

Aly Abouhasna

Абухасва Али Сами Али

Халькогениды железа вблизи экваторного состава: влияние замещения и допирования на структуру и физические свойства

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2016 г.

Работа выполнена на кафедре физики конденсированного состояния Института естественных наук и математики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Баранов Николай Викторович

Официальные оппоненты:

Биккулова Нурия Нагимьяновна, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей и теоретической физики Стерлитамакского филиала Башкирского государственного университета; г. Стерлитамак.

Митрофанов Валентин Яковлевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории статики и кинетики процессов ФГБУН Института металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии твердого тела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург

Защита состоится « 23 » декабря 2016 г. в 11-00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.003.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН) по адресу: 620990, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ УрО РАН и на сайте института: www.imp.uran.ru.

Автореферат разослан « __ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Чарикова Татьяна Борисовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из самых заметных событий последнего десятилетия в физике конденсированного состояния стало обнаружение в 2008 году сверхпроводимости в селениде железа FeSe с простой тетрагональной структурой [1]. Халькогениды переходных металлов уже на протяжении многих лет привлекают большой интерес исследователей, так как они обладают разнообразием кристаллических структур и фазовых превращений, а также необычными электрическими и магнитными свойствами [2]. В них наблюдаются фазовые переходы типа металл – изолятор, переходы в сверхпроводящее состояние или в состояние с волной зарядовой плотности [3]. Несмотря на то, что в бинарном соединении $\text{Fe}_{1+\delta}\text{Se}$ с небольшим избытком железа ($\delta \sim 0.01$) и со структурой типа PbO переход в сверхпроводящее состояние происходит при относительно невысокой критической температуре ($T_c \sim 8$ К [1]), это открытие инициировало расширение исследований халькогенидных соединений и поиск новых путей достижения более высоких критических температур. Простота кристаллической структуры позволяет рассматривать соединения типа FeSe в качестве модельных систем для выяснения механизмов сверхпроводимости в других сверхпроводниках на основе железа, имеющих более сложные кристаллические структуры. За время, прошедшее с 2008 г., различными методами выполнено большое число исследований кристаллической и электронной структуры, а также магнитных и транспортных свойств соединений на основе FeSe, в том числе, на монокристаллических [4] и пленочных образцах [5]. Установлено, что сверхпроводящие свойства и критическая температура в соединениях на основе $\text{Fe}_{1+\delta}\text{Se}$ сильно зависят от условий синтеза, от допирования или замещения как по подрешетке железа, так и по подрешетке халькогена, а также от наличия вакансий и от приложенного гидростатического давления [6]. Критическая температура T_c соединения $\text{Fe}_{1+\delta}\text{Se}$ может быть увеличена до 15 К при частичном замещении селена теллуrom, а под действием давления T_c возрастает до 37 К [6]; на тонкопленочных образцах FeSe получены значения T_c до 100 К [5], сравнимые с критическими температурами в высокотемпературных сверхпроводниках на основе купратов [7]. Хотя механизм сверхпроводимости в FeSe еще далек от понимания, но, по-видимому, в установлении сверхпроводящего состояния в этих материалах большую роль играют спиновые флуктуации [8]. Выявлена зависимость критической температуры от характеристик кристаллической структуры, в частности, от расстояния между ионом халькогена и плоскостью, в которой расположены катионы Fe [9]. Сильное влияние на сверхпроводящие свойства соединений типа $\text{Fe}(\text{Se},\text{Ch})$ с замещением селена атомами других

халькогенов (Ch = Te, S) могут играть неоднородности в распределении ионов. Кроме того, из-за узкой области гомогенности соединения $Fe_{1+\delta}Se$ и ограниченной растворимости в нем других халькогенов (S, Te), образцы на основе FeSe обычно содержат выделения других фаз, в частности, гексагональной фазы типа NiAs, что может играть значительную роль в формировании сверхпроводящих свойств [10]. Механизмы влияния посторонних фаз до конца не выяснены. Установлено, что замещение железа в тетрагональной фазе типа $Fe(Se,Ch)$ атомами других элементов или допирование, как правило, приводят к подавлению перехода в сверхпроводящее состояние, а критическая концентрация, при которой исчезает сверхпроводимость, зависит от сорта замещающих элементов. Исследование влияния смешивания халькогенов, замещения и допирования в подрешетке железа, а также присутствия различных фаз в материалах на основе FeSe на их сверхпроводящие свойства позволит глубже понять природу сверхпроводимости в железосодержащих сверхпроводниках и найти пути улучшения практически важных характеристик.

Цели и задачи работы. Целью настоящей работы являлось установление влияния изменений химического состава и соотношения фаз в условиях ограниченной растворимости на формирование сверхпроводящих свойств халькогенидов железа с составом близким к эквипомному.

Для достижения этой цели решались конкретные задачи:

- синтез халькогенидов железа с тройной смесью халькогенов $Fe_{1.02}Te_ySe_{1-y-x}S_x$ и $Fe_{1.02}Se_yTe_{1-y-x}S_x$;
- синтез халькогенидов железа $Fe_{1.02\pm x}M_xSe_{0.5}Te_{0.5}$ ($M = Ti, Pd$) с замещением или допированием по подрешетке железа;
- синтез железододефицитных относительно эквипомного состава халькогенидов типа $Fe_7(Se_{1-y}Te_y)_8$ с замещением селена теллуром;
- исследование фазового состава и кристаллической структуры фаз, определение границ существования фаз в образцах, выявление закономерностей изменения структурных параметров фаз при изменении химического состава и условий термических обработок;
- исследование изменений электрических свойств синтезированных соединений в зависимости от концентрации компонентов, фазового состава образцов и условий термообработок.

В настоящей работе были получены и выносятся на защиту следующие новые научные результаты.

1. На примере впервые синтезированных образцов типа $\text{Fe}(\text{S},\text{Se},\text{Te})$ с тройной смесью халькогенов показано, что замещение теллура или селена серой в системах $\text{Fe}_{1.02}\text{Se}_y\text{Te}_{1-y-x}\text{S}_x$ и $\text{Fe}_{1.02}\text{Te}_y\text{Se}_{1-y-x}\text{S}_x$, соответственно, не приводит к сжатию решетки тетрагональной сверхпроводящей фазы, как это можно было ожидать, исходя из различия ионных радиусов халькогенов. Показано, что наблюдаемые изменения параметров элементарной ячейки сверхпроводящей фазы являются результатом изменения химического состава и объёмных долей фазы со структурой типа NiAs и тетрагональной фазы, которые сосуществуют в образцах.
2. Показано, что как допирование образцов $\text{Fe}_{1.02}\text{Ti}_x\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ титаном, так и частичное замещение железа титаном в образцах $\text{Fe}_{1.02-x}\text{Ti}_x\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ приводит к росту объёмной доли гексагональной фазы и к изменениям параметров элементарной ячейки как тетрагональной, так и гексагональной фазы.
3. Обнаружено, что допированный титаном образец $\text{Fe}_{1.02}\text{Ti}_{0.04}\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$, полученный переплавкой, обладает более высоким значением критического тока в нулевом поле (J_c до $3.5 \cdot 10^6$ А/см²), чем монокристаллические образцы системы $\text{Fe}(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)$. Увеличение критического тока связывается с дополнительным пиннингом вихрей на дефектах структуры, вызванных внедрением атомов титана.
4. Установлено, что частичное замещение железа палладием приводит в образцах $\text{Fe}_{1.02-x}\text{Pd}_x\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ к появлению и росту объёмной доли второй, несверхпроводящей фазы с тетрагональной структурой на основе FeSe наряду с основной сверхпроводящей фазой на основе FeTe, что обусловлено ограниченной растворимостью палладия в основной тетрагональной фазе.
5. Показано, что замещение селена теллуrom в системе $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$ приводит к фазовому расслоению при $y > 0.15$ и к появлению сверхпроводящей тетрагональной фазы наряду с фазами типа NiAs. Обнаружено, что образцы $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$ с содержанием теллура $y \geq 0.4$, обладают переходом в сверхпроводящее состояние с более высокими температурами сверхпроводящего перехода (T_c до 17.8 К) по сравнению с однофазными образцами $\text{Fe}(\text{Se},\text{Te})$ из-за взаимодействия сосуществующих фаз и дефицита железа в образцах.

6. Установлено, что для всех исследованных систем характерна общая тенденция уменьшения критической температуры T_c^{onset} с увеличением параметра c кристаллической структуры тетрагональной сверхпроводящей фазы, что согласуется с данными, имеющимися в литературе.

Научная и практическая значимость. Результаты настоящей работы, свидетельствующие о сильной зависимости структурных параметров и сверхпроводящих свойств тетрагональной фазы от химического состава и объемных долей других фаз, присутствующих в образцах, могут быть использованы при проведении дальнейших исследований соединений типа $Fe(Se,Te)$, а также при разработке сверхпроводящих материалов и токопроводящих изделий на их основе. Результаты исследования системы $Fe_7(Se_{1-y}Te_y)_8$, указывающие на возможность повышения критической температуры сверхпроводящего перехода в результате взаимодействия между фазами, могут быть использованы для построения теоретических моделей, описывающих механизмы взаимодействия сверхпроводящих и несверхпроводящих фаз. Кроме того, эти результаты представлять интерес при разработке новых технологических приемов, обеспечивающих повышение критической температуры сверхпроводящего перехода в материалах на основе халькогенидов железа.

Методология и методы исследования. Получение образцов для исследования было выполнено методом твердофазного синтеза в вакуумированных кварцевых ампулах. Для выяснения влияния термообработок на фазовый состав, структуру и свойства соединений образцы, помещенные в вакуумированные кварцевые ампулы, подвергались отжигам при различных температурах с последующим охлаждением при контролируемых скоростях. Аттестация фазового состава и исследования кристаллической структуры соединений проводились методами рентгеновского дифракционного анализа на порошковых образцах. Расчет дифракционных картин и уточнение кристаллической структуры соединений проводилось методом полнопрофильного анализа с помощью программного пакета FullProf. Исследование морфологии поверхности образцов, полученных переплавкой, и определение элементного состава фаз выполнялось с использованием сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского энергодисперсионного микроанализа. Для получения данных о структурных фазовых превращениях выполнялись измерения теплового расширения на поликристаллических образцах. Измерения температурных зависимостей электрического сопротивления образцов выполнялись четырехконтактным методом

в температурном интервале 8–300 К. Магнитные измерения проводились с использованием СКВИД-магнитометра.

Достоверность результатов проведенных исследований обеспечивается использованием аттестованных образцов и применением стандартных методик измерений. Получено хорошее согласие экспериментальных результатов, полученных на незамещенных и замещенных образцах халькогенидов железа с имеющимися в литературе данными. Экспериментальные данные, полученные разными методиками, находятся в согласии друг с другом.

Личный вклад соискателя. Совместно с научным руководителем автор участвовал в постановке задач и в выборе объектов исследования. Автором лично выполнен синтез поликристаллических образцов $\text{Fe}_{1.02}\text{Te}_y\text{Se}_{1-y-x}\text{S}_x$, $\text{Fe}_{1.02}\text{Se}_y\text{Te}_{1-y-x}\text{S}_x$, $\text{Fe}_{1.02\pm x}\text{Ti}_x\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$, $\text{Fe}_{1.02-x}\text{Pd}_x\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ и $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$ и проведены их термообработки при различных условиях. Рентгеноструктурные исследования выполнены совместно с Н.В. Селезневой (Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург). Анализ рентгенограмм и уточнение структур с помощью программного пакета Fullprof для большей части образцов выполнен лично автором. Измерения коэффициента теплового расширения выполнены совместно в В.А. Казанцевым (Институт физики металлов УрО РАН г. Екатеринбург). Исследование поверхности крупнозернистых образцов, полученных медленным охлаждением расплава, и определение элементного состава фаз с использованием сканирующей электронной микроскопии и рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии было выполнено совместно с Д.К. Кузнецовым (Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург). Измерения температурных зависимостей электрического сопротивления образцов выполнены автором. Измерения магнитных свойств выполнены совместно с А.С. Волеговым (Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург). Автор принимал непосредственное участие в составлении программ измерений, в обработке, анализе и обобщении результатов, написании статей и тезисов докладов.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности, по которой она рекомендуется к защите. Содержание диссертации соответствует формуле паспорта специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, основой которой «является теоретическое и экспериментальное исследование природы кристаллических и аморфных, неорганических и органических веществ в твердом и жидком состояниях и изменение их физических свойств при различных внешних воздействиях» и п.1 области исследования «теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов,

неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов как в твердом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления».

Апробация результатов работы. Материалы диссертационной работы были представлены на следующих конференциях и семинарах: Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества СПФКС (г. Екатеринбург, Россия, 2013, 2014, 2015 г.); 4-я Международная конференция по сверхпроводимости и магнетизму ICSM-2014 (Анталья, Турция, 2014 г.); Московский международный симпозиум по магнетизму MISM-2014 (Москва, Россия, 2014 г.); 9 семинар СО — УрО РАН «Термодинамика и Материаловедение» (Новосибирск, Академгородок, Россия 2014 г.); XX международная конференция по магнетизму (ICM-20), (Барселона, Испания, 2015 г.); Международная молодежная научная конференция Физика Технологии Инновации. ФТИ (г. Екатеринбург, Россия, 2015, 2016.); 11-я Международная конференция по материалам и механизмам сверхпроводимости (M2S) CICG (Женева, Швейцария, 2015 г.); V Международная конференция по фундаментальным проблемам высокотемпературной сверхпроводимости (Малаховка, Россия 2015 г.); Международная конференция по прикладной сверхпроводимости ASC'16 (Денвер, США 2016 г.); 12-я Европейская конференция по прикладной сверхпроводимости (Лион, Франция 2015 г.); 5-я Международная конференция по сверхпроводимости и магнетизму ICSM-2015 (Анталья, Турция, 2016 г.); XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии (Екатеринбург, Россия 2016 г.); VI международный евразийский симпозиум (Euro-Asian-Symposium "Trends in Magnetism": (EASTMAG-2016, г. Красноярск, 2016 г.).

По теме диссертации опубликовано 3 статьи в ведущих научных журналах, охватывающих основные проблемы физики конденсированного состояния вещества, входящих в перечень ВАК, и 17 тезисов докладов на научных совещаниях и конференциях различного уровня.

Исследования по теме диссертации выполнены при поддержке РФФИ (проекты № 16-02-00480 и № 16-03-00733) и Программы повышения конкурентноспособности УрФУ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 158 страницы, включая 87 рисунков, 7 таблиц и список цитированной литературы из 131 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, показана новизна, изложены научная и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе дан обзор литературных данных о кристаллической структуре и физических свойствах бинарных халькогенидов переходных металлов типа FeCh (Ch = Se, Te). Представлены имеющиеся в литературе данные о кристаллической структуре, электрических и магнитных свойствах квазибинарных соединений Fe(Se,Te), Fe(Se,S) и Fe(Se,Te), а также о влиянии давления и замещения железа атомами других переходных металлов. Отмечено, что ряд вопросов, касающихся замещения и допирования на структуру и свойства материалов на основе FeCh, а также взаимодействия сосуществующих в образцах на основе FeSe фаз остаются до конца не выясненными.

Во второй главе описаны способы получения и обработки образцов, а также основные методики измерения их физических свойств, использованные в работе. В настоящей работе были синтезированы поликристаллические образцы, приведенные на таблице 1.

Таблица 1. Химический состав полученных соединений

$\text{Fe}_{1.02}\text{Te}_{0.3}\text{Se}_{0.7-x}\text{S}_x$	($x = 0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$)
$\text{Fe}_{1.02}\text{Te}_{0.4}\text{Se}_{0.6-x}\text{S}_x$	($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$)
$\text{Fe}_{1.02}\text{Te}_{0.5}\text{Se}_{0.5-x}\text{S}_x$	($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$)
$\text{Fe}_{1.02}\text{Te}_{0.6}\text{Se}_{0.4-x}\text{S}_x$	($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$)
$\text{Fe}_{1.02}\text{Se}_{0.3}\text{Te}_{0.7-x}\text{S}_x$	($x = 0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$)
$\text{Fe}_{1.02}\text{Se}_{0.4}\text{Te}_{0.6-x}\text{S}_x$	($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$)
$\text{Fe}_{1.02}\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5-x}\text{S}_x$	($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$)
$\text{Fe}_{1.02}\text{Se}_{0.6}\text{Te}_{0.4-x}\text{S}_x$	($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$)
$\text{Fe}_{1.02}\text{Ti}_x\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$	($x = 0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.12, 0.15, 0.2$)
$\text{Fe}_{1.02-x}\text{Ti}_x\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$	($x = 0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.12, 0.15, 0.2$)

$\text{Fe}_{1.02}\text{Pd}_x\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$	($x = 0, 0.02, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$)
$\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)$	($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$)

Все образцы синтезировали методом твердофазных реакций в вакуумированных кварцевых ампулах. Первый нагрев ампул в печи выполнялся медленно со скоростью около 15 °С/час до температуры 700 °С с промежуточной выдержкой при 200 °С и 400°С в течении суток при каждой температуре. Затем образцы отжигались при температуре 700 °С в течении 1 недели, после чего образцы размалывали, прессовали в таблетки и снова запаивали в откачанные кварцевые ампулы и отжигали дополнительно для улучшения гомогенности. Чтобы достичь лучшей однородности образцов $\text{Fe}_{1.02}\text{Se}_y\text{Te}_{0.5-x}\text{S}_x$ для синтеза использовали тройные сплавы халькогенов в качестве прекурсоров вместо простой смеси чистых халькогенов. Для этого исходные элементы (селен, теллур и сера) в необходимых пропорциях помещались в вакуумированные кварцевые ампулы и выдерживались при 200 °С в течение 2 ч, а затем при 400 °С в течение 2 ч, после чего охлаждали. Полученный таким образом сплав халькогенов использовался для последующей процедуры твердофазного синтеза.

Аттестация образцов и исследование их кристаллической структуры выполнялось с использованием рентгеновского дифрактометра Bruker D8 ADVANCE. Микрофотографии поверхности образцов и данные об элементном составе фаз были получены с использованием сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss AURIGA Crossbeam Workstation, оснащенного рентгеновским микроанализатором. Зависимость коэффициента термического линейного расширения (КТЛР) от температуры измеряли на кварцевом дилатометре DL-1500 RHP (ULVAC-SINKU RIKO, Япония).

Измерение температурных зависимостей электрического сопротивления проводилось стандартным 4-х контактным способом на постоянном токе на кафедре физики конденсированного состояния ИЕН УрФУ на установке с использованием автономного криостата замкнутого цикла Cryo-Free-204 в интервале температур 6 – 300 К. Погрешность в определении температуры не превышала ± 0.1 К в диапазоне 2 – 50 К и ± 0.5 в диапазоне 50 – 350 К. Полевые и температурные зависимости намагниченности образцов измерялись на СКВИД-магнитометре MPMS (Quantum Design) в температурном интервале 2 – 400 К и в магнитных полях до 70 кЭ.

В третьей главе представлены результаты исследования влияния замещения селена и теллура атомами серы в образцах $\text{Fe}(\text{Se},\text{Te})$ на их фазовый состав, кристаллическую структуру, поведение электрического сопротивления и магнитные

свойства. На рис. 1 представлены рентгеновские дифрактограммы образцов $\text{Fe}_{1.02}\text{Te}_{0.5}\text{Se}_{0.5-x}\text{S}_x$ с тройной смесью халькогенов. Все образцы содержат основную фазу с тетрагональной структурой типа PbO (пространственная группа $P4/nmm$) и примесные фазы: фазу с гексагональной структурой типа NiAs (пространственная группа $P6_3/mmc$) и оксид железа Fe_3O_4 с кубической структурой. С увеличением

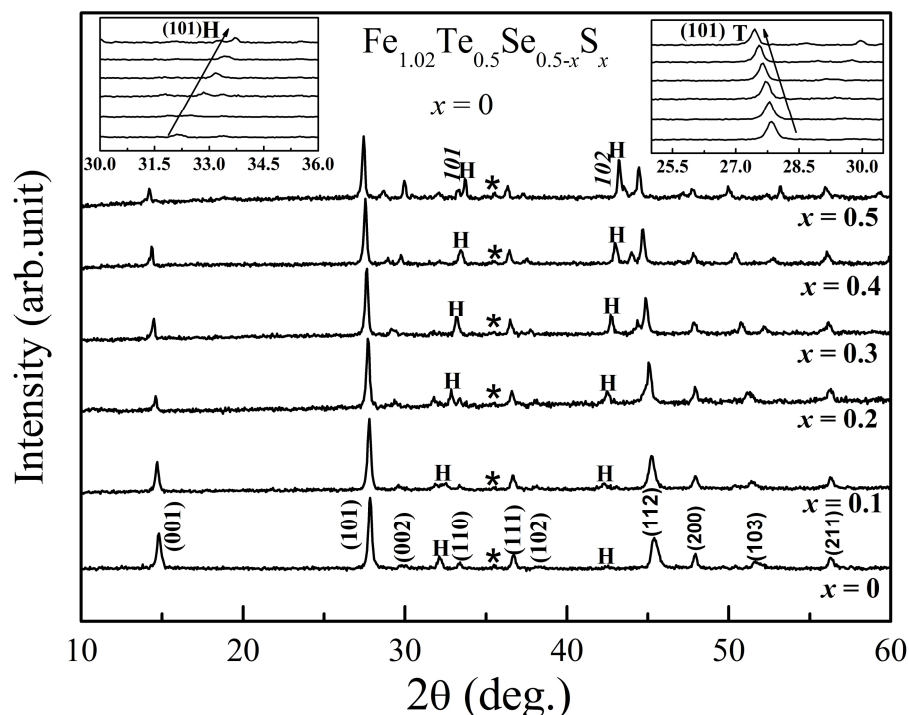


Рис. 1. Дифрактограммы образцов $\text{Fe}_{1.02}\text{Te}_{0.5}\text{Se}_{0.5-x}\text{S}_x$. На левой вставке: сдвиг пика (101) гексагональной фазы (H). На правой врезке: сдвиг пика (101) тетрагональной фазы (T). Пики, связанные с наличием оксида железа Fe_3O_4 отмечены звездочкой.

содержания серы в образцах на рентгенограммах видны заметные сдвиги пика (101) тетрагональной фазы и пика (101) гексагональной фазы (см. вставки на рис. 1), что указывает на изменения параметров кристаллической структуры обеих фаз при замещении. Вместе с этим увеличивается и объёмная доля гексагональной фазы.

Из анализа дифрактограмм получены значения параметров элементарной ячейки a и c тетрагональной и гексагональной фаз существующих образцов $\text{Fe}_{1.02}\text{Te}_y\text{Se}_{1-y-x}\text{S}_x$ которые представлены на рис. 2 в зависимости от номинальной концентрации серы. Установлено, что наблюдаемые изменения параметров элементарной ячейки тетрагональной и гексагональной фаз являются результатом изменения химического состава и соотношения объёмных долей этих фаз. Обогащение сверхпроводящей тетрагональной фазы теллуrom при увеличении содержания серы в образцах с увеличением содержания серы в $\text{Fe}_{1.02}\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5-x}\text{S}_x$ и $\text{Fe}_{1.02}\text{Se}_{0.4}\text{Te}_{0.6-x}\text{S}_x$ образцах подтверждается данными рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии (EDX). Полученные данные позволяют заключить, что повышение содержания теллура в тетрагональной фазе, наблюдаемое в образцах $\text{Fe}(\text{Te},\text{Se},\text{S})$ с ростом концентрации серы, является, прежде всего, следствием различий в пределах растворимости разных халькогенов в гексагональной фазе типа NiAs.

Измерения электрического сопротивления образцов показали, что критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние уменьшается с ростом содержания серы во всех образцах с тройной смесью халькогенов. При этом выявлена корреляция между изменением T_c^{onset} и относительным изменением параметра c элементарной ячейки тетрагональной фазы при одной той же концентрации серы в образцах: чем выше относительное расширение решетки в направлении оси c , тем значительнее уменьшение критической температуры начала сверхпроводящего перехода T_c^{onset} .

Представленные в третьей главе результаты показывают, что изменения в содержании серы, селена и теллура в образцах

$Fe(Te,Se,S)$ с тройной смесью халькогенов приводят к изменениям фазового состава, относительного объема и химического состава сосуществующих фаз, что должно учитываться при анализе результатов, так как эти изменения влияют на сверхпроводящие свойства образцов.

В четвертой главе представлены результаты исследования фазового состава, кристаллической структуры и сверхпроводящих свойств соединения $Fe_{1.02}Se_{0.5}Te_{0.5}$ при замещении железа титаном ($Fe_{1.02-x}Ti_xSe_{0.5}Te_{0.5}$) и при допировании титаном ($Fe_{1.02}Ti_xSe_{0.5}Te_{0.5}$), а также данные о влиянии замещения железа палладием, который является представителем 4d переходных элементов, на сверхпроводящие свойства образцов $Fe_{1.02-x}Pd_xSe_{0.5}Te_{0.5}$. На рис. 3 приведены рентгеновские дифрактограммы образцов $Fe_{1.02}Ti_xSe_{0.5}Te_{0.5}$ и $Fe_{1.02-x}Ti_xSe_{0.5}Te_{0.5}$ с концентрацией титана вплоть до $x = 0.2$. Установлено, что основная фаза с тетрагональной структурой типа PbO (пространственная группа $P4/nmm$) присутствует во всех образцах. В образцах, содержащих титан оксида железа выявлено не было.

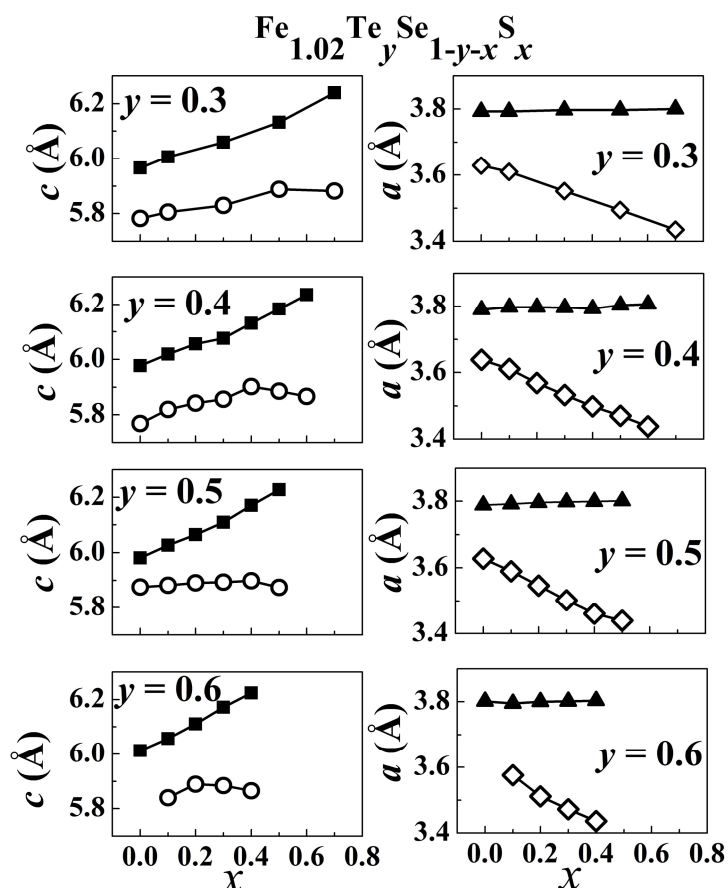


Рис. 2. Зависимость параметров a и c элементарных ячеек тетрагональной (заполненные символы) и гексагональной (открытые символы) фаз от номинальной концентрации серы.

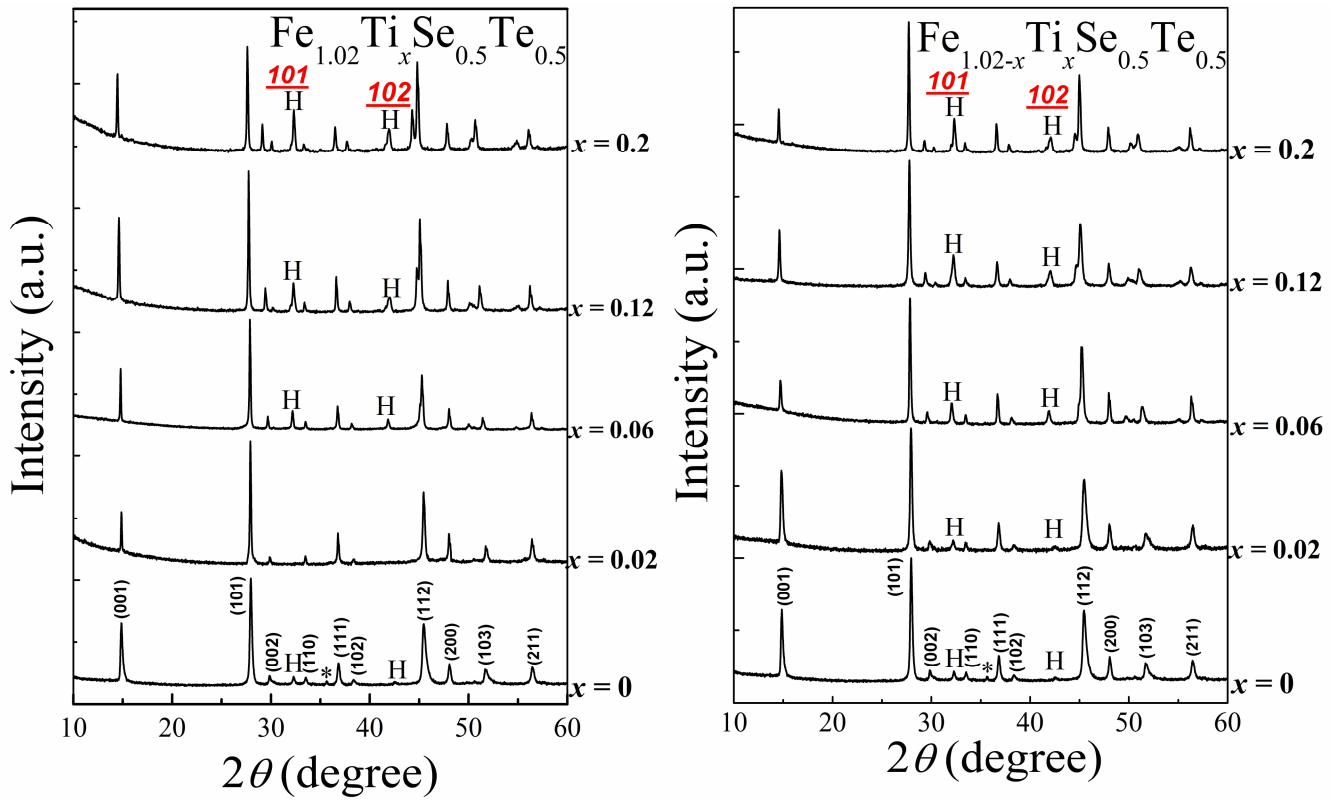


Рис. 3. Рентгеновские диффрактограммы образцов $\text{Fe}_{1.02}\text{Ti}_x\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$, допированных титаном (слева) и образцов $\text{Fe}_{1.02-x}\text{Ti}_x\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$, в которых железо частично замещается титаном (справа). Индексами отмечены пики, принадлежащие тетрагональной фазе. Пики, принадлежащие гексагональной фазе, отмечены символом (H), пики оксида железа Fe_3O_4 отмечены звёздочкой.

Обнаружено, что параметр c элементарной ячейки тетрагональной фазы монотонно увеличивается с концентрацией титана в образцах обеих серий $\text{Fe}_{1.02}\text{Ti}_x\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ и $\text{Fe}_{1.02-x}\text{Ti}_x\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$, в то время как параметр a практически не изменяется. В свою очередь в гексагональной фазе изменения параметров a и c элементарной ячейки более значительны. Допирование титаном приводит к небольшому увеличению параметра c гексагональной фазы и к заметному уменьшению параметра a . Замещение железа титаном приводит к резкому увеличению параметра c в интервале концентраций титана $0 \leq x \leq 0.04$, а в интервале концентраций титана $0.04 < x \leq 0.2$ наблюдается слабый рост параметра c , что касается параметра a , то он заметно уменьшается. Критическая температура сверхпроводящего перехода резко T_c^{onset} уменьшается на начальной стадии замещения или допирования вплоть до содержания титана $x = 0.04$, далее T_c^{onset} изменяется слабо с ростом концентрации титана в образцах. Уменьшение критической температуры, по-видимому, связано с увеличением параметра c элементарной ячейки тетрагональной фазы, которое наблюдается как при замещении, так и при легировании. Это наглядно демонстрируют зависимости T_c^{onset} от параметра c тетрагональной ячейки,

представленные на рис. 4. для случая замещения железа титаном и допирования титаном соединения $\text{Fe}_{1.02}\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$

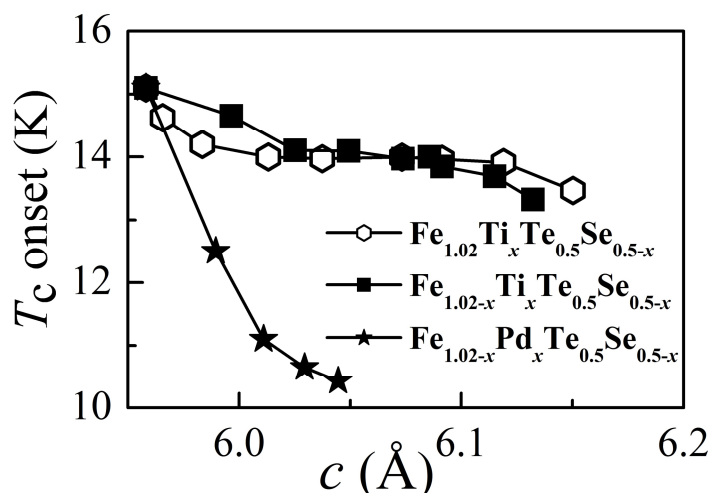


Рис. 4. Зависимость критической температуры T_c^{onset} от параметра c тетрагональной фазы в образцах $\text{Fe}_{1.02}\text{Ti}_x\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$, $\text{Fe}_{1.02-x}\text{Ti}_x\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ и $\text{Fe}_{1.02-x}\text{Pd}_x\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$.

Как следует из рис. 4, увеличение параметра c в тетрагональной фазе при замещении или допировании в обеих системах с титаном приводит к незначительному монотонному снижению критической температуры, что в целом согласуется с данными, имеющимися в литературе для сверхпроводников на основе железа (см., например [6]). С помощью измерений полевых зависимостей намагниченности установлено, что допированный титаном образец $\text{Fe}_{1.02}\text{Ti}_{0.04}\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$, полученный переплавкой, обладает повышенным значением критического тока в нулевом поле (J_c до $3.5 \cdot 10^6$ А/см²), что связано, по-видимому, с дополнительным пиннингом вихрей на дефектах структуры, вызванных внедрением атомов титана. Вторая часть четвертой главы посвящена изучению влияния замещения железа палладием в системе $\text{Fe}_{1.02-x}\text{Pd}_x\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ на фазовый состав, структуру и сверхпроводящие свойства. Рентгеновские дифрактограммы образцов $\text{Fe}_{1.02-x}\text{Pd}_x\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ показывают, что образцы содержат основную сверхпроводящую фазу с тетрагональной структурой типа PbO (пространственная группа $P4/nmm$) с параметрами решетки вблизи фазы FeTe (далее в тексте будем называть её фазой на основе FeTe). Однако увеличение концентрации палладия приводит к появлению и дальнейшему росту объёмной доли второй фазы с тетрагональной структурой (пространственная группа $P4/nmm$) с

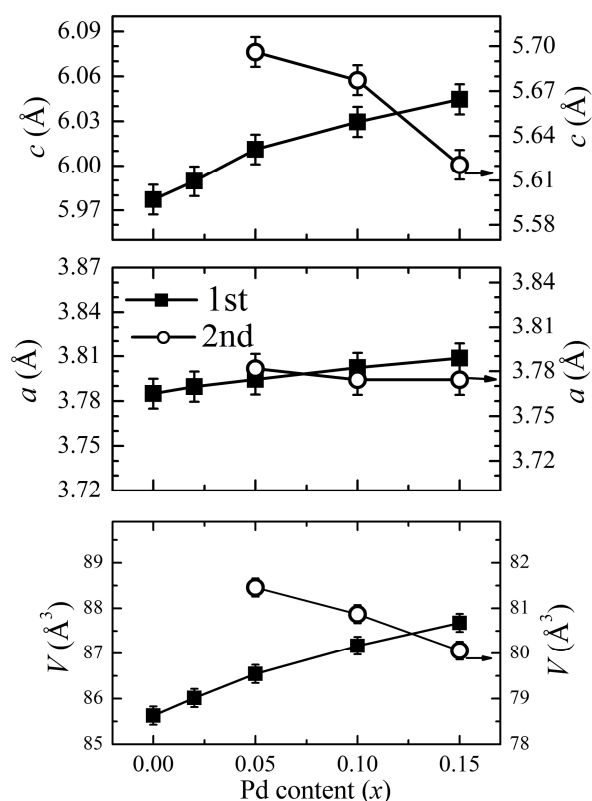


Рис. 5. Зависимости параметров a и c элементарной ячейки тетрагональных фаз на основе FeTe (закрытые символы) и на основе FeSe (открытые символы) от номинальной концентрации палладия в системе $\text{Fe}_{1.02-x}\text{Pd}_x\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$.

параметрами решетки вблизи фазы FeSe (далее - фаза на основе FeSe). На рис. 5. представлена зависимость параметров элементарной ячейки обеих тетрагональных фаз в зависимости от номинальной концентрации палладия. Установлено, что увеличение параметров элементарной ячейки a и c основной тетрагональной фазы на основе FeTe может быть вызвано обогащением теллуром, а уменьшение параметров элементарной ячейки второй тетрагональной фазы – обогащением селеном. Последнее подтверждается близостью параметров элементарной ячейки этой фазы к тетрагональной FeSe. Установлено, что, как и при замещении железа другими 3d элементами, увеличение концентрации палладия в образцах $\text{Fe}_{1.02-x}\text{Pd}_x\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ приводит к уменьшению критической температуры. Основным фактором, ответственным за падение T_c^{onset} , по-видимому, является увеличение межслоевого расстояния. Как следует из рис. 5, на котором на ряду с образцами, содержащими титан, представлены данные для $\text{Fe}_{1.02-x}\text{Pd}_x\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$, зависимость критической температуры от параметра c в случае замещения железа палладием является более резкой, чем в образцах с титаном, что очевидно является следствием различий в электронных характеристиках атомов титана и палладия, которые принадлежат 3d и 4d переходным элементам, соответственно.

В пятой главе представлены результаты исследования влияния замещения селена

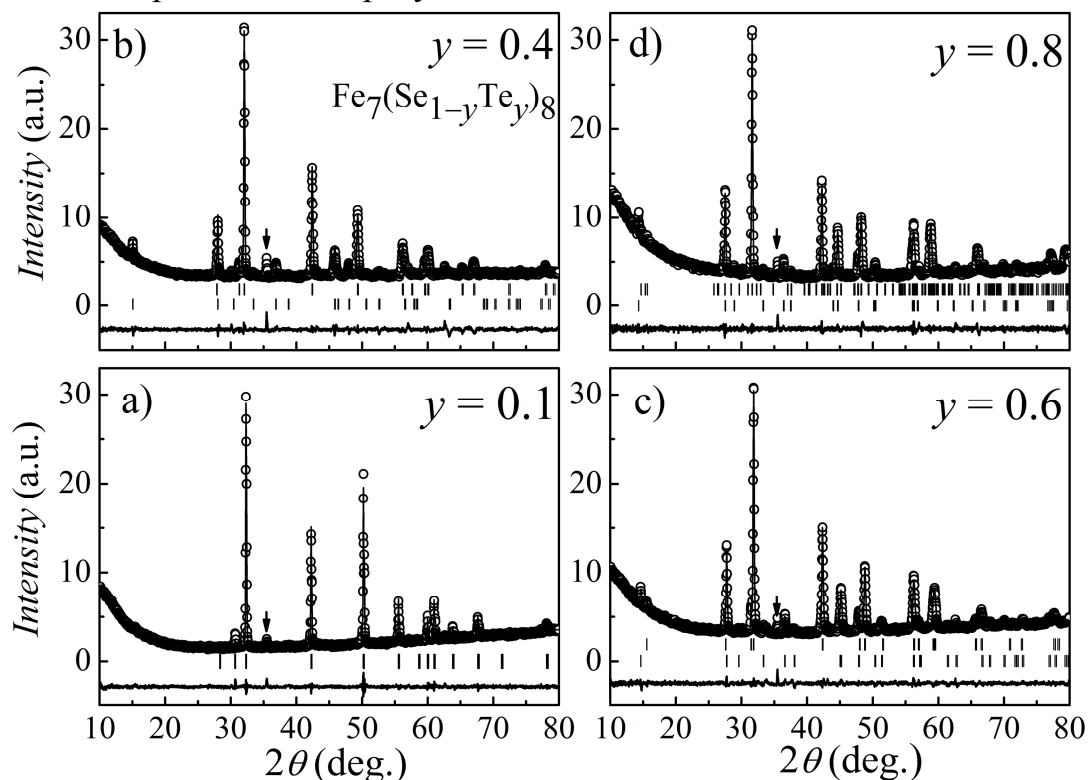


Рис. 6. Наблюдаемые (символы) и расчетные (линии) рентгенограммы для $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$ после закалки от 700°C . Вертикальные штрихи указывают на позиции брэгговских рефлексов для фаз с различными структурами (гексагональной $P6_3/mmc$, тетрагональной $P4/nmm$, тригональной $P\bar{3}m1$ и моноклинной $I12/m1$). Стрелка указывает на пик от Fe_3O_4 .

теллуrom в железodefицитном соединении Fe_7Se_8 , которое является ферримагнетиком и обладает слоистой структурой типа NiAs. Поскольку такое соединение с теллуrom не образуется, а растворимость теллура в системе $\text{Fe}_7(\text{Se},\text{Te})_8$ ограничена, то можно было ожидать, что при увеличении содержания теллура будет наблюдаться фазовое расслоение и образование тетрагональной фазы. На рис. 6 представлены рентгенограммы порошковых образцов $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$ с разным содержанием теллура, полученных закалкой от 700°C .

Действительно обнаружено, что в образцах $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$, полученных закалкой от 700°C , при увеличении концентрации Te выше $y \sim 0.15$ наряду с фазой типа NiAs появляется тетрагональная сверхпроводящая фаза типа PbO ($P4/nmm$). Замещение селена теллуrom до $y = 0.3$ приводит к росту объема элементарной ячейки фазы типа NiAs, что является вполне ожидаемым, имея в виду больший ионный радиус Te по сравнению с Se. С другой стороны параметры решетки a и c и объем элементарной ячейки тетрагональной фазы монотонно возрастают с ростом концентрации теллура. Для того чтобы определить состав фаз мы провели рентгеновский микроанализ с помощью сканирующего электронного микроскопа на образце с концентрацией $y = 0.4$, полученном путем переплавки (см. рис. 7). Установлено, что тетрагональная фаза близка к стехиометрии 1:1 и обогащена железом и теллуrom по отношению к номинальному составу образцов $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$. Образцы $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$, содержащие тетрагональную фазу обладают переходом в сверхпроводящее состояние. Это видно из рис. 8, на котором представлены зависимости $\rho(T)$ для образцов $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$ в области температур ниже 30 К. Как оказалось, образцы $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$ с концентрациями Te выше $y = 0.3$ обладают повышенной критической температурой начала сверхпроводящего перехода, T_c^{onset} , по сравнению с тем, что наблюдалось в системе $\text{Fe}_{1+\delta}(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)$.

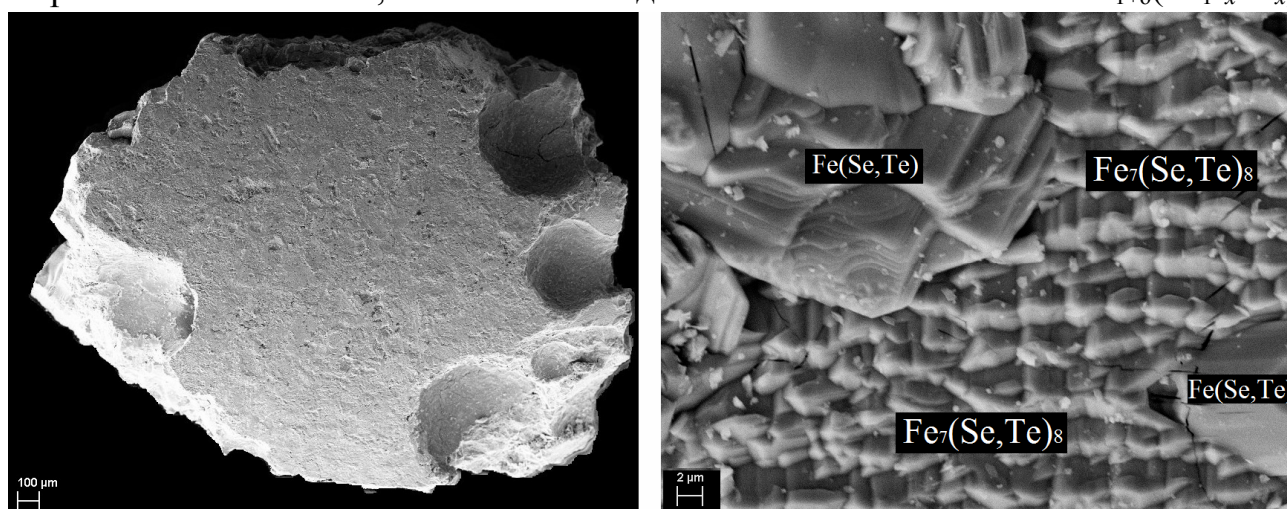


Рис. 7. Изображение поверхности образца $\text{Fe}_7(\text{Se}_{0.6}\text{Te}_{0.4})_8$ при разном увеличении. На правом рисунке показаны сосуществующие фазы типа $\text{Fe}_7(\text{Se},\text{Te})_8$ и $\text{Fe}(\text{Se},\text{Te})$.

Изменения в фазовом составе системы $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$ при увеличении содержания теллура, а также примерные концентрационные интервалы, в которых могут существовать различные фазы, представлены на рис.9. Доля тетрагональной фазы в закаленных образцах $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$ составляет около 20% при $y = 0.4$ и возрастает до 30% с ростом содержания теллура до $y = 0.8$. В интервале концентраций $0.15 \leq y \leq 0.3$ закаленные образцы $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$ находятся, по-видимому, в метастабильном переохлажденном состоянии. Как показали данные рентгеновской дифракции и измерения электросопротивления, в этих образцах ($0.15 \leq y \leq 0.3$) присутствуют только небольшие следы сверхпроводящей фазы типа PbO . Однако, двухнедельный отжиг при 200°C приводит к фазовому расслоению и увеличению объема тетрагональной фазы. Фазовые превращения в образцах $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$ при повышении температуры сопровождаются заметными аномалиями в тепловом расширении. Поскольку тетрагональная 1:1 фаза обогащена

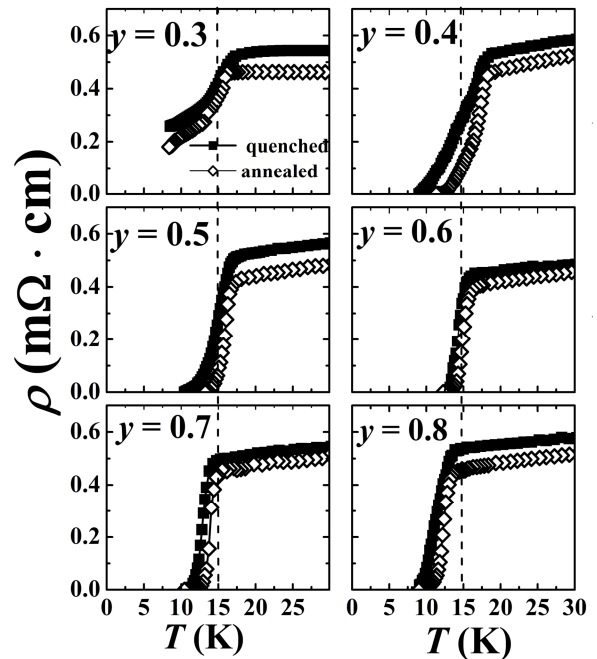


Рис. 8. Температурные зависимости удельного электрического сопротивления для $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$ образцов с различными концентрациями теллура ниже 30 К.

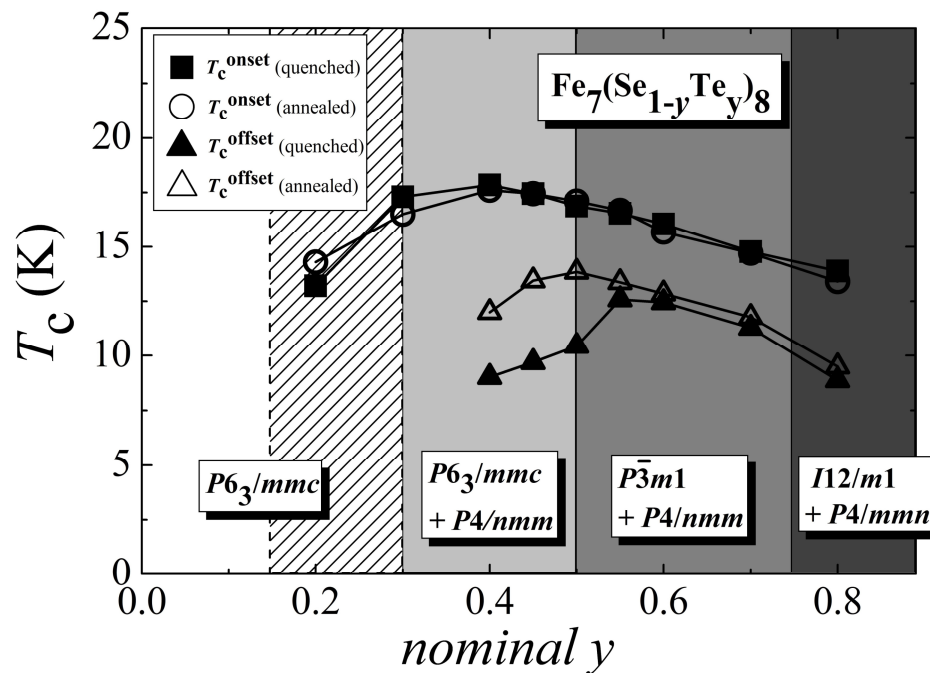


Рис. 9. Изменение фазового состава и критических температур T_c^{onset} и T_c^{offset} для закаленных и отожженных образцов $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$ при изменении содержания теллура.

железом по отношению к номинальному составу образцов $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$, то в результате ее появления и увеличения относительного объема происходит обеднение железом фазы типа NiAs. Поэтому замещение селена теллуrom из-за фазового расслоения сопровождается сдвигом состава фаз типа NiAs в образцах $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$ от начального отношения 7:8 к более низкому отношению железо-халькоген типа 3:4. Обнаружено, что образцы $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$ с номинальной концентрацией теллура $0.3 \leq y \leq 0.6$ обладают более высокими значениями критической температуры начала перехода в сверхпроводящее состояние (до 17.8 К) по сравнению со значениями, наблюдаемыми в однофазных соединениях $\text{Fe}(\text{Se},\text{Te})$. Такое увеличение критической температуры перехода в сверхпроводящее состояние обусловлено двухфазным состоянием образцов $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$ и взаимодействием между сосуществующими фазами, так как фаза типа NiAs и сверхпроводящая фаза типа PbO характеризуются различными межатомными расстояниями и обладают разными магнитными и электронными свойствами.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На примере впервые синтезированных образцов типа $\text{Fe}(\text{S},\text{Se},\text{Te})$ с тройной смесью халькогенов показано, что замещение теллура или селена серой в системах $\text{Fe}_{1.02}\text{Se}_y\text{Te}_{1-y-x}\text{S}_x$ и $\text{Fe}_{1.02}\text{Te}_y\text{Se}_{1-y-x}\text{S}_x$, соответственно, не приводит к сжатию решетки тетрагональной сверхпроводящей фазы, как это можно было ожидать, исходя из различия ионных радиусов халькогенов. Показано, что наблюдаемые изменения параметров элементарной ячейки сверхпроводящей фазы являются результатом изменения химического состава и объёмных долей тетрагональной фазы и фазы со структурой типа NiAs, которая обладает ограниченной растворимостью теллура.
2. Показано, что как допирование образцов $\text{Fe}_{1.02}\text{Ti}_x\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ титаном, так и частичное замещение железа атомами титана в образцах $\text{Fe}_{1.02-x}\text{Ti}_x\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ сопровождается ростом объёмной доли гексагональной фазы и приводит к изменениям параметров элементарной ячейки как тетрагональной, так и гексагональной фаз. Обнаружено, что допированный титаном образец $\text{Fe}_{1.02}\text{Ti}_{0.04}\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$, полученный переплавкой, обладает повышенным значением критического тока в нулевом поле (J_c до $3.5 \cdot 10^6$ А/см²) из-за дополнительного пиннинга вихрей на дефектах структуры, вызванных внедрением атомов титана.
3. Установлено, что частичное замещение железа палладием в образцах $\text{Fe}_{1.02-x}\text{Pd}_x\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ приводит к появлению и росту объёмной доли второй несверхпроводящей фазы с тетрагональной структурой на основе FeSe наряду с основной сверхпроводящей фазой на основе FeTe, что может быть обусловлено ограниченной растворимостью палладия в основной тетрагональной фазе.

4. Показано, что замещение селена теллуром в системе $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$ приводит из-за ограниченной растворимости теллура к фазовому расслоению и к появлению при $y > 0.15$ сверхпроводящей тетрагональной фазы наряду с фазами типа NiAs. Обнаружено, что вследствие взаимодействия между фазами и из-за дефицита железа образцы $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$ с содержанием теллура $y \geq 0.4$ обладают более высокими температурами начала сверхпроводящего перехода (T_c^{onset} до 17.8 К) по сравнению с однофазными образцами $\text{Fe}(\text{Se},\text{Te})$.

5. Установлено, что для всех исследованных систем наблюдается общая тенденция уменьшения критической температуры T_c^{onset} с увеличением параметра c кристаллической структуры тетрагональной сверхпроводящей фазы, что согласуется с данными, имеющимися в литературе.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в ведущих рецензируемых журналах, определенных ВАК РФ:

1. Phase relations and superconductivity in the $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_8$ system: Effect of phase coexistence / N. V. Baranov, A. S. Abouhaswa, N. V. Selezneva, V. A. Kazantsev, P. N. G. Ibrahim // Solid State Sciences. – 2016. – V. 6. – P. 136–145.
2. Abouhaswa, A. S. Characterization of the phase composition, crystal structure and superconducting properties of $\text{Fe}_{1.02}\text{Se}_y\text{Te}_{1-y-x}\text{S}_x$ / A. S. Abouhaswa, A. I. Merentsov, N. V. Baranov // Physica C: Superconductivity and its applications. – 2016. – V. 527. –P. 21–27.
3. Properties of FeSe-type superconductors with ternary mixture of chalcogens / A. S. Abouhaswa, A. I. Merentsov, N. V. Selezneva, N. V. Baranov // Physica C: Superconductivity and its applications. – 2014. – V. 502. –P. 10–13.

Публикации в сборниках тезисов семинаров и конференций:

1. Synthesis, phase relations and properties of $\text{Fe}(\text{Se},\text{Te})$ -based superconducting materials with the partial Pd for Fe substitution / A. S. Abouhaswa, A. I. Merentsov, N. V. Selezneva, N. V. Baranov // XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry. Ekaterinburg, Russia. – 2016. – P. 119.
2. Coexistence of magnetic and superconducting phases in the $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)_8$ system / A. Abouhaswa, N. Baranov, N. Selezneva, A. Merentsov // VI Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism" (EASTMAG-2016). Krasnoyarsk, Russia. – 2016. – P. 160.
3. Abouhaswa, A. S. Effect of the sulfur for tellurium substitution on properties of $\text{Fe}_{1.02}\text{Se}_y\text{Te}_{1-x}\text{S}_x$ / A. S. Abouhaswa, A. I. Merentsov, N. V. Baranov // Applied

- Superconductivity Conference (ASC'16). Colorado Convention Center in the “Mile High City” of Denver, USA. – 2016. – P. 163.
4. Properties of $\text{Fe}_{1.02}\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ Influenced by titanium substitution and doping / A.S. Abouhaswa, A. I. Merentsov, N.V. Selezneva, N.V. Baranov // 5th International Conference on Superconductivity and Magnetism. Fethiye, Blue Lagoon, Turkey. – 2016. – P. 615.
 5. Impact of the partial Pd for Fe substitution on properties of $\text{Fe}_{1.02}\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ / A.S. Abouhaswa, A.I. Merentsov, N.V. Selezneva, N.V. Baranov // 5th International Conference on Superconductivity and Magnetism, Fethiye, Blue Lagoon, Turkey. – 2016. – P. 619.
 6. Effect of the tellurium for selenium substitution on the phase composition and electrical resistivity of $\text{Fe}_7(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)_8$ / A. S. Abouhaswa, N. V. Selezneva, A. I. Merentsov, N. V. Baranov // Третья международная молодежная научная конференция. Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2016, УрФУ, Екатеринбург, Россия. – 2016. – С. 54.
 7. Меренцов, А. И. Влияние замещения теллура серой на сверхпроводящие свойства материалов $\text{Fe}_{1.02}\text{Se}_y\text{Te}_{1-y-x}\text{S}_x$ ($y = 0.4, 0.5, 0.6, x = 0 - y$) / А. И. Меренцов, А. С. Абухасва, Н. В. Баранов // V Международная Конференция «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости», Малаховка, Россия. – 2015. – С. 157.
 8. Abouhaswa, A. S. Sulfur substitution effects in iron chalcogenides Fe (Te,Se) superconductors/ A. S. Abouhaswa , A. I. Merentsov , N. V. Baranov // 11th International Conference on Materials & Mechanisms of Superconductivity (M2S) CICG, Geneva, Switzerland. – 2015. – P. 158.
 9. Effects of ternary mixture of chalcogens on the $\text{Fe}_{1.02}\text{Se}$ superconducting properties/ A. S. Abouhaswa, A. I. Merentsov, N. V. Selezneva, N. V. Baranov // Вторая международная молодежная научная конференция. Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2015, УрФУ, Екатеринбург, Россия.– 2015. – С. 1.
 10. Structural changes, transport and magnetic properties of $\text{Fe}_{1.02}\text{Te}_y\text{Se}_{1-y-x}\text{S}_x$ compounds with ternary mixture of chalcogens / N. Baranov, A. Abouhaswa, A. Merentsov, N. Selezneva // 20th international conference on magnetism, Barcelona, Spain. – 2015. – P. Mo. A- P12.
 11. Abouhaswa, A. The combined effect of titanium and air on Fe(Te,Se)-type superconducting materials / A. Abouhaswa, A. Merentsov, N. Baranov // 12th European Conference on Applied Superconductivity, Lyon, France. – 2015. – P. 3A-M-P.

12. Влияние замещения железа титаном и присутствия кислорода на сверхпроводящие материалы Fe(Se,Te) на основе железа / А. С. Абухасва, А. И. Меренцов, Н. В. Селезнева, Н. В. Баранов // XVI Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-16). Екатеринбург, Россия. – 2015. – С. 79.
13. Эффекты химического давления в сверхпроводящих халькогенидах железа / А. И. Меренцов, А. С. Абухасва, Т. В. Попова, Н. В. Селезнёва, Н. В. Баранов // 9 семинар СО — УрО РАН «Термодинамика и Материаловедение», Новосибирск, Россия. – 2014. – С. 36.
14. Влияние смешивания анионов на свойства железосодержащих халькогенидных сверхпроводников / А. С. Абухасва, А. И. Меренцов, Н.В. Селезнева, Н. В. Баранов // XV Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-15). Екатеринбург, Россия. – 2014. – С. 91.
15. Superconducting and magnetic properties of Fe(S,Se,Te) compounds with ternary mixture of chalcogens / A. S. Abouhaswa, A. I. Merentsov, N. V. Selezneva, N. V. Baranov // Moscow international symposium on magnetism (MISM). – 2014. – P. 171.
16. Merentsov, A. I. Anion mixing effects in iron-chalcogenide superconductors / A. I. Merentsov, A. S. Abouhaswa, N. V. Baranov // ICSM conference Antalya, Turkey. – 2014. – p. 463.
17. Абухасва, А. С. Влияния Серы На Сверхпроводящие Свойства Материалов $Fe_{1.02}Se_{0.5}Te_{0.5}$ / А. С. Абухасва, А. И. Меренцов, Н. В. Баранов // IVX Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-14). Екатеринбург, Россия. – 2013 – С. 105.

Цитированная литература

- [1] Superconductivity in the PbO-type structure α -FeSe / F. C. Hsu, J. Y. Luo, K. W. Yeh, T. K. Chen, T. W. Huang, P. M. Wu, Y. C. Lee, Y. L. Huang, Y. Y. Chu, D. C. Yan, M. K. Wu // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2008. – V. 105. – p. 14262–14264.
- [2] Pearce, C. I. Electrical and magnetic properties of sulfides / C. I. Pearce, R. A. Patrick, D. J. Vaughan // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 2006. – V. 61. – P. 127–180.

- [3] Castro Neto, A. H. Charge density wave, superconductivity, and anomalous metallic behavior in 2D transition metal dichalcogenides / A. H. Castro Neto // *Phys. Rev. Lett.* – 2001. – V. 86. – P. 4382
- [4] Single crystal growth and characterization of tetragonal FeSe_{1-x} superconductors/ D. Chareev, E. Osadchii, T. Kuzmicheva, J. Lin, S. Kuzmichev, O. Volkova, A. Vasiliev // *Cryst. Eng. Comm.* – 2013. – V.15. – P. 1989–1993.
- [5] Superconductivity above 100 K in single-layer FeSe films on doped SrTiO₃, J. F. Ge, Z. L. Liu, C. Liu, C. L. Gao, D. Qian, Q. K. Xue, Y. Liu, J. F. Jia // *Nature Materials.* – 2015. – Vol. 14. – P. 285–289.
- [6] Mizuguchi, Y. Review of Fe Chalcogenides as the Simplest Fe-Based Superconductor/ Y. Mizuguchi, Y. Takano // *Journal of the Physical Society of Japan.* – 2010. – V. 79. – P. 102001
- [7] Superconductivity at 93 K in a new mixed phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure / M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang, C. W. Chu // *Phys. Rev. Lett.* – 1987. – V. 58. – P. 908–910.
- [8] Strong interplay between stripe spin fluctuations, nematicity and superconductivity in FeSe / Q. Wang, Y. Shen, B. Pan, Y. Hao, M. Ma, F. Zhou, P. Steffens, K. Schmalzl, T. R. Forrest, M. Abdel-Hafiez, X. Chen, D. A. Chareev, A. N. Vasiliev, P. Bourges, Y. Sidis, H. Cao, J. Zhao // *Nature materials.* – 2016. – V. 15. – P. 159–163.
- [9] Anion height dependence of T_c for the Fe-based superconductor / Y. Mizuguchi, Y. Hara, K. Deguchi, S. Tsuda, T. Yamaguchi, K. Takeda, H. Kotegawa, H. Tou, Y. Takano // *Supercond. Sci. Technol.* – 2010. – V. 23. – P. 054013.
- [10] Microstructural magnetic phases in superconducting FeTe_{0.65}Se_{0.35} / A. Wittlin, P. Aleshkevych, H. Przybylińska, D.J. Gawryluk, P. Dłużewski, M. Berkowski, R. Puźniak, M.U. Gutowska, A. Wiśniewski // *Supercond. Sci. Technol.* – 2012. – V. 25 – P. 065019.