

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию  
**АНКУДИНОВА Александра Витальевича**

*"Диагностика наноустройств методами сканирующей зондовой микроскопии"*, представленную на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук по специальности  
01.04.01 – "Приборы и методы экспериментальной физики"

Современный этап развития электроники требует разработки технологий создания твердотельных структур нанометрового (и даже атомного!) масштаба и проведения исследований их свойств на таком же уровне. Важную роль для решения возникающих при этом задач могут играть методы сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), однако на сегодняшний день получение точных количественных данных о локальных свойствах поверхности образца остается проблематичным. Диссертационная работа А.В. Анкудинова посвящена разработке новых количественных СЗМ методик измерений и обработки экспериментальных результатов исследования различных наноустройств. Такие исследования безусловно актуальны для решения фундаментальных проблем физики наноструктур, так как несут ценную информацию о локальных взаимодействиях, электронных свойствах двумерных структур, одноэлектронных и квантово-размерных эффектах, и являются новым направлением в атомно-масштабной физике поверхности твердого тела. Более того, подобные работы важны и для решения прикладных задач, так как имеют прямое отношение к разработке перспективных нанотехнологий, новым методам синтеза функциональных элементов, получению квантовых наноструктур и созданию на их основе опто- и наноэлектронных приборов нового поколения.

Для проведения этих исследований диссертантом развиты количественные методики СЗМ исследований электрических, оптических и структурных свойств ряда конкретных наноустройств: лазерных диодов, солнечных элементов, топливных элементов. К новым результатам, приведенным в диссертации, относятся обнаружение механических напряжений на границе гетероструктур с подложкой и вблизи тонких слоёв, отличающихся от окружения по постоянной решетки, например, на сколах лазерных гетероструктур, а также впервые обнаруженные особенности в распределениях электростатического потенциала в приборных полупроводниковых структурах с резкими потенциальными барьерами. Кроме того, автором разработана методика наблюдения утечки носителей тока из активной области работающих светодиодов и лазеров.

Сама диссертация (297 страниц текста, включая 95 рисунков) состоит из введения, четырех глав, приложений на 6 стр., заключения и библиографическо-



го списка из 287 наименований.

Первая (обзорная) глава работы посвящена подробному изложению результатов СЗМ исследований лазерных диодов, солнечных элементов и воздушно-водородных топливных элементов, проанализированы методические аспекты СЗМ измерений электромеханических свойств сегнетоэлектрических пленок и подробно рассмотрены вопросы о СЗМ зондах со сглаженной геометрией кончика. При этом автором продемонстрировано безусловное умение анализировать и обобщать результаты, известные из литературных источников.

Во второй главе представлены результаты экспериментального СЗМ исследования приборных наноструктур, включая гетероструктуры с резкими потенциальными барьерами и *pn* переходами в их составе, с помощью которых тестировалось латеральное разрешение метода сканирующей Кельвин Зондовой Микроскопии (СКЗМ), мощные лазерные диоды, на зеркалах которых анализировались особенности распределения приложенного напряжения и детектировались токи утечки неосновных носителей, трехкаскадных солнечных элементов, воздушно-водородных топливных элементов, где изучались активные области, определяющие эффективность их работы. В разделе 2.1 представлены результаты исследования особенностей формирования химического контраста в СЗМ измерениях на сколах эпитаксиальных гетероструктур (GaAlAs/GaAs, ZnSe/GaAs), а в разделе 2.2 обсуждаются результаты измерения распределения потенциалов в приборных гетероструктурах. Следует отметить проведенные автором детальный сравнительный анализ и теоретический оценки пространственного разрешения методов электростатической силовой микроскопии (ЭСМ) и СКЗМ. Так, в разделе 2.2.6 приведены результаты ЭСМ и СКЗМ измерений на эталонных образцах с резкими потенциальными барьерами, которые могли использоваться для калибровки СКЗМ измерений и вычисления инструментальной функции СКЗМ при подаче точно известного напряжения, запирающего переход; в разделе 2.2.7 представлены результаты СКЗМ исследований распределения внешнего смещения в работающем лазерном диоде, в котором была обнаружена область паразитного падения напряжения, вызвавшая деградацию прибора. В разделе 2.3 предложен новый подход к обнаружению утечки дырок из активной области работающих лазерных диодов с использованием СКЗМ, а в разделе 2.4 - методика восстановления оптических мод с помощью сканирующего ближнепольного оптического микроскопа.

Заметно выделяющаяся среди остальных третья глава целиком посвящена различным наномеханическим экспериментам с использованием СЗМ, в частности, исследованию доменов поляризации в тонких сегнетоэлектрических пленках (раздел 3.2). Улучшенная трехточечная СЗМ методика измерения моду-



ля Юнга подвешенного нанообъекта описана в разделе 3.3, где получены аналитические выражения для прогиба подвешенного объекта в точке нагрузки, подтвержденные экспериментально на образцах наносвитков минерального хризотила. В заключение, в разделе 3.4 рассмотрена возможность использования специальных образцов с наномостиками над микропорами для измерения максимальной силы взаимодействия в динамических квазистатических режимах работы СЗМ и получено аналитическое выражение максимальной силы в режиме tapping mode для гармонического потенциала взаимодействия, хорошо согласующееся с экспериментом.

И, наконец, в последней, четвертой главе диссертации рассматриваются результаты применения СЗМ к исследованию мягких объектов. В разделе 4.1 предложен надежный и воспроизводимый способ создания сферических зондов субмикронного калиброванного радиуса кривизны для СЗМ, не требующий обязательного изготовления посадочного места на кончике и сохраняющий исходные характеристики датчика. Такие зонды применялись для изучения ультратонких пленок полисилоксановых блок-сополимеров (раздел 4.2). Подробный анализ факторов, сдерживающих применение СЗМ диагностики тактильных исследований мягких, живых клеток млекопитающих с субмикронным и нанометровым разрешением приведен в разделе 4.3. Там же продемонстрирован способ неразрушающего СЗМ исследования живых клеток с использованием специализированных сферических зондов субмикронной кривизны.

Таким образом, А.В. Анкудиновым получен значительный объем новых результатов, достоверность которых обеспечена применением апробированных взаимодополняющих экспериментальных методов исследования и подходов, обоснованных математических моделей, а также соответствием этих результатов известным теоретическим и экспериментальным данным. В диссертации изложена четкая картина состояния технологий получения и современного научного представления о строении и свойствах твердотельных наноструктур и ряда нетрадиционных мягких объектов. Работа заметно выделяется среди подобных широтой использования различных методов СЗМ при проведении экспериментов. Основные положения работы сформулированы и изложены ясным литературным языком, а ключевые термины и определения представлены в различных вариантах их использования в научной литературе. В работе получило заметное развитие новое научное направление по исследованию на нано (атомном) уровне особенностей формирования химического контраста в изображениях поверхностей сколов полупроводниковых гетероструктур.

Однако диссертация А.В. Анкудинова не свободна от недостатков. Основ-



ные замечания по соответствующим разделам работы состоят в следующем.

Во Введении.

Стр. 25. Первый абзац с описанием содержания четвертой главы не очень уместно заканчивается фразой «в нашей работе это предлагается делать с помощью специальных зондов».

По главе 1.

1. Стр. 34. В подписи к рис. 7, во второй строчке слово «часть» лишнее, а в третьей строчке не «канал расширяется», а «видимая часть канала расширяется».

2. Стр. 53, 9 строка сверху: «реакция опоры действует на ступени под наклоном» надо заменить на «направление реакции опоры на ступени отклоняется от нормального».

По главе 2.

1. Стр. 66, последние две строчки и первая на стр. 67: «низкая чувствительность из-за того что переменное электрическое поле прикладывается квазистатически, т.е. на частоте существенно ниже резонанса (проигрыш в чувствительности пропорционален добротности)». Не совсем ясно, о каком проигрыше идет речь? По-видимому, о проигрыше по сравнению с бесконтактным возбуждением ЭСМ сигнала на частоте резонанса?

2. Стр. 107, Рис. 38. На всех профилях КРП, приведенных на этом рисунке, области с дырочной проводимостью характеризуются более положительным значением сигнала, чем области с электронной проводимостью. Это противоречит данным на рис. 37(d).

3. На стр. 148, в самом конце, сказано следующее. «Как показали проведенные расчеты, при **равенстве мощностей этих двух мод** и средних внутренних оптических потерях  $1.5 \text{ см}^{-1}$ , критическая длина резонатора, обеспечивающая одновременное выполнение пороговых условий генерации, составляет  $2180 \text{ мкм}$ . Это значение близко к продольному размеру резонаторов лазерных образцов, выбранных для эксперимента. Проведенные эксперименты показали, что амплитуда поля лазерного излучения содержит примерно 75% второй и 25% первой моды, см. последнюю линию на стр. 152. То есть, в действительности, мощности (квадраты амплитуд) **этих двух мод отличаются примерно на порядок**. К сожалению, это интересное расхождение никак не комментируется в тексте диссертации.

По главе 3.

Стр.186, строки 2-4. Цитата «Проведенный в работах [<sup>145,147,148</sup>] анализ показывал, что выражение (37) достаточно хорошо выполняется в СЗМ эксперименте...» несколько искажает ситуацию. В указанных работах анализируются усло-



вия, когда выполняется выражение (37), а из приведенной фразы следует, что выполняется всегда.

Тем не менее, учитывая широту охвата исследованных вопросов и большой объем проделанной работы, эти замечания скорее можно считать пожеланиями. Они не снижают общей высокой оценки научного уровня проведенных исследований. Работа прекрасно иллюстрирует развитие методик сканирующей зондовой микроскопии и блестяще показывает успехи этого развития многими приложениями. Материалы диссертации докладывались на многочисленных международных и всероссийских научных конференциях, хорошо известны и одобрены научной общественностью, достаточно полно (29 статей) представлены в специализированных высокорейтинговых научных журналах, защищены внедренным патентом РФ. Все новые результаты, сформулированные положения и выводы, выносимые на защиту, не вызывают возражений. Автореферат диссертации хорошо отражает её основное содержание и показывают значимость личного вклада соискателя в полученные научные результаты. Тема диссертации, её содержание и опубликованные результаты полностью соответствуют паспорту специальности 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики», что видно также из списка публикаций диссертанта.

Считаю, что представленная работа соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а сам автор, Александр Витальевич Анкудинов, в полной мере заслуживает присуждения ему искомой учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Заведующий кафедрой физической электроники и нанофизики Башкирского государственного университета, доктор физико-математических наук,

профессор

Р.З. Бахтизин

Почтовый адрес:

450076, РФ, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32.

Телефон (рабочий): +7 (347) 229-96-47.

Телефон (моб.) +7 (917) 410-98-71.

Факс: +7 (347) 273-65-74.

Адрес электронной почты: [raouf@bsu.net.ru](mailto:raouf@bsu.net.ru)



Подпись: Бахтизин Р.З.  
Заверяю: ученый секретарь БашГУ  
*С.Р. Баимова*  
« 02 » октября 20 15 г.