

## ОТЗЫВ

научного консультанта на диссертационную работу  
ПОЗДНЯКОВА Дмитрия Викторовича «Моделирование электрофизических свойств и электрических характеристик приборных структур на основе полупроводниковых квантовых проволок и металлических одностенных углеродных нанотрубок», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

### *1. Научная оценка диссертации*

В 80-е годы прошлого века наряду с усовершенствованием технологических процессов производства кремниевых планарных полевых транзисторных ключей, являющихся базовыми элементами цифровых интегральных схем (ЦИС), началось активное исследование перспективных приборных структур с двумерным и одномерным электронным газом. Уже тогда в рамках продолжающейся миниатюризации приборных структур микроэлектроники в рамках закона Мура ведущие разработчики ЦИС были убеждены, что рано или поздно на смену объемным планарным транзисторам придут квантово-размерные структуры с двумерным электронным газом. В этой связи стало очевидным, что естественным этапом дальнейшей миниатюризации транзисторов будет переход на квантово-размерные структуры с одномерным электронным газом. И действительно, на рубеже первого десятилетия XXI века ведущие мировые производители ЦИС, такие, как TSMC, Samsung, Intel и IBM, осуществили переход на производство ЦИС на основе FinFET с двумерными проводящими каналами (полевых транзисторов с «плавниками»). Следует отметить, что почти все современные ЦИС в виде центральных процессоров для персональных компьютеров, рабочих станций, серверов, процессоров для видеокарт, планшетов, смартфонов и других устройств изготавливаются на основе именно таких транзисторов. В то же время, указанные производители ЦИС активно переходят на новую технологию их производства на основе полевых транзисторов с одномерными проводящими каналами внутри трубчатых затворов. В течение ближайших лет ожидается, что наиболее высокопроизводительные процессоры, особенно применяемые в графических ускорителях в качестве инфраструктуры для искусственного интеллекта, будут изготавливаться на основе транзисторов типа GAAFET – полевых транзисторов с трубчатыми затворами, в каналах которых формируется одномерный электронный газ. Приблизительно через 5 лет, как прогнозируют ведущие разработчики и изготовители современных ЦИС, это уже будут более эффективные GAAFET благодаря их вертикальной компоновке в интегральных схемах. Дальнейшее улучшение характеристик ЦИС на основе транзисторов типа GAAFET с вертикальной компоновкой, как считают ведущие разработчики ЦИС, невозможно без перехода от кремния к другим полупроводниковым материалам, в том числе  $A^{III}B^V$  и  $A^{II}B^{VI}$ .

В этой связи очевидно, что разработка и проектирование такого рода приборов становятся невозможными без использования соответствующих компьютерных систем автоматизированного проектирования (САПР), основной и важнейшей составной частью которых является физико-математические модели элементов ЦИС. Сложность построения моделей транзисторных структур с одномерным электронным газом в проводящем канале состоит в том, что, поскольку длина свободного пробега носителей заряда сравнима с длиной волны де-Бройля, то при построении строгих моделей переноса, предназначенных для расчёта электрофизических параметров и электрических характеристик структур в общем случае приходится самосогласованно решать уравнения Шрёдингера, Пуассона и Больцмана в двумерной потенциальной яме, что является нетривиальной и чрезвычайно сложной задачей. К этому следует добавить, что построение адекватной модели переноса в канале прибора требует учёта фундаментальной квантовой физики процессов рассеяния «одномерных» носителей, включая процессы рассеяния на границах раздела, поскольку последние занимают значительное место в моделируемой области прибора.

Научное направление, занимающееся решением такого рода задач и получившее

название вычислительной микро- и нанoeлектроники, уже более 25 лет развивается на кафедре физической электроники и нанотехнологий и в лаборатории материалов и приборных структур микро- и нанoeлектроники БГУ. Это научное направление является чрезвычайно важным для обеспечения технологической независимости Республики Беларусь и Союзного государства Беларуси и России в области микро- и нанoeлектроники. По этой причине тема диссертационной работы, несомненно, является актуальной.

В диссертации выполнен комплекс работ, являющихся концептуальным развитием теории процессов переноса носителей заряда в приборных структурах с одномерным электронным газом, и построены соответствующие физико-математические модели, позволяющие рассчитывать электрофизические параметры и электрические характеристики таких структур. При этом развитые Поздняковым Д.В. подходы к моделированию могут быть использованы для широкого класса одномерных систем. Важно также отметить, что для таких структур, как арсенид-галлиевые квантовые проволоки и металлические одностенные углеродные нанотрубки, а также баллистические полевые транзисторы на их основе, численные расчёты в диссертационной работе доведены до конкретных значений параметров и вида характеристик, а с целью подтверждения адекватности разработанных моделей везде там, где это возможно, проведено сравнение с известными экспериментальными данными и результатами расчётов других авторов. Несомненно, что полученные Поздняковым Д.В. результаты имеют мировой уровень, что подтверждается его публикациями и ссылками на них в ряде престижных зарубежных изданий.

Диссертационная работа Позднякова Д.В. на соискание ученой степени доктора физико-математических наук является естественным продолжением и дальнейшим развитием темы его кандидатской диссертации «Влияние рассеяния электронов на электрофизические свойства полупроводниковых структур с низкоразмерным электронным газом», выполненной под научным руководством доктора физ.-мат. наук, профессора В.М. Борздова.

Основными методами, с помощью которых были получены важнейшие результаты докторской диссертации, являются методы квантовой физики твердого тела, методы Монте-Карло и прямого численного решения кинетического уравнения Больцмана, а также метод передаточных матриц. К числу таких результатов можно отнести:

Концептуально развита теория рассеяния носителей заряда для всех доминирующих механизмов в полупроводниковых квантовых проволоках и металлических одностенных углеродных нанотрубках, учитывающая квантово-размерные и вторичные квантовые эффекты. При этом в рамках квантовой теории возмущений строго учтены все доминирующие механизмы без использования каких-либо дополнительных, широко применяемых для уменьшения вычислительной сложности расчетов соответствующих матричных элементов приближений. Благодаря этому в случае предельного перехода для всех рассмотренных механизмов рассеяния достигается полное согласование интенсивностей рассеяния носителей для полупроводниковых квантовых проволок бесконечно большого поперечного сечения и объемных полупроводников.

Получены выражения для расчета интенсивностей фононного рассеяния электронов в металлических одностенных углеродных нанотрубках типа «armchair» для полных электронной и фононной зонных структур в рамках приближения «вмороженных» в кристаллическую решетку фононов и линейного возмущения гамильтониана сильной связи атомов углерода по смещениям атомов из положений равновесия. Можно утверждать, что такой подход является более строгим микроскопическим описанием взаимодействия электронов с фононами в нанотрубках по сравнению с широко используемой континуальной моделью электрон-фононного взаимодействия, базирующейся на приближении фононных деформационных потенциалов.

Построены физико-математические модели переноса электронов в полупроводниковых квантовых проволоках и металлических одностенных углеродных нанотрубках, которые учитывают квантово-размерные и вторичные квантовые эффекты. Разработаны алгоритмы и программы для расчета электрофизических параметров и электрических характеристик данных структур. Предложен подход к учету вторичных квантовых эффектов в рамках формализмов кинетического уравнения Больцмана и метода Монте-Карло, который позволяет



устранять характерные для идеализированных одномерных квантовых систем сингулярные точки плотности электронных состояний и приводит к тому, что равновесная функция распределения фермионов в квантовых системах с затухающими квантовыми состояниями всегда «релаксирует» к функции Ферми–Дирака, что ранее достигалось лишь в рамках описания таких систем с помощью уравнения Лиувилля – фон Неймана.

Разработаны численные модели переноса носителей заряда в баллистических квантово-барьерных полевых транзисторах с барьером Шоттки на основе полупроводниковых квантовых проволок и металлических одностенных углеродных нанотрубок, учитывающие квантово-размерные и вторичные квантовые эффекты. Разработаны алгоритмы и программы для расчета электрических характеристик таких транзисторов. Проведена оптимизация их конструктивно-топологических параметров.

С учётом анализа полученных результатов численного моделирования в работе предложены такие перспективные приборы наноэлектроники, как миниатюрный резистивный датчик температуры на основе металлической одностенной углеродной нанотрубки типа «armchair», функционирующий на новом принципе четырехэлектродный удвоитель частоты нового типа и GAAFET с полностью снимаемым затворным напряжением барьером Шоттки в его проводящем канале.

Все представленные в диссертации результаты были получены в рамках 13 НИР, выполнявшихся в разные годы в БГУ. Их апробация подтверждается участием автора в 26 научных конференциях. Следует отметить также и высокий уровень опубликованности результатов. Это 53 научные работы, в числе которых: 1 монография, адаптированная для зарубежных специалистов версия которой была издана в LAP LAMBERT Academic Publishing на 6 языках; 21 статья в научных изданиях, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, и в иностранных научных изданиях, в числе которых такие авторитетные журналы, как «Nanoscale Research Letters» (4.4), «Physica E» (3.2), «Journal of Computational Electronics» (2.9), «Physica Status Solidi B» (1.7), «Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics» (1.3), «Physics of the Solid State» (1.8), «Russian Microelectronics» (0.5), «Nanobiotechnology Reports» (0.5) (в скобках указаны значения импакт-фактора журналов за 2024 год согласно Scopus/Web-of-Science); 3 статьи в других научных изданиях; 20 статей в сборниках материалов научных конференций и симпозиумов; 8 тезисов докладов.

Помимо научной значимости полученные в диссертации результаты обладают также и практической значимостью, поскольку разработанные в ней компьютерные программы могут быть непосредственно использованы при разработке и проектировании новых перспективных наноприборов и элементов ЦИС, что позволит значительно уменьшить материальные затраты, связанные с прогнозированием электрических параметров и характеристик разрабатываемых приборных структур, а также повысить точность и эффективность такого прогнозирования.

Все результаты диссертационной работы Позднякова Д.В., сформулированные в защищаемых положениях и выводах, определяющие их новизну, научную и практическую значимость, получены соискателем лично. Содержание диссертационной работы полностью соответствует специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах (физико-математические науки).

## *2. Характеристика научной и научно-педагогической деятельности соискателя*

Поздняков Д.В. начал заниматься научной работой, связанной с темой его диссертации, будучи еще студентом третьего курса. В 2001 году он с отличием (средний бал 5.0) окончил ВУЗ по специальности «физическая электроника» и в том же году поступил в аспирантуру БГУ по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах. В 2004 году успешно окончил ее, защитив кандидатскую диссертацию по специальности 01.04.04 – физическая электроника. За 2004–2006 годы в НИЛ материалов и приборных структур микро- и наноэлектроники кафедры физической электроники и нанотехнологий БГУ Д.В. Поздняков прошел путь от младшего до ведущего научного сотрудника. В 2007–2014 годах и с 2023 года по настоящее время он – ведущий научный сотрудник указанной НИЛ. Общий стаж его научной работы в БГУ без

учета аспирантуры составляет более 12 лет. С 01.11.2024 Поздняков Д.В. – докторант БГУ в форме соискательства, по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

В 2007 году Поздняков Д.В. стал лауреатом Стипендии Президента Республики Беларусь талантливым молодым ученым за новые научные результаты, полученные в области электрофизики наноструктур и имеющие практическое подтверждение, признанные в Республике Беларусь и за рубежом. В 2010 году соискатель был награжден грамотой БГУ за плодотворную научную деятельность.

О том, что Поздняков Д.В. является сложившимся учёным, способным самостоятельно решать сложные научно-технические задачи свидетельствует тот факт, что, работая в течение некоторого времени в других организациях Республики Беларусь, в том числе научных, для решения сложных комплексных задач он продолжал использовать методы статистического моделирования, включая метод Монте-Карло. При этом за период с 2014 по 2019 гг. он прошёл карьерный путь от начальника отдела медицинской техники в НПО УП «АДАНИ» до заместителя генерального директора по науке и инновациям в ЗАО «АДАНИ Технолоджис». В это время он, в частности, осуществлял руководство межведомственным проектом по созданию источника рентгеновского излучения на основе малогабаритного бетатрона с энергией ускоренных электронов до 7.5 МэВ. Разработал программное обеспечение для оптимизации конструкции его ключевых элементов: полюсных наконечников электромагнита, обмоток смещения и контрактора, вольфрамовой мишени, ускорительной вакуумной камеры и инжектора Кернста.

По результатам совокупной научной деятельности Д.В. Поздняковым опубликованы: 1 монография, адаптированная для зарубежных специалистов версия которой была издана в LAP LAMBERT Academic Publishing на 6 языках; 30 статей в рецензируемых научных журналах; 56 статей в материалах научных конференций и сборниках научных трудов; тезисы докладов на 17 научных конференциях; 3 патента на изобретения (1 WO, 1 US и 1 RU). 2 научные статьи приняты к печати в журналах «Plasma Physics Reports» и «Russian Microelectronics».

В 2025 году ВАК Республики Беларусь в соответствии с пунктом 60.2 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий за плодотворную научную деятельность присвоила Позднякову Д.В. звание доцента по специальности «Физика».

За время работы на кафедре физической электроники и нанотехнологий БГУ Поздняков Дмитрий Викторович зарекомендовал себя высококвалифицированным специалистом. Для него характерны такие качества, как большое трудолюбие и высокая целеустремленность при достижении поставленных целей. В течение последних трех лет он активно участвовал в НИР кафедры в рамках выполнения следующих ГПНИ: «Материаловедение, новые материалы и технологии», «Фотоника и электроника для инноваций» и «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства». Ряд полученных Поздняковым Д.В. результатов диссертационного исследования используются в образовательном процессе кафедры физической электроники и нанотехнологий БГУ, что подтверждается 4 актами о практическом использовании результатов исследования в образовательном процессе и 2 свидетельствами о добровольной регистрации и депонировании объектов авторского права в виде компьютерных программ.

Поздняков Дмитрий Викторович – самостоятельный, полностью сложившийся ученый, способный формулировать и решать сложные комплексные вычислительные задачи компьютерными методами. При этом его научная деятельность не ограничивается только исследованиями, составляющими основу его докторской диссертации, что дополнительно указывает на его высокую квалификацию.

### *3. Заключение*

Учитывая вышеизложенное, считаю, что диссертационная работа Позднякова Дмитрия Викторовича является завершенным самостоятельным квалификационным исследованием, соответствующим требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук (п. 20 и 21 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении



ученых званий), содержит принципиально новые научно-обоснованные теоретические результаты, совокупность которых является крупным достижением в области физико-математического моделирования электрофизических свойств и электрических характеристик приборных структур с одномерным электронным газом. Она может быть рекомендована к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Уровень квалификации Позднякова Дмитрия Викторовича полностью соответствует ученой степени доктора физико-математических наук, и ему может быть присуждена ученая степень по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах за совокупность следующих важных результатов, включающих:

1. Концептуальное развитие теории рассеяния носителей заряда в приборных структурах с одномерным электронным газом, учитывающей квантово-размерные и вторичные квантовые эффекты в приближении стабильных одночастичных квантовых состояний, что позволило повысить адекватность физико-математического описания процессов переноса носителей заряда в таких структурах в рамках формализмов кинетического уравнения Больцмана и метода Монте-Карло.

2. Разработанные физико-математические модели, алгоритмы и созданные на их основе программные средства моделирования процессов переноса электронов в арсенид-галлиевых квантовых проволоках и металлических одностенных углеродных нанотрубках типа «armchair», которые дали возможность учесть квантово-размерные и вторичные квантовые эффекты в такого рода структурах и повысить точность расчёта электрофизических параметров и электрических характеристик этих структур.

3. Предложенный принцип управления дрейфовой скоростью носителей заряда в квантовых проволоках с шероховатостями границ раздела, основанный на эффекте изменения интенсивности рассеяния носителей заряда на таких границах при изменении напряжённости внешнего поперечного электрического поля, который позволил предложить конструкцию четырехэлектродного электронного удвоителя частоты нового типа.

4. Предложенный принцип реализации режима плоских подзон и баллистического переноса носителей заряда в квантово-барьерных полевых транзисторах с трубчатыми затворами и одномерными проводящими каналами на основе арсенида галлия и других полупроводниковых соединений, позволяющий оптимизировать значения конструктивно-топологических параметров транзисторов, при которых проводимость их каналов и обратная подпороговая крутизна вольт-амперных характеристик максимально близки к своим теоретическим значениям для заданной рабочей температуры приборов.

Научный консультант,  
зав. кафедрой физической электроники  
и нанотехнологий, д-р физ.-мат. наук,  
профессор

В.М. Борздов

