, высокими значениями H_{c2} , H_{IT} 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 длинномерные сверхпроводящие провода при сохранении ключевых характеристик и снижении себестоимости.

Общая оценка диссертационной работы.

Диссертацию отличают комплексность и целостность исследования, включающего технологический процесс, проведение измерений характеристик полученных пленок и анализ полученных результатов. Достоверность результатов диссертационного исследования и сформулированных выводов не вызывает сомнений. Все экспериментальные данные в диссертации получены на современных установках с соблюдением проверенных процедур подготовки образцов и повторения измерений на разных сериях образцов. Результаты измерений обработаны с применением проверенных методов статистической обработки и согласуются между собой и с литературными данными для пленок FeSe_xTe_{1-x} на кристаллических подложках. Основные положения работы обсуждались на научных семинарах кафедры и докладывались на научных конференциях, ключевые результаты опубликованы в рецензируемых журналах.

К недостаткам диссертации можно отнести следующее:

В числе недостатков диссертационной работы можно упомянуть отсутствие явной оценки длины свободного пробега электронов и ее связи с длиной когерентности, а также отсутствие ее связи с удельным сопротивлением, не приведенном в явном виде.

Несмотря на отмеченные недостатки, характеризуя диссертационную работу в целом, следует отметить внутреннее единство ее структуры, логичность, связь результатов, выводов и положений, выносимых на защиту. Это делает диссертацию целостным, законченным исследованием, в котором решены поставленные задачи.

Автореферат соответствует содержанию диссертации. 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

 М.А. Тарасов

«23» *августа* 2026 г.

Тарасов Михаил Александрович, доктор физико-математических наук,
Специальность, по которой официальным оппонентом защищена докторская диссертация: 01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики.
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, лаборатория сверхпроводниковых устройств для приема и обработки информации, главный научный сотрудник

Официальный адрес с почтовым индексом и адресом электронной почты организации: 125009 Москва, Моховая ул. 11, стр. 7, ИРЭ РАН, tarasov@hitech.cplire.ru

Подпись Тарасова М.А. заверяю

Старший инспектор от
Андреева И.И.

