

ОТЗЫВ

официального оппонента 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

Актуальность темы. Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) в настоящее время является одним из ведущих методов исследования объектов на нанометровом масштабном уровне. Принципы работы СЗМ обеспечивают уникальные возможности исследовать и манипулировать материей при атомарном пространственном разрешении, что делает СЗМ незаменимым инструментом современных нанотехнологий. Беспрецедентные возможности СЗМ привели к интенсивному развитию разнообразных модификаций этого метода, который на сегодняшний день еще далек от завершения. СЗМ активно применяется в таких задачах, как измерение рельефа поверхности, диагностика поляризации и намагниченности в ферроэлектриках и ферромагнетиках, изучение потенциалов и зарядов на поверхностях полупроводниковых наноструктур, измерение модуля Юнга тонких полимерных пленок и нанотрубок. Несмотря на принципиальную возможность достигать атомарного разрешения в этих практически важных задачах СЗМ, как правило, дает лишь качественный ответ. Причины кроются в недостатке информации о форме контакта и уровне взаимодействия непосредственно во время измерений, в сложности учета точной геометрической конфигурации зонд-образец, в слабой чувствительности СЗМ к объемным свойствам. Исходя из вышесказанного тема диссертационной работы А. В. Анкудинова, посвященной разработке для сканирующей зондовой микроскопии новых количественных методик проведения измерений и обработки их результатов, имеет несомненную актуальность.

Практическая значимость темы. Результаты работы имеют несомненное практическое значение, они найдут широкое применение в твердотельной электронике, производстве и тестировании полупроводниковых лазеров, физике и химии поверхности, исследованиях коррозии, микробиологии и медицине, а также в различных направлениях нанотехнологий. Представленные в диссертации исследования важны для применения сканирующей зондовой микроскопии в диагностике как твердотельных приборных наноструктур, так и «мягких тел»: полимерных нано и микрообъектов, а также живых клеток.

Диссертация состоит из введения, краткого, но достаточно исчерпывающего литературного обзора, трех глав с оригинальными результатами исследований автора. В первой главе, посвященной количественным подходам в СЗМ диагностике приборных эпитаксиальных полупроводниковых наногетероструктур, рассмотрены, в частности, следующие вопросы: химический контраст в СЗМ изображениях поверхностей сколов лазерных структур; диагностика распределения напряжения питания в работающем лазере; наблюдение поверхностной утечки неосновных носителей из прямо смещенного рп перехода; определение методом ближнепольной микроскопии состава поперечных оптических мод на зеркале лазера. Во второй главе, посвященной экспериментальной наномеханике, особенный интерес вызывают два рассмотренных автором вопроса: об определении характеристик закрепления подвешенных нанообъектов для повышения точности СЗМ измерений их упругих характеристик (теория и эксперимент); о определении силы удара зонда по образцу в режиме амплитудной модуляции (теория и эксперимент). В третьей главе приведены результаты СЗМ исследований мягких объектов – живых клеток и полимеров с помощью субмикронных сферических зондов калиброванного радиуса кривизны, способ изготовления которых подробно описан в этой же главе.

Наиболее значимые результаты диссертационной работы.

1. Разработана методика локализации методами СЗМ положения и толщин основных слоев (эмиттеров, волновода, активной области) лазерных гетероструктур с нанометровой точностью.
2. На поперечном разрезе многослойной лазерной диодной структуры выявлены области дополнительного падения напряжения, отвечающие за омические потери в приборе при токах инжекции выше порога лазерной генерации.
3. Разработана методика количественного картирования токов утечки носителей заряда на зеркале работающего полупроводникового лазерного диода.
4. Разработана методика анализа сигналов сканирующей ближнепольной оптической микроскопии для восстановления состава оптических мод в полупроводниковом лазерном диоде с плоским резонатором Фабри Перо.
5. Разработан алгоритм анализа механического прогиба одномерных объектов, перекрывающих углубления в подложке, позволяющий количественно охарактеризовать условия их закрепления на краю углублений. Применение

данного алгоритма позволяет многократно повысить точность определения упругих характеристик нанообъектов.

6. Получено экспериментальное подтверждение аналитической модели (H.Bielefeldt, F.Giessibl) для вычисления силы удара зонда по образцу в режиме амплитудной модуляции.
7. Разработана методика неинвазивного СЗМ исследования рельефа и упругих характеристик живых клеток с субмикронным пространственным разрешением. Методика основана на оригинальной технологии специализированных сферических зондов субмикронного калиброванного радиуса кривизны.

Достоверность результатов подтверждается использованием апробированных экспериментальных и аналитических методов, сравнением результатов экспериментов с результатами аналитических и численных расчетов, апробацией основных положений диссертации на международных и всероссийских конференциях, публикациями в высокорейтинговых российских и международных журналах.

Научная новизна. По мнению оппонента новизна работы определяется разработкой методик количественного анализа данных СЗМ, основанных на оригинальных экспериментальных технологиях, подкрепленных разработанными автором аналитическими моделями. Полученные результаты позволяют существенно повысить точность измерений методом СЗМ, а также проводить измерение объектов, ранее не доступных для СЗМ (живых клеток).

Замечания по диссертационной работе.

1. Для анализа механического прогиба одномерных объектов, перекрывающих углубления в подложке, выбрана модель трехпролетной балки. Представляется, что данный анализ может быть осуществлен на более простой модели однопролетной балки при учете угловой жесткости в точках закрепления.
2. При определении размеров деформируемого нанообъекта осуществляется выбор из двух альтернативных значений, полученных на основе геометрического и деформационного подходов. Представляется, что более высокая точность может быть достигнута в случае учета обеих значений, взятых с некоторыми весами, определяемыми на основе анализа данных измерений.
3. Для анализа формы прогиба нанообъектов было бы полезно использовать интегральные характеристики пространственного распределения данных измерений и их безразмерные отношения.

Перечисленные замечания не ставят под сомнение полученные результаты и не снижают общую положительную оценку работы.

Особо бы хотелось отметить количество и качество публикаций, прекрасное оформление работы, а также высокую квалификацию диссертанта, позволяющую совмещать высокие экспериментальные технологии с глубоким анализом физико-механических аспектов явлений, используемых при разработке этих технологий и их практическом применении.

Заключение. Диссертационная работа «Диагностика наноустройств методами сканирующей зондовой микроскопии» является завершённой научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научном уровне, ее основные положения, полученные результаты и выводы обоснованы и соответствуют необходимым критериям научной новизны и практической значимости. Содержание автореферата адекватно отражает основные положения диссертации и полученные результаты. Результаты, выносимые на защиту, опубликованы. Диссертация отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Анкудинов Александр Витальевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент,
заведующий лабораторией «Дискретные модели механики»
Института проблем машиноведения Российской Академии наук,
д.ф.-м.н. Антон Мирославович Кривцов



12.10.2015

Почтовый адрес:
Большой пр. ВО, д.61, Санкт-Петербург 199178
Телефон (мобильный): +7 (911) 121-40-35.
Адрес электронной почты: akrivtsov@bk.ru

