

Аннотация

В настоящее время большой интерес научного сообщества вызывают топологические материалы, к которым относятся топологические изоляторы (ТИ) и топологические кристаллические изоляторы (ТКИ), которые будучи изоляторами в объёме, имеют проводящие спин-поляризованные поверхностные состояния (ПС), характеризующиеся уникальными свойствами, вызванными сильным спин-орбитальным взаимодействием. К уникальным свойствам ТИ и ТКИ относятся линейный закон дисперсии $E(k)$ и жесткая связь направления квазиимпульса и спина, что делает эти материалы перспективными для быстродействующей электроники и спинтроники. К таким материалам относятся $Pb_{1-x}Sn_xTe$ (ТКИ) и соединения группы $A^V B^VI$ (ТИ): Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , а также их твёрдые растворы. Для уменьшения объёмной проводимости и выделения вклада поверхностных состояний в транспортные свойства используют эпитаксиальные плёнки. Одним из методов визуализации поверхностных состояний топологических изоляторов является фотоэлектронную спектроскопию с угловым разрешением (ARPES). Данная методика крайне чувствительна к чистоте и структурному совершенству поверхности исследуемого материала и для её применения поверхность исследуемого образца должна быть атомарно-чистой и структурно-упорядоченной. Основным методом получения поверхностей этих соединений является скол объёмных материалов в вакууме, однако данная методика не подходит для эпитаксиальных плёнок. Кроме того, ориентации поверхностей, которые возможно получить методом скола, ограничены, для объёмных $Pb_{1-x}Sn_xTe$ и соединений $A^V B^VI$ такими ориентациями являются (001) и (0001), соответственно. Основными методами для приготовления/сохранения атомарно-чистых и структурно-упорядоченных поверхностей эпитаксиальных плёнок ТИ и ТКИ являются: травление ионами аргона, прогрев образцов в потоке атомарного водорода, пассивация поверхности элементными VI группы, использование вакуумных чемоданов. Сложность этих методов создаёт дополнительные препятствия для изучения поверхностных свойств топологических материалов и требуется найти более технологичное решение.

Ещё одной проблемой при переходе от объёмных материалов к эпитаксиальным плёнкам является проблема выбора подложки. Эпитаксиальный рост соединений группы $A^V B^VI$ происходит по механизму Ван-дер-Ваальса и выбор подложки для них не является критичным. Основной подложкой для роста твёрдого раствора $Pb_{1-x}Sn_xTe$ является BaF_2 (111), однако рассогласование постоянных решёток плёнка-подложка довольно велико и может достигать 4.2%. Одной из альтернативных подложек для роста $Pb_{1-x}Sn_xTe$ является $CdTe/ZnTe/GaAs$ (013), которая обладает гораздо более близкой постоянной решётки. Однако, для использования данной подложки требуется разработать методику приготовления атомарно-чистой и структурно-упорядоченной поверхности $CdTe$ (013) после экспозиции на атмосфере.

Химическая обработка может быть решением для вышеописанных проблем при соблюдении нескольких условий: такая обработка удаляет собственные оксиды без травления и внедрения поверхностных дефектов и формирует удаляемый пассивирующий слой, который может быть десорбирован с помощью отжига в вакууме при относительно низких температурах. Например, для полупроводников группы $A^III B^V$ был разработан универсальный метод подготовки атомарно-чистых и структурно-упорядоченных поверхностей, который состоит из удаления поверхностных оксидов путем химической обработки в безводном растворе хлороводорода в изопропиловом спирте ($HCl-iPA$) и прогрева в вакууме. Предполагалось, что такая же обработка будет эффективна и для

соединений $A^V B^VI$, $A^{IV} B^VI$ и $A^{II} B^VI$. Кроме того, ожидалось, что после обработки образуется слой элементов VI группы, который будет защищать поверхность образца от окисления во время загрузки в вакуумную камеру (по аналогии с мышьяком для соединений $A^{III} As$).

Исполнитель (Ф.И.О): Тарасов Андрей Сергеевич

Наименование выпускной научно-квалификационной работы: Эпитаксиальный рост и поверхностные свойства тонких плёнок топологических изоляторов соединений $A^{IV} B^VI$ и $A^V B^VI$

Объект исследования: Поверхность топологических изоляторов $Pb_{1-x}Sn_xTe$, Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3 , поверхность альтернативной подложки $CdTe/ZnTe/GaAs$ (013)

Цель: Изучение особенностей роста эпитаксиальных плёнок $Pb_{1-x}Sn_xTe$ и $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ на подложках $CdTe/ZnTe/GaAs$ (013) и разработка методики приготовления атомарно-чистых и структурно-упорядоченных поверхностей соединений $A^{IV} B^VI$, $A^{II} B^VI$ и $A^V B^VI$.

Методы исследования: дифракция быстрых электронов на отражение (ДБЭО), дифракция медленных электронов (ДМЭ), рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), атомно-силовая микроскопия (АСМ), фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением (ARPES).

Научная новизна:

1. Показано, что обработка гетероструктур $CdTe/ZnTe/GaAs$ (013) в растворе $HCl-iPA$ приводит к удалению слоя собственных оксидов и формированию пассивирующего слоя теллура толщиной 3-5 нм. Дальнейший прогрев в вакууме при температуре 250 °С приводит к десорбции слоя элементного теллура и формированию атомарно-чистой и структурно-упорядоченной поверхности $CdTe$ (013). Экспериментально определено, что данная обработка не оказывает влияния на морфологию поверхности $CdTe$ (013).
2. Впервые получены эпитаксиальные плёнки $Pb_{1-x}Sn_xTe$ и $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ с ориентацией (013). Обнаружено, что при температурах подложки порядка 250 °С рост плёнок происходил по послойному механизму. На поверхности полученных эпитаксиальных плёнок обнаружены некоторые особенности рельефа, вдоль и поперёк которых наблюдалась сильная анизотропия электрофизических свойств.
3. Показано, что химическая обработка плёнок $Pb_{1-x}Sn_xTe$ (111) в растворе $HCl-iPA$ удаляет с поверхности собственные оксиды и обогащает поверхность слоем элементного теллура толщиной 2-3 нм. Дальнейший прогрев в вакууме при температуре 250 °С приводит к десорбции элементного теллура, обогащению поверхности оловом и образованию атомарно-чистой и структурно-упорядоченной поверхности $Pb_{1-x}Sn_xTe$ (111)-(1x1). Было продемонстрировано значительное влияние обработки $HCl-iPA$ на электрофизические свойства $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ (111), что указывает на значительный вклад поверхности в транспортные свойства $Pb_{1-x}Sn_xTe$.
4. Обнаружено, что обработка соединений Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 в растворе $HCl-iPA$ приводит к удалению собственных оксидов и появлению на поверхности пассивирующего слоя. Для Bi_2Se_3 в качестве пассивирующего слоя выступает элементный селен, прогрев образца в вакууме при температуре 170 °С приводит к десорбции селена и формированию атомарно-чистой и структурно-упорядоченной поверхности Bi_2Se_3 (0001). В случае Bi_2Te_3 поверхность покрывается слоем элементного теллура и оксихлорида висмута, прогрев образца в вакууме при температуре 200 °С приводит к формированию атомарно-чистой и структурно-упорядоченной поверхности Bi_2Te_3 (0001). В состав пассивирующего слоя для Sb_2Te_3 входят элементный теллур и

оксихлорид теллура. Прогрев при 200 °С приводит к десорбции пассивирующего слоя и появлению атомарно-чистой и структурно-упорядоченной поверхности Sb_2Te_3 (0001). Обнаружено, что данная химическая обработка не оказывает влияния на морфологию поверхности соединений группы $\text{A}^{\text{V}}\text{B}^{\text{VI}}$.

Теоретическая и практическая значимость:

В настоящее время активно изучается такая область науки, как спинтроника, в которой передача полезного сигнала осуществляется за счёт спина электронов. В перспективе, использование спина позволяет увеличить быстродействие приборов и уменьшить их энергопотребление. Для создания и изучения таких приборов крайне важно понимание механизмов создания, сохранения и изменения спина электронов. Перспективными материалами для этой области науки являются топологические изоляторы: твёрдые растворы $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 что связано с наличием у них поверхностных спин-поляризованных состояний. Для изучения спин-поляризованных состояний используют поверхностно-чувствительные методики, например, ARPES. Успешное применение данных методик определяется состоянием поверхности и способом её приготовления. В рамках данной работы была разработана универсальная методика приготовления атомарно-чистых и структурно-упорядоченных поверхностей данных соединений на основе химической обработки в безводном растворе HCl -iPA и дальнейшего прогрева в вакууме. Относительная простота данной методики и возможность её применения для эпитаксиальных плёнок открывает широкие возможности для изучения поверхностных свойств соединений $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , а также делает возможным напыление дополнительных слоёв, например, магнитных контактов, после экспозиции на воздухе для создания более сложных гетероструктур.

В рамках данной работы также была разработана методика получения атомарно-чистой и структурно-упорядоченной поверхности эпитаксиальной гетероструктуры $\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{GaAs}$ (013) с помощью обработки в безводном растворе HCl -iPA и дальнейшего прогрева в вакууме. Данная гетероструктура разработана в лаборатории 15 ИФП СО РАН и используется в качестве альтернативной подложки для роста эпитаксиальных слоёв $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$, которые используются для создания матричных фотоприёмников ИК диапазона и квантовых структур. Разработка данной методики приготовления поверхности открывает возможность использования альтернативных подложек $\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{GaAs}$ (013) после экспозиции на воздухе. Это позволило модифицировать технологию получения эпитаксиальных плёнок на основе твёрдого раствора $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ и существенно расширить применение данной подложки для широкого круга материалов. В частности, впервые удалось получить эпитаксиальные плёнки $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ и $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ с ориентацией (013) и изучить их электрофизические свойства. Данная работа является ещё одним шагом для понимания поверхностных свойств топологических изоляторов и создания фундамента для элементной базы спинтроники.

Область применения: Спинтроника, изготовление ИК фотоприёмников, фундаментальные исследования

Список ключевых слов: топологический изолятор, топологический кристаллический изолятор, $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, CdTe , Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , молекулярно-лучевая эпитаксия, поверхность, тонкие плёнки, химическая обработка, фотоэлектронная спектроскопия

Апробация работы:

Основные результаты, полученные в рамках данной работы, представлялись и обсуждались на семинарах и конкурсах молодых учёных ИФП СО РАН, а также докладывались на следующих российских и международных конференциях: XXVI Международный симпозиум «Нанозифика и нанозлектроника» (Нижний Новгород, 14-17 марта, 2022), Школа молодых ученых «Актуальные проблемы полупроводниковых наносистем» АППН-2021 (Новосибирск, 7-9 декабря, 2021), Фотоника 2021 (Новосибирск, 4-8 октября, 2021), XXV Международный симпозиум «Нанозифика и нанозлектроника» (Нижний Новгород, 9-12 марта, 2021), XIV Российская конференция по физике полупроводников "Полупроводники-2019" (Новосибирск, 9-13 сентября 2019), 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM) (Эрлагол, 29 июня - 3 июля, 2019), Российская конференция и школа молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотозлектроники (с участием иностранных ученых) «ФОТОНИКА 2019» (Новосибирск, 27–31 мая, 2019).

Статьи:

1. Тарасов А.С., Голяшов В.А., Ахундов И.О., Ищенко Д.В., Кожухов А.С., Кох К.А., Терещенко О.Е., Приготовление атомарно-чистой и структурно упорядоченной поверхности Bi_2Se_3 (0001) без использования молекулярных пучков и скола в вакууме, Химическая Физика, 2022, т.41, №6, стр. 81
2. Tarasov A.S., Ishchenko D.V., Akhundov I.O., Golyashov V.A., Klimov A.E., Suprun S.P., Fedosenko E.V., Sherstyakova V.N., Rybkin A.G., Vilkov O.Yu., Tereshchenko O.E., Surface chemical treatment effect on (1 1 1) PbSnTe < In > Topological crystalline insulator films, Applied Surface Science, Volume 569, 2021, 150930
3. Тарасов А.С., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Менщиков Р.В., Ужаков И.Н., Кожухов А.С., Федосенко Е.В., Терещенко О.Е., Получение атомарно-чистых и структурно-упорядоченных поверхностей эпитаксиальных плёнок CdTe для последующей эпитаксии, Физика и техника полупроводников, 2021, т.55, №9, стр. 748
4. Тарасов А.С., Голяшов В.А., Ищенко Д.В., Ахундов И.О., Климов А.Э., Эпов В.С., Кавеев А.К., Супрун С.П., Шерстякова В.Н., Терещенко О.Е., Эффект поля и спин-вентильный эффект в кристаллическом топологическом изоляторе PbSnTe , Автометрия, 2020, т.56, №5, стр. 121-126
5. Tarasov A.S., Akhundov I.O., Golyashov V.A., Ishchenko D.V., Suprun S.P., XPS and RHEED study of chemically treated PbSnTe surface, International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Conference Proceeding, 2019, стр. 19025081
6. Тарасов А.С., Ищенко Д.В., Акимов А.Н., Ахундов О.И., Голяшов В.А., Климов А.Э., Пашин Н.С., Супрун С.П., Федосенко Е.В., Шерстякова В.Н., Терещенко О.Е., Модификация поверхностных свойств эпитаксиальных слоёв PbSnTe с составом вблизи инверсии зон, Журнал технической физики, 2019, т.89, №11, стр. 1795-1799

Тезисы и труды конференций:

1. Тарасов А.С., Голяшов В.А., Ахундов И.О., Ищенко Д.В., Кожухов А.С., Кох К.А., Терещенко О.Е., Получение атомарно-чистых и структурно-упорядоченных поверхностей топологических изоляторов $\text{A}^{\text{V}}\text{B}^{\text{VI}}$, XXVI Международный симпозиум «Нанозифика и нанозлектроника», Нижний Новгород, 14-17 марта, 2022.
2. Тарасов А.С., Ахундов И.О., Голяшов В.А., Ищенко Д.В., Корецкий А.В., Кох К.А., Терещенко О.Е., Получение атомарно-чистой и структурно-упорядоченной поверхности

топологического изолятора Bi_2Se_3 , Школа молодых ученых «Актуальные проблемы полупроводниковых наносистем» АППН-2021., Новосибирск, 7-9 декабря, 2021.

3. Тарасов А.С., Ищенко Д.В., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Менщиков Р.В., Ужаков И.Н., Кожухов А.С., Лошкарев И.Д., Климов А.Э., Федосенко Е.В., Терещенко О.Е., Анизотропия проводимости эпитаксиальных плёнок топологического кристаллического изолятора $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, выращенных на подложках $\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{GaAs}$ (013), «ФОТОНИКА 2021», Новосибирск, 4-8 октября, 2021

4. Тарасов А.С., Акимов А.Н., Ахундов И.О., Голяшов В.А., Ищенко Д.В., Климов А.Э., Молодцова Е.Л., Пашин Н.С., Федосенко Е.В., Супрун С.П., Шерстякова В.Н., Терещенко О.Е., Получение атомарно-чистых и структурно-упорядоченных поверхностей эпитаксиальных плёнок $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ (111), XXV Международный симпозиум «Нанопизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 9-12 марта, 2021

5. Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Менщиков Р.В., Ужаков И.Н., Тарасов А.С., Федосенко Е.В., Терещенко О.Е., Альтернативные подложки (013) $\text{GaAs}/\text{ZnTe}/\text{CdTe}$ для МЛЭ роста CdHgTe и PbSnTe , XXV Международный симпозиум «Нанопизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 9-12 марта, 2021

6. Ахундов О.И., Голяшов В.А., Ищенко Д.В., Климов А.Э., Супрун С.П., Тарасов А.С., Терещенко О.Е., Пассивирующие и термодесорбционные свойства теллура на поверхности PbSnTe XIV Российская конференция по физике полупроводников "Полупроводники-2019", Новосибирск, 9-13 сентября, 2019

7. Ищенко Д.В., Акимов А.Н., Ахундов О.И., Голяшов В.А., Климов А.Э., Пашин Н.С., Супрун С.П., Тарасов А.С., Федосенко Е.В., Шерстякова В.Н., Терещенко О.Е., Транспортные свойства тонких плёнок $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ вблизи фазы ТКИ в зависимости от физико-химического состояния поверхности, XIV Российская конференция по физике полупроводников "Полупроводники-2019", Новосибирск, 9-13 сентября 2019 г., 2019

8. Акимов А.Н., Ахундов И.О., Ищенко Д.В., Климов А.Э., Пашин Н.С., Супрун С.П., Тарасов А.С., Терещенко О.Е., Федосенко Е.В., Шерстякова В.Н., Влияние поверхности на фотопроводимость плёнок $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ с составом $0,28 \leq x \leq 0,32$, Российская конференция и школа молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники (с участием иностранных ученых) «ФОТОНИКА 2019», Новосибирск, 27–31 мая, 2019