

На правах рукописи

Спивак Юлия Михайловна

**АНАЛИЗ ФОТОПРИЕМНЫХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И
ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ НА ОСНОВЕ ХАЛЬКОГЕНИ-
ДОВ СВИНЦА МЕТОДАМИ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ**

Специальность: 01.04.10 – Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2008

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель –
доктор физико-математических наук, профессор Мошников В.А.

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук, профессор Немов С.А.
кандидат физико-математических наук, с.н.с. Соловьев И.В.

Ведущая организация – Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Защита состоится «__18__» _сентября_____ 2008г. в 14.00 час. на заседании совета Д 212.238.04 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан 10 июля 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Мошников В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время прогресс в материаловедении, в том числе в полупроводниковой ИК- оптоэлектронике связан с появлением и развитием новых технологий и методов исследования материалов.

Халькогениды свинца являются основными материалами для создания оптоэлектронных приборов, работающих в диапазоне длин волн 2-5 мкм. Одной из важнейших современных задач ИК- оптоэлектроники является интеграция фотоприемных функциональных элементов в монолитную конструкцию с электроникой, созданной по традиционной планарной кремниевой технологии. Значительное рассогласование параметров кристаллических решеток при гетероэпитаксии халькогенидов свинца на кремний стимулирует поиск путей повышения качества материала посредством создания буферных мультислоев и изучение особенностей релаксации механических напряжений в слоях халькогенидов свинца, полученных молекулярно- лучевой эпитаксией (МЛЭ) [1]. На базе таких структур создаются матрицы фотоприемников (ФП) на основе барьеров Шоттки. Природа возникновения неоднородности параметров фоточувствительных элементов в матрицах ФП до настоящего времени изучена недостаточно, различие параметров в таких ФП, как правило, объясняется влиянием шунтирующих дислокаций [2].

Другим направлением приборных реализаций на основе халькогенидов свинца на инородных подложках является создание функциональных наноструктурированных поликристаллических слоев. Наиболее перспективной для эффективного ФП считается сетчатая структура, состоящая из контактирующих зерен, покрытых оксидными фазами и содержащих р-п переход внутри зерна. Оптимизация размеров зерен и контактных областей между ними обеспечивает повышение фоточувствительности не только за счет возникновения избыточных носителей заряда непосредственно в канале проводимости, но и вследствие инжекции носителей заряда в р-п переходе. При этом эффективность фотоприемников и излучателей зависит от технологических условий формирования и термообработки (от процессов спекания зерен, перераспределения примесей, образования оксидных фаз на поверхности и встроенных электрических полей внутри) [3]. Это обуславливает многообразие путей получения фотоприемных и излучающих поликристаллических структур, значительно различающихся по структуре и свойствам.

Актуальной проблемой является развитие методик анализа структуры и свойств халькогенидов свинца на наноуровне и исследование природы физических процессов, влияющих на изменение свойств наноструктурированных объектов в целом. Традиционные методы контактной спектроскопии тока растекания в процессе измерения приводят к необратимым изменениям свойств и невозможности вольт-амперных характеристик (ВАХ). В тоже время методы сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) остаются

перспективными для решения многих проблем. Для реализации этих потенциальных возможностей необходимо проведение специальных методических разработок.

На основе вышеизложенного, тема работы, посвященная исследованию фоточувствительных структур на основе соединений A^4B^6 с помощью методов атомно-силовой микроскопии, является актуальной и представляет интерес как с научной, так и с практической точек зрения.

Целью работы являлись развитие модельных представлений о процессах, протекающих при формировании фоточувствительных монокристаллических и поликристаллических слоев халькогенидов свинца на инородных подложках, и разработка новых методик атомно-силовой микроскопии для анализа таких слоев.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Исследовать механизмы роста эпитаксиальных слоев PbTe (111), полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на кремниевых подложках с буферными слоями CaF_2 и на подложках VaF_2 с помощью атомно-силовой микроскопии.
2. Развить модельные представления об особенностях релаксационных явлениях в напряженных гетероструктурах PbTe/ CaF_2 /Si.
3. Разработать комплекс экспериментальных методик СЗМ для диагностики локальных электрофизических свойств структур на основе халькогенидов свинца.
4. Отработать режимы создания микросистемы островковых индиевых наноконтактов и провести локальные исследования изменений электрофизических свойств в процессе физико-химических превращений на интерфейсе «металл - полупроводник».
5. Исследовать перколяционные сетчатые структуры поликристаллических фотоприемников на основе селенида свинца путем картографирования тока растекания при послойном травливании оксидных слоев.
6. Разработать методику оценки кинетики образования оксидных фаз на поверхности зерен.
7. Разработать методику и проанализировать особенности электрофизических свойств фотоприемных структур с внутризеренным p-n переходом.

Научной новизной обладают следующие результаты:

1. Впервые описаны несквозные дефекты трубчатого вида в эпитаксиальных слоях PbTe(111)/ VaF_2 и предложена модель, объясняющая образование таких дефектов взаимодействием спиралей роста в случае высокой плотности винтовых дислокаций.
2. Установлено, что при переструктурировании буферных слоев CaF_2 за счет релаксации механических напряжений в процессе циклического изменения

температуры гетерокомпозиции $\text{PbTe}(111)/\text{CaF}_2/\text{Si}$ в диапазоне 10-300К возникает дополнительная система ступеней на поверхности PbTe , содержащих не только 60° -террасы, но и 30° -террасы.

3. Выявлены нанообласти с аномальным ассиметричным характером проводимости на интерфейсе In/PbTe при использовании нового комбинированного метода, включающего создание системы наноконтактов и сканирующую микроскопию сопротивления растекания при вариации серий значений приложенного напряжения в двух полярных направлениях, а также построение локальных вольт-амперных характеристик и цифровую обработку изображений.

4. Показано, что в процессе формирования контакта In/PbTe происходит перераспределение элементов в нанообластях, что способствует образованию p-n переходов в приповерхностной области полупроводника.

5. Обнаружено, что рекристаллизация поликристаллических слоев на основе $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Se}$ в процессе активационного отжига приводит к выделению нанофаз в объеме зерна с тенденцией их вытеснения под слой оксида, что проявляется в сдвиге спектральных характеристик слоев в коротковолновую область.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Создано программное обеспечение для оценки процессов, возникающих при протекании тока высокой плотности через систему «зонд АСМ - образец» на основе моделирования процессов разогрева и пластической модификации приконтактной области. Модель может быть применена для анализа систем «острый зонд – полупроводник с низкими константами упругости» и выбора условий проведения экспериментов с использованием электрофизических методик СЗМ.

2. Предложен метод анализа электрофизических свойств областей интерфейса «металл-полупроводник» с локальностью, определяемой размерами островковой структуры металлического контакта. Метод использован при изучении эволюции свойств, обусловленной физико-химическими процессами, протекающими на интерфейсе.

3. Экспериментально определены режимы формирования островковых микроконтактов In/PbTe электронно-лучевым испарением на холодные подложки через маску; получены системы микроконтактов с площадью индивидуального контакта 9 мкм^2 , каждый из которых состоит из изолированных островков площадью $0,03\text{-}2\text{ мкм}^2$ и высотой 30-40 нм.

4. Разработана методика анализа сетчатых структур, позволяющая определять «мертвые» и скелетные ветви перколяционного кластера. Методика может быть применена для широкого класса сетчатых структур.

5. Впервые методами АСМ детально проанализированы процессы фазообразования при фотосенсибилизации как в йод -содержащей атмосфере, так и в отсутствии йода.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Анализ механизмов роста, образования и эволюции дефектов структуры в зависимости от рассогласования параметров кристаллической решетки подложки, растущего слоя, комбинации буферных слоев и релаксации механических напряжений при термоциклировании обеспечивается разработанными методиками на основе метода атомно-силовой микроскопии.
2. Снижение скорости эпитаксии PbTe (111) на подложках фторида бария приводит к тому, что рост слоев происходит по спирально-последовательному механизму, при этом наблюдается выравнивание ступеней роста по ширине, а в местах взаимодействия спиралей возникают дефекты трубчатого вида. При увеличении плотности спиралей роста происходит смена пары источников спиралей роста, что сопровождается потерей сквозного характера трубчатых дефектов.
3. Релаксация механических напряжений в процессе термоциклирования в интервале температур 300-10 К в гетероструктурной композиции PbTe/CaF₂/Si приводит к возникновению террас на поверхности слоев, проходящих под углом 30° к основной системе террас, образованных в результате скольжения дислокаций с выходом на поверхность.
4. Визуализация и анализ развития нанощуптов и наночастиц с аномальными электрофизическими характеристиками на интерфейсе «металл-полупроводник» обеспечивается предложенным комбинированным методом, включающий методику формирования металлического микроконтакта с островковой структурой, сканирующую микроскопию сопротивления растекания при вариации значений приложенного напряжения в двух полярных направлениях, построение локальных вольт-амперных характеристик и цифровую обработку изображений.
5. Анализ изменения типа электропроводности и концентрации носителей заряда внутри и на границе зерен поликристаллических слоев на основе PbSe при исследовании локальных вольт-амперных зависимостей в сочетании с последовательным стравливанием оксидных фаз с поверхности зерен в фотопроводящих сетчатых структурах позволяет детектировать образование p-n перехода внутри зерна.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы внедрены курс лабораторных работ и часть лекционного материала по дисциплинам «Зондовые и пучковые нанотехнологии», «Материаловедение микро- и наносистем», «Наноматериалы».

Результаты работы использованы при выполнении государственного контракта № 4750р7011 от 15.01.2007г. по теме «Увеличение эффективности ИК-фотодиодов для тепловизионных систем за счет снижения влияния протяженных дефектов кристаллической структуры в низкоразмерных полупроводниковых структурах A^{IV}B^{VI} при использовании эффективных буферных

слоев» в рамках программы «У.М.Н.И.К.» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере; Государственных контрактов № У-0032, ИНТ/НИЧ-69 (МЭ), № У-0032, ИНТ/НИЧ-88 (МЭ).

Работа по сканирующей зондовой микроскопии выполнялись на зондовой нанолаборатории Ntegra Terma (NT-MDT), введенной в учебный и научный процесс по плану инновационного образовательного проекта, программа «Физика и технология микро- и наносистем», и атомно-силовом комплексе (SIS) в ходе стажировки в Швейцарском федеральном технологическом институте г.Цюриха (стипендия Президента РФ на стажировку в зарубежных научных центрах в 2005-2006гг.).

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, семинарах и школах:

- На международных конференциях: IV, V Международных конференциях «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», СПб: ФТИ РАН, 2004, 2006г; III Международная научная конференция "Кинетика и механизм кристаллизации", Иваново, 2004г.; XI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», М., МГУ, 2004г.;
- На всероссийских конференциях: XXII, XXI Российских конференциях по электронной микроскопии, М.: Черноголовка, 2008, 2006гг.; «Вакуумная техника и технология-2007», СПб: ФТИ РАН, 2007; XX Совещание по температуроустойчивым функциональным покрытиям, СПб: ИХС РАН, 2007; 11-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов», М., 2004г; «ВНКСФ-10. Десятая Всероссийская Научная конференция Студентов-Физиков и Молодых Ученых», М., 2004г.
- на 4-ой, 5-ой, 6-ой, 8-ой Всероссийских молодежных конференциях по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, СПб.: СПбГПУ, 2003, 2004, 2005, 2007 гг. и других.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 статей, из них – 4 статьи, которые входят в перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами, заключения, трех приложений и списка литературы, включающего 144 наименования. Основная часть работы изложена на 98 страницах машинописного текста. Работа содержит 94 рисунка и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены цель и задачи диссертации. Сформулирована научная новизна, практическая значимость полученных в работе результатов и научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор литературы, посвященной современным проблемам создания фоточувствительных структур для ИК-оптоэлектроники в диапазоне длин волн 2-5 мкм. Показаны важнейшие области применения оптоэлектронных приборов на основе халькогенидов свинца. Проанализированы актуальные проблемы материаловедения, связанные с созданием фотоприемников на основе монокристаллических слоев халькогенидов свинца на различных подложках. Рассмотрены модельные представления о природе фоточувствительности в поликристаллических наноструктурированных слоях на основе халькогенидов свинца в зависимости от структуры и состава слоя.

Обобщены современные достижения и выделены проблемы при применении методов СЗМ в исследовании и модификации свойств полупроводниковых приборных структур. Кратко приведены основные сведения о принципах регистрации информации о свойствах поверхности объектов исследования, основанных на различных типах аналитических сигналов. Особое внимание уделяется экспериментальным работам, посвященным специфике применения и моделированию проводящих методик СЗМ.

На основании проведенного анализа литературы сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена исследованию механизмов роста и релаксации эпитаксиальных слоев PbTe (111) на различных подложках с помощью атомно-силовой микроскопии.

В главе приведены основные сведения о технологии получения монокристаллических слоев PbTe методом молекулярно-лучевой эпитаксией (МЛЭ) и методике исследования топографии эпитаксиальных слоев PbTe с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ). Описана методика экспериментов по термоциклированию полученных структур в диапазоне температур 10-300К.

Установлено по данным АСМ (топография слоев PbTe (111)/BaF₂, толщина слоев ~ 0,8-1,1 мкм), что в выбранных термодинамических условиях эпитаксиальный рост слоев PbTe осуществляется послойно вокруг винтовых дислокаций, причем скорость роста ограничивается скоростью встраивания атомов, адсорбированных на поверхности подложки, а влияние барьера Швёбеля настолько значительно, что приводит к выравниванию по ширине соседних ступеней роста. Типичный вид поверхности таких слоев PbTe приведен на рис. 1.

Обнаружены несквозные трубчатые дефекты, относительно равномерно распределенные по всей поверхности слоев PbTe. Результаты моделирования скорости движения фронтов роста соседних спиралей показали, что при сближении в процессе роста крайних ступеней соседних спиралей из-за уменьшения площади нижней ступени, а также асимметрии потенциального рельефа поверхности у края ступени, происходит замедление скорости зарас-

тания нижней ступени, что будет приводить к образованию полости. При сближении фронтов роста 3-4 растущих спиралей формируются нанополости с характерной формой отверстия (треугольные, квадратные), как схематично

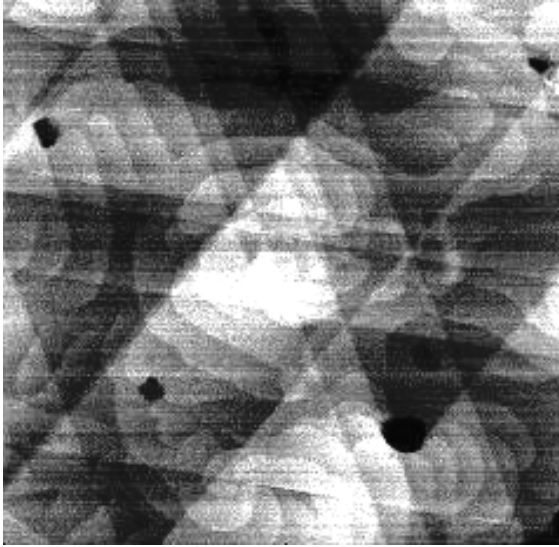


Рис. 1. Топография PbTe (111)/BaF₂ с трубчатыми дефектами (диапазон высот по оси Z ≈ 17,8 нм, размер изображения 5мкм x 5мкм).

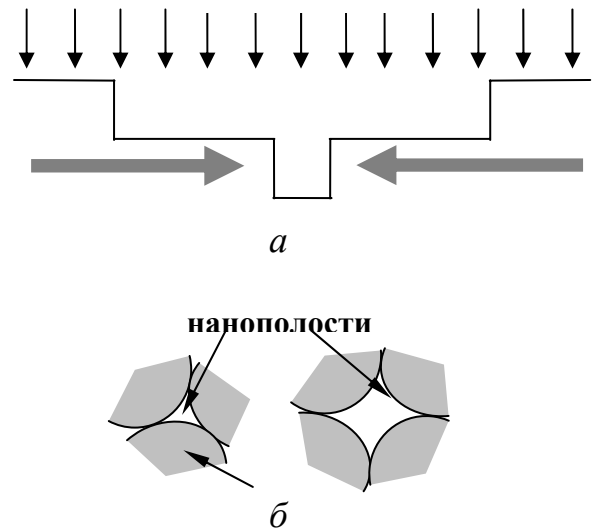


Рис. 2. Движение фронтов роста ступеней во времени в разрезе (а) и образование нанополостей на границах срастания спиралей роста (б).

показано на рис. 2 и подтверждается экспериментальными данными (рис. 1).

Образование таких несквозных дефектов может быть объяснено в рамках модели [4], предполагающей, что при высокой плотности винтовых дислокаций происходит взаимодействие близкорасположенных источников роста и переключение роста спиралей с одной системы источников на другую.

Проведен теоретический анализ упругодеформированного состояния эпитаксиальных слоев PbTe (111) на подложках Si с буферным подслоем CaF₂ и BaF₂, который показал, что при снижении температуры до значений порядка 10К увеличение механических напряжений должно приводить к активации перемещения дислокаций не только в направлениях легкого скольжения, но и во вторичных системах скольжения.

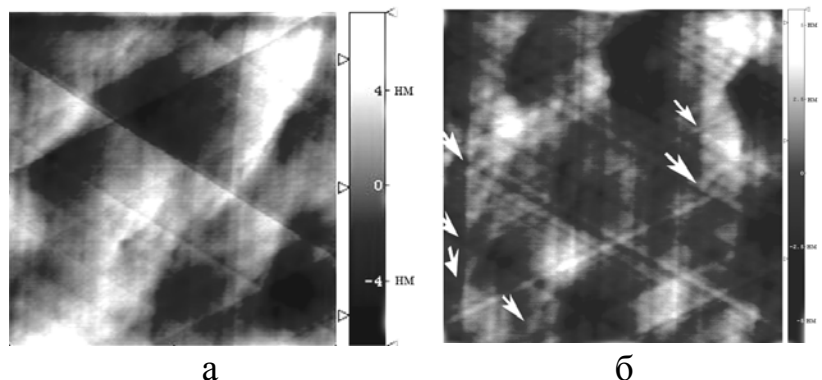


Рис.3 Топография поверхности PbTe(111) по данным АСМ (размер 5мкм x 5мкм).

Впервые экспериментально методами АСМ поверхности PbTe обнаружена релаксация механических напряжений в процессе термоциклирования (300-10К) с образованием кроме системы 60°-х террас, ступеней, проходящих под углом 30° (рис. 3). Экспериментально установлено, что в гетерокомпозициях PbTe/CaF₂/Si (рассогласование $\Delta a/a > 18\%$) плотность таких линий возрастает.

В третьей главе рассмотрены модельные представления о природе нестабильности вольт-амперных характеристик (ВАХ) при использовании нанозондов. Особо выделены следующие причины: разогрев приконтактной области и влияние пластической деформации из-за действия объемных пондеромоторных сил в рамках модели [5], ранее предложенной для системы «зонд Ti-SiO₂-Si». Возможность пластической деформации обусловлена низкими значениями констант упругости халькогенидов свинца.

При проведении измерений на типичных образцах экспериментально было обнаружено, что ВАХ, измеренные при фиксированном положении зонда на поверхности металла, обладают низкой воспроизводимостью, высоким уровнем шумов, не связанных с приборными шумами и погрешностями. На рис. 4 приведена типичная серия I-U характеристик, полученных одна за другой при временном интервале между измерениями 10-20с. Измерения проводили в вакууме при охлаждении образца до $T \sim 130\text{K}$ при одном и том же положении зонда).

Для оценки величины разогрева приконтактной области было проведено математическое моделирование распределения температуры в системе «зонд - тонкий диэлектрик-полупроводник» в зависимости от радиуса закругления зонда, сопротивления образца, внешнего приложенного напряжения и времени прохождения тока. Задача решалась итерационно методом конечных разностей. Распределение электростатического поля в начальный момент времени моделировалось в векторном виде с учетом влияния тонкого диэлектрического слоя на поверхности полупроводника. В результате моделирования были получены карты распределения электростатического поля в каждой точке приконтактной области, по которым рассчитывалось распределения плотности тока через образец в зависимости от температуры. По картам распределения плотности тока в каждой точке определялось количество теплоты Джоуля-Ленца,

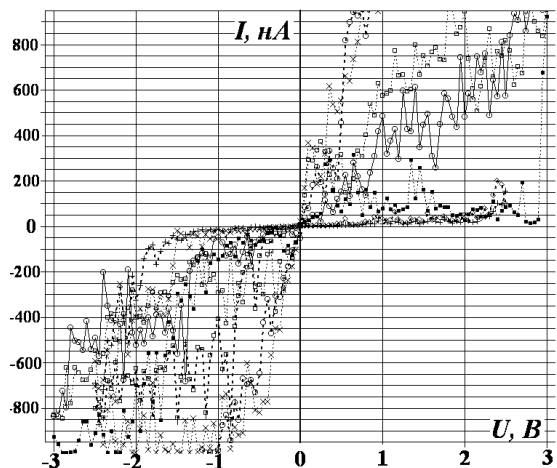


Рис. 4. ВАХ, полученные в одном измерительном цикле при фиксированном положении зонда АСМ для типичного образца In/PbTe (вакуум, $T \sim 130\text{K}$).

выделяемой единичным объемом с учетом теплопроводности материала, и рассчитывалось изменение температуры ΔT в каждый момент времени Δt .

Результаты моделирования показали, что при радиусе закругления зонда $R_{\text{зонд}} \approx 20\text{-}50\text{ нм}$ разогрев приконтактной области за $\Delta t \sim 1\text{-}5$ сек может достигать десятков и сотен градусов, что необходимо учитывать при выборе

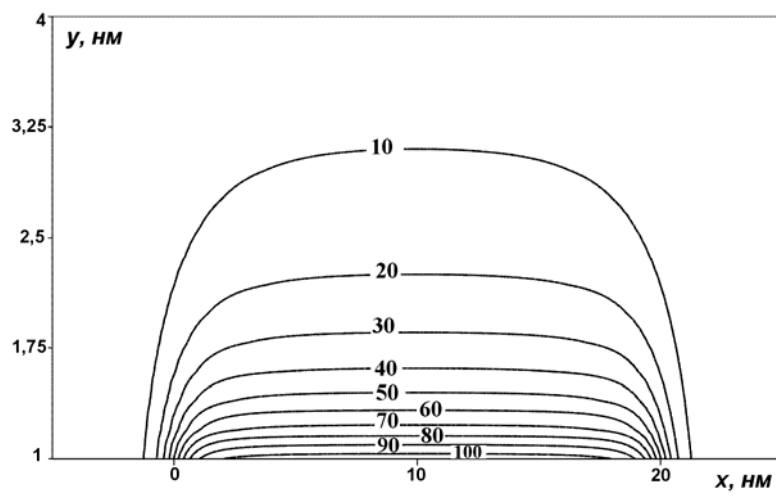


Рис. 5. Изменение температуры области под контактом за 1 сек при $U=1\text{ В}$ ($R_{\text{зонд}} \approx 20\text{ нм}$).

экспериментальных условий измерения локальных ВАХ. На рис. 5. приведена карта распределения температуры в области под зондовым контактом при приложении внешней разности потенциалов $U=1\text{ В}$ для $p\text{-PbTe}$ с концентрацией носителей заряда $\approx 2,5 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$.

Анализ возникновения условий для пластической модификации показал, что влияние объемных

пондеромоторных сил становится существенным при протекании токов более 100 мкА .

Для предотвращения перегрева материала предложена методика построения локальных вольт-амперных характеристик по комплексу карт сопротивления растекания, полученных в режиме сканирования. При этом эффективное время теплового воздействия на область под наноконтактом снижено до $10^{-3}\text{-}10^{-4}$ сек, а ВАХ для каждой отдельной точки поверхности рассчитывались из значений тока растекания последовательной серии карт, полученных при разных значениях потенциала на зонде. Сопоставление данных топографии и карт растекания позволяло контролировать точность совмещения данных различных карт и восстанавливать ВАХ для каждой точки участка исследованной поверхности. Методика впервые обеспечила возможность воспроизводимого измерения локальных электрофизических свойств контактов In/PbTe и может быть рекомендована для измерения ВАХ других материалов с низкими значениями порога пластического течения.

В главе также приведены краткие сведения о конструкции и технических особенностях атомно-силовых микроскопов, используемых в работе. Особое внимание уделено выбору условий эксперимента (выбор параметров зондовых датчиков, тестирование и т.п.).

Четвертая глава посвящена разработке методов и методик СЗМ и исследованию локальных электрофизических свойств контактов металл-полупроводник на примере контактов In/PbTe .

Для обеспечения новых аналитических возможностей получения информации о процессах, протекающих на начальной стадии формирования контакта по всей его площади и в отдельных нанообластях, в работе было предложено использовать металлический контакт с наноостровковой структурой без образования эквипотенциального слоя. Таким образом, обеспечивалась латеральная локальность измерений, определяемая площадью каждого отдельного изолированного островка наносистемы, при сохранении возможности оценки свойств материала по площади всей системы наноконтактов в целом.

В главе описана технология нанесения систем индиевых микроконтактов, каждый из которых представляет систему островковых наноконтактов. Получена серия образцов In/PbTe с микроконтактами. Контроль условия изолированности наноконтактов друг от друга осуществлялся с помощью сопоставления данных сопротивления растекания и топографии индивидуального микроконтакта In/PbTe при одновременной их регистрации. Показано, что формирование микросистемы изолированных наноконтактов обеспечивает диагностику электрофизических свойств с разрешением $\sim 30\text{-}50$ нм. Исследование особенностей электрофизических свойств контактов проводилось по оригинальной методике (глава 3), позволяющей строить ВАХ по данным комплекта карт проводимости.

Комплексный анализ экспериментальных данных топографии и сопротивления растекания, полученных методами атомно-силовой микроскопии, впервые позволил визуализировать информацию о локализации и развитии проводящих участков (шунтов) в реальных контактах In/PbTe при вариации и смене полярности напряжения.

Впервые обнаружены особенности протекания тока при вариации напряжения (рис. 6), которые отражают значительно более сложные физико-химические процессы, протекающие в приповерхностном слое PbTe на границе с In, чем предлагается в традиционных моделях, основанных на влиянии вновь образующихся дислокаций. В то же время эти результаты находятся в согласии с общими закономерностями образования оксидных фаз, протекающих с параллельным выделением избыточного свинца в кластеры [7].

Таким образом, предложенный комбинированный способ, состоящий из методики формирования металлического микроконтакта с наноостровковой структурой, сканирующей микроскопии сопротивления растекания при вариации значений приложенного напряжения в двух полярных направлениях, построения локальных вольт-амперных характеристик и цифровой обработки изображений, включая наложение, обеспечивает визуализацию наносшунтов и наночастиц с аномальными электрофизическими характеристиками на интерфейсе «металл-полупроводник». Принципиально метод применим для анализа широкого класса систем «металл-полупроводник».

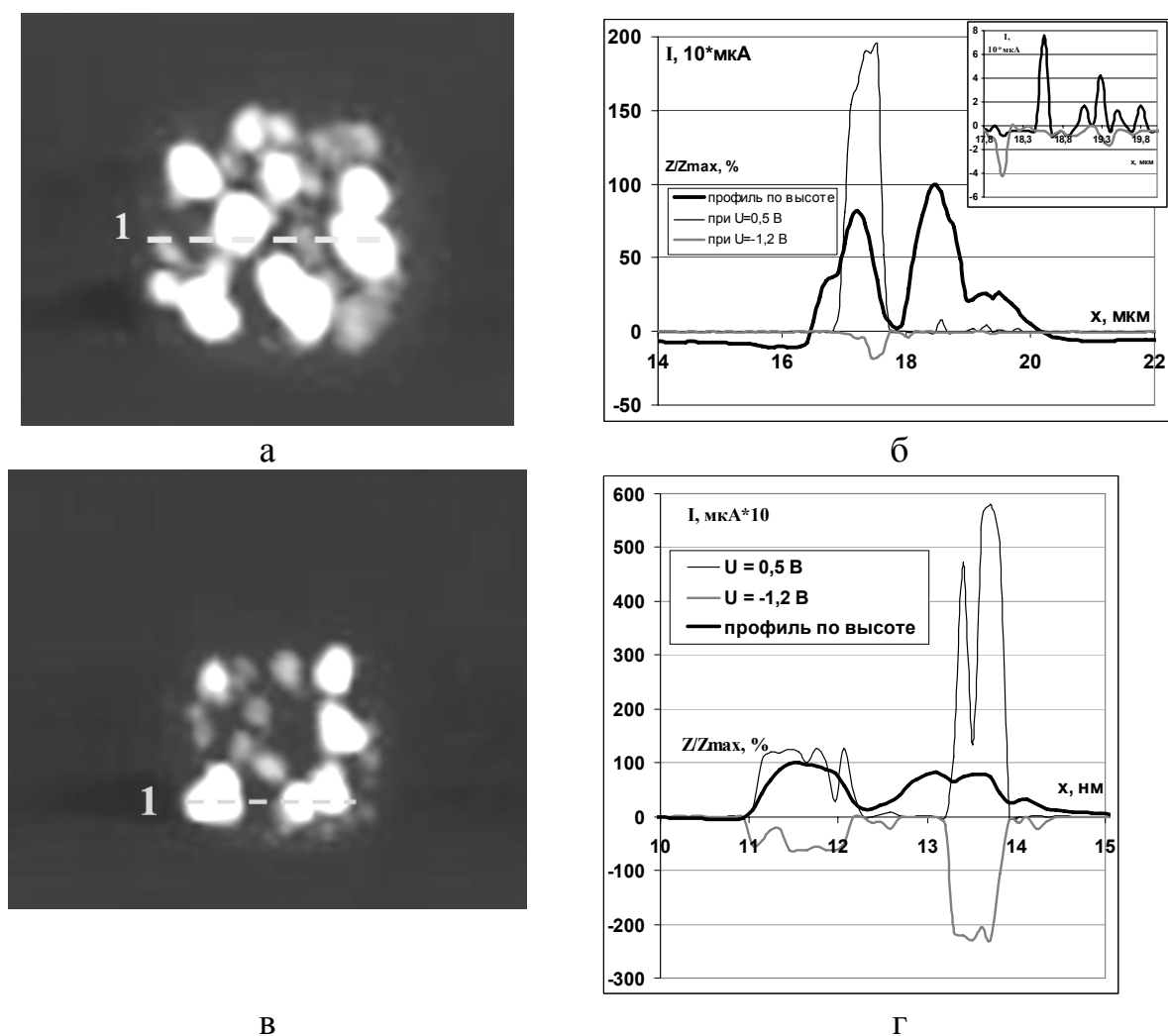


Рис. 6. Исследование проводимости наноконтактов с учетом их топографии при вариации напряжения: а, б – топография системы наноконтактов, размер изображения $\sim 6 \text{ мкм} \times 6 \text{ мкм}$; в, г – зависимость $I(x)$ вдоль профиля № 1 для приведенных контактов соответственно;

В пятой главе приведены исследования строения и электрофизических свойств фоточувствительных поликристаллических слоев на основе селенида свинца для фотоприемников методами атомно-силовой микроскопии. В главе кратко описаны основные этапы изготовления фотоприемников на основе легированных слоев PbSe и твердых растворов $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Se}$.

Важную роль для оптимизации параметров фоточувствительных слоев играют процессы рекристаллизации зерен поликристаллической пленки, протекающие при сенсibiliзирующем отжиге. Оптимальной для фотоприемников является сетчатая перколяционная структура, в которой границы трех зерен находятся под углом 120° . В этом случае границы устойчивы, так как механические напряжения взаимно уравнивают друг друга. Для поликристаллических фоточувствительных слоев оптимальный средний размер зерна

должен быть порядка $1/\alpha$, где α – коэффициент оптического поглощения. $\alpha \approx 2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$, что соответствует диаметру зерна $\sim 0,5 \text{ мкм}$.

Фоточувствительные свойства слоев значительно зависят от состава оксидной фазы (PbO_x , PbSeO_3 или оксиселениты $2\text{PbO} \cdot \text{PbSeO}_3$, $4\text{PbO} \cdot \text{PbSeO}_3$).

Образование оксидов зависит не только от условий окисления, но и от концентрации носителей заряда (отклонения от стехиометрии) в исходных образцах. Наконец, при создании конкретных типов фоточувствительных слоев, функционирующих в кислородосодержащей атмосфере, могут быть использованы эффекты адсорбции. Тогда эффективность работы всего слоя зависит

от соотношения значений длины экранирования Дебая, размеров зерен и контактных областей между ними. На всех этапах термических процессов изготовления и сенсбилизации фоточувствительных слоев происходит перераспределение элементов, сопровождающиеся изменением концентрации носителей заряда. Целенаправленное изменение условий обработки позволяет дополнительно усилить эффект фотопроводимости при создании p-n перехода внутри зерен. Методики, разработанные на основе СЗМ, могут быть использованы для контроля всех этих параметров поликристаллических слоев PbSe и твердых растворов $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Se}$ при осуществлении фотосенсибилизации в йодосодержащей среде.

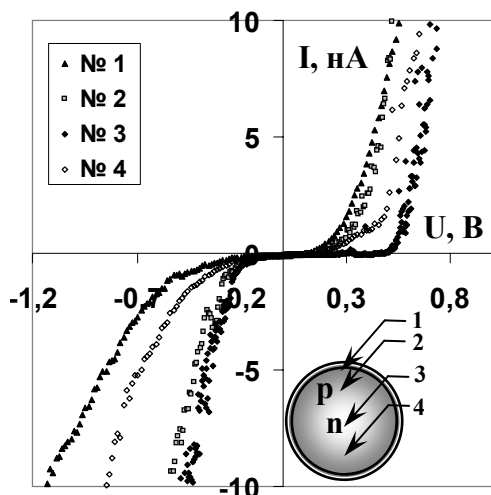


Рис. 8. Изменение положения ВАХ относительно $U=0\text{В}$ в зависимости от цикла травления слоя.

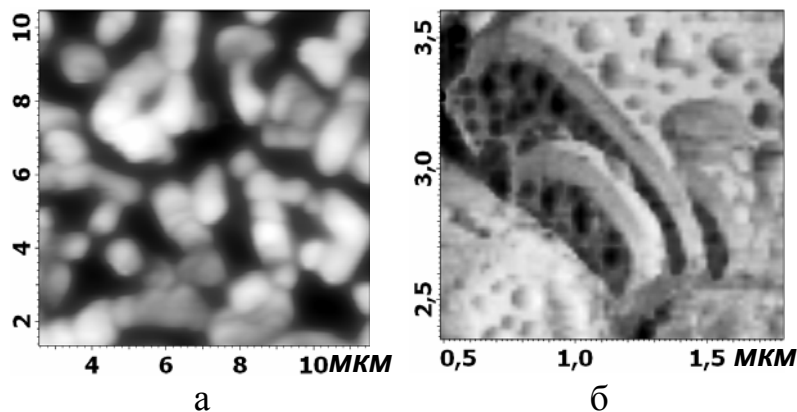


Рис. 7. Рельеф поверхности по данным АСМ фоточувствительного слоя на основе $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Se}$ <I> (а) и латерально-силовая микроскопия зерна (б)

По данным латерально-силовой микроскопии фоточувствительных слоев на основе PbCdSe <I> обнаружено, что реструктурирование поверхности кристаллитов протекает существенно быстрее при значениях температуры, превышающей температуру плавления PbI_2 . Внутренний объем зерна является гетерофазным (Рис.7), а образование оксидных фаз зависит от значения парциального давления йода.

По данным латерально-силовой микроскопии фоточувствительных слоев на основе PbCdSe <I> обнаружено, что реструктурирование поверхности кристаллитов протекает существенно быстрее при значениях температуры, превышающей температуру плавления PbI_2 . Внутренний объем зерна является гетерофазным (Рис.7), а образование оксидных фаз зависит от значения парциального давления йода.

Исследования характера проводимости слоя после травления оксидного покрытия показали, что перколяционный кластер содержит «мертвые» ветви, не включенные в процесс токопереноса и основной проводящий канал.

Для изучения распределения электрофизических свойств внутри зерен и на границе, а также для идентификации состава оксидов по значению ширины запрещенной зоны были исследованы локальные вольт-амперные характеристики зерен через тонкий диэлектрик.

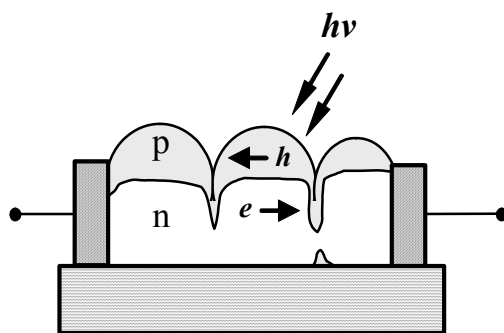


Рис. 9. Схема разреза фоточувствительного слоя с р-п переходом и 2 каналами проводимости (цепочка зерен условно представлена 3 зернами).

слоях n-PbSe, подвергаемых последовательному окислению, по данным спектров отражения.

Традиционно фоточувствительные структуры на основе поликристаллических слоев PbSe формируются на стеклянных подложках определенного состава и после специальной обработки. В работе для изучения возможности получения таких структур на кремнии были проведены эксперименты по получению слоев PbSe на подложках Si и пор-Si. Было показано по данным оптической и растровой электронной микроскопий, что слои на пористом кремнии обладают лучшей адгезией, в отличие от слоев PbSe на кремнии, которые характеризовались многочисленными механическими дефектами.

Для улучшения механических и фотоэлектрических свойств ФП рекомендовано создание фоточувствительной структуры на предварительно созданном сетчатом рельефе. Показано эффективное применение в качестве подложек диэлектрических слоев пор- Al_2O_3 .

Исследования ВАХ проводили в контактном режиме для того, чтобы падение напряжения между зондом и полупроводником происходило в основном на оксидной оболочке зерна. Методика эксперимента заключалась в последовательном повторении циклов: травление слоя – выдержка на воздухе – измерения ВАХ (рис.8). По данным эксперимента видно, что в центре зерна наблюдается смена типа проводимости от поверхности (р-тип) к центру (n-тип), рис.9. Эти результаты находятся в согласии с данными по определению концентрации носителей заряда в поликристаллических

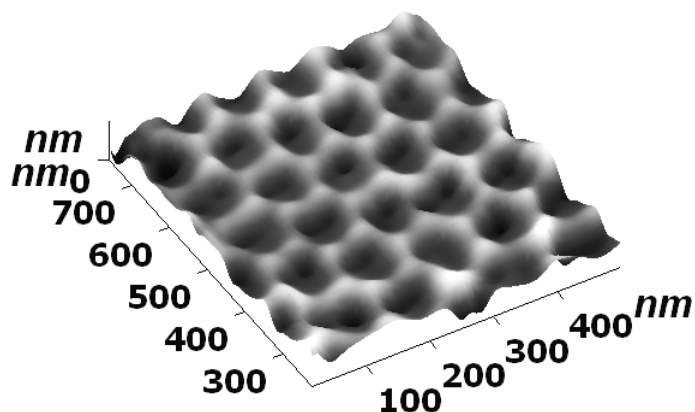


Рис. 10. Топография слоя пор- Al_2O_3 для создания эффективных сетчатых структур ФП (глубина пор \approx 20-40 нм).

Высокоупорядоченные слои $\text{rog-Al}_2\text{O}_3$, полученные методом электрохимического анодирования Al, представлены на рис. 10.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты работы, полученные автором.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ:

1. Установлено, что эпитаксиальный рост слоев PbTe (111) на подложках BaF_2 осуществляется послойно вокруг винтовых дислокаций, скорость роста определяется скоростью встраивания атомов, адсорбированных на поверхности подложки, причем влияние барьера Швёбеля заметно, что приводит к выравниванию соседних ступеней роста по ширине.
2. Впервые обнаружены специфические дефекты в эпитаксиальных слоях PbTe/ BaF_2 – несквозные нанотрубки (диаметром $\sim 140\text{-}600$ нм), глубина которых варьировалась в диапазоне $\sim 1\text{-}10$ монослоев и более.
3. Предложена модель образования несквозных трубчатых дефектов из-за снижения скорости роста нижней ступени при сближении фронтов соседних спиралей роста.
4. Обнаружено присутствие 30-градусных ступеней на поверхности эпитаксиального слоя PbTe (111) и установлено, что образование 30-градусных ступеней происходит при активизации скольжения дислокаций с выходом на поверхность в системе скольжения $\langle 112 \rangle \{110\}$.
5. Плотность 30-градусных террас на поверхности эпитаксиальных слоев PbTe (111) возрастает с ростом рассогласования слоев гетерокомпозиции по параметру кристаллической решетки.
6. Предложена и разработана методика для исключения необратимых процессов изменения структуры образца за счет локального разогрева при контактной области; сущность новой методики заключается в том, что при сканировании поверхности образца за один проход зонда регистрируется как информация о топологии поверхности объекта, так и интенсивность сигнала по току при различном приложенном напряжении, затем формируется комплект карт проводимости, после обработки, которых осуществляется построение локальных ВАХ.
7. Предложена и реализована новая методика, позволяющая диагностировать изменения локальных электрофизических свойств контактов на начальных этапах их формирования.
8. Отработана технология формирования системы островковых микроконтактов In/PbTe электронно-лучевым испарением на холодные подложки через маску; получены системы из микроконтактов (общая площадь каждого $\approx 9\text{ мкм}^2$); каждый микроконтакт состоит из изолированных островков площадью $0,03\text{-}2\text{ мкм}^2$ и высотой $30\text{-}40$ нм.
9. Показано, что анализ локальных путей протекания тока с помощью сопоставления данных топографии и сопротивления растекания, позволяет по-

лучать информацию о характере и локализации проводящих участков в реальных контактах металл-полупроводник, а также проведение анализа развития шунтов при вариации и смене полярности приложенного напряжения.

10. Впервые установлено, что уже на начальных этапах формирования контакта In/PbTe происходит формирование локальных p-n переходов в приповерхностной области полупроводника.
11. Разработанный комплекс диагностики поликристаллических слоев селенида свинца на основе регистрации ВАХ впервые позволил проводить контроль параметров и свойств наноструктурированной фоточувствительных структур, включая контроль образования p-n переходов внутри зерна.
12. Методом латерально-силовой микроскопии исследованы особенности переструктурирования кристаллитов слоев PbCdSe в атмосфере йода, связанные с возникновением нанофаз в объеме слоя из-за образования жидкой фазы на границе оксид-зерно в процессе рекристаллизации.
13. Экспериментально доказана возможность формирования поликристаллических слоев PbSe с хорошей адгезией к кремнию за счет применения микропористых буферных слоев por-Si. При этом развитая поверхность пористого кремния значительно окисляется, что является дополнительным источником кислорода при формировании фоточувствительных структур в процессе отжига.

Литература:

1. Two-Dimensional Monolithic Lead Chalcogenide Infrared Sensor Arrays on Silicon Read-Out-Chips and Noise Mechanisms / H. Zogg, K. Alchlabi, D. Zimin, K. Kellermann // IEEE, Transactions on Electron Devices.- January 2003.- V. 50, NO.1.- P. 209-213.
2. Zogg, H. IV-VI (Lead Chalcogenide) Infrared Sensors and Lasers/ H. Zogg, A. Ishida // Infrared Detectors and Emitters: Materials and Devices (ed. P. Capper, C. T. Elliott).- Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000.- 478p.
3. Голубченко, Н.В. Кинетика и механизмы окисления поликристаллических слоев селенида свинца, легированных висмутом / Н.В. Голубченко, В.А. Мошников, Д.Б.Чеснокова // Материалы электронной техники. – 2005.- № 1.- С. 23 – 28.
4. Spiral Growth and Treading Dislocations for Molecular Beam Epitaxy of PbTe on BaF₂(111) Studied by Scanning tunneling microscopy / G. Springholz, A.Y. Ueta, N. Frank, G. Bauer //Appl. Phys. Rev.-1996.- V.69, No.19.- P. 2822-2824.
5. Неволин, В.К. Зондовые нанотехнологии в электронике /В.К. Неволин.- М.: Техносфера, 2005. -148с.
6. Поверхностно-барьерные структуры с промежуточным слоев на Pb_{0,77}Sn_{0,23}Te / Гришина Т.А. и др. // ЖТФ.-1987.- Т.57, Вып.12.- С.2355-2360.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Из перечня изданий, рекомендованных ВАК:

1. Гамарц, А.Е. Определение концентрации носителей заряда в поликристаллических слоях селенида свинца на основе спектров отражения / А.Е. Гамарц, Ю.М. Канагеева (Спивак), В.А. Мошников // Физика и техника полупроводников.-2004.- Т.39, Вып. 6.-С. 667-668.
2. Гамарц, А.Е. Многослойные структуры PbSe/pog-Si/Si и их электрофизические свойства / А.Е. Гамарц, Ю.М. Канагеева (Спивак) // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Известия государственного электротехнического университета). Сер. Физика твердого тела и электроника.-2005.- Вып.1.- С.9-16.
3. Канагеева (Спивак), Ю.М. Особенности измерений электрофизических свойств фотодиодов на основе эпитаксиальных слоев PbTe для среднего ИК -диапазона с помощью атомно-силовой микроскопии / Ю.М. Канагеева (Спивак) и др. // Вакуумная техника и технология.- 2008.- Т.18, № 1.- С. 3-8.
4. Канагеева (Спивак), Ю.М. Исследование свойств матриц на основе In/PbTe методами атомно-силовой микроскопии с помощью специальной системы наноконтактов / Ю.М. Канагеева (Спивак), В.А. Мошников // Вакуумная техника и технология.- 2008.- Т.18, № 2.-С. 87-94.

и другие:

5. Использование электрохимических методов при изготовлении активных элементов сенсорных структур / С.В.Кощев , Ю.М. Канагеева (Спивак) , А.И. Максимов и др. // Технология и дизайн микросхем: материалы науч. молодежной школы, г. Санкт-Петербург, 15-16 нояб. 2005г.- СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005.- С. 81-89.
6. Изучение структурно-морфологических особенностей макропористого кремния при препарировании образцов остросфокусированным ионным пучком / Ю.М. Канагеева (Спивак) и др. // Петербургский журнал электроники.-2007.- №1.- С.30-34.
7. Канагеева (Спивак), Ю.М. Релаксация механических напряжений в эпитаксиальных структурах на основе PbTe (111) по данным атомно-силовой микроскопии / Ю.М. Канагеева (Спивак) // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Известия государственного электротехнического университета). Сер. Физика твердого тела и электроника.-2007.- Вып. 1.-С.33-38.