

## ОТЗЫВ

На автореферат диссертации Бородина Богдана Романовича «Сканирующая зондовая литография дихалькогенидов переходных металлов и исследование электронных и оптических свойств структур на их основе», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников».

Хотя сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) имеет тридцатилетнюю историю, данный метод продолжает активно развиваться, а возможности метода - расширяться, в том числе в области зондовой литографии, то есть модификации, а не визуализации наноструктур. По этой причине тема диссертации Б.Р. Бородина является актуальной, а решаемые в ней задачи показывают задел для практического применения предложенных решений.

Среди основных результатов работ значительной методической новизной обладают результаты по зондовой литографии, как по локальному анодному окислению, так и предложенный автором «ф-СЗМ» метод. Возможность количественной характеристики работы выхода электронов для описанных наноструктур, возможность модификации данных структур с помощью широко распространенного метода СЗМ (при большом количестве современных зондовых станций в РФ и мире), ожидаемо способствует развитию сопряженных методом создания и характеристики наноструктур из новых материалов. Значительной востребованностью обладают оценки оп силам нажима, количеству треков процарапывания поверхностных слоёв, и детальное описание экспериментов по определению работы выхода и анализа спектров ФЛ и КРС со всеми необходимыми формулами. Касаемо «ф-СЗЛ» удивляет тонкость линии рисунка и ровность края на рисунке 7б автореферата. Указанный радиус закругления (изначальный заводской) 100 нм, а разрешение достигается до 20 нм. В этой связи важно, что автором продемонстрировано, что спустя серию повторений царапания (хотя в автореферате не указано точное число) СЗМ зонд практически не затупляется. Таким образом, практическая значимость состоит в том числе в определении режима, при котором предложенный метод литографии экономит СЗМ зонды или они меньше расходуются в ходе работы.

В автореферате и диссертации сперва описаны физические основы и предпосылки исследования, затем рост структур с подробным алгоритмом технологии зондовой литографии, затем в главах описывается диагностика, подкреплённая компьютерным моделированием, поэтому работа выглядит цельно, последовательно и таким образом идея и подход к реализации данного исследования понятно сформулированы. Высокий уровень данного исследования подтверждается публикациями автора по теме диссертации (13 штук) и обзор данных работ, способа изложения не вызывает сомнений в достоверности представленных к защите результатов.

К замечаниям по представленной работе стоит отнести следующее. Во-первых, в тексте автореферата отсутствуют сведения о том, какие зонды использовались для

локального анодного окисления. Видится целесообразным осветить роль зондов в данном исследовании для коллег, которые будут планировать свои эксперименты на основе полученных автором данных. Известно, что зонды имеют характерные остроту, углы наклона граней, толщины напылений на грани и другие характеристики, которые имеют разброс в значениях даже в одной заводской упаковке, поэтому воспроизводимость результатов может зависеть от характеристик конкретного зонда. К примеру, касаясь значений силы нажима, определённого как оптимальная для проведения царапания поверхности (5 мкН), данное значение может зависеть от характеристик покрытия острия зонда, которые не всегда точно контролируются производителем зондов. Во-вторых, в тексте почти не упомянуты структурные свойства объектов исследования и методы исследования. Например, неясно можно ли различить дефекты в ПЭМ-ВР для края представленных процарапанных структур при соответствующей пробоподготовке и изучить влияние дефектов структуры деформированных краёв на оптические свойства. В-третьих, касаясь описания оптических результатов люминесценции и КРС, также хотелось бы пояснений про краевые эффекты для структур, в частности, о том, как ровность края исследуемых структур влияет на получаемый спектр и моды в методе КРС и имеет ли место зависимость спектров от температуры объекта.

В заключение следует отметить, что несмотря на указанные замечания, работа является законченной, полноценной, значимой и пояснения к вышеуказанным замечаниям могут быть обнаружены в тексте опубликованных авторов публикаций. В этой связи, уверен, что работа соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а соискатель Бородин Богдан Романович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников».

Заведующий лабораторией функциональной  
диагностики низкоразмерных структур для Гейдт Павел Викторович  
нанoeлектроники физического факультета, к.ф.-м.н.

Рабочий телефон: +7 383 363 4425

Email: p.geydt@nsu.ru

Адрес организации: Россия, 630090, Новосибирская обл., г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ)

Подпись Гейдта Павла Викторовича удостоверяю