

«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по науке Уральского
федерального университета
имени первого президента России
Б.Н.Ельцина,
к.ф.-м.н., Кружаев
Владимир Венедиктович



О Т З Ы В

ведущей организации

на диссертационную работу Анкудинова Александра Витальевича

**“Диагностика наноустройств методами
Сканирующей Зондовой Микроскопии”**,

представленную на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

по специальности 01.04.01 –

Приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертация А.В. Анкудинова посвящена разработке новых количественных методик измерений и обработки экспериментальных результатов в исследованиях наноустройств методами сканирующей зондовой микроскопии. Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) хорошо известна как техника с уникальными возможностями для исследования свойств поверхности с атомарным разрешением. Кроме решения фундаментальных задач в физике и химии атомарного устройства поверхностей различных материалов СЗМ также востребована для решения задач в нано- и биотехнологиях, медицине, экологии, других областях современной научно-технической деятельности.

Основная тенденция развития этой сравнительно молодой техники направлена на существенное упрощение процесса измерений и его адаптации для пользователя с минимальными навыками работы, и, одновременно, на существенное увеличение содержания точной количественной информации в выходных данных. Первое направление требует, главным образом, технических и конструкторских решений. Для развития второго направления востребованы новые подходы к применению техники в научных исследованиях и результаты изучения

принципиальных ограничений СЗМ. К факторам, ограничивающим применение СЗМ, можно отнести отсутствие точной информации о форме области контакта зонда с образцом, о характере и величине взаимодействия, сложную и неоднозначную интерпретацию получаемых изображений, ограниченную чувствительность измеренных параметров поверхности к объемным свойствам образца. В этих условиях постановка и решение задач представляемой работы выглядят востребованными и актуальными.

В диссертации: 1) успешно развита СЗМ диагностика электрических, оптических и структурных свойств ряда современных наноструктур, таких как мощные полупроводниковые лазерные диоды, высокоэффективные солнечные элементы и воздушно-водородные топливные элементы; 2) улучшена точность и информативность ряда наномеханических экспериментов с использованием СЗМ; 3) сделан существенный шаг в развитии неразрушающих исследований рельефа и механических свойств живых клеток с помощью СЗМ. Представленная к защите диссертационная работа в свете изложенного, несомненно, **актуальна.**

Научная новизна

По мнению ведущей организации к числу наиболее значимых результатов, впервые полученных автором и определяющих соответствие диссертации требованиям ВАК, следует отнести нижеследующие.

1) Рассмотрение экранирующего действия адсорбированного слоя молекул воды, которое уширяет перепад потенциала в месте выхода резкого рп перехода на поверхность полупроводника.

2) Обнаружение в мощных лазерных диодах паразитного потенциального барьера, формирующегося в стартовых эпитаксиальных слоях при высоких токах инжекции и приводящего к омическому разогреву и разрушению зеркал прибора.

3) Предложенный оригинальный способ измерения токов утечки неосновных носителей в работающих лазерных диодах.

4) Проведенные пионерские СЗМ исследования многокаскадных солнечных элементов из трех субэлементов. Получение свидетельства о сохранении эффективности туннельных соединений при уровне возбуждения вплоть до нескольких GW/m^2 .

5) Разработку оригинальной методики для решения обратной задачи восстановления локального фазового и амплитудного состава поперечных мод электрического поля в мощных лазерных диодах.

6) Разработку алгоритма для определения условий закрепления наномостика на краях углубления в подложке, который в четыре раза повысил точность измерений модуля Юнга материала наномостика.

7) Реализацию нового способа изготовления специализированных сферических зондов с субмикронным калиброванным радиусом кривизны, который способствует развитию биомедицинских исследований с помощью СЗМ.

Обоснованность и достоверность результатов

Результаты работы надежно подтверждены многочисленными экспериментами автора, а также рядом зарубежных и отечественных исследователей. Они согласуются как с известными, так и с разработанными автором аналитическими моделями. Достоверность результатов подтверждается апробацией на практике. В частности, рассмотренная в диссертации технология специализированных СЗМ зондов с калиброванной геометрией кончика уже несколько лет используется автором с коллегами в мелкосерийном производстве.

В работе для ведения СЗМ исследований развит и обоснован ряд оригинальных экспериментальных и теоретических подходов к: анализу сигналов электромеханического отклика пьезоэлектрических образцов; измерениям утечек неосновных носителей в работающих инжекционных лазерах; определению с повышенной точностью механических и геометрических характеристик живых клеток; достоверным измерениям модуля Юнга одномерных нанообъектов. В этом свете тематика диссертации лежит в русле научных исследований по разработке новых методов и принципов измерений физических величин и хорошо соответствует формуле специальности 01.04.01.

Научная и практическая значимость работы

Научная и практическая значимость работы не подвергается сомнению. Методики исследования утечки неосновных носителей в мощных полупроводниковых лазерах, а также восстановления состава разности фаз и отношения амплитуд двух одновременных поперечных оптических мод и мод электрического поля в лазерном диоде могут быть использованы для контроля технологических процессов на разных этапах изготовления полупроводниковых приборов, а также при проектировании полупроводниковых лазеров.

Представляет практический интерес оригинальная методика измерений и обработки СЗМ сигналов для исследований воздушно-водородных топливных элементов.

Практически значимым результатом работы, очевидно, является налаженный мелкосерийный выпуск специализированных сферических зондов для СЗМ исследований. Он важен не только для информативных исследований мягких объектов, но может способствовать повышению точности исследований с использованием микроскопии пьезоотклика и измерений сопротивления растекания. Результат открывает возможность проведения новых экспериментальных исследований в области нанофотоники и плазмоники.

Рекомендации по использованию

Результаты работы могут быть востребованы исследователями в области нанотехнологий в Институте автоматики и процессов управления ДВО РАН, Новосибирском институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова, Казанском физико-техническом институте им. Е.К. Завойского, Нижегородском институте физики микроструктур РАН, Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе. Интересны они также разработчикам сканирующих зондовых микроскопов и дистрибьюторам СЗМ зондов. Конкретными потребителями могут быть: российские компании НТ-МТД, Аист НТ, зарубежные MicroMash, Nanoworld, Bruker.

Содержание диссертации может служить основой для создания учебного пособия по применению сканирующей зондовой микроскопии в диагностике полупроводниковых и биологических микро и наносистем для студентов и преподавателей технических ВУЗов. Например, такой курс представляется полезным при подготовке специалистов по направлению 20.05.00 «Метрология, стандартизация и сертификация» в Уральском федеральном университете, Томском политехническом университете, Башкирском государственном университете, Донском государственном техническом университете, а также по направлению 21.01.00 «Электроника и микроэлектроника» в Санкт-Петербургском электротехническом университете, Нижегородском государственном техническом университете, Московском институте стали и сплавов.

Замечания

1) Во введении, на стр. 21 и в автореферате на стр. 16, в описании содержания раздела 2.3 отмечается, что «Также исследованы ИК лазеры на основе гетероструктуры GaInSbAs/GaAlSbAs/GaSb». Однако результаты этого исследования, удачно иллюстрирующие развитую автором методику измерения утечки неосновных носителей на зеркалах лазеров, описаны

излишне лаконично (практически дублируется текст из введения). Полная информация приведена лишь в публикации автора [А43].

2) На стр. 22 диссертации слово «диагностика» на первой линии последнего абзаца должно стоять в родительном падеже. В этом же абзаце фраза «плохо проводящие однородные мембраны» выбрана неудачно, так как на таких мембранах измерения проводимости не эффективны.

3) На стр. 35, на рис.8 приведена схема установки с обозначениями на английском языке, а подпись к рисунку занимает лишь одну строчку. Последующий текст не добавляет информации, поэтому следовало дать подробное пояснение к этому рисунку.

4) На стр. 100-102 при описании результатов, полученных на втором эталонном образце, не представлен анализ природы топографических особенностей, соответствующих механически напряженным слоям GaSb.

5) Тексты диссертации и автореферата содержат некоторое количество грамматических ошибок и опечаток. Например, в диссертации: на стр.54, 10 строка, «вовремя» надо заменить на «во время»; на стр.94, 5 строка снизу: «разрешение» надо заменить на «разрешением»; на стр. 110, подпись к Рис.40, 1 и 3 строки, «падение» надо заменить на «падения»; на стр.117, 5 строка, «область» надо заменить на «области»; на стр.141, 1 абзац, 4 строка, «модами» надо заменить на «мод»; на стр.142, 10 строка, «светом» надо заменить на «света»; на стр.186, 11 строка, «угол» надо заменить на «угла».

Заключение

Диссертация представляет собой законченное исследование по актуальной теме. Развитые в работе методики измерений могут служить основой для более точных и информативных СЗМ исследований; полученные результаты представляют также практический интерес, подтвержденный продуктивным взаимодействием автора с хорошо известным производителем СЗМ приборов, компанией НТ-МДТ. Автореферат и публикации автора в полной мере отражают содержание диссертации, а также значимость личного вклада автора. Тема диссертации и ее содержание соответствуют специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

По характеру и объему выполненных исследований, актуальности поставленных задач, научной новизне и практической значимости полученных результатов диссертационная работа А.В. Анкудинова «Диагностика наноустройств методами Сканирующей Зондовой Микроскопии» полностью удовлетворяет требованиям ВАК к докторским диссертациям, а ее автор, А.В. Анкудинов, заслуживает присуждения

ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертационная работа доложена автором и обсуждена на объединенном научном семинаре Лаборатории сегнетоэлектриков отдела оптоэлектроники и полупроводниковой техники Научно-исследовательского института физики и прикладной математики и Лаборатории наноразмерных сегнетоэлектрических материалов Института естественных наук Уральского федерального университета имени первого президента России Б.Н.Ельцина, 31 августа 2015 года (Протокол №1 от 31 августа 2015 года). Отзыв рассмотрен и утвержден на объединенном заседании Лаборатории сегнетоэлектриков отдела оптоэлектроники и полупроводниковой техники Научно-исследовательского института физики и прикладной математики и Лаборатории наноразмерных сегнетоэлектрических материалов Института естественных наук Уральского федерального университета имени первого президента России Б.Н.Ельцина, 5 октября 2015 года (Протокол №1/2 от 5 октября 2015 года).

Доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией сегнетоэлектриков отдела оптоэлектроники и полупроводниковой техники Научно-исследовательского института физики и прикладной математики Уральского федерального университета имени первого президента России Б.Н.Ельцина, профессор Кафедры компьютерной физики, Институт естественных наук Уральского федерального университета имени первого президента России Б.Н.Ельцина.

Адрес: Екатеринбург, 620000, пр. Ленина, 51

Моб. тел.: +7-912-613-4834

e-mail: vladimir.shur@urfu.ru

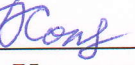
 (В.Я. Шур)
Шур Владимир Яковлевич

Кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией наноразмерных сегнетоэлектрических материалов Института естественных наук Уральского федерального университета имени первого президента России Б.Н.Ельцина.

Адрес: Екатеринбург, 620000, пр. Ленина, 51

Моб. тел.: +7-981-974-3288

e-mail: kholkin@urfu.ru

 (А.Л. Холкин)
Холкин Андрей Леонидович

Подписи Шура В.Я. и Холкина А.Л. удостоверяю

Ученый секретарь
института
естественных наук УрФУ

 (Л.А.Памятных)
Памятных Лидия Алексеевна

