

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации **АНКУДИНОВА Александра Витальевича**  
**«Диагностика наноустройств методами сканирующей зондовой  
микроскопии»,**

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

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) в настоящее время стала тем диагностическим инструментом, без которого невозможно представить себе исследования наноразмерных структур как в материаловедении и электронике, так и в биологии. Методы СЗМ, такие как сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) и атомно-силовая микроскопия (АСМ) позволяют изучать поверхности твердых тел с атомарным разрешением, причем можно получить информацию не только о геометрических характеристиках, но и контролировать электрофизические, механические и оптические свойства наноструктур.

Однако, несмотря на широкое использование методов и оборудования СЗМ, до сих пор остаются нерешенными ряд проблем:

- измерения электрофизических и механических параметров наносистем носят качественный характер;
- неизвестные геометрия АСМ (СТМ) зонда и сила взаимодействия обуславливают неточность измерений локальной поляризации, намагниченности, проводимости, поверхностного потенциала, модуля Юнга, и, наконец, рельефа образцов;
- при исследовании неизвестных, новых объектов возникают проблемы интерпретации и использования данных в анализе процессов и свойств, определяющих практическое использование этих объектов.

В результате этого часто возникают вопросы об эффективности применения техники СЗМ для измерения электрофизических, механических и других физических свойств наноразмерных объектов. В то же время, нерешенные вопросы и проблемы создают поле деятельности для исследователя по разработке новых методов и методик СЗМ для диагностики наносистем, в том числе низкоразмерных объектов биологического происхождения.

Основной целью работы являлась разработка новых количественных методик измерений и обработки экспериментальных результатов в СЗМ исследованиях наноразмерных объектов и систем. В качестве объектов исследования выбраны лазерные гетероструктуры, в том числе мощные лазерные диоды, высокоэффективные многокаскадные солнечные элементы; воздушно-водородные топливные элементы и сопутствующие материалы. Кроме того, в работе исследовались тонкие сегнетоэлектрические пленки, перспективные в системах энергонезависимой памяти, одномерные нанобъекты и полимерные пленки, актуальные в разработках новых композиционных материалов, а также живые эукариотические клетки. Таким образом, предлагаемые методы диагностики были апробированы на широком спектре наноразмерных объектов.

К достоинствам работы и заслугам непосредственно автора можно отнести получение следующих значимых научных результатов.

1. В мощных лазерных диодах обнаружен паразитный потенциальный барьер, формирующийся на стартовых, калибровочных эпитаксиальных слоях при токах инжекции выше порога лазерной генерации и приводящий к катастрофической неоптической деградации зеркала прибора.

2. Разработан оригинальный способ детектирования утечки неосновных носителей в работающих лазерных диодах и выявлена прямая связь локальной величины тока утечки с концентрацией носителей в активной области полупроводникового лазера.

3. Проведены нетривиальные СЗМ исследования распределений фотонапряжения на сколах многокаскадных солнечных элементов из трех субэлементов на основе р-п- переходов в Ge, GaAs и GaInP<sub>2</sub>, соединенных туннельными р<sup>+</sup>п<sup>+</sup>- переходами при локальном фотовозбуждении каждого субэлемента, и продемонстрирована возможность контролировать функционирование каждого субэлемента, на основании чего сделаны выводы о сохранении эффективности туннельных соединений при уровне возбуждения вплоть до нескольких GW/m<sup>2</sup>.

С практической точки зрения на наш взгляд интерес представляют следующие результаты.

1. Налажен мелкосерийный выпуск готовой продукции и получен патент на способ изготовления специализированных сферических СЗМ зондов субмикронного калиброванного радиуса кривизны без промежуточного контроля с помощью оптической и электронной микроскопии на основных стадиях изготовления зонда. Специализированные сферические зонды важны не только для информативных исследований мягких особенно биологических объектов, их также можно использовать для повышения точности измерений пьезоотклика сегнетоэлектрических образцов и измерений локальной проводимости.

2. Разработана оригинальная методика измерений и обработки СЗМ сигналов для исследований воздушно-водородных топливных элементов. С ее помощью с нанометровым пространственным разрешением выявлены детали распределения полимерной компоненты на углеродных гранулах каталитического слоя и особенности устройства активных областей в полусборках топливных элементов.

3. Разработаны методики диагностики потенциальных барьеров внутри структуры и токов утечки неосновных носителей на зеркалах лазеров, которые предложено использовать для контроля технологических процессов изготовления полупроводниковых лазеров.

Среди замечаний, возникших после ознакомления с авторефератом, можно отметить следующие:

1. При описании содержания 2-ой главы почему-то отдан приоритет только нескольким подразделам (2.2.6, 2.2.7).

2. На рис. 5 в упрощенную схему замещения следовало бы параллельно емкостям С<sub>2</sub> и С<sub>3</sub> добавить активные сопротивления утечки соответствующих р-п- переходов.

дов для обеспечения «работоспособности» этой схемы. Кроме того, при составлении качественного прогноза поведения сигнала фотоЭДС  $U_{\phi}$  на сколе многопереходного солнечного элемента не учитывалась диффузионная емкость р-п- переходе в Ge ( $C_1$ ).

Указанные замечания не носят принципиального характера и являются скорее мелкими недочетами автореферата.

Судя по автореферату, диссертационная работа АНКУДИНОВА Александра Витальевича «Диагностика наноустройств методами сканирующей зондовой микроскопии» является результатом решения крупной научной проблемы, связанной с развитием количественных СЗМ методов диагностики электрофизических, механических и оптических свойства наноразмерных объектов, полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор, несомненно, заслуживает присвоения ему искомой ученой степени.

Вихров Сергей Павлович. Главный научный сотрудник Регионального Центра зондовой микроскопии коллективного пользования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет» (РГРТУ), доктор физико-математических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ (Адрес для переписки: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, Тел.: (4912)46-03-66, E-mail: [me@rsreu.ru](mailto:me@rsreu.ru))

 С.П. Вихров

Вишняков Николай Владимирович. Директор Регионального Центра зондовой микроскопии коллективного пользования, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет», к. т. н. (Адрес для переписки: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, Тел.: (4912)46-02-99, E-mail: [rcpm@rsreu.ru](mailto:rcpm@rsreu.ru))

 Н.В. Вишняков

*Подписи С.П. Вихрова и Н.В. Вишнякова заверяю*

Ученый секретарь Ученого совета РГРТУ



В.Н. Пржегорлинский