

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Петров Андрей Владимирович

**Тонкие пленки FeSeTe на аморфных подложках при низких
температурах**

Специальность 1.3.10 Физика низких температур

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре физики полупроводников и криоэлектроники физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: **Снигирев Олег Васильевич**, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Кульбачинский Владимир Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики низких температур и сверхпроводимости, профессор

Тарасов Михаил Александрович, доктор физико-математических наук, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, лаборатория сверхпроводниковых устройств для приема и обработки информации, главный научный сотрудник

Можяев Петр Борисович, кандидат физико-математических наук, Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Центр перспективной микроэлектроники, отделение физико-технологических исследований имени К.А. Валиева, лаборатория технологии микро- и наносистем, старший научный сотрудник

Защита диссертации состоится «14» мая 2026 г. в 15 часов 20 минут на заседании диссертационного совета МГУ.013.5 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 8, криогенный корпус, конференц-зал.

E-mail: perov@magn.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3848>

Автореферат разослан «___» _____ 2026

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.013.5,
кандидат физико-математических наук

Т.Б. Шапаева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы. Исследование сверхпроводимости в тонких железосодержащих пленках FeSeTe (FST) 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 [1] 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) [2] 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, присутствие железосодержащим сверхпроводникам высокие значения верхнего критического поля, не зависящие практически от направления приложенного поля по отношению к кристаллографическим плоскостям пленки, и возможность адаптации свойств проводников FST под конкретные задачи с помощью тонкоплёночной технологии, преодолении ограничений, связанных с объёмными материалами, и возможностью применения в качестве низкодисперсионных линий передачи высокочастотных сигналов в криоэлектронных устройствах.

Процессы успешного получения качественных пленок с высокими электрофизическими характеристиками на аморфных подложках как актуальных кандидатов на использование в сверхпроводящих проводах 3-го поколения практически не изучены, известны всего единицы публикаций на эту тему. Причина заключается в том, что интересные для длинномерных проводов материалы возможных диэлектрических гибких подложек, например, оптических световодов, и материалы, сверхпроводников FST имеют в некоторых сочетаниях коэффициенты термического расширения (КТР), отличающие почти в 20 раз, что приводит к растрескиванию полученных пленок и их отшелушиванию от подложки при перепаде температур от $\sim +300^\circ\text{C}$ при напылении до $\sim -270^\circ\text{C}$ при измерениях и образцы, пригодные для измерений, не получались. Кроме того, многие аморфные подложки-стекла, имеющие КТР близкие к КТР сверхпроводящих пленок, имеют температуры размягчения или плавления ниже, чем температуры нанесения пленок.

Единичные публикации по пленкам FST на аморфных подложках подчеркивают отсутствие разработанности данной темы исследований. Однако, необходимо отметить, что в настоящее время известно несколько сотен работ, посвященных исследованию свойств тонких пленок семейства

FST на кристаллических подложках. В частности, многие из этих работ посвящены фундаментальным исследованиям влияния напряжений, возникающих на интерфейсном слое между кристаллической подложкой и пленками этого семейства на температуру перехода в сверхпроводящее состояние, T_c , достигающую 16 - 18 К и выше на подложке CaF_2 при обычном атмосферном давлении. В этих работах широко представлены и физические характеристики получающихся пленок, что позволяет сравнивать свойства пленок FST на аморфных и кристаллических подложках. В литературе имеется также около десятка работ, посвященных исследованию электродинамических характеристик пленок FST вместо пленок REBCO на металлических лентах-подложках.

Объект исследования – тонкие плёнки $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$, сформированные методом импульсно-лазерного осаждения.

Предмет исследования – морфологические, структурные и электродинамические свойства плёнок FeSeTe на аморфных диэлектрических подложках, их критические параметры, такие как критическая температура сверхпроводящего перехода (T_c), верхнее критическое магнитное поле (H_{c2}), поле необратимости (H_{irr}), плотность критического тока (j_c) и механизмы пиннинга вихрей.

Цель работы Цель работы состояла в формировании сверхпроводящих плёнок тетрагонального селенида железа интеркалированного теллуром $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ (далее FeSeTe или FST) на аморфных диэлектрических подложках без буферного слоя и исследовании их физических характеристик при низких температурах. В начале работы было необходимо подобрать аморфные подложки с коэффициентом теплового расширения (КТР), близким к КТР пленок FeSeTe , подобрать методику импульсно-лазерного осаждения, оптимизировать режимы роста: температуру подложки, давление в камере, энергию импульса, частоту и число импульсов, обеспечивающие воспроизводимое изготовление качественных сверхпроводящих пленок. После того как эта часть общей цели была достигнута, направлением работы стало изучение физических характеристик получаемых пленок, включающее исследование морфологии, структуры, фазового состава, нахождение температурной зависимости энергии активации вихрей Абрикосова, оценку верхнего критического поля H_{c2} , поля необратимости H_{irr} и плотности критического тока j_c , и других параметров.

Для достижения поставленной указанной цели в рамках настоящей работы были сформулированы следующие **задачи**:

1. Разработать методику безбуферного импульсно-лазерного осаждения (PLD) плёнок FeSeTe на аморфные подложки и оптимизировать параметры роста.
2. Исследовать морфологию поверхности, фазовый состав и элементную однородность плёнок методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), атомно-силовой микроскопии (АСМ) и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС).

3. Определить электрофизические характеристики: зависимости сопротивления на переходе из нормального в сверхпроводящее состояние от температуры T и магнитного поля $R(T, H)$, критическую температуру T_c , критические поля H_{c2} и H_{irr} , зависимость плотности критического тока j_c от температуры и магнитного поля.
4. Провести анализ вихревой динамики термически активированных вихрей, определить энергию их активации, а также характер центров пиннинга.
5. Выявить механизмы, определяющие значения T_c , проявление квазидвумерных эффектов и перехода Березинского–Костерлица–Таулеса (БКТ).
6. Оценить перспективность применения полученных плёнок для создания ВТСП-проводов третьего поколения.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. 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 , что выше известных результатов.
2. Обнаружено, что в отличие от ситуации с FeSeTe пленками на монокристаллических подложках, демонстрирующих более высокие T_c , чем у распыляемой мишени с $T_c \approx 14$ К, полученные значения T_c для пленок на аморфной подложке ниже, чем у мишени.
3. 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 $\approx 0,60$ 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.
4. 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 спектроскопическим анализом, продемонстрировавшим, что в более толстых плёнках (120 нм) поверхностная стехиометрия $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ 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.
5. 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 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$.

6. 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 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, 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 за счет изменения элементного фазового состава в осаждаемой пленке 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 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 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.

Методология исследования. В работе использовался комплексный экспериментальный подход, включающий:

- импульсно-лазерное осаждение (PLD) тонких плёнок;
- атомно-силовую микроскопию (АСМ), сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) с микроанализом, рентгено-фотоэлектронную спектроскопию (РФЭС);
- электрофизические измерения на системе PPMS (Physical Property Measurement System Quantum Design): зависимости $R(T,H)$, вольт-амперные характеристики, измерения магнитного момента с использованием вибрационного магнитометра (VSM) и СКВИД-магнитометрии;

- анализ критических параметров в рамках моделей TAFF (Thermally Activated Flux Flow) и Dew–Hughes для силы пиннинга.

Положения, выносимые на защиту.

1. Прямое импульсно-лазерное осаждение (PLD) плёнок $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ на аморфное боросиликатное стекло К-208 с 2% CeO_2 без буферных слоёв обеспечивает формирование устойчивого сверхпроводящего состояния с критической температурой перехода T_c до 9.5 К, что обосновывает реализуемость безбуферной архитектуры $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ на аморфных диэлектрических подложках.
2. Формирование в плёнках $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ на аморфной подложке К-208 интерфейсного слоя толщиной менее 40 нм с изменённой стехиометрией уменьшает эффективную сверхпроводящую толщину и приводит к проявлению квазидвумерных эффектов, включая переход Березинского–Костерлица–Таулеса при $T_{\text{ВКТ}} \approx 7$ К, а также к понижению T_c по сравнению с мишенью, что обосновывает определяющую роль состояния интерфейса плёнка–подложка в формировании квазидвумерного сверхпроводящего состояния и снижении T_c в безбуферных плёнках на аморфных подложках.
3. Анализ вихревой динамики в плёнках $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ на К-208 по температурно-полевым зависимостям сопротивления обеспечивает определение энергии активации вихрей $U(H)$ и поля необратимости и указывает на доминирование коррелированного пиннинга на планарных дефектах, что выявляет механизм пиннинга, обеспечивающий значения активационной энергии и критических характеристик, сопоставимых с характерными для плёнок $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ на монокристаллических подложках.
4. Анализ сверхпроводящего перехода в магнитном поле для двух ориентаций поля относительно плоскости плёнки и транспортных характеристик плёнок $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ на аморфной подложке обеспечивает оценку ключевых параметров: $H_{c2}(0) \approx 68$ Тл ($H \parallel ab$) и 51 Тл ($H \perp ab$), $\gamma \approx 1.3$, $\xi_{ab} \approx 2.5$ нм, $\xi_c \approx 1.9$ нм, j_c до $(5 - 6) \times 10^4$ А/см² при 2 К, что подтверждает сопоставимость совокупности критических параметров безбуферных плёнок на аморфной подложке с параметрами плёнок $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ на монокристаллических подложках.
5. Прямое PLD-осаждение плёнок $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ на аморфные диэлектрики без буферных слоёв обеспечивает возможность формирования сверхпроводящих элементов в упрощённой технологической схеме, исключаяющей стадию создания буферной архитектуры, что создает предпосылки для переноса подхода на протяжённые конфигурации сверхпроводящих структур, где критичны технологическая простота и воспроизводимость безбуферного формирования сверхпроводящего слоя.

Достоверность и обоснованность результатов. Все экспериментальные данные в диссертации получены на современных высокоточных установках (PLD-установка, SEM, РФЭС, PPMS, VSM, MPMS (Magnetic Property Measurement System) и рентгеновская дифракция (XRD)) с соблюдением единых процедур подготовки образцов и многократного

повторения измерений на разных сериях образцов. Результаты R(T,H), V-I, TAFF- и БКТ-анализов обработаны с применением проверенных методов статистической обработки и согласуются между собой и с литературными данными для $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ на кристаллических подложках. Основные положения работы неоднократно 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.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались автором на следующих всероссийских и международных конференциях:

- *Петров А.В., Снигирев О.В., Блинова Ю.В., Маресов А.Г.* Плёнки $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ на стекле с примесью CeO_2 . XXIV Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-24), г. Екатеринбург, стендовый доклад, 14 марта 2025.
- *Петров А.В., Кочергин М.Д.* Исследование возможности получения тонких плёнок $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ на аморфных подложках. XXXI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2024», секция «Физика», Москва, устный доклад, 16–24 апреля 2024.

Основные положения, результаты и выводы диссертации отражены в 3 научных статьях, все они опубликованы в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук.

Диссертационная работа соответствует научной специальности 1.3.10 Физика низких температур (паспорт научной специальности ВАК РФ), в том числе следующим пунктам:

1. Разработка физико-технических и физико-технологических основ проектирования, создания и исследования элементной базы, устройств и приборов слаботочной сверхпроводниковой электроники.
3. Разработка физико-технических и физико-технологических основ и процессов изготовления низкотемпературных и высокотемпературных проводов и кабелей на их основе;
6. Исследование механических, электрических, магнитных, оптических, тепловых и других физических свойств вещества при низких температурах.

Структура и объем диссертации. Кандидатская диссертация изложена на 106 машинописных страницах, включает введение, 4 главы, заключение и библиографию из 84 наименований; содержит 3 таблицы и 33 рисунка.

Личный вклад автора.

Формулирование темы диссертации, обоснование задач исследования, планирование работы и анализ полученных результатов проводились автором совместно с научным руководителем Снигиревым О.В. и Маресовым А.Г. Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Совместно с Пороховым Н.В. была спроектирована установка импульсного лазерного осаждения (PLD).

Автор лично собрал и отладил эту сложную установку, а также самостоятельно подобрал оптимальные режимы роста пленок (плотность энергии, давление в камере, частота, число импульсов, температура подложки, скорость нагрева). Автор лично выполнил изготовление всех исследованных образцов FeSeTe на аморфных подложках K-208. Автор лично произвел первичные магнито-резистивные измерения полученных пленок и выполнил анализ и интерпретацию полученных результатов. В плодотворной кооперации с Овченковым Е.А., Пороховым Н.В., Варлашкиным А.В. были выполнены измерения электродинамических свойств (четырёхзондовые зависимости сопротивления от температуры и магнитного поля $R(T,H)$, вольт-амперные характеристики $V-I$ при различных температурах и полях, зависимости магнитного момента от температуры и магнитного поля $M(T,H)$). Автор лично выполнил полную обработку всех полученных электродинамических данных, включая оценку плотности критического тока j_c и критических полей H_{c2} , H_{irr} , TAFF – анализ и энергию активации вихрей. Хотя рентгеноструктурный анализ, РФЭС - анализ фазового состава и подготовку мишеней осуществляли соавторы, автор совместно с Ю.В. Блиновой, А.В. Лубенченко и О.В. Снигиревым интерпретировал полученные результаты. Автор самостоятельно обработал все экспериментальные данные, в кооперации с научным руководителем Снигиревым О.В. подготовил рукописи статей для публикации в журналах и материалы докладов на конференциях.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной научной темы, описаны объект и предмет исследования, сформулированы цели, задачи и методология исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость работы, достоверность полученных результатов и личный вклад автора, а также приведены сведения об апробации работы в публикациях. Приведено краткое содержание работы.

Первая глава посвящена аналитическому обзору научной литературы по железосодержащим сверхпроводникам с акцентом на систему FeSe/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. Отдельно рассмотрены механизмы пиннинга в тонких плёнках и связь эффективности закрепления вихрей с типом дефектной структуры. Проанализированы подходы к описанию критических параметров в магнитном поле и формированию вихревой фазовой диаграммы. 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 первом разделе 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 оксидной примесью. Обоснован выбор стекла К-208 как подложки и подтверждён его аморфный характер по данным рентгеноструктурного анализа.

Во втором разделе изложена методика получения плёнок FeSeTe методом лазерной абляции. Для осаждения железосодержащих сверхпроводников разработана отдельная установка и оптимизирована оптическая схема установки с подбором условий фокусировки и плотности энергии на мишени. Схема разработанной установки для импульсно-лазерного осаждения железосодержащих сверхпроводников представлена на (рис. 1). Приведён технологический маршрут осаждения: подготовка и очистка подложек, вакуумирование, термостабилизация, осаждение, охлаждение в вакууме. Представлен оптимальный режим напыления плёнок FeSeTe на подложки К-208 (табл. 1); для защиты плёнок от деградации при переносе на измерительные установки использован защитный слой серебра.

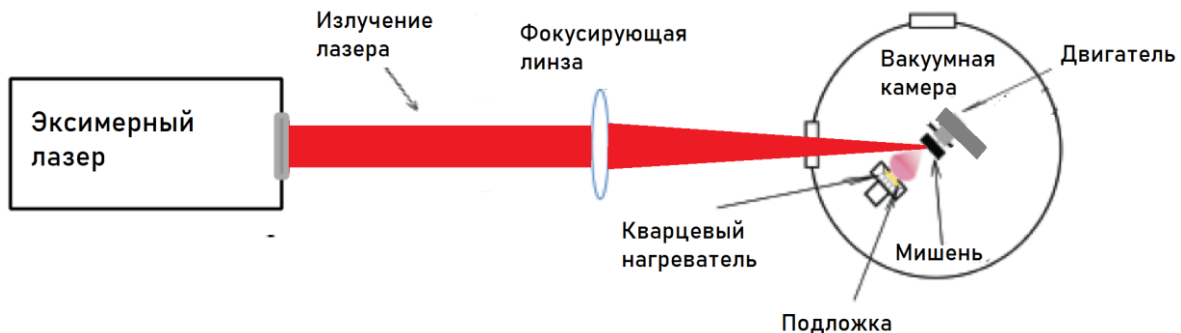


Рисунок 1 — Схема разработанной установки для импульсно-лазерного осаждения железосодержащих сверхпроводников

Таблица 1 — Оптимальный режим напыления пленок $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ на подложки К-208

Материал подложки	Мишень	$T_{осж}$, °С	$E_{осж}$, мДж	$F_{изл}$, Дж/см ²	$N_{имп}$	f , Гц	$d_{пленки}$, нм
К-208	$FeSe_{0.5}Te_{0.5}$	300	200	2	10800	3	120
	Ag	100	200	2	6000	6	50

В третьем разделе описаны методы исследования полученных образцов. Электротранспортные характеристики измерялись четырёхконтактным методом на установке PPMS как на исходных плёнках, так и на микроэлектронных структурах, сформированных методами фотолитографии и ионного травления (рис. 2). Плотность критического тока дополнительно определялась магнитометрически по петлям намагниченности с использованием VSM и СКВИД-магнитометра, с последующей оценкой в рамках модели Бина. Для структурного, морфологического и химического анализа применялись рентгенодифракция, сканирующая электронная и зондовая микроскопия, а также рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия с профилированием состава по глубине.

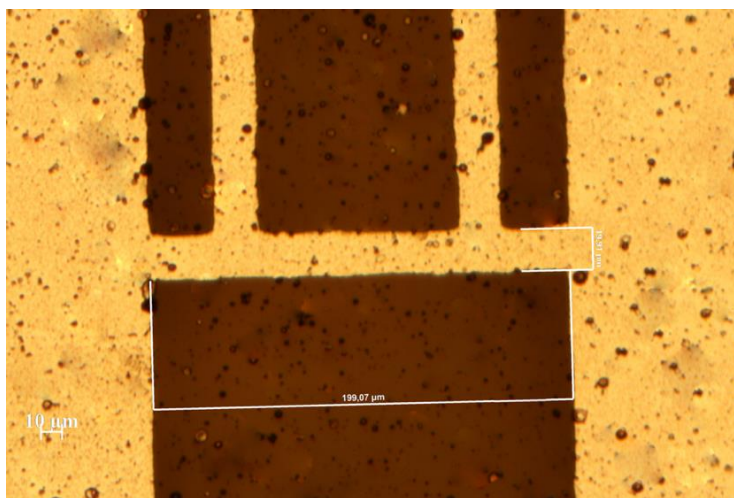


Рисунок 2 — Фотография микроэлектронной структуры в оптическом микроскопе

В третьей главе представлены основные экспериментальные результаты по плёнкам FeSeTe , полученным на аморфных подложках К-208 методом импульсного лазерного осаждения.

В первой части третьей главы подробно описаны структурные и морфологические характеристики плёнок FeSeTe , полученных на аморфных подложках К-208 методом импульсного лазерного осаждения. Показано, что плёнка толщиной 120 нм имеет однородную плотную структуру; преобладающий размер зёрен составляет 30–100 нм, при наличии редких более крупных включений порядка 200 нм (рис. 3).

По данным энергодисперсионного анализа состав плёнки близок к номинальному $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$, а локальный разброс содержания элементов по поверхности не превышает ~5% (табл. 2). По результатам сканирующей зондовой микроскопии среднеквадратичная шероховатость поверхности составляет 4–6 нм в поле $1 \times 1 \text{ мкм}^2$ и 7–10 нм в поле $10 \times 10 \text{ мкм}^2$, что подтверждает хорошее качество поверхности (рис. 4) [A1].

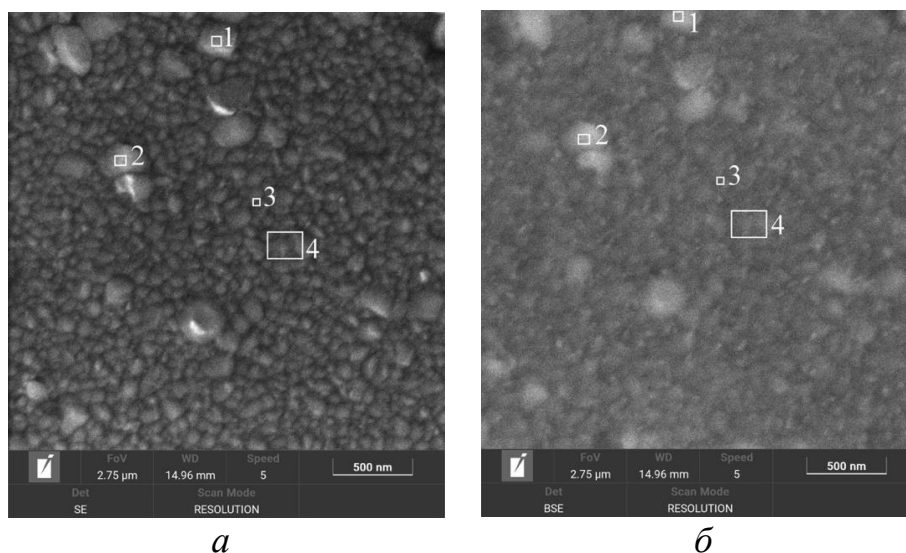


Рисунок 3 — Фотография участков поверхности пленки FST и мест спектрального анализа фазового состава пленки: а — Режим SE; б — режим BSE

Таблица 2. Результаты микроанализа элементного состава пленки.

Элемент	Участок 1 Ат. %	Участок 2 Ат. %	Участок 3 Ат. %	Участок 4 Ат. %
Fe	50.1	50.5	50.0	50.0
Se	27.1	26.5	27.1	27.2
Te	22.8	23.0	22.9	22.7

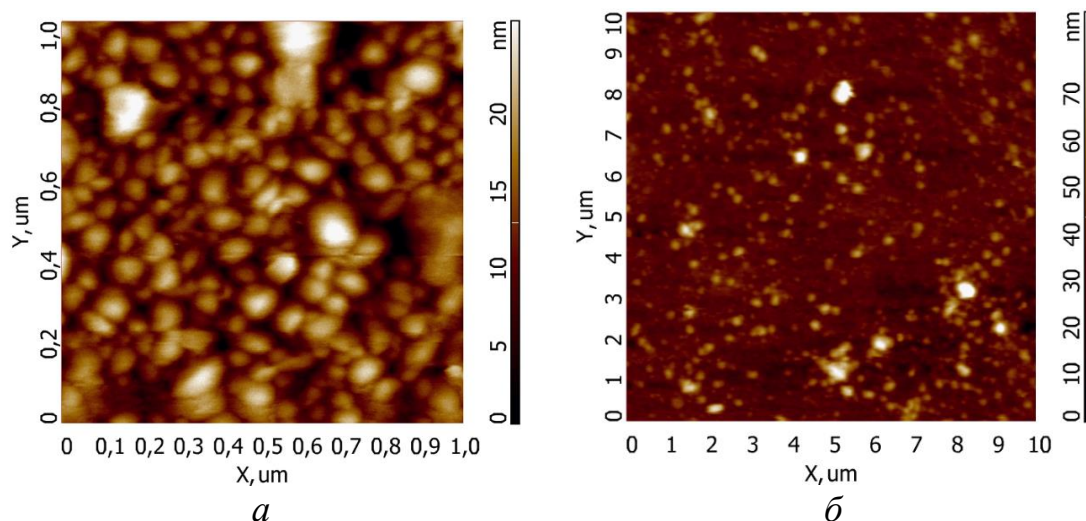


Рисунок 4 — Изображение поверхности пленки зондовым микроскопом: а — в поле 1×1 мкм²; б — в поле 10×10 мкм².

Для образцов толщиной 40 и 120 нм выполнено рентгенодифракционное сопоставление: в обоих случаях формируется текстура (001), при этом параметры решётки различаются, что указывает на влияние толщины на структурные характеристики плёнок (рис. 5) [A2].

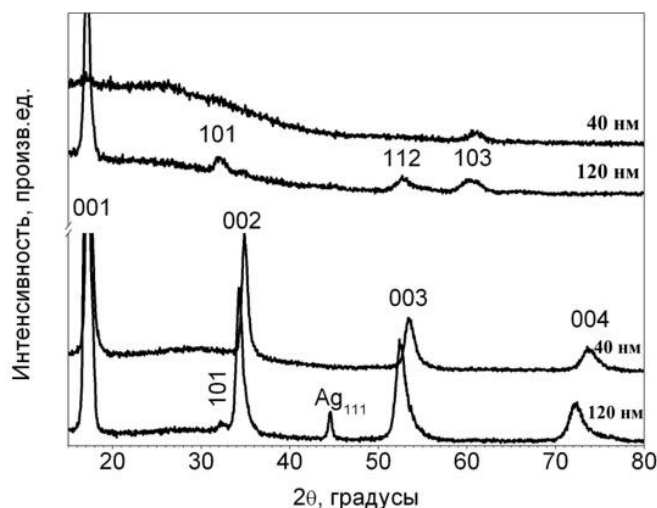


Рисунок 5 — Рентгеновские дифрактограммы образцов толщиной 40 нм и 120 нм, две верхние дифрактограммы измерены в геометрии скользящего падения, угол между первичным пучком и плоскостью образца – 1° , две нижние – в симметричной геометрии

Во второй части третьей главы приведены результаты комплексного исследования сверхпроводящих и транспортных свойств плёнок $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ толщиной 120 нм на аморфных подложках К-208. Анализ выполнен как на нелитографированных квадратных образцах, так и на микромостиках 100×20 мкм, что позволило сопоставить интегральные характеристики плёнки и локальный транспорт в геометрии малого поперечного сечения.

По зависимостям $R(T, H)$ установлено, что в нулевом магнитном поле для нелитографированного образца температура перехода по середине составляет $T_{c(\text{mid})} \approx 9,5$ К, температура начала перехода $T_{c(\text{onset})} \approx 11,5$ К, ширина перехода $\Delta T_c \approx 3$ К. Для микромостика получены $T_{c(\text{onset})} \approx 12,5 \pm 0,5$ К, $T_{c(\text{zero})} \approx 7$ К и $\Delta T_c \approx 3,5$ К. При увеличении магнитного поля до 9 Т сверхпроводящий переход смещается в область 6–7 К (рис. 6). В интервале 300–10 К наблюдается слабая температурная зависимость сопротивления, что соответствует поведению материала в грязном пределе [А3].

На основе полевых зависимостей сопротивления, по критериям $0,9R_n$ и $0,1R_n$, построены $H_{c2}(T)$ и $H_{irr}(T)$. Экстраполяция в область низких температур дала $H_{c2\parallel ab}(0) \approx 68$ Тл и $H_{c2\perp ab}(0) \approx 51$ Тл; анизотропия составляет $\gamma \approx 1,3$ (рис. 7). Рассчитанные длины когерентности равны $\xi_{ab}(0) \approx 2,5$ нм и $\xi_c(0) \approx 1,9$ нм. Для глубины проникновения магнитного поля из литературных данных и отношения длин когерентности получены оценки $\lambda_{ab} \approx 880$ нм и $\lambda_c \approx 1150$ нм. При толщине плёнки $d = 120$ нм характерный магнитный масштаб в плоскости $\lambda_{\perp} \approx 6,5$ мкм, что указывает на совместное проявление объёмных и квазидвумерных признаков сверхпроводящего состояния [А1].

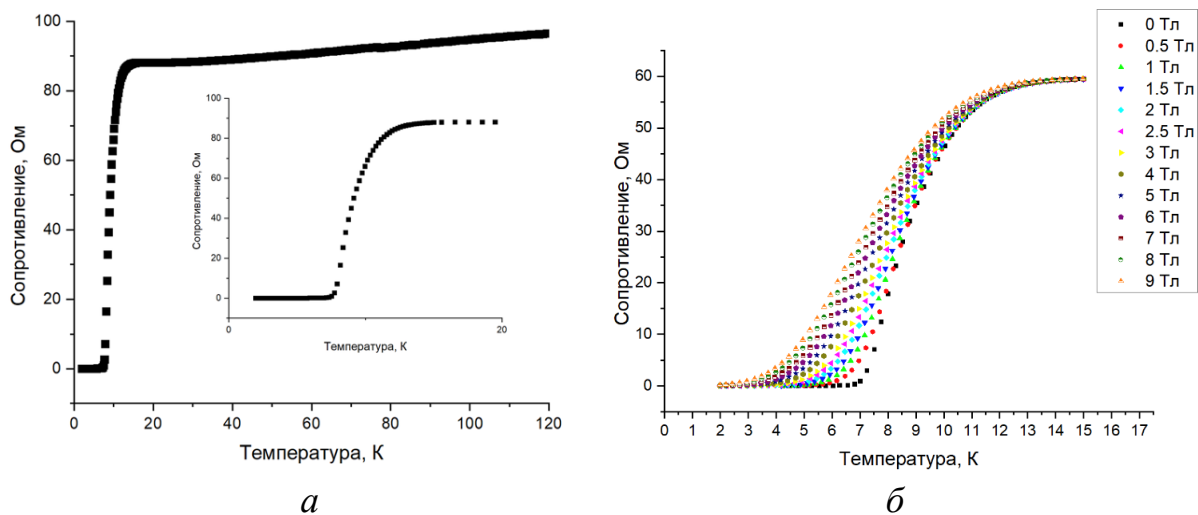


Рисунок 6 — Температурная зависимость сопротивления полученной пленки FST (120 нм) на стекле К-208, $T_c = 9,5$ К в нулевом поле — а. Зависимость сопротивления R от температуры T при различных магнитных полях для образца, $H//c$ — б

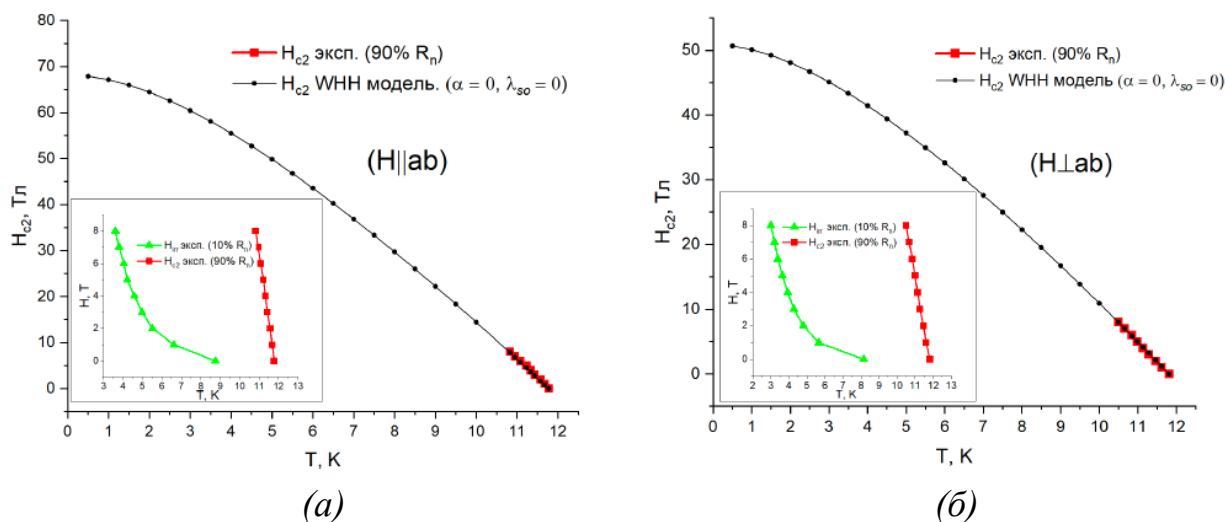


Рисунок 7 — Зависимости второго критического поля H_{c2} (квадраты — экспериментальные точки $H_{c2}(T)$, кружки — аппроксимация по формуле Вертхамера–Хельфанда–Хоенберга и линии необратимости H_{irr} (на вставках; треугольники — экспериментальные точки H_{irr} по критерию $0,1 R_n$) от температуры для образца при поле, параллельном плоскости ab — а, и перпендикулярном ей — б.

Отдельно выполнен анализ термоактивационного переноса в рамках модели TAFF. По зависимостям $\ln R$ от $1/T$ показано, что энергия активации вихрей уменьшается с полем по степенному закону $U(H) \sim H^{-\alpha}$. Для нелитографированного образца получено $\alpha \approx 0,5-0,6$, а для микромостика в области высоких полей α возрастает до $\approx 0,78$; при этом фиксируется перегиб в районе $H \approx 7$ Т, что отражает изменение режима пиннинга и усиление вклада коррелированных центров закрепления (рис. 8) [A1].

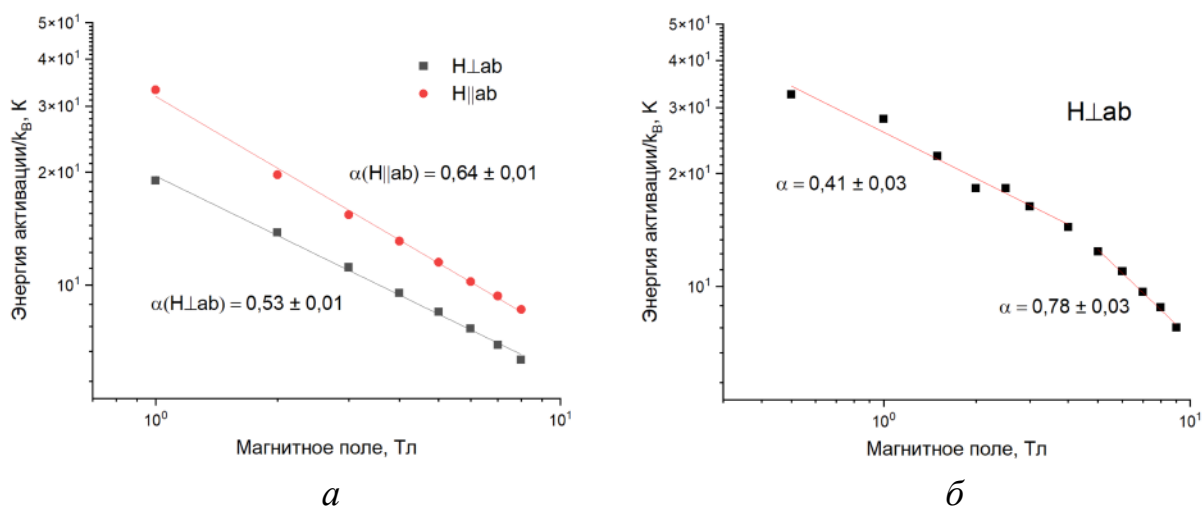


Рисунок 8 — Зависимость энергии активации вихрей Абрикосова при двух ориентациях магнитного поля для нелиитографированного образца – а; и для микрострипа – б.

По вольт-амперным характеристикам определена критическая плотность тока. Для микрострипа при 2 К получено $j_c \approx 2,5 \times 10^4$ А/см² в собственном поле и около 8×10^3 А/см² в полях до 4 Т (рис. 9). Вблизи T_c зависимость $J_c(T)$ описывается степенным законом с показателем $\alpha \approx 1$, то есть близка к линейной по $(1 - T/T_c)$. Дополнительно оценена мощность срыва $P^* = J_c U_c$: в диапазоне 2–5,5 К она увеличивается от $(4-5) \times 10^{-3}$ мВт до $(2,5-3,0) \times 10^{-2}$ мВт [A1, A3].

Для независимой проверки уровня транспортных характеристик выполнены бесконтактные магнитные измерения. При 2 К получены оценки $j_c \approx 1,25 \times 10^4$ А/см² (VSM) и $j_c \approx 2,3 \times 10^4$ А/см² (СКВИД), что согласуется с контактными измерениями. Согласование контактных и бесконтактных оценок критической плотности тока подтверждает достоверность полученных результатов и устойчивость сверхпроводящих свойств в широком диапазоне температур и полей, что принципиально важно для практического использования таких плёночных структур. Анализ нормированной силы пиннинга $f_p(h)$ показал максимум при $h_{max} \approx 0,31-0,34$; параметры аппроксимации $p \approx 0,6-0,7$ и $q \approx 1,1-1,5$ соответствуют доминированию коррелированного (линейного) пиннинга на протяжённых дефектах (рис. 10) [A1].

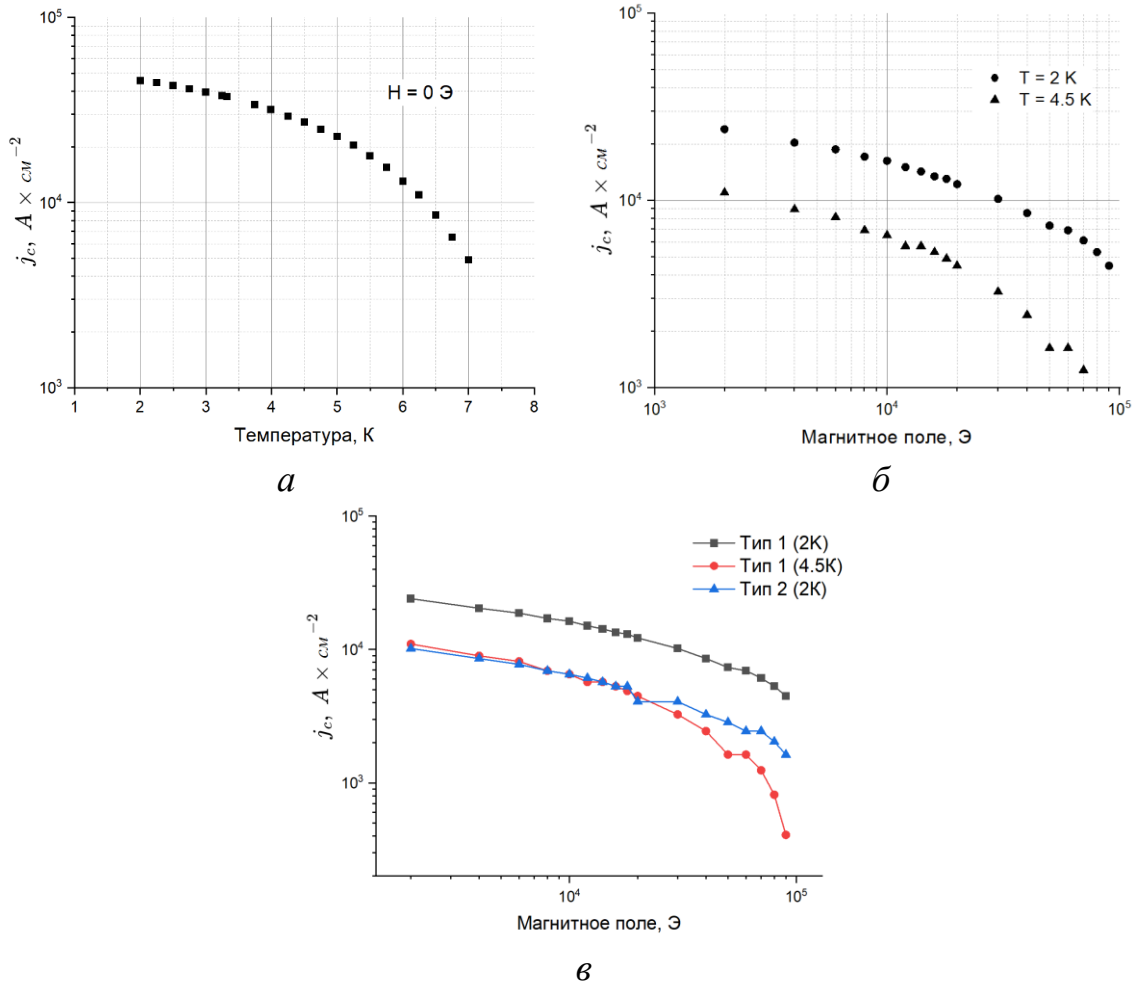


Рисунок 9 — Зависимость плотности критического тока от температуры в нулевом поле — а; зависимость плотности критического тока от магнитного поля при температурах 2 К и 4,5 К — б; сравнительный график зависимостей плотности критического тока от магнитного поля для различных микромостиков — в

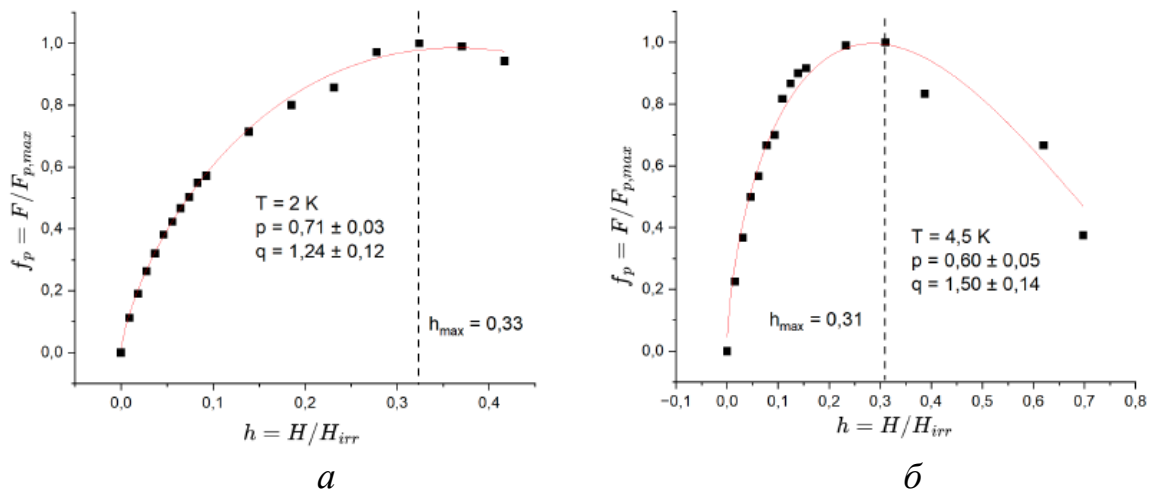


Рисунок 10 — Зависимость нормированной плотности силы пиннинга $f_p(h)$ от нормированного на поле необратимости магнитного поля $h = H/H_{irr}$ при температуре 2 К — а; и 4,5 К — б

Итогом второй части главы является количественно подтверждённое описание ключевых параметров сверхпроводящего состояния, вихревой динамики и пиннинга в плёнках $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ на аморфных подложках, включая их поведение в широком диапазоне температур и магнитных полей.

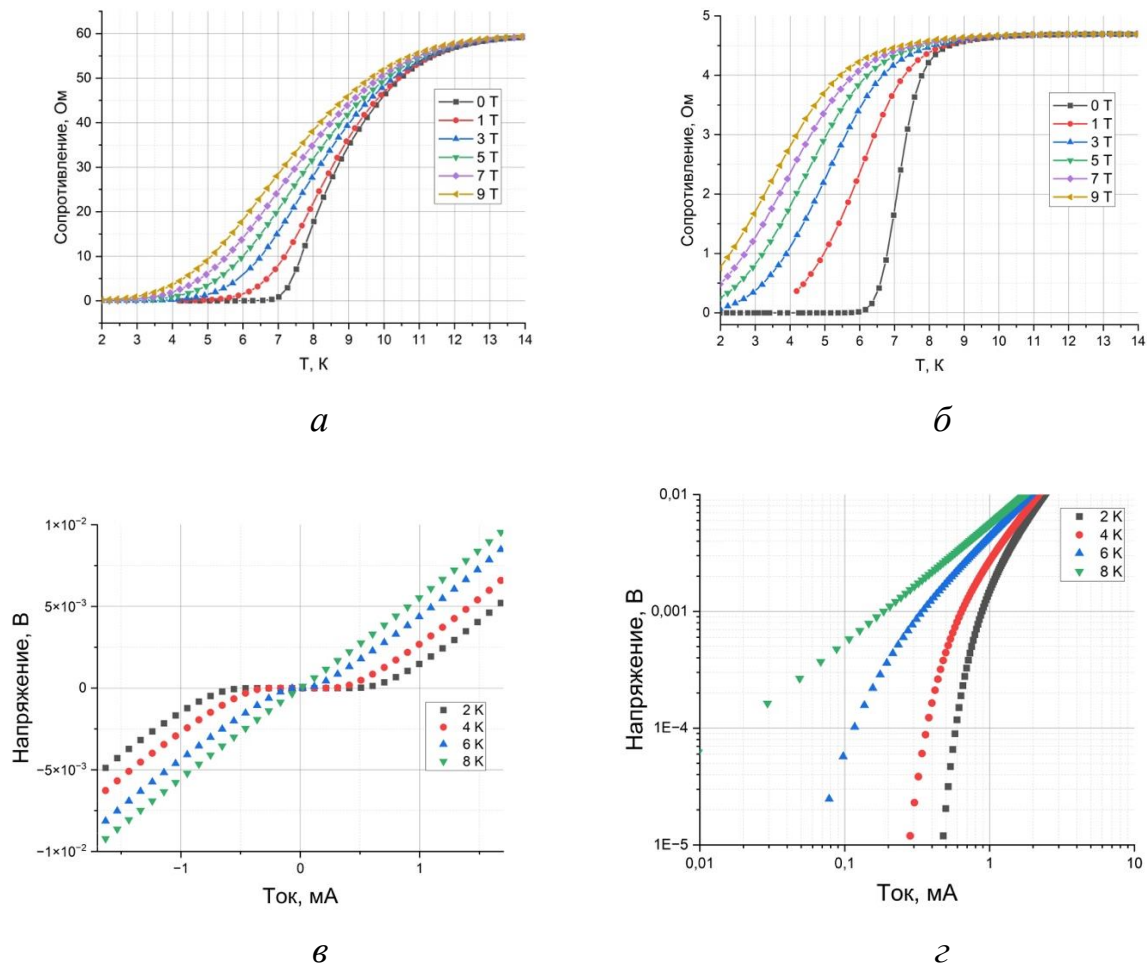


Рисунок 11 — Электродинамические характеристики микромостиков образцов пленок типа А и Б. Зависимость сопротивления образцов типа А – а; и типа (Б) – б от температуры при различных значениях магнитного поля. Общий вид вольт-амперной характеристики образца типа (Б) – в; и начальный участок ВАХ вблизи критического тока образца типа (Б) в нулевом поле при различных температурах – з

В третьей части третьей главы рассмотрены особенности электродинамики микромостиков плёнок FeSeTe толщиной 120 нм, для которых выявлены два типа поведения: образцы типа А с гистерезисом вольт-амперных характеристик и образцы типа Б без гистерезиса [А2]. Для образцов типа А температура сверхпроводящего перехода по середине составляет $T_c \approx 9,5$ К. Анализ участка ВАХ вблизи критического тока в нулевом поле в координатах $V \sim I^n$ показал выполнение критерия $n = 3$, что соответствует температуре БКТ-перехода $T_{\text{БКТ}} = 7,5$ К. Для образцов типа Б установлено более низкое значение $T_c \approx 7,5$ К, более сильное влияние магнитного поля на температуру полного перехода, а также наличие БКТ-перехода при $T_{\text{БКТ}} = 5,5$

К. Сопоставление характеристик двух типов показало: для типа А $j_c = 5 \times 10^3$ А/см² (при 7 К) и 5×10^4 А/см² (при 2 К), $U/k_B = 50$ К, $H_{c2}(0) \approx 50$ Тл; для типа Б $j_c = 5 \times 10^3$ А/см² (при 5,5 К) и 2×10^4 А/см² (при 2 К), $U/k_B = 80$ К, $H_{c2}(0) \approx 8$ Тл. Сравнение электродинамических характеристик образцов типов А и Б представлено на рисунке 11.

В четвёртой части третьей главы приведены результаты стехиометрического анализа плёнок FeSeTe методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с профилированием по толщине [A2]. Для плёнки исходной толщиной 40 нм построены профили относительных концентраций элементов до распыления и после четырёх этапов ионного травления, для плёнки толщиной 120 нм — до распыления и после двух этапов. Анализ выполнен по линиям Fe2p, Te3d, Se3p и O1s. Дополнительно для плёнки 40 нм после третьего этапа распыления представлены спектры Fe2p и Se3p с разложением на компонентные пики, что позволило выделить вклад отдельных химических состояний по толщине плёнки. Результаты стехиометрического профилирования и спектрального разложения представлены на рисунке 12.

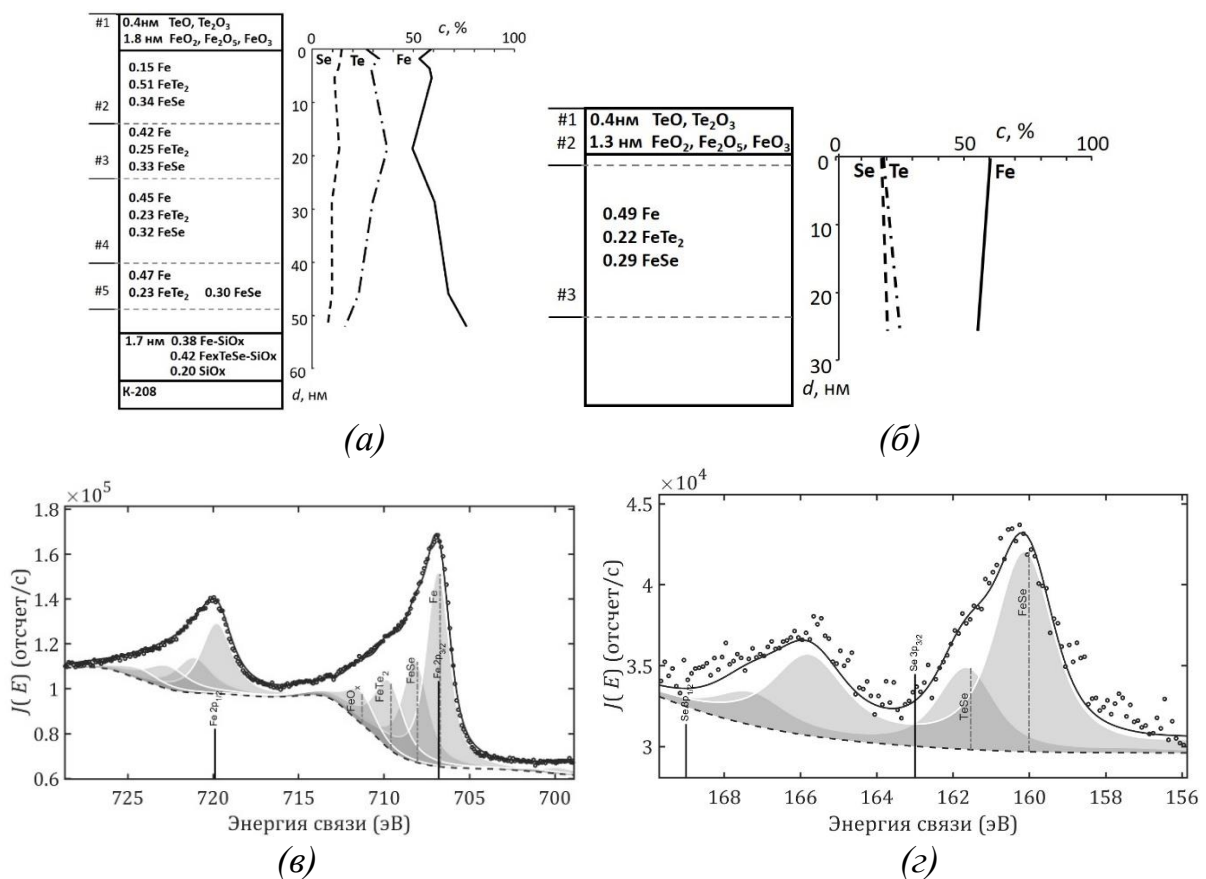


Рисунок 12 — Исследование стехиометрического состава пленок по толщине методом РФЭС. Распределение состава в плёнке толщиной 40 нм — а; и в плёнке толщиной 120 нм — б. Рентгеновский фотоэлектронный спектр для плёнки с исходной толщиной 40 нм после 3 этапа распыления: линия Fe 2p — в; спектр линии Se 3p — г. Закрашенными площадями показаны фазовые пики, пунктиром фон

В четвертой главе выполнено обсуждение полученных результатов для плёнок $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ на аморфной подложке К-208, содержащей CeO_2 . Показано, что достигнутая температура сверхпроводящего перехода плёнки $T_c = 9.5$ К выше, чем для плёнок на боросиликатном стекле Fischer Scientific, но ниже температуры перехода мишени $T_c(\text{M}) = 14$ К [3]. Отмечено, что такая картина отличается от типичного поведения плёнок $\text{FeSe}/\text{FeSeTe}$ на кристаллических подложках, где за счёт деформаций T_c обычно возрастает; в качестве сопоставления приведены данные для подложек CaF_2 (T_c до 18–19 К) [4]. При этом для исследуемой плёнки получены параметры элементарной ячейки $a = 3.760$ Å и $c = 6.045$ Å, однако даже при таких параметрах T_c остаётся ниже, чем у мишени и кристаллов данного состава.

Показано, что плёнки со стехиометрией, близкой к $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$, характеризуются однородной морфологией, хорошей адгезией и зернистой структурой: основной размер зёрен 30–100 нм, 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 $f_p(h)$ и $U(H)$ 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 $H_{irr}(4$ 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.

Анализ энергии активации вихрей показал, что значения U ниже, чем в оксидных ВТСП-плёнках, но сопоставимы с монослойной $\text{FeSe}/\text{SrTiO}_3$ [5] и монокристаллами FeSeTe [6]. Полевая зависимость $U(H)$ монотонна во всём исследованном диапазоне, а показатель степени указывает на существенный вклад планарных дефектов в пиннинг. Дополнительно обсуждены два типа микромостиков (с гистерезисом ВАХ и без него): в обоих случаях обнаружен переход Березинского–Костерлица–Таулеса, что согласуется с квазидвумерным характером сверхпроводимости [7]. Рассмотрены возможные причины гистерезиса (перегрев электронного газа и внутренние флуктуации) [8], а также отмечено, что вопрос о размерности сверхпроводимости в железосодержащих системах остаётся дискуссионным [3, 9].

По данным рентгеноструктурного анализа для плёнок 120 и 40 нм подтверждено различие параметров решётки (120 нм: $a = 3.80$ Å, $c = 6.05$ Å; 40 нм: $a = 3.75$ Å, $c = 5.98$ Å), что указывает на отличие начальных слоёв от более толстых областей. Оценка размер областей когерентного рассеяния по методу Вильямсона–Холла [10] дала значения 34 ± 3 нм. РФЭС-профилирование показало, что в плёнке 40 нм верхний слой обеднён Se (переход от $\text{Fe}_1\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ к $\text{Fe}_1\text{Se}_{0.2}\text{Te}_{0.7}$), тогда как в плёнке 120 нм верхние слои

ближе к стехиометрии мишени. Выявлен приповерхностный оксидный слой толщиной около 2 нм, практически не зависящий от общей толщины плёнки; оксиды Se не обнаружены. Наличие слоя 30–40 нм с изменённой стехиометрией у интерфейса согласуется с предположением о преимущественном протекании тока в верхней части плёнки и, как следствие, с проявлением квазидвумерной сверхпроводимости и БКТ-перехода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана и апробирована комплексная методика формирования тонких сверхпроводящих пленок FeSeTe на аморфных диэлектрических подложках с устойчивой сверхпроводящей фазой с T_c до 9,5 К при безбуферном осаждении.
2. Обнаружено, что в отличие от ситуации с FeSeTe пленками на монокристаллических подложках, демонстрирующих более высокие T_c , чем у распыляемой мишени с $T_c \approx 14$ К, полученные значения T_c для пленок на аморфной подложке ниже, чем у мишени
3. Показано, что сверхпроводящее состояние в плёнках FeSe_{0.5}Te_{0.5} на аморфной подложке К-208 носит квазидвумерный характер и определяется, в основном, приповерхностным слоем. Квазидвумерный характер поведения подтверждается наличием перехода Березинского–Костерлица–Таулеса (БКТ), приводящим к понижению температуры перехода пленок (T_c) в сверхпроводящее состояние и поведением зависимостей $R(T, H)$ от температуры и магнитного поля.
4. Показано, что при толщинах больше 40 нм, в пленках FeSeTe на аморфных подложках существует механизм самотекстурирования за счет изменения элементного фазового состава при росте пленки. Найдены параметры тетрагональной ячейки для пленок с толщинами близкими к 120 нм: $a = 3,760$ Å, $c = 6,045$ Å. Решетка сжата в плоскости ab и растянута вдоль оси c относительно монокристаллов FeSeTe.
5. Найдены физические характеристики пленок FST при низких температурах - значения плотности критического тока: $(3 \div 5) \times 10^4$ А/см² в собственном поле, поля необратимости $H_{irr}(4\text{ К})$ до 10 Тл, длин когерентности $\xi_{ab}(0) \approx 2,5$ нм и $\xi_c(0) \approx 1,9$ нм, лондоновских глубин проникновения магнитного поля λ_{ab} и λ_c , что вместе с полученными оценками высоких значений верхнего критического поля $H_{c2}(0)$ вблизи нулевой температуры показывает перспективность пленок FST на аморфных гибких диэлектрических подложках для высокополевых применений.
6. Выполнен совокупный анализ глубинно-зависимого рентгеновского фотоэлектронного спектроскопического исследования, данных о длинах когерентности, лондоновских глубин проникновения и наблюдаемого БКТ-перехода показавший, что при условии, что толщина пленки $d \gg \xi_c$ и $d \ll \lambda_{\perp} = \frac{\lambda_c^2}{d}$ ток преимущественно течёт в верхней части плёнки. Это приводит к возникновению квазидвумерного режима сверхпроводимости

при трёхмерности плёнки по показателю - отношению длины когерентности, ξ_c , к межплоскостному расстоянию, c .

7. Установлено, что динамика вихрей Абрикосова в исследуемых плёнках описывается моделью термоактивированного движения вихрей (ТАФФ) во всём исследованном диапазоне магнитных полей, причём энергия активации $U(H)$ уменьшается по степенному закону $U(H) \sim H^{-\alpha}$ с показателем $\alpha \approx 0,5 - 0,6$ для нелиитографированного образца и возрастанием α до $\approx 0,78$ для микромостика в высоких полях. Показано, что энергия активации вихрей в пленках FeSeTe на аморфных подложках сравнима с данными для FeSeTe на кристаллических подложках и обусловлена протяженными планарными дефектам.

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 квазидвумерного 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.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных журналах, индексируемых в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук:

[A1] Петров А.В., Снигирев О.В., Маресов А.Г., Блинова Ю.В., Порохов Н.В., Чареев Д.А., Варлашкин А.В., Цветков А.Ю. Характеристики плёнок FeSe_{0.5}Te_{0.5} на аморфной подложке // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2025. № 6. С. 2560504. Импакт фактор 0,52 (РИНЦ). Объем 0,6 п.л. Вклад автора: 0,5. DOI 10.55959/MSU0579-9392.80.2560504.

[A2] Петров А.В., Снигирев О.В., Овченков Е.А., Маресов А.Г., Блинова Ю.В., Девятериков Д.И., Порохов Н.В., Чареев Д.А., Лубенченко А.В. Структура пленок FeSeTe на аморфной подложке // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2025. Т. 89. № 11. С. 1734–1741. Импакт фактор 0,7 (РИНЦ). Объем 0.5 п.л. Вклад автора: 0.5. EDN: UDNWAZ.

Petrov A.V., Snigirev O.V., Ovchenkov E.A., Maresov A.G., Blinova Yu.V., Devyaterikov D.I., Porokhov N.V., Chareev D. A., Lubenchenko A.V. Structure of

FeSeTe films on amorphous substrate // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2025. Vol. 89. No. 11. P. 2094–2101. Объем 0.5 п.л. Вклад автора: 0.5. EDN: CIPVIN.

[A3] Петров А.В., Снигирев О.В., Овченков Е.А., Блинова Ю.В., Порохов Н.В., Шевченко А.Р., Чареев Д.А., Маресов А.Г. Плёнки $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ на стекле с примесью CeO_2 // Вестник МГУ. Серия 3: Физика, астрономия. 2025. № 2. С. 2520502. Импакт фактор 0,52 (РИНЦ). Объем 0.5 п.л. Вклад автора: 0.5. EDN: EBAQEJ.

Petrov A.V., Snigirev O.V., Ovchenkov E.A., Blinova Yu.V., Porokhov N.V., Shevchenko A.R., Chareev D.A., Maresov A.G. $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ Films on glass with CeO_2 doping // Moscow University Physics Bulletin. 2025. Vol. 80. P. 306–313. Импакт фактор 0,4 (JIF). Объем 0.5 п.л. Вклад автора: 0.5. EDN: DSQFVQ

Список цитируемой литературы

1. Sprau P.O., Kostin A., Kreisel A., Böhmer A.E., Taufour V., Canfield P.C., Mukherjee S., Hirschfeld P.J., Andersen B.M., Davis J.C. Séamus. Discovery of orbital-selective Cooper pairing in FeSe // Science. 2017. Vol. 357, No. 6346. P. 75–80.

2. Piperno L., Vannozzi A., Augieri A., Masi A., Mancini A., Rufoloni A., Celentano G., Braccini V., Cialone M., Iebole M., Manca N., Martinelli A., Meinero M., Putti M., Meledin A. High-performance Fe(Se,Te) films on chemical CeO_2 -based buffer layers // Sci. Rep. 2023. Vol. 13. P. 569.

3. Chen L., Tsai C.-F., Lee J.H., Zhang X., Wang H. Highly textured superconducting $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ thin films on glass substrates // Japanese Journal of Applied Physics. 2013. Vol. 52. P. 020201.

4. Iebole M., Braccini V., Bernini C., Malagoli A., Manca N., Martinelli A., Cialone M., Putti M., Singh S.J., Latronico G., Mele P. Fe(Se,Te) thin films deposited through pulsed laser ablation from spark plasma sintered targets // Materials. 2024. Vol. 17, No. 11. P. 2594.

5. Zhao W., Chang C.-Z., Xi X., Mak K. F., Moodera J. S. Vortex phase transitions in monolayer FeSe film on SrTiO_3 // 2D Materials. 2016. Vol. 3, No. 2. P. 024006.

6. Kumar R., Varma G.D. Study of structural and magnetotransport properties of Fe(Te, Se) single crystals // Phys. Status Solidi B. 2020. Vol. 257. P. 1900552.

7. Zhu L., Mei C., Wei L., Sun Z., Wu S., Huang H., Zhang S., Liu C., Feng Y., Tian H., Yang H., Li J., Wang Y., Zhang G., Lu Y., Zhao Y. Quasi-two-dimensional superconductivity in $\text{FeSe}_{0.3}\text{Te}_{0.7}$ thin films and electric-field modulation of superconducting transition // Scientific Reports. 2015. Vol. 5. P. 14133.

8. Qiao L., Li D., Postolova S. V., Mironov A. Yu., Vinokur V., Rosenstein B. Dynamical instability of the electric transport in superconductors // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. P. 14104.

9. Schneider R., Zaitsev A. G., Fuchs D., von Löhneysen H. Excess conductivity and Berezinskii–Kosterlitz–Thouless transition in superconducting FeSe thin films // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2014. Vol. 26. P. 455701.
10. Williamson G.K., Hall W.H. X-ray line broadening from fcc aluminium and wolfram // *Acta Metallurgica*. 1953. Vol. 1, No. 1. P. 22–31.