

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»

Бородин Богдан Романович изучал свойства двумерных материалов на основе дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ). Диссертационная работа экспериментальная, в основном опирается на Сканирующую зондовую микроскопию (СЗМ). Автор фокусируется на определении зависимостей работы выхода ДПМ от толщины, выявлении деталей механизмов фотоокисления и анодного окисления ДПМ, контролируемом механическом разрушении образцов. Добытые знания применяет для создания рецептов СЗМ–литографии ДПМ и исследует сформированные путем СЗМ-литографии наноструктуры. Объекты выбраны современные, новые и «недоисследованные». Без сомнения, было важно понять предельные возможности СЗМ–литографии на ДПМ и научиться создавать уникальные наноструктуры востребованные не только в СЗМ–измерениях. В таком контексте, мне представляется, тема диссертации звучит вполне актуально.

Богдан провел замечательную работу и получил интересные новые данные, доказывающие четыре основных положения диссертации. Наиболее важно то, что ему удалось создать средство производства. Автореферат исчерпывающе отражает основные результаты, изложение логичное, иллюстрации хорошо дополняют текст. Уровень результатов очень высокий, и опубликованы они в высокорейтинговых журналах. Диссертация мне нравится, чувствуется увлеченность автора. Не только «по форме» все выполнено «на отлично», но и «по сути» все дельно. Хочется пожелать Богдану не терять увлеченности, продолжать находить радость и переживать горечь в творчестве исследователя.

Замечания. 1. Возможно, стоило бы пошагово (с иллюстрациями) описать процедуру литографии напряжением: как подавался короткий (доли мс) импульс напряжения на зонд при анодном окислении в точке; как из тэппинга переходили в контакт и обратно (переходили ли), в какой момент подавали импульс анодного напряжения... 2. После подачи на зонд напряжения U_{imp} АСМ-кантилевер притягивается к заземленному образцу электростатической силой, которую можно оценить по формуле $F_{el} = \varepsilon_0 w_c l_c h_T^{-2} U_{imp}^2$ (w_c и l_c – ширина и длина консоли, h_T – высота зонда). Взяв, например, параметры кантилевера NSG01: $w_c = 35\mu m$, $l_c = 150\mu m$, $h_T = 15\mu m$, и амплитуду импульса в ходе литографии $U_{imp} = 22V$, – получаем $F_{el} \cong 100nN$. Для

примененных в работе кантилеверов с жесткостью $k_c \cong 5N/m$ такая сила срывает осцилляции и, отклоняя консоль на $100/5 \approx 20nm$ в сторону образца, буквально, приклеивает зонд к поверхности. Если передний фронт импульса резкий (полоса генератора широкая), то время «прыжка на контакт» – это, по порядку величины, период осцилляций, (десятки, единицы микросекунд). Таким образом, после подачи импульса напряжения зонд ударяет по образцу, залипает на нем, и «анодному окислению» предшествует механическое воздействие. Интересен комментарий Богдана Романовича по этому поводу. В частности, например, исследовалась ли также детально, как в случае отрицательного напряжения на зонде, литография ДПМ положительным напряжением?

Заключение. 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».

Анкудинов Александр Витальевич, Доктор физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики», ведущий научный сотрудник лаборатории физико-химических свойств полупроводников, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук», г. Санкт-Петербург.

«16» мая 2023 г.

А.В. Анкудинов

Адрес: 194021, г. Санкт-Петербург, Ул. Политехническая, д. 26
Тел.: (812)297-2245, факс: (812) 297-1017
моб.т. 8-931-362-43-17,
e-mail: alexander.ankudinov@mail.ioffe.ru; alex_ank@mail.ru