

На правах рукописи



НЕСТЕРОВ ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

**ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ
ДВУМЕРНЫХ И ОДНОМЕРНЫХ НАНОСТРУКТУР КРЕМНИЯ**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Воронеж - 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Научный руководитель Заслуженный деятель науки РФ, доктор физико-математических наук, профессор Домашевская Эвелина Павловна

Официальные оппоненты: **Рембеза Станислав Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», факультет радиотехники и электроники, кафедра полупроводниковой электроники и наноэлектроники, заведующий

Лаврентьев Анатолий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», факультет автоматизации, мехатроники и управления, кафедра электротехники и электроники, заведующий

Ведущая организация: ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского"

Защита состоится 21 декабря 2017 г. в 15:10 на заседании диссертационного совета Д 212.038.06 при Воронежском государственном университете по адресу: 394018, г. Воронеж, Университетская площадь 1, физический факультет, ауд. 428.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного университета, с авторефератом – на сайте ВУЗа <http://www.vsu.ru> и на сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки РФ – <http://vak.ed.gov.ru>.

Автореферат разослан 20 ноября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Дроздин Сергей Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Кремний-на-изоляторе (КНИ) является известным материалом в области микроэлектроники, однако его исследование остается актуальным благодаря постоянно возникающим новым областям применения, поскольку кремниевая технология по-прежнему остаётся преобладающей. В связи с этим разработка элементной базы микроэлектроники на основе кремния-на-изоляторе, где в качестве изолятора выступает оксид кремния, актуальна и требует глубокого и детального изучения ввиду ряда преимуществ перед технологией объёмного кремния. Однако в таких структурах при использовании определенных технологий получения КНИ возникают различные эффекты, например растяжение/сжатие слоя кремния, расположенного на диэлектрической «подложке» оксида кремния SiO_2 . Наблюдаемый эффект, в свою очередь, приводит к изменению зонной структуры растянутого слоя кремния Si и, как следствие, изменению его электрических характеристик. Таким образом, управляя деформацией решётки, мы получаем возможность управлять электрическими свойствами материала.

Нанонити кремния (НК) являются сравнительно новым материалом по сравнению с КНИ, поэтому изучение их оптических и электрических свойств чрезвычайно важно и актуально для определения наиболее эффективной области применения. Важно определить, какая из имеющихся технологий получения НК наиболее эффективно позволяет управлять их ростом, размерами, плотностью, качеством поверхности и оставаться безопасной и дешёвой. В то же самое время не стоит забывать о том, какая технология лучше подходит для той или иной области применения нанонитей кремния, например, сенсорики или фотоники. Структурные отличия нанонитей кремния от объёмного материала, как и в случае КНИ, могут приводить к изменению электронной структуры и, как следствие, оптических и электрических свойств.

Именно возможные изменения в зонной структуре исследуемых материалов приводят нас к использованию методов, высокочувствительных к локальному окружению атомов, позволяющих получить прямую информацию об электронной структуре валентной зоны (ВЗ) и зоны проводимости (ЗП), чтобы составить полную картину электронной структуры изучаемых наноструктур на кремнии, которая является фундаментальной характеристикой любого полупроводникового материала. К таким методам относятся, прежде всего, метод ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии (УМРЭС) и спектроскопия ближней тонкой структуры рентгеновского края поглощения (XANES), т.е. спектроскопия квантового выхода (СКВ) с использованием синхротронного излучения (СИ).

Данная работа посвящена электронно-энергетическому строению двумерных наноструктур КНИ (кремний-на-изоляторе) и одномерных наноструктур НК (нанонити кремния) методами ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии (УМРЭС) и спектроскопии квантового выхода (СКВ) с использованием синхротронного излучения (СИ).

Объекты и методы исследований.

Объектами исследования низкоразмерных структур кремния служили:

-образцы двумерных наноструктур КНИ, полученных по разным технологиям в России и за рубежом, с кристаллическими слоями кремния как в деформированном (растянутом) состоянии, так и в недеформированном (нерастянута) состоянии;

-образцы одномерных наноструктур в виде массивов нанонитей кремния (НК), полученные методом металл-ассистированного жидкофазного химического травления (MAWCE) на пластинах монокристаллического кремния c-Si (100), легированных бором В с двумя разными степенями легирования и при разных временах травления.

Для получения данных об электронно-энергетическом спектре валентной зоны использовался метод ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии (УМРЭС). Для получения данных об электронно-энергетическом спектре зоны проводимости использовалась спектроскопия ближней тонкой структуры края рентгеновского поглощения (XANES), т.е. спектроскопия квантового выхода (СКВ) с использованием синхротронного излучения (СИ). Для получения данных о субструктуре и морфологии образцов использовались методы растровой электронной микроскопии и рентгеновской дифракции (РД).

Цель работы. Целью диссертационной работы является установление закономерностей изменения электронного строения (зонной структуры), субструктуры и фазового состава двумерных и одномерных наноструктур кремния на примере кремния-на-изоляторе КНИ и нанонитей кремния НК.

Задачи исследования:

1. Получить информацию об электронно-энергетическом строении валентной зоны и фазовом составе структур КНИ с растянутым и нерастянута) слоями кремния методом УМРЭС.

2. Получить информацию об электронно-энергетическом строении зоны проводимости в структурах КНИ с растянутым и нерастянута) слоями кремния методом СКВ с использованием СИ.

3. Провести теоретический расчет зонной структуры и плотности состояний КНИ с растянутым и нерастянута) слоем кремния для подтверждения экспериментально обнаруженного изменения в электронно-энергетическом строении КНИ с растянутым слоем кремния.

4. Получить информацию об электронно-энергетическом строении валентной зоны и фазовом составе нанонитей кремния (НК), сформированных на подложках монокристаллического кремния c-Si разной степени легирования методом УМРЭС.

5. Получить информацию об электронно-энергетическом строении зоны проводимости НК, сформированных на подложках c-Si с разной степенью легирования, методом СКВ с использованием СИ.

6. Провести анализ эффекта обращения интенсивности при регистрации СКВ низкоразмерных структур кремния с помощью синхротронного излучения.

Научная новизна полученных результатов:

1. На основе предложенной модели деформации кристаллической решетки слоя кремния в структуре КНИ произведена оценка уменьшения величины запрещенной зоны на 0.13 эВ в растянутом слое кремния на основе зонных расчетов методом ЛППВ, обусловленного изменением кристаллической решетки в структуре КНИ, и обнаружено появление новых особенностей в электронно-энергетическом строении в связи с тетрагональным искажением кубической решетки кремния.

2. Впервые показано на основе измерений СКВ в области Si L_{2,3} - краев поглощения кремния с использованием синхротронного излучения, что эффект предкраевой интерференции синхротронного излучения, наблюдаемый в структурах КНИ как с растянутым слоем кремния, так и с нерастянутым слоем, не зависит от деформации слоя и обусловлен соизмеримостью нанометровых длин волн СИ с толщиной нанослоев кристаллического кремния в структурах КНИ. При углах скольжения СИ < 21° в предкраевой области главного края поглощения СКВ Si L_{2,3} – XANES обнаруживается образование стоячих рентгеновских волн с длиной волны $\lambda \sim 12 - 20$ нм и плавными колебаниями интенсивности электромагнитного поля СИ.

3. Впервые показано, что морфология, субструктура и фазовый состав массивов нанонитей кремния (НК), получаемых методом металл-ассистированного жидкофазного химического травления (MAWCE), определяется типом выбранной подложки и временем травления.

4. На основе измерений угловых зависимостей скольжения синхротронного излучения по образцу впервые показано, что аномальный провал интенсивности с необращаемой инверсией тонкой структуры главного Si L_{2,3} - края поглощения СКВ нанонитей кремния, выращенных на низколегированной подложке кремния, увеличивающийся с уменьшением угла скольжения СИ, обусловлен малой толщиной нитей (≤ 100 нм), соизмеримой с длиной волны СИ и приводящей к заметному поглощению СИ при прохождении через нити, т.е. фактическому образованию спектров пропускания СИ.

Практическая значимость.

Установлено, что в зависимости от технологии получения структур кремний-на-изоляторе, в ней могут происходить тетрагональные искажения кристаллической решетки, приводящие к перестройке электронной структуры напряженного слоя нанокристаллического кремния, выращенного на изолирующем слое диоксида кремния. Такая перестройка позволяет управлять электрооптическими свойствами структур КНИ в зависимости от технологии их получения.

Комплексные результаты электронно-энергетического строения, субструктуры и фазового состава нанонитей кремния, выращенных в разных технологических условиях метода металл-ассистированного жидкофазного химического травления (MAWCE), могут быть использованы при обработке

технологии формирования НК заданных размеров и свойств с учетом типа подложки и времени травления.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Уменьшение ширины запрещенной зоны на 0.13 эВ в растянутом слое кремния по данным метода ЛППВ, обусловленное деформацией кристаллической решетки в структуре КНИ, и появление новых особенностей в электронно-энергетическом строении в связи с тетрагональным искажением кубической решетки кремния.

2. Эффект предкраевой интерференции синхротронного излучения, наблюдаемый в структурах КНИ как с растянутым слоем кремния, так и с нерастянутым слоем, не зависит от деформации слоя и обусловлен соизмеримостью нанометровых длин волн СИ с толщиной нанослоев кристаллического кремния.

3. Атомная и электронная структура массива нанонитей кремния (НК), получаемого методом металл-ассистированного жидкофазного химического травления (MAWCE), определяется типом выбранной подложки и временем травления.

4. Аномальный провал интенсивности с необращаемой инверсией тонкой структуры главного Si $L_{2,3}$ - края поглощения СКВ нанонитей кремния, выращенных на низколегированной подложке, увеличивающийся с уменьшением угла скольжения СИ, обусловлен малой толщиной нитей (≤ 100 нм), приводящей к заметному поглощению СИ, проходящего через нити, и фактическому образованию спектров пропускания СИ.

Достоверность результатов работы основана на воспроизводимой методике получения материалов с заданными свойствами; на использовании в экспериментах высокоточных современных приборов, в том числе оборудования центра генерации синхротронного излучения третьего поколения BESSYII (Берлин); на применении независимых методов обработки данных, воспроизведении обнаруженных эффектов и использовании современного программного обеспечения для их анализа.

Таким образом, полученные результаты и выводы, изложенные в диссертации, являются обоснованными, обладают новизной и практической значимостью.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: 19-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика» (Зеленоград, 2012); XIII международная научно-техническая конференция "Кибернетика и высокие технологии XXI века" (Воронеж, 2012); German-Russian Conference of Fundamentals and Applications of Nanoscience (Berlin, Germany, 2012); XIX Международная молодежная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2012» (Москва, 2012); IX Международная конференция по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, наноразмерных структур и приборов на его основе «Кремний-2012» (Санкт-Петербург, 2012); V всероссийская конференция (с международным участием) «Химия поверхности

и нанотехнология» (Санкт-Петербург – Хилово, 2012); VII всероссийская школа-семинар студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению "Диагностика наноматериалов и наноструктур" (Рязань, 2014); VI Всероссийская Конференция «Физико-химические процессы в конденсированном состоянии и на межфазных границах «ФАГРАН» (Воронеж, 2012); "XXI Всероссийская конференция «рентгеновские и электронные спектры и химическая связь" РЭСХС-2013 (Новосибирск, 2013). 17-я Всероссийская молодежная конференция "Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника" (Санкт-Петербург, 2015); XIV Международный семинар "Физико-математическое моделирование систем" (Воронеж, 2015).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 4 статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных работ, 11 тезисов докладов в сборниках трудов конференций.

Личный вклад автора. Постановка задач, определение направлений исследований выполнены д.ф.-м.н., профессором Домашевской Э.П. Экспериментальные ультрамягкие рентгеновские эмиссионные спектры Si L_{2,3} исследованных образцов и результаты рентгеновской дифракции получены лично автором. Спектры ближней тонкой структуры края рентгеновского поглощения XANES, т.е. спектры квантового выхода СКВ с использованием синхротронного излучения получены совместно с д.ф.-м.н. Турищевым С.Ю. Расчеты зонной структуры и плотности состояний в растянутом слое кремния структуры КНИ проведены совместно с проф. Курганским С.И. Анализ электронного строения и фазового состава и обсуждение результатов проводилось совместно с научным руководителем д.ф.-м.н., профессором Домашевской Э.П., д.ф.-м.н., профессором Тереховым В.А.

Основные результаты и выводы получены лично автором.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта (Соглашение № 14.574.21.0093 от 11.08.2014 г.) программы ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы" и частично гранта Минобрнауки России в рамках государственного задания ВУЗам в сфере научной деятельности на 2017-2019 годы. Проект № 3.6263.2017/ВУ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и выводов работы. Объем диссертации составляет 118 страниц, включая 54 рисунка, 2 таблицы, список литературы, который содержит 165 наименований, включая публикации по теме диссертации.

Во введении к диссертации обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, ее научная новизна, практическая значимость полученных результатов и научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основе литературных данных дается обзор основных свойств двумерных наноструктур КНИ (кремний-на-изоляторе) и одномерных наноструктур НК (нанонити кремния). Рассматриваются физико-химические методы получения низкоразмерных структур кремния

КНИ и НК. Приводятся известные данные по структуре этих объектов и их основным свойствам. Обосновывается выбор и излагаются физические основы методов ультрамягкой эмиссионной спектроскопии УМРЭС и спектроскопии квантового выхода СКВ с использованием синхротронного излучения, которые используются в работе в качестве основных. Глава заканчивается выводами, на основе которых формулируются цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена характеристике объектов и методов получения и исследования низкоразмерных структур кремния КНИ и НК. В первой части главы излагаются условия формирования исследуемых структур. На Рис. 1 представлен общий вид исследуемых структур КНИ.

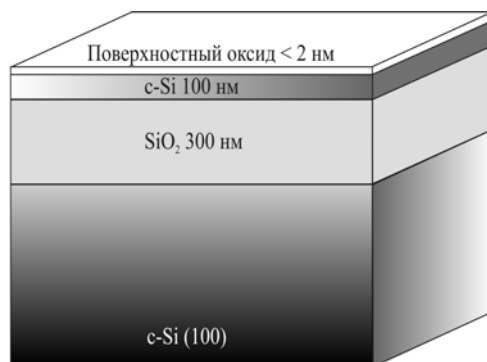


Рисунок 1. Схематическое представление структуры КНИ.

На Рис. 2 (слева) представлена микрофотография СЭМ, из которой оценивается длина нитей порядка 5 мкм в образце HD-SiNW с НК, выращенными на высоколегированной подложке. На том же рисунке справа представлены результаты ПЭМ, показывающие сильную развитость поверхности отдельной нити толщиной порядка 300 нм.

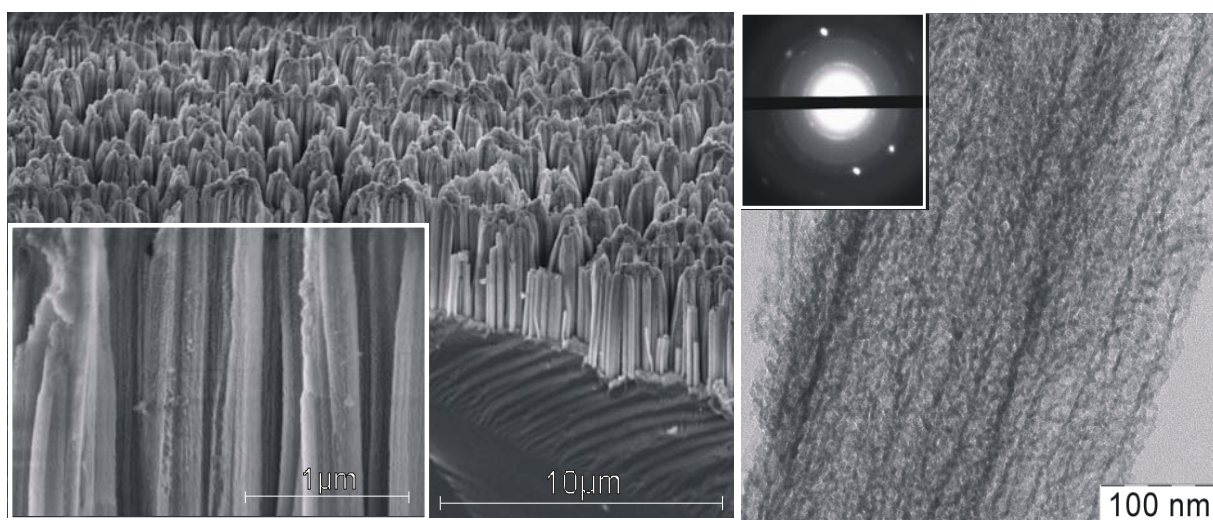


Рис. 2. Микрофотографии СЭМ (слева) и ПЭМ (справа) для образца HD-SiNW с НК, выращенными на высоколегированной подложке. На вставке справа представлена микродифракция отдельной нити.

Длина нитей в другом образце HD-SiNW с массивом НК, выращенных на низколегированной подложке, была существенно больше и составляла порядка 20 мкм (Рис. 3 слева результаты СЭМ), в то время как толщина нитей ~ 100 нм, в среднем, три раза меньше (Рис. 3 справа результаты ПЭМ), и они имеют более гладкую и менее развитую поверхность по сравнению с образцом HD-SiNW, в котором НК выращены на низколегированной подложке.

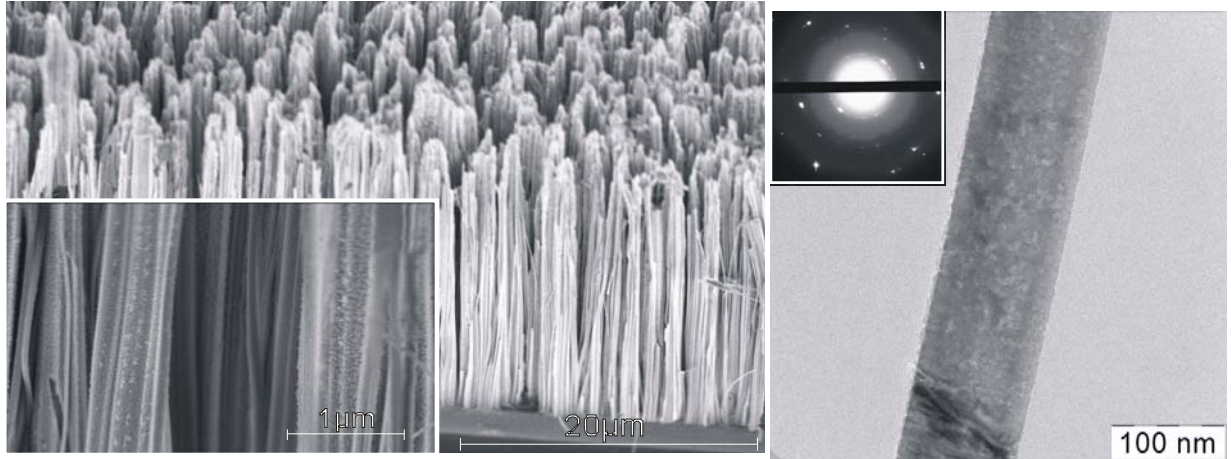


Рис. 3. Микрофотографии СЭМ (слева) и ПЭМ (справа) для образца LD-SiNW с НК, выращенными на низколегированной подложке. На вставке справа представлена микродифракция отдельной нити.

Во второй части главы приводятся описания методик получения спектров УМРЭС и СКВ в ультрамягкой области рентгеновского спектра, методики компьютерного фазового анализа по эмиссионным рентгеновским спектрам и методики рентгеновской дифракции (РД) для низкоразмерных структур. Распределение интенсивности рентгеновской эмиссионной полосы кремния Si $L_{2,3}$ отражает распределение $s(d)$ - состояний кремния в соответствии с соотношением:

$$I_z(E) \sim v^3 \cdot \sum_k |M_{ik}|^2 \delta(E - E_k), \quad (1)$$

где $M_{ik} = \int \varphi_{zi}^* H' \varphi_k dr$ – матричный элемент вероятности перехода электрона из валентной зоны с волновой функцией φ_k и собственным значением E_k на вакансию основного уровня атома сорта z с волновой функцией φ_{zi} . H' – оператор возмущения электромагнитного поля, E – энергия электрона в валентной зоне.

Спектр рентгеновского поглощения XANES, или спектр квантового выхода СКВ рентгеновского фотоэффекта дает информацию о распределении локальной парциальной плотности электронных состояний в зоне проводимости в соответствии с соотношением:

$$\mu_z(h\nu) \sim v^3 \cdot \sum_i |M_{fi}|^2 \delta(E_f - E_{zi} - h\nu), \quad (2)$$

где $M_{fi} = \int \varphi_f H' \varphi_{zi} dr$ – матричный элемент вероятности перехода электрона с основного уровня атома сорта z с волновой функцией φ_{zi} и собственным значением E_{zi} в зону проводимости с волновой функцией φ_f и собственным значением E_f .

Третья глава посвящена особенностям и различиям электронно-энергетического строения структур КНИ с растянутым и нерастянутым слоями кремния. Излагаются РД результаты по измерению параметров кристаллической решётки кремния в структурах КНИ с растянутым и нерастянутым слоями. Влияние искажений решётки кремния на плотность электронных состояний валентной зоны (ВЗ) установлено на основе анализа тонкой структуры ультрамягких рентгеновских эмиссионных спектров (Рис.4). Это дополнительное расщепление валентных состояний в КНИ с напряженным слоем кремния, появление хвостов плотности состояний и увеличения вклада s -состояний в области энергий $E \geq 94$ эВ (состояния W_2 , X_4 , L_3), которое означает трансформацию sp^3 гибридных волновых функций в sp^2 при понижении симметрии кристаллической решетки в растянутом слое.

Предлагается модель деформации кристаллической решетки слоя кремния в структуре КНИ с растянутым слоем кремния и производится оценка уменьшения величины запрещенной зоны на 0.13 эВ в растянутом слое кремния на основе зонных расчетов методом ЛППВ, обусловленного изменением кристаллической решетки в структуре КНИ, и появление новых особенностей в электронно-энергетическом строении в связи с тетрагональным искажением кубической решетки кремния.

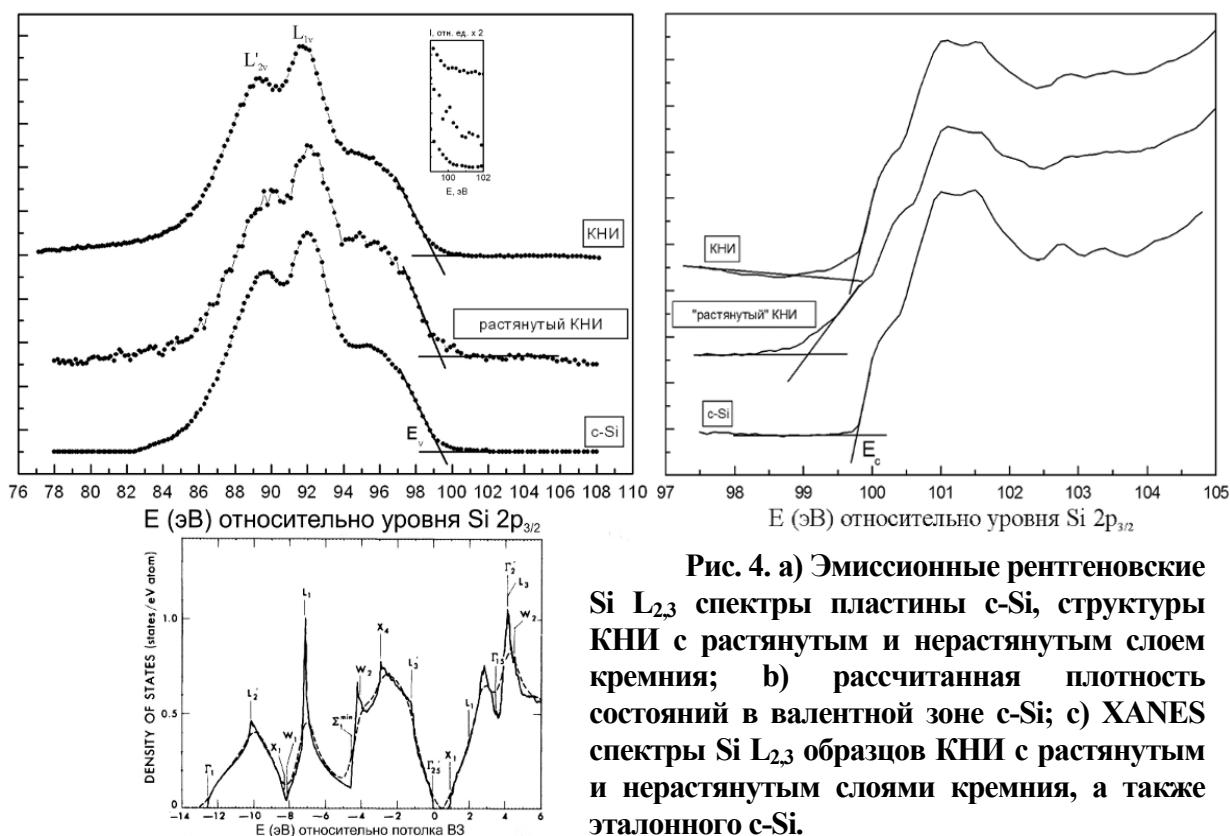


Рис. 4. а) Эмиссионные рентгеновские Si L_{2,3} спектры пластины c-Si, структуры КНИ с растянутым и нерастянутым слоем кремния; б) рассчитанная плотность состояний в валентной зоне c-Si; в) XANES спектры Si L_{2,3} образцов КНИ с растянутым и нерастянутым слоями кремния, а также эталонного c-Si.

Во второй части главы излагаются результаты измерений СКВ в области Si L_{2,3} - краев поглощения кремния с использованием синхротронного излучения, в которых обнаружен эффект предкраевой интерференции

синхротронного излучения (Рис. 5), наблюдаемый в структурах КНИ как с растянутым слоем кремния, так и с нерастянутым слоем, и показывается независимость этого эффекта от деформации слоя и его обусловленность соизмеримостью нанометровых длин волн СИ с толщиной нанослоев кристаллического кремния в структурах КНИ.

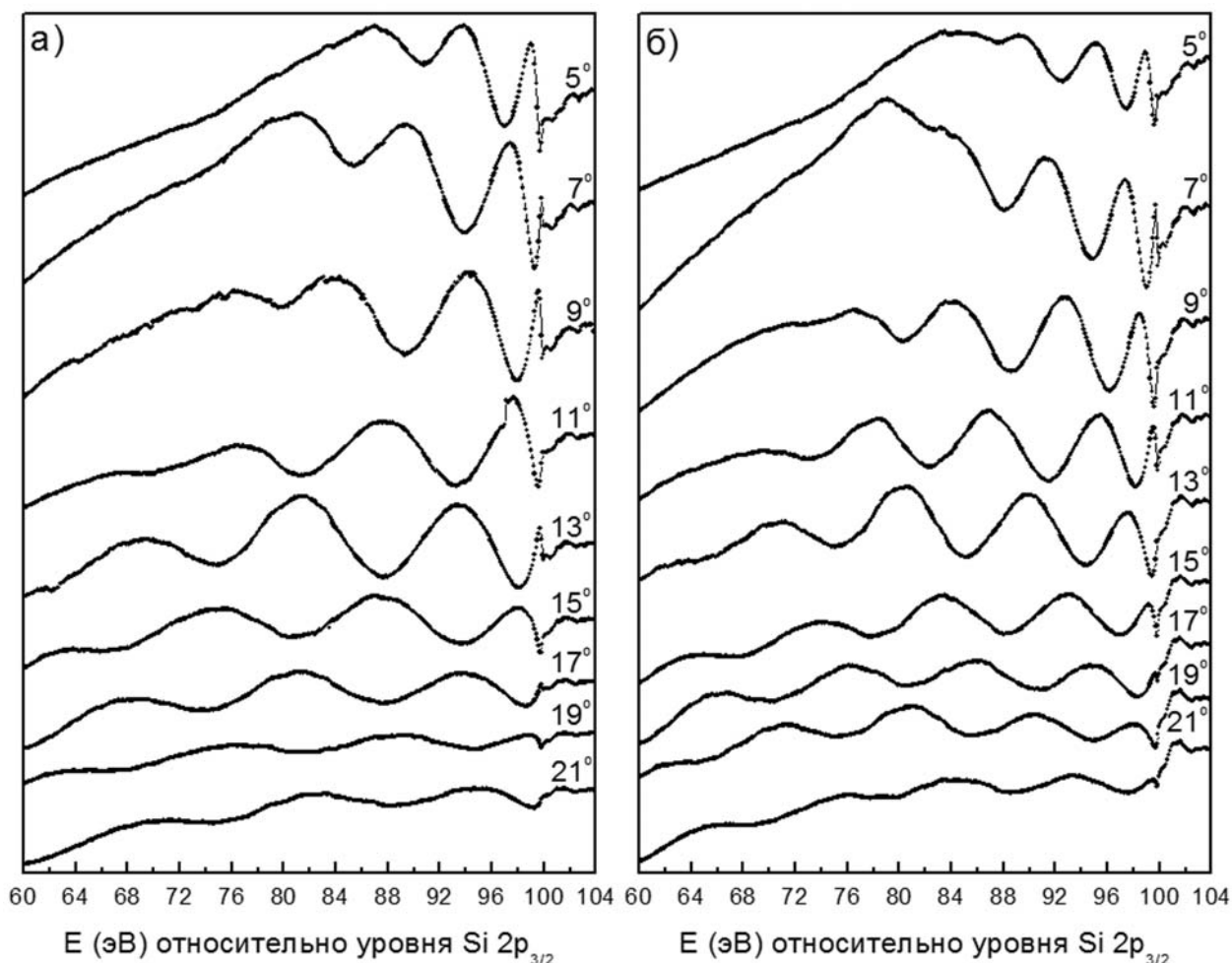


Рис. 5. СКВ (XANES) Si $L_{2,3}$ - спектры при различных углах скольжения θ в широком диапазоне энергий образца КНИ с растянутым слоем (а) и нерастянутым слоем (б).

В четвертой главе представлены особенности атомного и электронного строения нитевидного кремния, полученные на основе данных УМРЭС (Рис. 6) и СКВ (Рис. 7). В первой части главы показывается влияние технологических условий на электронное строение валентной зоны и фазовый состав разных массивов НК. Во второй части главы приводятся результаты и дается объяснение впервые наблюдаемой при всех углах скольжения необрацаемой инверсии интенсивности СКВ в ультрамягкой рентгеновской области Si $L_{2,3}$ - края поглощения (Рис. 7) для образца LD-SiNW с толщиной нитей около 100 нм (Рис. 3 справа), соизмеримой с длиной волны СИ.

На Рис. 6 слева и справа приведены Si $L_{2,3}$ - спектры образцов HD-SiNW и LD-SiNW с НК разной толщины, соответствующие глубинам анализа 10, 35, 60

и 120 нм. В центре Рисунка 6 приведены спектры эталонов, тонкая структура которых не зависит от глубины анализируемого слоя. При сопоставлении Si L_{2,3} - спектров образцов НК со спектрами эталонов очевидны существенные различия между ними.

При глубине анализа 10 нм Si L_{2,3} - спектр образца HD-SiNW с толстыми нитями показывает два максимума при энергиях 89 эВ и 94,7 эВ и сателлит при энергии 77 эВ (Рис.6 слева), положение которых хорошо соответствует их положению в SiO₂ и свидетельствует о преобладании в составе поверхностного 10 нм слоя оксида кремния. Далее, на глубине 35 нм соотношение интенсивностей пиков почти не меняется, но провал между ними заметно уменьшается, и проявляется слабо выраженное плечо при E ~ 92 эВ. С увеличением глубины анализа до 120 нм вклад особенности при E ~ 92 эВ в УМРЭС Si L_{2,3} - спектр увеличивается. Так как при 92 эВ находится главный максимум кристаллического кремния (Рис.6), можно сделать вывод, что с ростом глубины анализа вклад фазы c-Si возрастает.

Как видно из Рис. 6 (справа), Si L_{2,3} - спектры образца LD-SiNW с тонкими нитями существенно отличаются по характеру распределения электронов в ВЗ кремния от образца HD-SiNW с толстыми нитями. В образце LD-SiNW главный максимум Si L_{2,3} - спектра находится при энергии 92 эВ независимо от глубины анализа. Поскольку этой энергии соответствует главный максимум L_{2,3} - спектра монокристаллического кремния c-Si, то это свидетельствует о существенном вкладе c-Si в состав НК образца LD-SiNW вплоть до толщины анализируемого слоя 120 нм, при которой в области ~ 95 эВ наблюдается дополнительный максимум, обусловленный заметным вкладом оксидной фазы. Это подтверждают результаты фазового анализа на основе компьютерного моделирования с использованием Si L_{2,3} - спектров эталонных образцов, приведенные в Таблице 1.

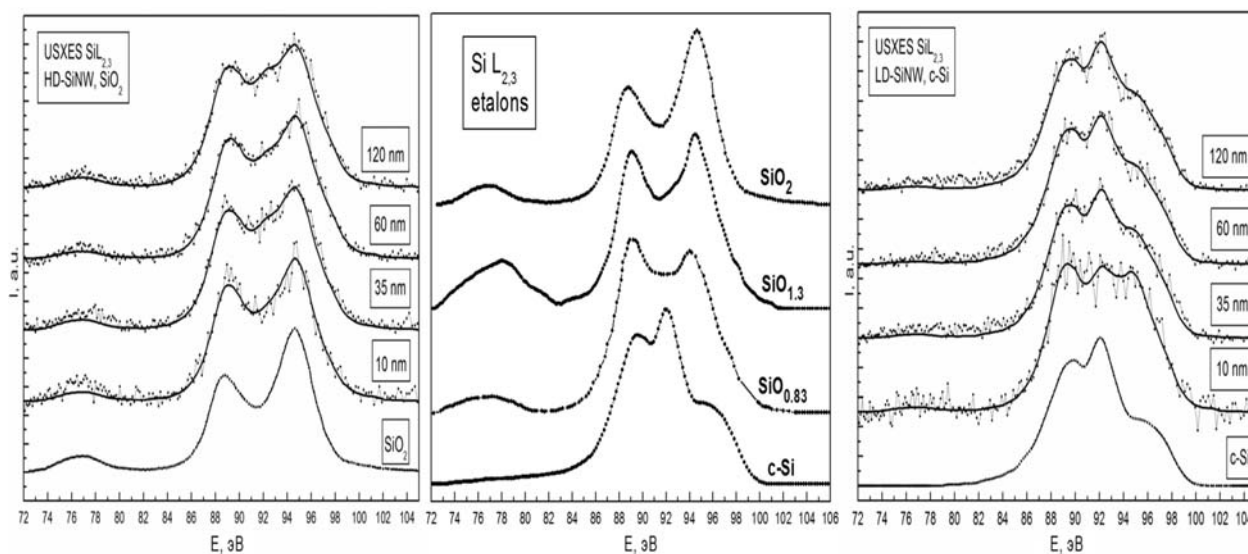


Рис.6. Экспериментальные и модельные Si L_{2,3} - спектры УМРЭС образца HD-SiNW (слева), эталонов c-Si, субоксидов и диоксида кремния SiO₂ (в центре) и образца LD-SiNW (справа). Точками обозначены экспериментальные спектры, сплошными линиями — модельные спектры.

Таблица 1. Фазовый состав образцов LD-SiNW и HD-SiNW на различных глубинах от поверхности.

Образец	Глубина анализа, нм	c-Si, %	SiO ₂ , %	SiO _x , %	Погрешность, %
HD-SiNW	10	0	35	65	8
	35	13	37	50	8
	60	19	34	47	6
	120	24	42	34	6
LD-SiNW	10	45	22	33	6
	35	67	13	20	10
	60	72	8	20	7
	120	74	11	15	10

Однако самые явные различия между образцами HD-SiNW и LD-SiNW с НК разной толщины проявились в процессе регистрации спектров квантового выхода СКВ (XANES). При нормальном падении синхротронного излучения на образец LD-SiNW в ультрамягкой рентгеновской области спектра поглощения Si L_{2,3} элементарного кремния наблюдается аномальный провал интенсивности с необращаемой инверсией тонкой структуры спектра поглощения, увеличивающийся с уменьшением угла скольжения синхротронного излучения (Рис. 7а). Данный эффект обусловлен малой толщиной нитей ≤ 100 нм, пропускающих через себя значительную часть СИ и позволяющих регистрировать таким образом XANES Si L_{2,3} - спектры «на прохождение», т.е. спектры пропускания. Тогда как в образце HD-SiNW с НК, выращенными на высоколегированной подложке, эффект обращения интенсивности пропадает с ростом угла скольжения синхротронного излучения (Рис.7.б)

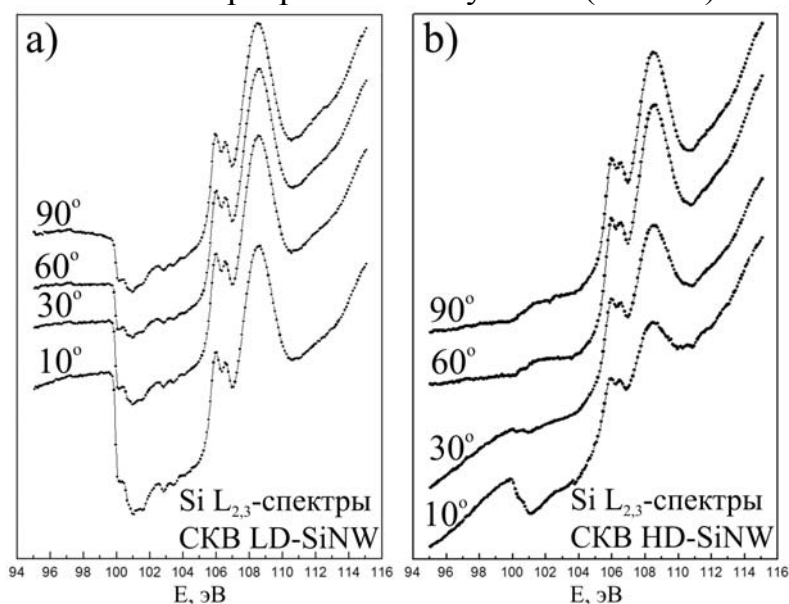


Рис.7. Si L_{2,3} - спектры СКВ (XANES), зарегистрированные при разных углах скольжения синхротронного излучения $\theta = 90^\circ, 60^\circ, 30^\circ, 10^\circ$ образцов: а) LD-SiNW и б) HD-SiNW.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

С использованием всех преимуществ используемых рентгеноспектральных методов для исследования электронно-энергетического строения низкоразмерных объектов были получены изложенные выше результаты, по которым сделаны следующие выводы:

1. В структуре КНИ, содержащей нерастянутый слой Si, наблюдается эффект интерференции синхротронного излучения, как и в структуре КНИ с растянутым слоем Si. При углах скольжения $CI < 21^\circ$ в предкраевой области главного края поглощения СКВ Si $L_{2,3}$ – XANES обнаруживается образование стоячих рентгеновских волн с длиной волны $\lambda \sim 12 - 20$ нм и плавными колебаниями интенсивности электромагнитного поля СИ.

2. Возникновение интерференции СИ не зависит от деформации кристаллической решетки слоя кремния, выращенного на изоляторе SiO_2 , но обусловлено толщиной этого слоя, соизмеримой с длиной волны СИ.

3. Предложена модель тетрагонального искажения кубической кристаллической решетки кремния, положенная в основу расчета методом ЛППВ, показывающего на суммарное уменьшение ширины запрещенной зоны в растянутом слое кремния на 0,13 эВ по сравнению с нерастянутым. Экспериментально это проявляется в появлении «хвостов» плотности локализованных состояний вблизи потолка ВЗ и дна ЗП в КНИ с растянутым слоем кремния.

4. Установлена зависимость морфологии, субструктуры и фазового состава нитевидных нанокристаллов от степени легирования подложки Si (100) и времени ее травления методом MAWCE.

5. В случае формирования массивов нитевидных кристаллов методом MAWCE на низколегированной подложке Si (100) нанонити толщиной ≤ 100 нм (образец LD-SiNW) представляют собой кристаллические стержни, покрытые оксидным слоем толщиной около 5-ти нм.

6. На высоколегированной подложке и при большом времени травления, образуются нанонити субмикронной толщины и кораллоподобной структуры, состоящие из разориентированных нанокристаллов кремния, покрытых толстым слоем (более 10 нм) оксидов кремния.

7. При регистрации спектров квантового выхода рентгеновского фотоэффекта и нормальном падении синхротронного излучения на образец LD-SiNW с массивом нанонитей в ультрамягкой рентгеновской области спектра поглощения Si $L_{2,3}$ элементарного кремния наблюдается аномальный провал интенсивности с инверсией тонкой структуры спектра поглощения, увеличивающийся с уменьшением угла скольжения синхротронного излучения.

8. Эффект необращаемой инверсии интенсивности главного $L_{2,3}$ - края поглощения кремния во всем интервале углов скольжения СИ от нормального до близкого к нулевому обусловлен малой толщиной нитей ≤ 100 нм, пропускающих через себя значительную часть СИ и позволяющих регистрировать таким образом XANES Si $L_{2,3}$ - спектры «на прохождение», т.е. спектры пропускания.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Терехов В.А. Особенности электронного строения нанослоев «кремний-на-изоляторе» и их взаимодействие с излучением нанометрового диапазона / В.А. Терехов, Д.Н. Нестеров, Э.П. Домашевская, С.Ю. Турищев, Г.Н. Камаев, А.Х. Антоненко // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники - 2014. - Т. 17, №2. - стр. 81-86.
2. Турищев С.Ю. Особенности атомного и электронного строения нитевидного кремния, сформированного на подложках с различным удельным сопротивлением по данным ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии / С.Ю. Турищев, В.А. Терехов, Д.Н. Нестеров, К.Г. Колтыгина, В.А. Сиваков, Э.П. Домашевская // Письма в Журнал технической физики - 2015. - Т. 41, № 7. - стр. 81-88.
3. Турищев С.Ю. Электронное строение массивов нитевидного кремния, сформированного методом MAWCE / С.Ю. Турищев, В.А. Терехов, Д.Н. Нестеров, К.Г. Колтыгина, Е.В. Паринава, Д.А. Коюда, А. Schleusener, V. Sivakov, Э.П. Домашевская // Конденсированные среды и межфазные границы - 2016. - Т. 18, № 1. - стр 130-141.
4. Terekhov V.A. The electronic structure peculiarities of a strained silicon layer in silicon-on-insulator: experimental and theoretical data / V.A. Terekhov, D.N. Nesterov, E.P. Domashevskaya, E.V. Geraskina, M.D. Manyakin, S.I. Kurganskii, G.N. Kamayev, A.N. Antonenko, S.Yu. Turishchev // Applied Surface Science - 2016. Т. 382. стр. 331-335.
5. Нестеров Д.Н. Синхротронные исследования электронно-энергетического спектра структур «кремний-на-изоляторе» / Д.Н. Нестеров // Микроэлектроника и информатика – 2012. 19-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2012., стр. 36.
6. Терехов В.А. Особенности электронного строения и взаимодействия с излучением нанометрового диапазона структур типа кремний-на-изоляторе / В.А. Терехов, Э.П. Домашевская, С.Ю. Турищев, Г.Н. Камаев, А.Х. Антоненко // XIII международная научно-техническая конференция "Кибернетика и высокие технологии XXI века", г. Воронеж, 15-16 мая 2012 г, Тезисы докладов. - Воронеж, 2012, стр. 247-252.
7. Terekhov V.A. Synchrotron radiation interaction with nanolayers of “silicon-on-insulator” and its electronic structure / V.A. Terekhov, E.P. Domashevskaya, S.Yu. Turishchev, G.N. Kamayev, A.K. Antonenko // German-Russian Conference of Fundamentals and Applications of Nanoscience, Berlin, Germany, May 19-21, 2012: Abstr. - Berlin, Freie Universitat Berlin, 2012. - P. 138.
8. Нестеров Д.Н. Особенности электронного строения и взаимодействия с излучением нанометрового диапазона структур типа кремний-на-изоляторе / Д.Н. Нестеров // XIX Международная молодежная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2012», Москва, 9-13 апреля 2012 г. стр. 351.

9. Терехов В.А. Синхротронные исследования особенностей электронного строения структур типа кремний-на-изоляторе / В.А. Терехов, Э.П. Домашевская, С.Ю. Турищев, Д.Н. Нестеров, Г.Н. Камаев, А.Х. Антоненко // V Всероссийская конференция (с международным участием) "Химия поверхности и нанотехнология", Изд-во "Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет) (Санкт-Петербург)", Санкт-Петербург, 24-30 сентября 2012 г., стр. 151.
10. Нестеров Д.Н. Особенности электронного строения и взаимодействия с излучением нанометрового диапазона структур типа кремний-на-изоляторе / Д.Н. Нестеров, В.А. Терехов, Э.П. Домашевская, С.Ю. Турищев, Г.Н. Камаев, А.Х. Антоненко // VI Всероссийская конференция "Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах "ФАГРАН – 2012", Изд-во "Научная книга", Воронеж, 15-19 октября 2012 г., стр. 262-263.
11. Нестеров Д.Н. Оценка толщины кремниевого слоя в структурах КНИ по предкраевой интерференционной структуре в Si L_{2,3} XANES / Д.Н. Нестеров, В.А. Терехов, Э.П. Домашевская, С.Ю. Турищев, Г.Г. Камаев, А.Х. Антоненко // Рентгеновские и электронные спектры и химическая связь: XXI Всероссийская конференция, РЭСХС, 7-11 октября 2013, Новосибирск: программа и сборник тезисов докладов. — Новосибирск, 2013. — стр. 93.
12. Нестеров Д.Н. Электронное строение и фазовый состав нитевидного кремния сформированного методом MAWSE по данным рентгеноспектральных исследований / Д.Н. Нестеров, К.Г. Колтыгина, Д.Е. Спирин, Е.В. Паринова, Д.А. Коюда // Диагностика наноматериалов и наноструктур, Рязань, 15-19 сентября 2014 г. Сборник трудов конференции - стр. 122-124.
13. Курганский С.И. Компьютерное моделирование "растянутого" кремния / Курганский, Е.В. Гераськина, М.Д. Манякин, Д.Н. Нестеров, В.А. Терехов // XIV Международный семинар "Физико-математическое моделирование систем" Изд-во "Воронежский государственный технический университет", Воронеж, 26-27 июня 2015 г., стр. 8-14.
14. Курганский С.И. Энергетическая структура «растянутого» кремния / С.И. Курганский, Е.В. Гераськина, М.Д. Манякин, Д.Н. Нестеров, В.А. Терехов // VII Всероссийская конференция "Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах "ФАГРАН – 2015", Изд-во "Научная книга", Воронеж, 10-13 ноября 2015 г., стр. 220-221.
15. Нестеров Д.Н. Электронное строение массивов нитевидного кремния, сформированного металл-ассистированным химическим травлением / Д.Н. Нестеров, В.А. Терехов, С.Ю. Турищев // 17-я Всероссийская молодежная конференция "Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника", Санкт-Петербург, 23-27 ноября 2015 г. Тезисы докладов - стр. 103.

Работы [1-4] опубликованы в периодических изданиях, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертации.