

ОТЗЫВ

официального оппонента к.ф.-м.н. Шевырина Андрея Анатольевича на диссертационную работу Никитина Максима Валерьевича «Крутильная деформация квазиодномерного проводника ромбического TaS₃ при движении волны зарядовой плотности», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Работа М. В. Никитина посвящена изучению прямого и обратного влияния движения ВЗП на механические свойства квазиодномерных проводников и имеет отношение к бурно развивающейся области науки – физике микро- и наноэлектромеханических систем (НЭМС). Подобные системы имеют существенный прикладной потенциал для создания датчиков сверхмалых сил, зарядов, масс, спиновых детекторов. Кроме того, они используются в качестве модельных систем для изучения комплексных явлений нелинейной динамики, а также как искусственно созданные объекты, находящиеся в квантовом режиме. В 2010 году журнал Science признал работу группы Клиланда, относящуюся к области МЭМС и НЭМС "Прорывом года", что подчеркивает актуальность этой сферы деятельности. С фундаментальной точки зрения в первую очередь интерес представляют физические механизмы, обеспечивающие связь "электронных" и механических степеней свободы. Эти механизмы являются специфичными и имеют особенности для систем, создаваемых на основе различных материалов (металлы, углеродные нанотрубки, графен, полупроводники и т. д.). К числу материалов, пригодных для создания МЭМС и НЭМС, относительно недавно добавились квазиодномерные проводники с волной зарядовой плотности (ВЗП). В работе М. В. Никитина изучается влияние движения ВЗП на механические свойства подвешенных вискеро́в. В частности, исследуется кручение нитевидных кристаллов квазиодномерного проводника – ромбического TaS₃ с волной зарядовой плотности. Этот материал обладает уникальными электромеханическими свойствами. Помимо того, что он сильно деформируется в электрическом поле, он является ещё и чувствительным тензорезистором. Следовательно, образец TaS₃ может служить одновременно и генератором, и приёмником механических колебаний. Кроме того, изучение механического отклика таких систем является методикой, комплементарной к электронно-транспортным измерениям и позволяет извлечь новую информацию о свойствах ВЗП. Таким образом, избранная тема диссертации представляется **актуальной**.

Диссертация М. В. Никитина состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во введении содержится краткое описание современного состояния исследований квазиодномерных полупроводников с ВЗП. Обоснована актуальность, научная и практическая новизна, обозначены цели и задачи исследования, представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит детальное описание предшествующих работ, дающее ясное представление о контексте, в который вписывается диссертация М. В. Никитина. Особое внимание уделено прямому и обратному влиянию деформации ВЗП и механической деформации кристалла. Подробно описаны некоторые из использовавшихся методик детектирования колебаний нанoeлектромеханических систем, включая оптическую схему, измерение сопротивления вискеров и методику гетеродинирования с частотной модуляцией. Первая глава заканчивается предложением двух подходов к изучению взаимного влияния ВЗП и деформации кристалла: исследование усредненной по времени и зависящей от времени деформации ВЗП.

Вторая глава описывает влияние синхронизации волны зарядовой плотности высокочастотным электрическим полем на кручение квазиодномерных проводников TaS_3 . Приводятся результаты одновременного измерения угла кручения, вызванного приложением постоянного электрического поля, и дифференциального сопротивления образца при облучении высокочастотным полем. Наиболее ярким результатом является обнаружение особенностей на зависимостях угла кручения от постоянного тока (уменьшение угла кручения) при значениях напряжения, соответствующих ступенькам Шапиро. Обсуждаемые особенности оказались едва заметными при прямых измерениях на постоянном токе, однако, с применением модифицированной дифференциальной методики измерения угла кручения М. В. Никитину удалось пронаблюдать на зависимостях угла кручения особенности более выраженные, чем на зависимостях дифференциального сопротивления от постоянного тока, несмотря на низкую степень синхронизации ВЗП (около 10%). Поскольку кручение обусловлено неоднородностью деформации ВЗП, его уменьшение позволяет М. В. Никитину сделать вывод о том, что в условиях синхронизации высокочастотным полем пространственная неоднородность деформации волны зарядовой плотности уменьшается.

Третья глава посвящена исследованию широкополосного и узкополосного шумов, связанных с движением ВЗП. Изучены как шумы напряжения на образце, так и связанные с ними шумовые крутильные колебания в широком диапазоне пропускаемых токов. Обнаружены периодические механические колебания образцов в диапазоне частот от 2 кГц до 70 кГц при

приложении постоянного напряжения выше порогового. Частота колебаний пропорциональна току ВЗП и совпадает с фундаментальной частотой скольжения ВЗП в данном поле.

Четвертая глава посвящена исследованию применимости методики, называемой М. В. Никитиным "гетеродинирование", для детектирования колебаний вискеро́в TaS_3 с помощью электрофизических измерений. В ходе экспериментов между заделанными концами вискеро́в подавалось переменное напряжение с высокой частотой, модулируемой низкочастотным сигналом. Ток, протекающий через образец, являясь произведением приложенного напряжения и кондактанса, содержит компоненту на низкой частоте модуляции, которая должна быть пропорциональна производной по частоте от синфазной составляющей колебательного отклика. Зависимости измеренного тока от частоты демонстрируют яркие резонансные особенности, связанные с возбуждением механических колебаний на собственных частотах вискеро́в. Автор, используя температурные зависимости и намеренно изменяя геометрию образца, убедительно обосновывает механическое происхождение наблюдаемых особенностей. Применение методики смешивания сигналов позволило М. В. Никитину избежать известных сложностей, связанных с измерениями напряжений на высоких частотах: образцы с высоким импедансом совместно с паразитной емкостью подводящих кабелей формируют RC-фильтр, существенно ослабляющий сигнал отклика образцов на колебания. Предложенная методика свободна от этого недостатка, поскольку высокочастотный отклик преобразуется вискером в низкочастотный сигнал. В этом смысле исследуемые вискеро́в совмещают в одном устройстве не только актюатор и детектор, как справедливо замечает автор, но и высокочастотный смеситель.

В заключении приводятся основные результаты, полученные М. В. Никитиным.

Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации представляются **вполне обоснованными и достоверными**. Полученные результаты проанализированы в контексте современных исследований и проинтерпретированы с должной внимательностью и осторожностью. К примеру, одновременное использование оптической методики и электрофизических измерений для детектирования механических колебаний квазиодномерных проводников убедительно демонстрируют механическую природу наблюдаемых особенностей. Несмотря на это, автор ищет дополнительные подтверждения, прибегая к анализу температурных зависимостей и намеренному изменению геометрии образцов. М. В. Никитин обосновывает разумность полученных результатов и с количественной точки

зрения, сравнивая измеренные значения физических величин с численными оценками. Работы М. В. Никитина известны научной общественности и обсуждались на конференциях, семинарах и конкурсах. Часть результатов опубликована в высокорейтинговых и признанных изданиях, таких как Physical Review B, Physica B, Успехи физических наук и Письма в ЖЭТФ.

Новизна научных результатов состоит в том, что

1) впервые продемонстрированы особенности крутильного отклика квазиодномерных проводников, соответствующие ступенькам Шапиро;

2) впервые обнаружен и изучен широкополосный и узкополосный (соответствующий фундаментальной частоте скольжения ВЗП) шум в крутильной деформации квазиодномерных проводников при приложении постоянного напряжения;

3) впервые показано, что методика смещения высокочастотных сигналов позволяет детектировать крутильные колебания квазиодномерных проводников с волной зарядовой плотности.

Научная значимость работы определяется ее методологической ценностью: показано, что измерение деформаций квазиодномерных проводников позволяет извлечь новую информацию о физических свойствах волны зарядовой плотности. С фундаментальной точки зрения значима также полученная информация о физическом механизме электромеханической связи в изучаемых системах.

Практическая значимость работы обусловлена применимостью полученных результатов для создания новых микро- и нанoeлектромеханических устройств. М. В. Никитин демонстрирует, что высокочастотные колебания квазиодномерных проводников можно возбуждать и детектировать, пользуясь исключительно электрофизическими методами и не прибегая к сторонним устройствам, таким как оптические схемы и источники сильных магнитных полей.

Диссертация не лишена **недостатков**:

1. На рис. 2.6 (б) приводятся две кривые: одна из них получена путем непосредственного измерения угла кручения с помощью оптической методики, а вторая – в результате интегрирования данных, полученных с помощью модифицированной дифференциальной оптической методики. Данные, соответствующие двум кривым, различаются более, чем в два раза, однако, этот факт не отмечен и не объяснен в тексте диссертации.

2. Из текста диссертации непонятна связь между данными, отраженными на рисунках 3.9 и 3.10. Так, на с. 79 М. В. Никитин утверждает следующее:

"Очевидно, что главный пик на каждой из кривых $V_n(I)$ (отмечен стрелкой) соответствует току, при котором фундаментальная частота скольжения ВЗП совпадает с настройкой фильтра. Это подтверждает зависимость нелинейного тока, соответствующего пику V_n , от частоты настройки фильтра (синие звездочки на рисунке 3.10)."

В то же время величины токов, соответствующие стрелкам на рис. 3.9, превышают масштаб вертикальной оси на рис. 3.10. Остается неясным, как были получены данные для рис. 3.10, а утверждение о соответствии токов не представляется очевидным.

Кроме того, подпись к рис. 3.9 содержит ошибку. Автор пишет "Зависимости тока от шумового напряжения (а) и кручения (b)", хотя, по-видимому, имелось в виду "Зависимости шумового напряжения (а) и угла кручения (b) от тока".

3. Значения сопротивления образца R_s и эталонного сопротивления R_e следовало указать не только в подписях к рисункам 4.2 и 4.3, но и в тексте диссертации при описании методики на с. 83.

4. На мой взгляд, использование термина "гетеродинирование" не обосновано в тексте диссертации. Гетеродинное смешивание подразумевает перемножение двух сигналов с *различными* частотами с целью получить сигнал на промежуточной частоте. В то же время, при прочтении раздела 1.6 и четвертой главы диссертации создается впечатление, что используемая автором методика подразумевает перемножение кондактанса (либо сопротивления) образца с напряжением (либо током), изменяющихся на *одной и той же* частоте возбуждения ω . В этом случае корректным было бы использовать термин "гомодинирование".

Кроме того, на мой взгляд, диссертацию улучшило бы экспериментальное обоснование преимуществ методики с частотной модуляцией по сравнению с измерениями постоянной компоненты сигнала, получавшейся бы без использования модуляции.

Перечисленные недостатки никоим образом не меняют общего положительного впечатления от работы М. В. Никитина и относятся скорее не к содержанию работы, а к изложению и оформлению материала.

Таким образом, работа М. В. Никитина «Крутильная деформация квазиодномерного проводника ромбического TaS_3 при движении волны зарядовой плотности» является законченной научно-квалификационной

работой, содержащей решение задачи о влиянии движения ВЗП на механические свойства квазиодномерных проводников, имеющей значение для физики микро- и наноэлектромеханических систем. Автореферат корректно отражает содержание диссертации.

Считаю, что работа «Крутильная деформация квазиодномерного проводника ромбического TaS_3 при движении волны зарядовой плотности» полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК к работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук и соответствует критериям "Положения о порядке присуждения ученых степеней", а ее автор Никитин Максим Валерьевич, несомненно, заслуживает присуждения искомой степени по специальности 01.04.07 «физика конденсированного состояния».

11.05.2017 г.

к.ф.-м.н., м.н.с. ФГБУН Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова
Сибирского отделения РАН

Подпись А. А. Шевырина удостоверяю



Шевырин А. А.

Ученый секретарь
ИФП СО РАН
С.А. Аржанникова

ФИО: Шевырин Андрей Анатольевич

Учёная степень: кандидат физико-математических наук

Специальность: 01.04.10 «Физика полупроводников»

Почтовый адрес: 630090, ул. Ак. Лаврентьева, д. 13, г. Новосибирск

Телефон: +7(383)333-10-87

Адрес электронной почты: shevandrey@isp.nsc.ru

Название организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН

Должность: младший научный сотрудник