

АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА

На правах рукописи

МИКРОСТРУКТУРА И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ МАТЕРИАЛОВ Si, ZnO, CdS, MoSe₂, InAs_{1-x}Sb_x

Специальность: 2220.01 – Физика полупроводников

Отрасль науки: Физика

Соискатель: **Алиева Егяна Наги кызы**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора философии

Баку – 2021

Диссертационная работа выполнена в Институте физики
Национальной академии наук Азербайджана (НАНА)

Научный руководитель: доктор физико-математических
наук, доцент
Байрамов Аяз Идаят оглы

Официальные оппоненты: член корреспондент НАНА, доктор
физико-математических наук,
профессор
Казимзаде Айдын Гасан оглы
доктор физико-математических
наук, профессор
Годжаев Эльдар Мехралы оглы
доктор физико-математических
наук, профессор
Аллахвердиев Керим Рагим оглы

Диссертационный совет Высшей Аттестационной Комиссии при
Президенте Азербайджанской Республики, действующий на базе
Института физики Национальной Академии Наук Азербайджана
под номером ED 1.14

Председатель диссертационного совета:

Действительный член НАНА, доктор
физико-математических наук, профессор
Мамедов Назим Тимур оглы

Ученый секретарь диссертационного совета:

доктор физико-математических
наук, доцент
Мехдиева Рафига Забил кызы

Председатель научного семинара:

доктор физико-математических
наук, доцент
Мехдиев Талат Рзагулу оглы



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы и степень изученности темы.

Стремительное развитие науки в последние десятилетия привело к тому, что, в связи с миниатюризацией электронных устройств, относительно новая область физики – микроэлектроника, сменилась уже на более перспективную – наноэлектроника. С переходом в нанометровую область размеров исследуемых объектов возникла потребность в использовании принципиально новых методик исследования наноструктур. Работа существующих оптических микроскопов существенно ограничена разрешением в 200 нм, определяемым дифракционным критерием Рэлея.

Значительным событием для развития физики низкоразмерных систем и микрообъектов явилось создание сначала сканирующего туннельного микроскопа (СТМ), а затем атомно-силового микроскопа (АСМ) и разнообразных методик на их основе, объединённых в настоящее время в новое направление физических исследований – сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ). На сегодня сканирующая зондовая микроскопия - один из мощных современных методов исследования морфологии и локальных свойств поверхности твердого тела с высоким пространственным разрешением около 1 Ангстрем.

В последние годы сканирующий зондовый микроскоп стал не только исследовательским, но и технологическим инструментом. Его успешно используют для создания новых уникальных физических приборов, таких как одноэлектронный транзистор, спиновый транзистор, а также для изготовления носителей памяти с гигантскими плотностями записи (до 10^{10} бит/см²).

Наибольшее применение сканирующие зондовые методики нашли в исследованиях тонкоплёночных покрытий. Как известно, в настоящее время широкое применение в устройствах оптоэлектроники нашли тонкопленочные материалы, имеющие

широкие функциональные возможности при малых объёмах, что способствует удешевлению и миниатюризации самих устройств.

Тонкоплёночные материалы получают в основном методами двух типов – физическим и химическим. В физических методах энергия частиц падающего на поверхность подложки вещества значительно больше, чем в химических, поскольку напыление производят в большинстве случаев в плазме магнетронного разряда (magnetron sputtering), молекулярных пучков (molecular beam epitaxy) или лазерного факела (pulsed laser deposition). Большая кинетическая энергия частиц способствует образованию плёнок с более совершенной кристаллической структурой за счет высокой поверхностной диффузионной подвижности частиц.

В технологии получения высококачественных тонких плёнок свободных от внутренних напряжений и дислокаций важную роль играет выбор подложки, на которой будет происходить рост тонких плёнок. Получение таких микроструктур является само по себе уникальной и сложной технологической задачей, достигаемой использованием специальных методов и режимов выращивания тонкоплёночных структур, релаксация напряжения при которых происходит преимущественно путём образования дислокаций несоответствия, локализованных в области интерфейса.

Возможность получения высококачественных тонкоплёночных материалов для нужд современной оптоэлектроники (солнечных и термоэлектрических преобразователей, диодных лазеров, светоизлучающих диодов, фотоприемников, тепловизоров, насыщающихся поглотителей, модуляторов, фильтров и т. д.), появление новых высокотехнологичных установок для диагностики и всестороннего изучения физических свойств тонких плёнок стимулируют интенсивные исследования в этом направлении.

Функциональная нагрузка тонкой плёнки в приборной структуре может быть различной. В зависимости от требуемой функциональности (требуемого дизайна), технология получения (технологический дизайн) плёнки может варьироваться и

включать в себя, помимо основного метода получения, дополнительное легирование и даже модификацию поверхности уже полученной плёнки. Оптимальный дизайн и окончательная технология изготовления устанавливаются путём переборки различных методов получения и дополнительных процедур до достижения требуемой функциональности, которая, в свою очередь, уже проверяется чисто физическими методами.

Настоящая работа посвящена пост-технологическому анализу физических явлений в тонких плёнках Si, ZnO, CdS, MoSe₂ и InAs_{1-x}Sb_x, дизайн которых подразумевает детальное рассмотрение их микроструктуры, оптических, а в ряде случаев и электрических свойств.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является исследование микроструктуры, оптических, а в ряде случаев и электрических свойств тонких плёнок коммерческих полупроводниковых материалов Si, ZnO, CdS, MoSe₂ и InAs_{1-x}Sb_x, с разным, в зависимости от материала, технологическим дизайном тонкой пленки.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены задачи полной пост-технологической характеристики структуры, морфологии, оптических, а в ряде случаев, и электрических свойств тонких плёнок со следующим технологическим дизайном для каждого из упомянутых материалов:

1. Стандартная коммерческая кремниевая структура Si:B/SiO₂ (захороненный буферный слой оксида кремния)/Si:B (подложка) и аналогичная структура с субволновой дифракционной решёткой, полученной в результате наногрейтинга поверхности тонкого слоя Si:B методом лазерной литографии.
2. Тонкоплёночные структуры фуллерен C₆₀/Si и фуллерен C₆₀/Si (пористый).
3. Тонкоплёночные структуры ZnO/подложка и ZnO:Al/подложка, полученные методом магнетронного распыления на подложках из натриево-известкового стекла

в атмосфере газовой смеси кислород/аргон с различным соотношением O/Ar (0-6% O₂).

4. Тонкоплёночная структура CdS/подложка с наноструктурированной тонкой пленкой CdS, полученной на стеклянной подложке методом аэрозольного пиролиза из растворов с различным показателем pH.
5. Нерелаксированные гетероэпитаксиальные структуры InAs_{1-x}Sb_x при x=0,43 и 0,38, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии при оптимальном выборе промежуточного буфера переменного состава для плавного изменения параметра решётки и подборе оптимальных толщин и режимов (температурных и временных) эпитаксиального роста буферного и рабочего слоёв,
6. Тонкоплёночная структура MoSe₂/подложка, полученная магнетронным распылением Mo на подложку из стекла и последующей термической обработкой полученной пленки в насыщенных парах селена.

Методы исследований. Основными источниками получения данных по микроструктуре в настоящей работе являлись:

- Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) - атомно-силовая (АСМ) и туннельная (СТМ),
- Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), включая анализ элементного состава (ЭДРС – Энерго-Дисперсионная Рентгеновская Спектроскопия)
- Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) и
- Рентгеновская дифрактометрия.

Методами исследования оптических свойств являлись:

- Спектроскопическая эллипсометрия, дающая полную информацию о диэлектрической функции, которая описывает все оптические свойства материала за исключением люминесценции и Рамановского рассеяния,
- Стандартная и конфокальная фотолюминесцентная спектроскопии,
- Конфокальная микроскопия Рамановского рассеяния.

Основные научные положения, выносимые на защиту.

1. Фундаментальная перестройка электронного спектра кремния и гигантское увеличение проводимости на интерфейсе тонкий кремниевый слой/буферный слой оксида кремния являются следствием наногрейтингования поверхности с периодом сравнимым с Де-Бройлевской длиной волны электронов вблизи уровня Ферми.
2. Рост интенсивности на два порядка и доминирование молекулярных излучательных переходов над межзонными в структуре твердотельный фуллерен C_{60} /пористый кремний /кремний по сравнению со структурами с аналогичным фуллереном, осаждённым на стекло или кремний, связан с глубоким проникновением мономолекулярного C_{60} в поры кремния и релаксацией правил отбора для оптических переходов из-за сильного взаимодействия проникнутых молекул со стенками пор.
3. Спектральные особенности фотолюминесценции тонких пленок CdS при наличии в матрице кристаллических зерен с размерами меньше 10 нм, являются следствием квантового размерного эффекта.
4. Низкая концентрация наноразмерных (<10 нм) зерен CdS, как центров излучения с огромной силой осциллятора, но пренебрежимо малой плотностью состояний по сравнению с плотностью собственных состояний объемного CdS приводит к трудности обнаружения квантового размерного эффекта в диэлектрической функции CdS.
5. В Бруггемановском приближении эффективной среды параметр, описывающий оптическую степень кристалличности тонкой пленки, находится аналитически.
6. Когерентный рост твердых растворов $InAs_{0,57}Sb_{0,43}$ и $InAs_{0,62}Sb_{0,38}$ на градиентных буферных слоях $AlGaInSb$ и $GaInSb$, соответственно, обусловлен локализацией дефектов несоответствия на интерфейсах подложка-буфер и низкой плотностью пронизывающих дислокаций (менее 10^7 см^{-2}).

7. Мнимая часть диэлектрической функции MoSe_2 , полученная экспериментально методом спектральной эллипсометрии и рассчитанная с использованием функционала плотности качественно хорошо согласуются в широкой области энергий фотона за исключением оптических переходов вблизи энергетической щели из-за не учёта кулоновского взаимодействия электрона и дырки в рамках одноэлектронного приближения.

Научная новизна исследований.

1. Показано, что наногрейтинг (с периодом меньшим 250 нм) на интерфейсе тонкий кремниевый слой/буферный слой оксида кремния приводит к созданию поверхностной сверхрешетки с характерными излучательными переходами в квантовой яме.
2. Показано, что в кремниевых структурах с субволновой дифракционной решёткой происходит значительное увеличение (на 2-3 порядка величины) концентрации свободных электронов.
3. Показано, что тонкие пленки фуллерена C_{60} на стеклянной подложке представляют собой смешанную систему молекулярный кристалл - зонный полупроводник, с характерными излучательными переходами между вибранными состояниями синглетного экситона Френкеля, с одной стороны, и излучательными межзонными переходами на краю фундаментального поглощения, с другой.
4. Показано, что по- крайней мере для пленок широкозонных полупроводников (таких как, например, ZnO) следует ввести оптическую степень кристалличности, показывающую насколько диэлектрическая функция плёнки отличается от её значений для идеального монокристалла.
5. Показано, что изменение состава x тонких пленок твердого раствора $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, позволяющее уменьшить ширину запрещенной зоны до 100 мэВ, не приводит к повышению

дефектности и нарушению высокой степени однородности, свойственных InAs и InSb.

Теоретическая и практическая значимость исследований. Теоретическая значимость проведенных исследований связана с описанием сложных оптических явлений, наблюдаемых в исследованных тонких пленках с различным дизайном в рамках существующих теоретических представлений о взаимодействии электромагнитного излучения с веществом, как при наличии на поверхности субволновой дифракционной решетки с периодом сравнимым с длиной волны Де-Бройля электрона в кристалле, так и в случае смешанной системы полупроводник-молекулярный кристалл.

Полученные в диссертации результаты исследований кремниевых структур с субволновой дифракционной решёткой являются первым шагом в создании лазеров на квантовых ямах с длиной волны, регулируемой периодом дифракционной решётки. Кроме того, наногрейтинг может быть использовано для электронного легирования полупроводниковых материалов без химического введения примесей (так называемое G-легирование).

Данные исследований тонких плёнок ZnO, ZnO:Al и CdS могут быть полезны для создания широкозонного оконного слоя в рамках TCO (Transparent Conductive Oxide) технологий при конструировании солнечных элементов второго поколения.

Такой универсальный параметр как оптическая степень кристалличности, введённая в настоящей работе, может служить для экспресс анализа и аккуратной оценки качества оптоэлектронного материала, полученного в результате того или иного технологического процесса.

Результаты исследований нерелаксированных гетероэпитаксиальных структур $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ при $x=0,43$ и $0,38$ можно использовать для разработки и создания диодных лазеров, светоизлучающих диодов (СИД), фотоприемников и др. в технологически важной области спектра от 3 до 12 мкм, в которую попадают окна прозрачности атмосферы.

Данные по микроструктуре и оптическим параметрам тонкоплёночных структур, включающих MoSe_2 могут быть использованы при конструировании и создании миниатюрных и низкокзатратных фототранзисторов и сенсоров.

Личный вклад соискателя. Соискатель единолично проводил исследования и анализ микроструктуры тонких плёнок, принимал непосредственное участие в оптических экспериментах, самостоятельно обрабатывал полученные данные на базе специализированного программного обеспечения и проводил комплексный анализ всей совокупности полученных результатов на основе современных представлений о связи структуры и физических процессов в полупроводниках и молекулярных кристаллах, происходящих под действием электромагнитного излучения.

Апробация и применение. Результаты исследований, изложенные в диссертации, обсуждались на Международных конференциях International Conference Thin Films ICTF 16, (Хорватия, Дубровник, 2014), Baku World Forum of Young Scientists (Azerbaijan, Baku, 2014), International Conference on Ternary and Multinary Compounds ICTMC 19 (Japan, Niigata, 2014), Materials Science and Engineering MSE 2014 (Germany, Darmstadt, 2014), International Conference on Spectroscopic Ellipsometry ICSE-7 (Germany, Berlin, 2016), ICTMC 20 (Germany, Halle, 2016), XIV Межд. Конференции «Физика диэлектриков» (Россия, Санкт-Петербург, 2017), 17 International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technology, Computer Simulations (Belarus, Minsk, 2017), 25 Annual International Conference on COMPOSITES/NANO ENGINEERING ICCE-25 (Italy, Rome, 2017), 52-ой Школы ФГБУ «ПИАФ» по физике конденсированного состояния (Россия, Петербург, 2018).

Разработанный метод скрайбирования с использованием АСМ для получения на поверхности полупроводников дифракционных решеток с периодом в 100 нм, что пока недостижимо для существующих промышленных технологий, является важным нанотехнологическим процессом,

приближающим период грейтирования к Де-Бройлевской длине волны электронов в полупроводниках и открывающим путь к использованию квантовых эффектов в коммерческих материалах при комнатной температуре. Разработанный метод запатентован (Патент: «Способ формирования наноразмерных элементов на тонком слое полупроводникового материала» і 2016 0086).

Название организации, в которой выполнена диссертационная работа. Диссертация была выполнена в Инновационном секторе Института Физики Национальной Академии Наук Азербайджана.

Опубликованные работы. Основные материалы диссертации были опубликованы в 28 публикациях, из них 15 статей (в том числе 9 в иностранных журналах с импакт фактором) и 13 тезисов.

Объем, структура и основное содержание диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения 8 стр. (14125), пяти глав (I глава 18 стр. (17275), II глава 44 стр. (49261), III глава 24 стр. (22723), IV глава 36 стр. (32804), V глава 28 стр. (22323)) выводов (2 стр. (2938)), изложена на 176 страницах, включая 68 рисунка, 6 таблиц и список цитируемой литературы из 115 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность избранной темы, сформулированы цель и основные задачи работы, научная новизна, практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, и кратко изложено основное содержание диссертационной работы.

В первой главе «Методы исследований кристаллической структуры и морфологии поверхности объёмных и тонкоплёночных материалов» диссертации подробно описаны устройство и принцип работы атомно-силового микроскопа и сканирующего туннельного микроскопа. Приводятся режимы работы атомно-силового и туннельного микроскопов. Приводится точность измерений и факторы,

вливающие на чувствительность и пространственное разрешение устройств.

Существуют различные методы исследования структуры кристаллического строения объёмных и тонкоплёночных материалов. Это методы дифракции рентгеновских лучей, нейтронов (нейтронография) и электронов (электронография).

Нами для исследований структуры кристаллов в основном использовался метод высокоразрешающей рентгеновской дифракции. Для выяснения соответствия параметров решётки тонкоплёночной структуры и подложки снимались кривые качания и исследовались карты обратного пространства. Для изучения морфологии и локальных свойств поверхности объёмных и тонкоплёночных материалов с высоким пространственным разрешением нами использовались современные методы сканирующей зондовой микроскопии поверхностей - атомно-силовая микроскопия, туннельная микроскопия и сканирующая электронная микроскопия.

Рентгеноструктурные исследования, полученных тонкоплёночных структур проводились на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance Bruker comp., Germany и на рентгеновском дифрактометре Bruker D2 Phaser, Bruker comp., Germany.

С помощью рентгеновского дифрактометра Bruker D8 Advance проводился:

- качественный и количественный анализ кристаллических фаз,
- определение размеров кристаллитов.

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) - один из мощных современных методов исследования морфологии и локальных свойств поверхности твердого тела с высоким пространственным разрешением. В исследованиях нами использовался микроскоп AIST-NT (Tokyo Instruments, Japan), работающий в режимах атомно-силового и туннельного микроскопов.

Рабочая часть зондов (острие) имела размеры порядка нанометров, в зависимости от режима исследования.

Характерное расстояние между зондом и поверхностью образцов составляло 0,1 – 10 нм.

Во второй главе «Кремниевые структуры с субволновой дифракционной решёткой и слоем фуллерена (C₆₀) на поверхности» приводятся результаты, по исследованию электрических и оптических свойств наногрейтированного слоя Si, полученного на поверхности Si/SiO₂ приборной структуры, а также оптических свойств тонких пленок фуллерена C₆₀, осажденных на поверхность пористого кремния (PS). Исследования электрических свойств проводились 4-зондовым методом.

Была обнаружена заметная металлизация наногрейтированной структуры Si/SiO₂, которая объясняется увеличением числа электронов проводимости вследствие депрессии занятых квантовых состояний в валентной зоне кремния.

Важно отметить, что указанное выше увеличение концентрации электронов проводимости или так называемое геометрически индуцированное легирование (G-допинг), является результатом перестройки спектра собственных состояний электронов. Влияние G -допинга было обнаружено, также и на оптические переходы в областях выше энергетической щели полупроводникового слоя с поверхностной решеткой. В частности, в наногрейтированных структурах в диапазоне энергии фотонов 1.1– 3.2eV, при которых межзонные оптические переходы в Si запрещены, наблюдается широкое и интенсивное излучение с частично разрешенными и почти эквидистантными пиками, разделенными ~130 meV.

Демонстрируется возможность наногрейтирования поверхности материалов используя атомно-силовой микроскоп при условии по- крайней мере на порядок меньшей твёрдости этого материала по сравнению с твердостью острия кантилевера.

C₆₀/стекло, C₆₀/Si, C₆₀/PS/Si, а также пористые тонкопленочные структуры PS/Si для сравнения, были исследованы методом фотолюминесцентной спектроскопии при комнатной температуре. Наряду с широкополосным

низкоэнергетическим излучением при 1,774 эВ в диапазоне энергий фотонов номинально запрещенных оптических переходов, пленки C_{60} на стеклянной подложке демонстрируют высокоэнергетические излучения при 2,115 эВ и 2,342 эВ в диапазоне разрешенных дипольных переходов. С другой стороны, пленки C_{60} на Si или PS/Si показывают только полосу излучения 1.774 эВ. Интенсивность этого излучения в $C_{60}/PS/Si$ в 200 раз выше, чем в C_{60}/Si , и, по крайней мере, в 20 раз превышает интенсивность излучения, наблюдаемого на пористом Si/Si. Такое резкое увеличение интенсивности излучения свидетельствует об ослаблении правил отбора для номинально запрещенных оптических переходов и предполагает сильное взаимодействие молекул C_{60} с пористыми стенками кремния. Молекулярные сигнатуры пленок C_{60} отчетливо проявляются в вибронных переходах с энергетическим разделением 60 мэВ (энергия Ag-моды) между уровнями излучения, наблюдаемыми в полосе излучения 1.774 эВ в $C_{60}/PS/Si$. Происхождение полос излучения 2.115 и 2.342 эВ анализируется в рамках зонной структуры стандартного полупроводника, а также полученных эллипсометрических данных. Первое соответствует межзонным переходам между дном зоны проводимости и потолком валентной зоны. Появление второго видимо связано с расщеплением валентной зоны в точке X зоны Бриллюэна пленки C_{60} за счет внутрикристаллического поля, причем величина расщепления кристаллическим полем составляет ~ 200 мэВ.

В третьей главе «Тонкие плёнки ZnO и CdS для применения в эффективных солнечных преобразователях» описана технология получения тонких пленок ZnO, ZnO: Al и CdS, всесторонние исследования их физических свойств. Тонкие пленки ZnO и ZnO: Al осаждались на подложках из натриево-известкового стекла методом магнетронного распыления при температурах подложки 200-400°C в газовой смеси кислород/аргон с различным соотношением O/Ar (0-6% O₂). Более высокие степени кристалличности для пленок ZnO: Al и ZnO достигались при температуре подложки 400°C и при

соотношении смеси (O/Ar) 0% и 4% соответственно. Кристалличность пленок, осажденных при температуре 300°C, демонстрируют относительно низкие значения и имеют максимум при 2% O₂.

АСМ исследования поверхности плёнок ZnO выявили, что поверхность носит нерегулярный характер с некоторыми пустотами, но улучшается при 4% соотношении O/Ar, что коррелирует с данными о кристалличности пленок из рентгенодифрактометрических исследований.

Из данных спектральных эллипсометрических исследований выявлено, что структуры в диэлектрической функции (как в ее реальной (ϵ_i), так и мнимой (ϵ_r) частях) пленок ZnO: Al, осажденных при соотношениях 2-4% O/Ar, уширяются и сдвигаются в область меньших энергий, что указывает на высокую концентрацию дефектов в этих образцах. В пленках ZnO минимальное уширение диэлектрической функции происходит при концентрации кислорода 4%, а положение пикового поглощения стабилизируется на уровне 3,29 эВ.

Анализ АСМ и рентгеновских данных для ZnO:Al и ZnO, с одной стороны, и данных по диэлектрической функции, с другой, показывает, что строгая корреляция между этими данными не всегда наблюдается, особенно если учесть тот факт, что уширение мнимой части диэлектрической функции, как известно, обратно пропорционально размеру зерен. Поэтому желательно ввести оптическую степень кристалличности, которая показывает, насколько диэлектрическая функция отличается от таковой для совершенного монокристалла.

Пусть ϵ_i мнимая часть диэлектрической функции ϵ , измеренной на поликристаллической пленке, ϵ_i^c мнимая часть эталонной диэлектрической функции ϵ^c , измеренной на монокристалле, ϵ_i^a мнимая часть гипотетической диэлектрической функции ϵ^a для аморфного материала. Тогда по определению степени кристалличности: $\epsilon_i = f\epsilon_i^c + (1 - f)\epsilon_i^a$, где f степень кристалличности. С другой стороны, в

приближении ВЕМА¹ (Bruggeman Effective Medium Approximation) имеем:

$$f \frac{\varepsilon^c - \varepsilon}{\varepsilon^c - 2\varepsilon} + (1 - f) \frac{\varepsilon^a - \varepsilon}{\varepsilon^a - 2\varepsilon} = 0$$

Комплексное уравнение для определения степени кристалличности тогда имеет вид:

$$\begin{aligned} 1 + \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \omega' \frac{\varepsilon_i(\omega') - f\varepsilon_i^c(\omega')}{(\omega')^2 - \omega^2} d\omega' + i \frac{\varepsilon_i(\omega) - f\varepsilon_i^c(\omega)}{1 - f} \\ = \operatorname{Re} \left(\frac{\varepsilon(\omega)\varepsilon^c(\omega) + 2\varepsilon(\omega)^2 - 3f\varepsilon(\omega)\varepsilon^c(\omega)}{\varepsilon^c(\omega) + 2\varepsilon(\omega) - 3f\varepsilon(\omega)} \right) \\ + \operatorname{Im} \left(\frac{\varepsilon(\omega)\varepsilon^c(\omega) + 2\varepsilon(\omega)^2 - 3f\varepsilon(\omega)\varepsilon^c(\omega)}{\varepsilon^c(\omega) + 2\varepsilon(\omega) - 3f\varepsilon(\omega)} \right) \end{aligned}$$

и содержит два уравнения (одно для действительной части, одно для мнимой) и степень кристалличности f , как неизвестное. Поэтому достаточно приравнять левую и правую мнимые части этого уравнения, получив кубическое уравнение относительно f . Решение этого уравнения в аналитическом виде известно. Всего возможно три варианта: а) решение имеет один реальный и два мнимых корня, б) решение имеет два реальных и один мнимый корень и с) все три корня реальны и отличны друг от друга. В каждом из этих случаев выбирается реальный положительный корень в интервале $0 \div 1$

Были проведены исследования электропроводности плёнок ZnO и ZnO: Al. Проводимость пленки, полученной при 400° С в атмосфере чистого Ar, составляет $3,5 \times 10^2 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ и уменьшается с увеличением содержания кислорода в смеси O/Ar. Снижение проводимости с увеличением содержания кислорода

¹ Adachi, S. Optical Properties of Crystalline and Amorphous Semiconductors: Materials and Fundamental Principles / – Springer Science, –1999. – 271 p. p.120–124.

в пленке ZnO: Al, осажденной при температуре 400 °С, можно объяснить образованием Zn-вакансий, которые в случае избытка кислорода являются дефектами акцепторного типа в ZnO.

В конце главы описана методика получения тонких пленок CdS. Размеры зёрен тонких пленок CdS, нанесенных методом обычного пиролиза, уменьшаются с увеличением pH реакционного раствора. Спектр фотолюминесценции (ФЛ) пленки, осажденной из раствора с pH=10.2, показывает широкополосную эмиссию, расположенную при 460 нм (2,7 эВ), что можно объяснить квантово-размерным эффектом при размерах зерен <10 нм. Никакие изменения диэлектрической функции из-за квантового размерного эффекта не наблюдаются, что вызвано низкой концентрацией наноразмерных (<10 нм) зерен CdS, как центров излучения с огромной силой осциллятора, но пренебрежимо малой плотностью состояний по сравнению с плотностью собственных состояний объемного CdS.

В четвертой главе «Нерелаксированные гетероэпитаксиальные структуры $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x=0,43$ и $0,38$)» приводятся данные о технологии получения нерелаксированных гетероэпитаксиальных структур $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ и их исследований различными физическими методами.

Из исследований рентгеновской дифракции различных составов твёрдых растворов $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ выявлено, что с уменьшением в составе твёрдого раствора количества атомов сурьмы Sb, наряду с изменением интенсивности рефлексов происходит смещение положения пиков рефлексов в сторону больших углов, что свидетельствует об уменьшении постоянной решётки. Действительно, атомы сурьмы в сравнении с атомами мышьяка обладают большим радиусом и при уменьшении их относительного количества в твёрдом растворе естественно ожидать уменьшение постоянной решётки. Это также согласуется с выполнением правила Вегарда.

Совместный анализ экспериментальных данных, полученных методами высокоразрешающей рентгеновской и электронной микроскопии, показал, что полученные нами

твердые растворы $\text{InAs}_{0,57}\text{Sb}_{0,43}$ и $\text{InAs}_{0,62}\text{Sb}_{0,38}$ растут когерентно на градиентных буферных слоях AlGaInSb и GaInSb , соответственно.

Полученные гетероэпитаксиальные структуры имеют хорошее структурное качество, что прослеживается по форме симметричных и асимметричных рефлексов в обратном пространстве.

Данные просвечивающей электронной микроскопии свидетельствуют о том, что верхние слои гетероэпитаксиальной структуры $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ являются нерелаксированными и ненапряженными, а дислокации в них в основном локализуются вблизи интерфейса.

Исследования морфологии поверхности методом атомно-силовой микроскопии выявили высокую степень качества поверхностей, полученных гетероэпитаксиальных структур. Шероховатость плёнки, определяемая величиной RMS (Root Mean Squared), оказалась меньше для плёнок $\text{InAs}_{0,57}\text{Sb}_{0,43}$, осаждаемых на промежуточный буфер AlGaInSb , чем для $\text{InAs}_{0,62}\text{Sb}_{0,38}$ на буфере GaInSb : для $\text{InAs}_{0,57}\text{Sb}_{0,43}$ – 4,3 нм, для $\text{InAs}_{0,62}\text{Sb}_{0,38}$ – 5,8 нм.

Методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (Energy-dispersive X-ray Spectroscopy – EDX или EDS) был проведен элементный анализ гетероэпитаксиальной структуры $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ с высоким пространственным разрешением. Разрешение ЭДС-анализа зависит от толщины образца, ускоряющего напряжения и диаметра электронного зонда и достигало 0,2 нм. Из анализа элементного состава эпитаксиальной гетероструктуры по глубине показано, что на поверхности, как и должно быть, в основном присутствуют элементы In, As и Sb, в середине в области промежуточного буфера появляются элементы Ga и Al, содержание которых активно меняется, и при приближении к подложке доминирует концентрация элементов Ga и Sb.

Подробно изложены данные исследований комбинационного (Рамановского) рассеяния света в гетероэпитаксиальных структурах $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$. Известно, что в

объёмных монокристаллах InAs частота продольного LO-фонона равна 242 см^{-1} , а TO – 220 см^{-1} , в InSb частота LO-фонона равна 193 см^{-1} , а TO – 185 см^{-1} . Нами наблюдались несколько фононных полос. Это разрешённая правилами отбора для данной геометрии рассеяния интенсивная фононная полоса на частотах 187 см^{-1} ($\text{InAs}_{0,57}\text{Sb}_{0,43}$) и 186 см^{-1} ($\text{InAs}_{0,62}\text{Sb}_{0,38}$) соответствующая продольному оптическому фонону в InSb (InSb-like LO) и асимметричная широкая фононная полоса на частотах 222 см^{-1} ($\text{InAs}_{0,57}\text{Sb}_{0,43}$) и 223 см^{-1} ($\text{InAs}_{0,62}\text{Sb}_{0,38}$), представляющая собой наложение двух полос от оптических продольных и поперечных фононов в InAs (InAs-like LO и InAs-like TO). Видно, что по мере уменьшения количества атомов Sb в $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ (образец $\text{InAs}_{0,62}\text{Sb}_{0,38}$) частота 222 см^{-1} смещается в сторону больших частот, т.е. частот КР активных фононов, характерных для InAs. Данные конфокальной Рамановской спектроскопии (КРС) свидетельствуют о двухмодовом типе перестройки фононных спектров в твёрдых растворах $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$.

Высокая однородность полученных гетероэпитаксиальных структур подтверждается данными исследований спектров микро-КРС путём сканирования лазерного луча по поверхности структуры (площадью $50\text{мкм}\times 50\text{мкм}$) в режиме картирования (mapping). В этой главе приведены результаты картирования положения пика и полуширины спектральных линий 187 см^{-1} и 222 см^{-1} .

Проведены спектральные эллипсометрические исследования гетероэпитаксиальных структур $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$. Определены действительная ϵ_i и мнимая ϵ_r части диэлектрической функции $\text{InAs}_{0,57}\text{Sb}_{0,43}$ и $\text{InAs}_{0,62}\text{Sb}_{0,38}$ для различных энергий фотонов. Отмечен похожий характер зависимостей, что неудивительно для соединений со столь схожей структурой и близкими составами. Наблюдается хорошая корреляция особенностей на зависимостях $\epsilon_r(E)$ и $\epsilon_i(E)$ с материнскими составами InAs и InSb. Расчитаны и построены дисперсионные зависимости показателей преломления $n(E)$ и экстинкции $k(E)$ для пленки $\text{InAs}_{0,57}\text{Sb}_{0,43}$.

В пятой главе «Структура и оптические свойства тонких пленок MoSe₂». приведены данные о технологии получения тонких плёнок MoSe₂, их характеристики методами рентгеновской дифракции и Рамановского рассеяния света, и исследований оптических свойств методом спектральной эллипсометрии и теоретическими расчётами электронной зонной структуры.

Слои MoSe₂ толщиной менее 100 нм были получены путем отжига пленок молибдена в насыщенных парах селена. Были проведены исследования кристаллической структуры методом рентгеновской дифракции и динамики решетки методом Рамановского рассеяния света. Выявлены характерные для MoSe₂ спектральные линии КР-активных оптических фононов E_{1g} (167,5 см⁻¹), A_{1g} (241 см⁻¹) и E_{2g}^1 (286 см⁻¹). На площади 1×1 мкм методом АСМ исследована морфология поверхности тонких плёнок MoSe₂ и определен средний размер кристаллитов около 10-50 нм.

Методом спектроскопической эллипсометрии исследованы тонкие плёнки MoSe₂ и поликристаллическая мишень MoSe₂ в спектральном диапазоне ультрафиолет/ видимая/ ближняя инфракрасная областей. Экспериментальные данные были обработаны в рамках оптической модели с дисперсией, описываемой В-сплайн процедурой (эта процедура доступная в базе данных пакета программ Complete Ease), и были получены диэлектрические функции как для тонкого слоя, так и для мишени. Оказалось, что наилучшая подгонка была получена, когда диэлектрическая функция MoSe₂ бралась в смеси с диэлектрической функцией чистого селена. В приближении уже упомянутой эффективной среды Бруггемана, необходимое количество селена при этом составляло 16 процентов.

Наличие чистого селена очевидно, поскольку измерения проводились на подготовленных образцах без отжига их в вакууме. Средние значения квадратичной ошибки (MSE) при подгонке для всех трех углов падения одновременно были ниже чем 11.4. Из выбранной оптической модели определена дисперсия комплексной диэлектрической функции (реальные и

мнимые части, ε_i и ε_r) слоев MoSe_2 и вычислена дисперсия показателей преломления n и экстинкции k .

Проведены расчеты зонной структуры MoSe_2 с помощью пакет-программ WEIN2k на основе теории функционала плотности (DFT) и полнопотенциальных линейаризованных присоединенных плоских волн. Обменно-корреляционные эффекты описаны в приближении локальной плотности (LDA-local density approximation). В видимой области мнимая часть диэлектрической функции рассчитана используя комбинированную плотность состояний. Интегрирование по зоне Бриллюэна проводилось методом Монхорста-Пака. Реальная часть диэлектрической функции получена с помощью соотношения Крамерса-Кронинга. Полученная диэлектрическая функция оказалась в хорошем согласии с диэлектрической функцией, полученной на основе анализа эллипсометрических данных по мишени из MoSe_2 в области энергий выше 1 эВ. Наблюдаемая особенность мнимой части диэлектрической функции около 1 эВ предполагается связанной с непрямыми экситонными переходами.

ВЫВОДЫ

1. Методами сканирующей зондовой микроскопии определена микроструктура тонких плёнок коммерческих полупроводниковых материалов Si, ZnO, CdS, MoSe_2 и $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, с разным, в зависимости от материала, технологическим дизайном тонкой пленки.
2. Методом измерения электропроводности обнаружено гигантское увеличение (на 2-3 порядка величины) концентрации свободных электронов в кремниевых структурах с нано-грейтовой поверхностью по сравнению со случаем плоской поверхности тонкого поверхностного слоя кремния.
3. Нано-грейтование приводит к возникновению новой критической точки в межзонной плотности состояний для

- оптических переходов и широкополосной фотолюминесценции с эквидистантными пиками, энергетическое положение которых зависит от длины волны возбуждения и соответствует области запрещенных переходов в стандартном кремнии.
4. Оптические переходы выше 2 эВ, формирующие диэлектрическую функцию тонкой пленки фуллерена C_{60} , нанесенной на стеклянную подложку, хорошо описываются моделью стандартного прямозонного полупроводника с энергией запрещенной зоны 2.115 эВ и энергией расщепления кристаллическим полем ~ 200 мэВ при комнатной температуре.
 5. Резкое увеличение интенсивности излучения в структурах $C_{60}/PS/Si$ по сравнению со структурами $C_{60}/\text{стекло}$ и C_{60}/Si является следствием релаксации в пористом кремнии правил отбора для переходов, запрещенных в случае обычного кремния.
 6. Согласно полученным микроструктурным данным, более высокие степени кристалличности тонких плёнок $ZnO:Al$ и ZnO , полученных методом магнетронного распыления достигаются при температуре подложки 400°C и соотношении смеси (O/Ar) 0% и 4% соответственно.
 7. Согласно полученным микроструктурным данным, размеры зёрен тонких пленок CdS , нанесенных методом обычного пиролиза, уменьшаются с увеличением pH реакционного раствора. Спектр фотолюминесценции пленки, осажденной из раствора с $pH = 10.2$, показывает широкую полосу эмиссии, расположенную при 460 нм (2,7 эВ), что можно объяснить квантовым размерным эффектом при размерах зерен <10 нм.
 8. Методами высокоразрешающей рентгеновской дифракции, атомно-силовой и электронной просвечивающей микроскопии выявлено, что твердые растворы $InAs_{0,57}Sb_{0,43}$ и $InAs_{0,62}Sb_{0,38}$ растут когерентно на градиентных буферных слоях $AlGaInSb$ и $GaInSb$, соответственно, и дефекты несоответствия локализованы на интерфейсах

подложка-буфер, а плотность пронизывающих дислокаций менее 10^7 см^{-2} .

9. Конфокальная Рамановская микроскопия эпислоёв твёрдого раствора $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ подтверждает двухмодовый характер поведения фононных мод и высокую степень однородности составов с $x=0,43$ и $0,38$.
10. Наблюдаемая особенность вблизи 1 эВ в мнимой части диэлектрической функции тонких пленок MoSe_2 обусловлена непрямыми экситонными переходами. Вдали от этой особенности экспериментальные данные по диэлектрической функции хорошо согласуются с рассчитанными в рамках одноэлектронного приближения с использованием функционала плотности.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В РАБОТАХ

1. Bayramov, A. Characterization of ZnO thin films prepared by magnetron sputtering method / A. Bayramov, Y. Aliyeva, E. Bagiyev, N. Gasimov, N. Satoh, M. Nakajima, R. Hajimammadov // AJP Fizika, – 2013, – 19 (2), – p. 84-85.
2. Mamiyev, Z.Q. Structural and optical characterization of nanostructured CdS thin films deposited by spray pyrolysis method / Z.Q. Mamiyev, N.O. Balayeva, N.M. Fathi, A.M. Kerimova, Y.N. Aliyeva, N.A. Qasimov, A.H. Bayramov // AJP Fizika, – 2014, –20 (4), – p. 26-28.
3. Aliyeva, Y., Khalilova, Kh., Kerimova, A., Huseynov, E., Mehdiyev, T.R., Alekperov, O., Mamedov N. SmS thin films with nanosize surface architecture // ICTF-16, Conference program and abstract, – Dubrovnik, Croatia, – 2014, – p.158.
4. Aliyeva, Y.N., Kerimova, A.M., Alekperov, O.Z., Hasanov, I.S., Huseynov, E.K., Mehdiyev, T.R., Mamedov N.T. Preparation of Nanostructures on the surface of SmS Thin Films by using AFM Technique // World Forum of Young Scientists «Collection of abstracts», – Baku, – 2014, – p. 204.

5. Aliyeva, Y., Bagiyev, E., Valiyev, R., Kerimova, A., Mamiyev, Z., Bayramov A. Optimization of preparation technology of ZnO and ZnO:Al thin films for solar cell applications // ICTMC-19, Conference program and abstract, – Niigata, Japan, – September 1-5, – 2014, – p. 94.
6. Aliyeva, Y., Mekhdiev, T., Huseynov, E., Alekperov, O., Maharramov, H., Mammadov, N. Nanostructured elements obtained on the surface of SmS thin films by Atomic Force Microscopy // MSE2014, Conference program and abstract, – Darmstadt, Germany, – 2014, – p. 166.
7. Aliyeva, Y., Kerimova, A., Alekperov, O., Hasanov, I., Huseynov, E., Mehdiyev, T., Mamedov N. Preparation and properties of nanodimensional diffraction lattice on the base of SmS // ICTMC-19, Conference program and abstract, – Niigata, Japan, – September 1-5, – 2014, – p. 83.
8. Bagiyev, E., Aliyeva, Y., Valiyev, R., Kerimova, A., Mamiyev, Z., Gasimov, N., Balayeva, N., Bayramov, A. Optimization of preparation technology of ZnO and ZnO:Al thin films for solar cell applications // 1st International Scientific Conference of young scientists and specialists, «Book of abstracts», – Baku, – October 15-16, – 2014, – p. 451.
9. Bagiyev, E. Optimization of preparation technology of ZnO and ZnO: Al thin films for solar cell applications / E. Bagiyev, Y. Aliyeva, N. Balayeva, A. Kerimova, R. Valiyev, Z. Mamiyev, N. Gasimov, A. Bayramov // Physica Status Solidi C, – 2015. – 12 (6), – p. 536-539.
10. Aliyeva, Y.N., Abdullayev, N.A., Guseynov, R.R., Tanriverdiyev, V., Kipshidze, G., Aliquliyeva, X.V., Mamedov, N.T. Epitaxial unrelaxed layers of $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ grown on compositionally graded buffers // ICTMC-20, – Halle, Germany, – 2016, – REF 86.
11. Aliyeva, Y.N. Confocal Raman mapping of the topmost layer heteroepitaxial $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ structures / Y.N. Aliyeva, N.A. Abdullayev, G. Kipshidze, V. Tanriverdiyev, I.A. Mamedova,

- N.T. Mamedov, A.A. Sadikhova // AJP Fizika, – 2016. – 22 (4), – p. 3-6.
12. Гусейнов, Р.Р., Танрывердиев, В., Kipshidze, G., Алиева, Е.Н., Абдуллаев, Н.А., Мамедов Н.Т. Нералаксированные слои $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ на градиентных буферных слоях // Труды XIV-ой межд. Конференции «Физика диэлектриков», – Санкт-Петербург, Россия, – 29 мая - 2 июня, – 2017, – с. 143.
 13. Sadikhova, A.A., Kipshidze, G., Aliyeva, Y.N., Abdullayev, N.A., Ahmedova Sh. Unrelaxed $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ alloys grown on compositionally graded buffers with molecular beam epitaxy // Proceedings of 17th International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technology, Computer Simulations, – Minsk, Belarus, – October 26-27, – 2017, – p. 29-32.
 14. Aliyeva, Y.N. Исследования гетероэпитаксиальных структур $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ методами высокоразрешающей рентгеновской и электронной микроскопии / Y.N. Aliyeva, Н.А. Абдуллаев, Х.В. Алигулиева, Р.Р. Гусейнов, G. Kipshidze, В. Танрывердиев, Н.Т. Мамедов // ANAS Transactions, – 2017. – 37 (2), – с.101-109.
 15. Гусейнов, Р.Р. Гетероэпитаксиальные структуры $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ на градиентных буферных слоях GaInSb и AlGaInSb / Р.Р. Гусейнов, В. Танрывердиев, G. Kipshidze, Е.Н. Алиева, Н.А. Абдуллаев, Х.В. Алигулиева, Н.Т. Мамедов // Физика и техника полупроводников, – Санкт-Петербург, – 2017, – 51 (4), – с. 551-557.
 16. Kerimova, E. Nanostructured CdS thin films deposited by spray pyrolysis method / E. Kerimova, E. Bagiyev, Y. Aliyeva, A. Bayramov // Physica Status Solidi C, – 2017, – 14 (6), – p. 1600144.
 17. Tavkheldze, A. Optical and electronic properties of periodic Si nanostructures / A. Tavkheldze, A. Bayramov, Y. Aliyeva, L. Jangidze, G. Skhiladze, S. Asadullayeva, O. Alekperov, and N.

- Mamedov // *Physica Status Solidi C*, – 2017. –14 (7), – p. 1700093/1-5.
18. Mamedov, N. Spectroscopic planar diffraction ellipsometry of Si-based multilayer structure with subwavelength grating / N. Mamedov, A. Tavkhelidze, A. Bayramov, Kh. Akhmedova, Y. Aliyeva, G. Eyyubov, L. Jangidze, G. Skhiladze // *Physica Status Solidi C*, – 2017. – 14, – p. 1700092/1-4.
 19. Mamedov, N., Tavkhelidze, A., Bayramov, A., Akhmedova, Kh., Aliyeva, Y., Eyyubov, G., Jangidze, L., Skhiladze, G. Optical properties of Si-based multilayer structure with subwavelength grating // *The Twenty-fifth Annual International Conference on Composites/nano engineering (ICCE-25) ICCE-25*, – Rome, Italy, – July 16-22, – 2017.
 20. Bayramov, A. Ellipsometric characterization of MoSe₂ thin layers obtained by thermal treatment of molybdenum in selenium vapor / A. Bayramov, Y. Aliyeva, G. Eyyubov, E. Mammadov, Z. Jahangirli, D. Lincot, N. Mamedov // *Applied Surface Science*, – 2017. – 421, – p. 310-314.
 21. Алигулиева, Х.В., Абдуллаев, Н.А., Алиева, Е.Н., Садыхова, А. Электрические и гальваномагнитные эффекты в гетероэпитаксиальных структурах InAs_{0,57}Sb_{0,43} // Сб. тезисов 52-ой Школы ФГБУ «ПИЯФ» по физике конденсированного состояния, – Петербург, Россия, – 2018, – с. 220-221.
 22. Гусейнов, Р.Р. Электрические и оптические свойства нерелаксированных гетероэпитаксиальных структур InAs_{1-x}Sb_x / Р.Р. Гусейнов, В.А. Танрывердиев, Г.Л. Belenky, G. Kipshidze Е.Н. Алиева, Х.В. Алигулиева, Э.Г. Ализаде, Х.Н. Ахмедова, Н.А. Абдуллаев, Н.Т. Мамедов, В.Н. Зверев // *Физика и техника полупроводников*, – 2019, – 53 (7), – с. 906-910.
 23. Alizade, E.N., Mammadov, N.T. Mammadov, S.N. Tavkhelidze, A., Bayramov, A.H., Aliyeva, Y.N., Ahmedova, Kh.N., Jangidze, L., Skhiladze, G. Optical Properties of Nano-

- Grated Si-Based Multilayer Structure // ICSE-8, – Barcelona, – May 26-31, – 2019, – p. 159.
24. Bayramov, A., Dzhafarov, T., Aliyeva, Y., Ahmadova, Kh., Alizade, E., Asadullayeva, S., Mammadov, S., Mammadov, N., Sadigov, M., Ragimov, Sh. Optical Properties of Fullerene Embedded Porous Silicon // ICSE-8, – Barcelona, – May 26-31, – 2019, – p. 281.
 25. Bayramov, A.I. Photoluminescence and optical transitions in C₆₀ fullerene thin films deposited on glass, silicon and porous silicon / A.I. Bayramov, N.T. Mamedov, T.D. Dzhafarov, Y.N. Aliyeva, Kh.N. Ahmadova, E.H. Alizade, S.Q. Asadullayeva, M.S. Sadigov, Sh.Kh. Ragimov // Thin Solid Films, – 2019. – 690, – p.137566/1-5.
 26. Bayramov, A. Optical properties of surface grated Si-based multilayer structure / A. Bayramov, E. Alizade, S. Mammadov, A. Tavkhelidze, N. Mamedov, Y. Aliyeva, Kh. Ahmedova, S. Asadullayeva, L. Jangidze, and G. Skhiladze // Journal of Vacuum Science and Technology B, – 2019. – 37, – p. 061807 /1-4.
 27. Aliyeva, Y. Scanning probe microscopy studies of fullerene C60/porous silicon multilayer structures // Fizika, – 2019. – 3, – p. 44-46.
 28. Aliyeva, Y. SmS thin films with nanosize surface architecture // Fizika, – 2019. – 3, – p. 46-51.

Патент: Мехдиев Т.Р. Способ формирования наноразмерных элементов на тонком слое полупроводникового материала. изобретение i20160086, Азербайджанская Республика / Алиева Е.Н., Гусейнов Е.К., Алекперов О.З., Мамедов Н.Т., Керимова А.М.

Защита диссертации состоится "23" июня 2021 г. в 11⁰⁰ часов на заседании Диссертационного Совета ED 1.14 действующий на базе Института Физики Национальной академии наук Азербайджана.

Адрес: AZ1143, Азербайджан, г. Баку, пр. Г.Джавида, 131, Институт Физики НАНА.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института Физики Национальной Академии Наук Азербайджана.

Электронная версия диссертации и автореферата размещена на официальном сайте Института Физики Национальной Академии Наук Азербайджана

Автореферат разослан по соответствующим адресам "21" мая 2021 года.

Подписано в печать: 16.04.2021

Формат бумаги: А5

Объем: 31477

Тираж: 70