

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Шубина Николая Михайловича

**«Исследование резонансов и антирезонансов в квантовых проводниках и элементах молекулярной наноэлектроники на их основе»,**

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Интерференция электронных волн и туннельный эффект являются одними из краеугольных камней квантовой механики, имеющими неклассическую природу. По-видимому, первым применением туннельного эффекта для объяснения наблюдаемых физических свойств вещества явилось объяснение Георгием Гамовым явления альфа-распада. Последующее развитие квантовой теории продемонстрировало ключевую роль этих явлений как в атомной физике, оптике, так и в физике конденсированного состояния. Достижения технологии и, как следствие, интенсивные экспериментальные и теоретические исследования современных полупроводниковых низкоразмерных систем также выявляют ключевую роль этих эффектов не только в общефизическом смысле, но и в практических приложениях низкоразмерных полупроводниковых систем в наноэлектронике. Таким образом, изучение процессов туннелирования электронов и интерференции электронных волн в различных приборах и устройствах, которые в непосредственном будущем могут составлять элементную базу наноэлектроники, представляет собой важную научную задачу, что обуславливает **актуальность тематики** диссертационной работы.

Диссертация Шубина Н.М. состоит из введения, четырех глав, заключения и ряда приложений. Во введении сформулированы цели и задачи диссертационной работы, приведены положения, выносимые на защиту.

*Первая глава* диссертационной работы полностью посвящена введению в проблему с достаточно полным обзором соответствующей литературы. Здесь

же вводится понятие открытой квантовой системы и дается описание ее физических свойств. Обсуждаются также понятие связанного состояния в непрерывном спектре и свойства резонанса Фано; рассматривается ключевой для понимания остального текста метод описания открытых квантовых систем с использованием неэрмитовых гамильтонианов.

*Вторая глава* диссертационной работы посвящена теории транспорта в произвольном квантовом проводнике. В основе математического описания туннельного транспорта лежит метод, разработанный впервые, насколько мне известно, в ставшей уже классической работе Йогалья Меира и Неда Вингринга 1992 года. Выражение для тока электронов, полученное в этой работе с помощью диаграммной техники Келдыша, является достаточно трудным для понимания резонансной структуры туннельного тока, что обусловлено его большой общностью. Автор диссертационной работы показывает, что общее выражение для туннельной прозрачности можно представить в достаточно простом виде, с использованием двух ключевых функций  $P$  и  $Q$ , зависящих от энергии туннелирующего электрона. Для расчета этих функций требуется знание неэрмитового гамильтониана системы. При этом оказывается, что анализ структуры резонансов и антирезонансов, их слияния, расщепления и т.п. значительно упрощается. Этот факт демонстрируется автором на примере нескольких простых моделей, в числе которых узельная модель, а также модель гетероструктуры из нескольких барьеров. При этом достаточно широко используется графический материал, способствующий более простому пониманию результатов и выводов этой главы.

*Третья глава* диссертационной работы имеет более прикладной характер. Автором предлагаются конкретные рекомендации по управлению туннельным транспортом и детально изучается структура конкретных приборов. В первой части главы поставлен и изучен вопрос о возможности управления резонансной структурой коэффициента прохождения с помощью конструктивной и деструктивной интерференции. Во второй части главы предложена структура конкретных устройств: интерференционного транзистора на основе

органических молекул и инвертора из таких транзисторов. Рассчитаны характеристики таких устройств и продемонстрировано, что они могут обладать рядом значительных технических преимуществ, в частности, существенно малым энергопотреблением. Заключительная часть третьей главы посвящена обсуждению ограничений, накладываемых на работу этих устройств, обусловленных шумами и эффектами электрон-электронного взаимодействия.

*Четвертая* – заключительная – глава диссертационной работы посвящена рассмотрению вопроса динамического транспорта при приложении переменного напряжения к контактам структуры и изучению резонансов прохождения при таких воздействиях. В частности, показано, что в динамической ситуации могут возникать дополнительные механизмы интерференции, обусловленные переменным полем в контактах, что может приводить к дополнительной «тонкой структуре» резонансов туннельного транспорта.

В *заключении* подведен итог проделанной работы и сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Таким образом, в диссертационной работе Шубина Н.М. построено теоретическое описание туннельного транспорта в открытых квантовых системах на основе неэрмитовых гамильтонианов. В частности, разработана единая теория резонансов и антирезонансов, а также связанных состояний в непрерывном спектре для квантовых проводников произвольной геометрии. Выявлена принципиальная разница туннельного прохождения электронов через вырожденные и невырожденные квантовые состояния туннельной системы. Это определяет **научную значимость и новизну** полученных результатов.

Анализ работы конкретных устройств и оценка их характеристик определяет **практическую значимость** диссертационного исследования. Использование адекватного поставленным задачам математического аппарата (метод функций Грина, метод матрицы переноса), численный анализ обеспечивают **достоверность** полученных в диссертационной работе

результатов и **обоснованность** научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Результаты диссертационной работы прошли существенную **апробацию**: они докладывались на российских и международных конференциях высокого уровня и опубликованы в 15 работах, 5 из которых входят в системы цитирования WoS и Scopus. Автореферат диссертационной работы правильно и полностью отражает содержание диссертации.

К **замечаниям** по диссертационной работе можно отнести следующие моменты:

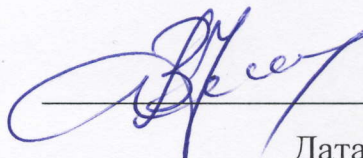
1. Очень лаконично обсуждается влияние эффектов электрон-электронного взаимодействия на транспортные свойства изучаемых систем. Фактически, автор приводит лишь качественные рассуждения по этому вопросу без использования каких-либо оценок или расчетов.
2. Достаточно часто автор представляет результаты в виде графиков, что существенно облегчает понимание. С другой стороны, отсылка к графикам и зависимостям в некоторых местах имеет лишь пояснения вида «зависимость показана на рисунке», и в дальнейшем автор не дает более никаких пояснений. Хотелось бы видеть некоторое качественное обсуждение.
3. Численные значения параметров, используемых автором для построения зависимостей, часто также приводятся без дополнительных пояснений и оценок.

Указанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общую высокую оценку диссертационной работы.

Считаю, что диссертационная работа «Исследование резонансов и антирезонансов в квантовых проводниках и элементах молекулярной наноэлектроники на их основе» удовлетворяет всем критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, а ее автор, Шубин Николай Михайлович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата

физико-математических наук по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния».

Ковалёв Вадим Михайлович



Дата: 23.09.2019

доктор физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников, заведующий лабораторией теоретической физики ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук

630090, Россия, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13

Телефон: (383) 333-32-64

e-mail: [vadimkovalev@isp.nsc.ru](mailto:vadimkovalev@isp.nsc.ru), [vmk111@yandex.ru](mailto:vmk111@yandex.ru)

Подпись В.М. Ковалева удостоверяю.

Ученый секретарь

Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,

к.ф.-м.н.



  
/Аржанникова С.А./

**Список основных публикаций оппонента Ковалева В.М. в рецензируемых научных изданиях по теме диссертации за последние 5 лет.**

1. M. Boev, V. M. Kovalev, I. G. Savenko. Magnetoplasmon Fano resonance in Bose-Fermi mixtures // *Physical Review B*.—2016.—Т. 94, № 24. —С. 241408.
2. M.V. Boev, V.M. Kovalev and I.G. Savenko. Coulomb drag of excitons in Bose-Fermi systems // *Physical Review B*. — 2019. —Т. 99, № 15. —С. 155409.
3. M. Sun, K.H.A. Villegas, V.M. Kovalev and I.G. Savenko. Bogolon-mediated electron scattering in graphene in hybrid Bose-Fermi systems// *Physical Review B*. — 2019.— Т. 99 № 11. — С. 115408.
4. V.M. Kovalev and I.G. Savenko. Photogalvanic currents in dynamically gapped transition metal dichalcogenide monolayers // *Physical Review B*.— 2019.—Т. 99, № 7.—С. 075405.
5. V. M. Kovalev, M. V. Boev and I. G. Savenko. Proposal for frequency-selective photodetector based on resonant photon drag effect in a condensate of indirect excitons// *Physical Review B*. — 2018.—Т. 98, № 4. —С. 041304(R).
6. K. H. A. Villegas, V.M. Kovalev, F. V. Kusmartsev, and I. G. Savenko. Shedding light on topological superconductors // *Physical Review B*.— 2018.—Т. 98, № 6. —С. 064502.
7. M. V. Boev, V. M. Kovalev, and I. G. Savenko. Bogolon-mediated electron capture by impurities in hybrid Bose-Fermi systems // *Physical Review B*. — 2018.—Т.97, № 16. —С. 165305.