

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию 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 нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

**1. Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представлена к защите, со ссылкой на область исследования паспорта соответствующей специальности, утвержденного ВАК.**

Диссертация Д.В. Позднякова соответствует специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах, отрасли «физико-математические науки» и двум областям исследований в соответствии с пунктом 1 «Создание (включая разработку конструкций и технологических маршрутов изготовления) и функционирование изделий твердотельной электроники, радиоэлектронных компонентов и систем микро- и нанoeлектроники, приборов на квантовых эффектах, нано- и микросенсоров» и пунктом 4 «Физические и математические модели изделий, устройств и технологических процессов по п. 1, в том числе для систем автоматизированного проектирования» раздела III Паспорта специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

**2. Актуальность темы диссертации.**

Актуальность темы диссертации не вызывает сомнения. Действительно, современное развитие микро- и нанoeлектроники подразумевает дальнейший переход от традиционных кремниевых транзисторов к квантово-размерным приборным структурам. К таким структурам, в частности, относятся полупроводниковые квантовые проволоки и углеродные нанотрубки. В них перенос и рассеяние носителей заряда определяются квантовыми эффектами и требуют строгого учёта волновой природы электронов. Данные наноструктуры обладают исключительными свойствами в широком частотном диапазоне, что открывает перспективы их применения не только в качестве интегральных приборов нового поколения, но и в качестве миниатюрных сенсоров, антенн и антенных решёток. Возникает задача адекватного моделирования процессов переноса электронов в полупроводниковых квантовых проволоках, углеродных нанотрубках и приборов на их основе – существующие системы автоматизированного проектирования не обеспечивают необходимый уровень предсказательности, что создаёт существенный разрыв между теоретическими задачами и практическими потребностями современной электроники. В диссертации Д.В. Позднякова разработаны и обоснованы физико-математические модели и развиты численные методы анализа электрофизических свойств и электрических характеристик указанных типов наноструктур, что обеспечивает восполнение этого разрыва. Полученные результаты имеют фундаментальное значение для дальнейшего развития вычислительной электроники. Они создают основу для формирования новых поколений квантово-размерных приборов.

Тема диссертационной работы соответствует перечню приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь на 2026–2030 годы, утвержденному Указом Президента Республики Беларусь № 135 от 01.04.2025, в частности, пунктам 1. «Цифровые технологии и искусственный интеллект (подпункты: «программное обеспечение и программно-технические средства»; «математические теории и методы, высокопроизводительные вычислительные системы, цифровые модели и двойники»)» и 2. «Инновационные технологии в промышленности (подпункт «фотоника, микроэлектроника, сенсорика и СВЧ-технологии»)».

### **3. Степень новизны результатов диссертации и научных положений, выносимых на защиту.**

Всем основным выводам и результатам диссертационной работы свойственна научная новизна. Их оригинальность подтверждается публикациями научных статей в престижных международных журналах. Все выносимые на защиту положения – новые и научно обоснованные. К основным результатам, обладающим несомненной научной новизной, следует отнести следующие достижения автора диссертационной работы:

1. Автором впервые предложен и обоснован ряд приближений, существенно уточняющих используемые ранее другими исследователями, и позволяющий в рамках квантовой теории возмущений учесть доминирующие механизмы рассеяния носителей заряда в полупроводниковых квантовых проволоках. Таким образом, в диссертационной работе существенно развиты существующие подходы и осуществлено принципиально новое, более строгое описание процессов рассеяния. Это, в том числе, позволило достичь согласования зависимостей интенсивностей рассеяния частиц от их энергии в полупроводниковых квантовых проволоках с соответствующими зависимостями для объемных полупроводников в предельных случаях.

2. Развита методика к описанию электрон-фононного взаимодействия в рамках микроскопического описания взаимодействия электронов с фононами, основанная на приближении линейного возмущения гамильтониана сильной связи атомов углерода по их отклонениям из положения равновесия, отличающийся от широко используемого континуального описания электрон-фононного взаимодействия. В рамках такого подхода впервые получены выражения для расчета интенсивностей фононного рассеяния электронов в одностенных углеродных нанотрубках типа «armchair» с учётом полной электронной и фононной зонных структур. Этот результат открывает возможность значительно более точного прогнозирования электрофизических и электродинамических свойств одностенных углеродных нанотрубок типа «armchair».

3. В диссертационной работе впервые предложены физико-математические модели для описания процессов переноса электронов в полупроводниковых квантовых проволоках и металлических одностенных углеродных нанотрубках, учитывающие как квантово-размерные, так и вторичные квантовые эффекты, что обеспечивает более точную оценку электрофизических параметров и электрических характеристик такого рода структур. Автору диссертации удалось показать, что корректный учет спектрального уширения уровней энергии электронов в структурах с одномерным электронным газом устраняет характерные для идеализированных одномерных квантовых систем сингулярности плотности электронных состояний и обеспечивает сходимость любой неравновесной функции распределения частиц по их импульсу к распределению Ферми–Дирака после снятия с квантовой системы возмущения, выводящего ее из термодинамического равновесия. Такой результат можно рассматривать как принципиально новый шаг в развитии теории переноса электронов в структурах с одномерным электронным газом.

4. Предложен оригинальный принцип управления дрейфовой скоростью носителей заряда в полупроводниковых квантовых проволоках с пространственно-неоднородными гетерограницами посредством полевого воздействия на интенсивность рассеяния частиц на таких границах. Тем самым в диссертационной работе впервые показана возможность целенаправленного регулирования электрофизических свойств одномерных квантовых систем за счёт управляемого воздействия на механизмы рассеяния носителей заряда, что открывает перспективы для разработки новых функциональных элементов нанoeлектроники.

5. Разработаны оригинальные численные модели переноса электронов в баллистических транзисторах с барьерами Шоттки в их каналах. На основе этих моделей созданы алгоритмы и компьютерные программы для анализа электрических характеристик такого рода транзисторов. Эти разработки позволяют оптимизировать их конструктивные и физико-топологические параметры. В диссертации продемонстрирован комплексный учёт

квантовых эффектов, что существенно повышает достоверность прогнозов электрических характеристик транзисторов и открывает возможности для практического проектирования их новых типов.

6. На основе проведенных исследований предложены новые приборы нанoeлектроники, включая резистивный датчик температуры на основе одностенной углеродной нанотрубки типа «armchair», оригинальный удвоитель частоты на основе полупроводниковой квантовой проволоки с пространственно-неоднородной поверхностью и модифицированный полевой транзистор с управляемым барьером Шоттки вдоль одномерного канала внутри трубчатого затвора. Эти результаты выходят за рамки чисто теоретического анализа и демонстрируют прикладной потенциал разработанных моделей, подтверждая их значимость для дальнейшего развития микро- и нанoeлектроники.

#### **4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Достоверность и обоснованность основных научных положений, полученных результатов и рекомендаций сомнений не вызывает. Использованный в диссертации математический аппарат позаимствован из таких областей теоретической физики, как квантовая механика, электростатика, термодинамика и статистическая физика, физика конденсированного состояния, а также из физики полупроводников и полупроводниковых приборов. Для моделирования переноса носителей заряда применяются такие давно зарекомендовавшие себя и широко используемые методы, как метод численного решения кинетического уравнения Больцмана, метод Монте-Карло и метод передаточных матриц. Корректность применения квантово-механических методов расчетов, разработанных и использованных моделей, а также обоснованность сделанных в работе выводов и рекомендаций подтверждается согласием полученных результатов расчетов с имеющимися экспериментальными данными и теоретическими результатами других авторов опубликованных ими научных работ, в том числе, рассчитанными из первых принципов.

Достоверность полученных автором диссертации результатов подтверждается, в том числе, их широкой апробацией на многочисленных международных конференциях и представлением в рецензируемых научных журналах. Изложенные в диссертации результаты в полной мере отражены и обсуждены в опубликованных научных работах по её теме.

#### **5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию.**

Диссертационная работа Позднякова Дмитрия Викторовича является законченным масштабным самостоятельным исследованием, имеющим как ярко выраженную научную, так и практическую значимость.

**Научная значимость.** Диссертация представляет собой системное развитие теории переноса и рассеяния носителей заряда в приборных структурах с одномерным электронным газом, объединяющее квантово-размерные и вторичные квантовые эффекты в рамках единых вычислительно реализуемых схем. Автор диссертации выстраивает физико-математические модели переноса носителей заряда в полупроводниковых квантовых проволоках и металлических одностенных углеродных нанотрубках, опираясь на корректную трактовку волновой природы частиц при рассмотрении доминирующих в таких структурах механизмов их рассеяния. Важным научным вкладом соискателя ученой степени является рассмотрение как электронного, так и фононного транспорта в углеродных нанотрубках, что позволяет выйти за рамки возможностей общепринятых моделей, базирующихся на кинетическом уравнении Больцмана лишь для носителей заряда и не позволяющих адекватно оценивать электрофизические параметры и электрические характеристики нанотрубок во внешних электрических полях с высокой напряженностью. Ряд полученных результатов проясняет микроскопическую сущность баллистического и квазibalлистического переноса электронов в одномерных проводящих каналах полевых транзисторов, уточняет роль барьеров Шоттки в

управлении токопрохождением и демонстрирует, как геометрия канала и колебания решётки полупроводника определяют предельные характеристики таких устройств. Диссертационная работа, в том числе, расширяет представления о согласовании объемных контактов с одномерными проводящими каналами. Совокупность полученных результатов – это большой шаг от разрозненных моделей к целостной платформе, пригодной для проведения новых исследований: от полевого управления частотой рассеяния носителей заряда до термоэлектрических и других эффектов в одномерных квантовых системах.

**Практическая значимость.** Разработанные модели и алгоритмы могут быть непосредственно использованы в качестве модулей САПР новых базовых элементов СБИС, УБИС и других приборных наноструктур. Благодаря учету квантово-размерных и вторичных квантовых эффектов повышается достоверность расчета электрофизических параметров и электрических характеристик таких структур, что критично для короткоканальных приборов. Потенциальный практический выход результатов двоякий. Во-первых, применительно к САПР полевых транзисторов с одномерными каналами внутри трубчатых затворов: разработанные физико-математические модели и алгоритмы интегрируются в качестве вычислительных модулей для оптимизации геометрии проводящего канала, профиля потенциального барьера и контактной области; они обеспечивают предсказание режимов баллистики, квазibalлистики и диффузии, а также тепловых ограничений и деградации характеристик. Во-вторых, для приборных решений: обозначены направления дальнейших НИОКР по резистивным датчикам температуры на основе одностенных углеродных нанотрубок «armchair»-типа, удвоителям частоты на основе квантовых проволок/слоев переменного поперечного сечения, а также по баллистическим полевым транзисторам с полностью снимаемыми барьерами Шоттки в их одномерных проводящих каналах. В инженерной практике полученные автором диссертации результаты позволят сократить число итераций натурального прототипирования соответствующих приборных структур и перенести акцент на их цифровое прототипирование.

**Экономическая значимость.** Экономический эффект может быть достигнут за счёт уменьшения затрат на натурное прототипирование и ускорения цикла разработки приборов нанoeлектроники. Построенные физико-математические модели и созданные на их основе алгоритмы позволяют: 1) сократить число экспериментов за счет прогнозирования электрических характеристик приборов на этапе их цифрового макета; 2) оптимизировать топологию приборов и применяемые материалы, снизить риски неудачных дорогостоящих технологических проб; 3) повысить выход годных приборов благодаря раннему выявлению предельных условий их нормального функционирования. С точки зрения коммерциализации результаты диссертации конвертируемы в лицензируемые программные компоненты корпоративных САПР. Возможна продажа лицензий на использование алгоритмов и библиотек параметров, а также заключение договоров НИОКР по адаптации моделей под технологические процессы конкретных предприятий микро- и нанoeлектроники. Экономическая выгода выражается в снижении совокупной стоимости разработки и сокращении времени вывода на рынок приборов на основе полупроводниковых квантовых проволок и металлических одностенных углеродных нанотрубок.

**Социальная значимость.** Ряд полученных в диссертации результатов внедрен в образовательный процесс на факультете радиофизики и компьютерных технологий БГУ: теоретические наработки — в лекционные курсы, программные средства — в лабораторный практикум. Это формирует у студентов компетенции в области моделирования перспективных приборных структур микро- и нанoeлектроники, что, в свою очередь, укрепляет кадровую базу электронной промышленности Республики Беларусь и способствует технологическому суверенитету страны.

## **6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати.**

По представленным в диссертации результатам ее автором опубликованы 53 научные работы, из которых 1 монография, 21 статья в научных изданиях, включенных в перечень

изданий, и в иностранных научных изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий (8 статей в международных изданиях с импакт-фактором больше единицы, 3 из которых опубликованы без соавторов), 3 статьи в других научных изданиях, 20 статей в сборниках материалов научных конференций и 8 тезисов докладов на научных конференциях. К наиболее значимым публикациям соискателя ученой степени следует отнести статьи в журналах «Journal of Computational Electronics», «Nanoscale Research Letters», «Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics», «Physica Status Solidi B», «Russian Microelectronics» («Микроэлектроника»). Опубликованные работы в полной мере отражают выносимые на защиту положения, сделанные выводы и изложенный в автореферате материал.

Таким образом, опубликованность результатов диссертации Позднякова Дмитрия Викторовича является достаточной и удовлетворяет требованиям ВАК Республики Беларусь.

### **7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК.**

Диссертационная работа оформлена в соответствии с требованиями ВАК. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию и точно отражает методику исследования, сделанные выводы и основные положения, выносимые на защиту.

### **8. Замечания по диссертации.**

При общей положительной оценке диссертационной работы по ней имеются следующие замечания. Первые из них носят достаточно общий характер и могут быть отнесены к нескольким разделам работы.

- 1 При представлении конкретных примеров, позволяющих судить о вычислительных возможностях развитой автором диссертации теории переноса и рассеяния носителей заряда в полупроводниковых квантовых проволоках, предпочтение отдается такому широко используемому полупроводнику, как арсенид галлия, и не всегда уделяется достаточное внимание кремнию, который в настоящее время остается базовым материалом микроэлектроники.
- 2 Рассматривая численно-теоретические модели физических процессов в приборных структурах на основе полупроводниковых квантовых проволок и металлических одностенных углеродных нанотрубок, автор не всегда уделяет должное внимание обоснованию выбора параметров расчетов и сравнению своих результатов с экспериментальными данными, доступными в литературе (я нашел только один рисунок с таким сопоставлением, Рис. 4.2). По тексту такие указания встречаются, но, на мой взгляд, в работе недостает обобщенного сопоставления эксперимента и разработанных теоретических моделей наряду с обоснованием выбора входных параметров для расчетов.
- 3 Автору диссертационной работы следовало хотя бы в виде текста охарактеризовать в одном месте всю цепочку (иерархию) использованных приближений при переходе от строгого описания многочастичной квантовой системы с помощью уравнения Лиувилля – фон Неймана к ее приближенному описанию в виде ансамбля отдельных частиц с помощью кинетического уравнения Больцмана при учете вторичных квантовых эффектов. Текущее представление фрагментировано по тексту, что затрудняет понимание общей структуры и взаимосвязи между отдельными уровнями приближений.
- 4 Автору также следовало обсудить применимость квазиклассического уравнения Больцмана для анализа процессов в области межподзонных переходов.

Далее следует отметить следующие замечания частного характера:

- 5 Автор оставляет за пределами анализа неоднородность движения носителей заряда в металлических углеродных нанотрубках. Было бы полезно оценить эту роль хотя бы на качественном уровне.

- 6 Так как многостенные углеродные нанотрубки занимают важное место в области практических приложений углеродных нанотрубок, в диссертации следовало бы отметить, возможно ли использовать представленные в ней разработки для расчета электрофизических параметров и электрических характеристик многостенных углеродных нанотрубок (которые всегда обладают металлическим типом проводимости). И если возможно, то каким образом, при каких допущениях и ограничениях.
- 7 В диссертации основное внимание уделяется углеродным нанотрубкам типа «armchair», тогда как процессы переноса и рассеяния носителей заряда в нанотрубках типа «zigzag» никак не обсуждаются. Исключение составляет раздел 5.2, посвященный нанотрубкам типа «zigzag».

Считаю необходимым подчеркнуть, что приведенные выше замечания не затрагивают основных положений и выводов, содержащихся в диссертации, и не снижают научной и практической значимости полученных Поздняковым Дмитрием Викторовичем результатов. Указанные недостатки не ставят под сомнение ценность работы в целом.

#### **9. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует.**

Проведенный анализ содержания диссертационной работы в целом, использованных методов исследования и интерпретации полученных результатов, их уровня и уровня их опубликованности позволяет сделать вывод о высокой квалификации Позднякова Дмитрия Викторовича, соответствующей ученой степени доктора физико-математических наук.

#### **10. Заключение.**

Диссертация Дмитрия Викторовича Позднякова «Моделирование электрофизических свойств и электрических характеристик приборных структур на основе полупроводниковых квантовых проволок и металлических одностенных углеродных нанотрубок» представляет собой масштабное комплексное исследование, выполненное самостоятельно и на высоком научном уровне. В работе сформулирован и решен на основе единого теоретического подхода комплекс задач, посвященных систематическому исследованию переноса и рассеяния носителей заряда в полупроводниковых квантовых проволоках, металлических одностенных углеродных нанотрубках и транзисторных структурах на их основе. Диссертация соответствует требованиям ВАК Республики Беларусь, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. В соответствии с требованиями главы 3 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий Поздняков Дмитрий Викторович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах за полученные им принципиально новые научные результаты в отрасли физико-математических наук, относящиеся к области физико-математического моделирования приборных структур наноэлектроники и приборов на квантовых эффектах, включающие:

- 1) существенный вклад в развитие теории переноса и рассеяния носителей заряда в одномерных проводящих каналах в виде полупроводниковых квантовых проволок и металлических одностенных углеродных нанотрубок с учетом квантово-размерных и вторичных квантовых эффектов, позволивший существенно повысить точность и достоверность описания переноса и рассеяния носителей заряда по доминирующим в указанных структурах механизмам, при этом оставаясь в рамках формализма кинетического уравнения Больцмана;
- 2) разработку комплексных физико-математических моделей процессов переноса носителей заряда в GaAs квантовых проволоках и металлических одностенных углеродных нанотрубках типа «armchair», создание алгоритмов и компьютерных программ,

предназначенных для численного моделирования этих процессов и расчета электрофизических параметров и электрических характеристик указанных проводников с высокой степенью достоверности;

- 3) формулировку и обоснование механизма регулирования дрейфовой скорости носителей заряда в полупроводниковых квантовых проволоках посредством управляемого изменения частоты рассеяния частиц на пространственно-неоднородных границах структуры под действием внешнего электрического поля, в соответствии с которым продемонстрирована возможность практической реализации электронного удвоителя частоты, функционирующего на предложенном механизме;
- 4) разработку способа формирования плоских подзон в одномерном проводящем канале транзистора с барьером Шоттки путем создания градиента в составе полупроводникового материала и разработку соответствующего метода расчета оптимальной стехиометрии полупроводникового соединения вдоль канала;
- 5) разработку численной модели, алгоритмов и программных средств для расчета электрических характеристик транзистора с барьером Шоттки в его одномерном проводящем канале, позволяющих решать задачу оптимизации физико-топологических параметров транзистора и достигать согласованного приближения этих характеристик к их предельным теоретическим значениям при заданных температурах;

что в совокупности представляет собой крупное достижение в области моделирования электрофизических свойств и электрических характеристик приборных структур с одномерным электронным газом.

Официальный оппонент:

директор научно-исследовательского  
учреждения «Институт ядерных проблем»  
Белорусского государственного университета,  
доктор физико-математических наук, профессор



С.А. Максименко