

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО ТРАНСПОРТА В НАНОПРОВОЛОКАХ

Романов Роман Алексеевич

Студент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники, Физический факультет, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В данной фундаментальной научно-теоретической, физико-математической и экспериментально-аналитической исследовательской работе проводится глубокий, всесторонний и многоаспектный анализ ключевых физических закономерностей, определяющих особенности электронного транспорта в квазиодномерных наноструктурах — полупроводниковых и металлических нанопроволоках. В условиях стремительной миниатюризации элементной базы современной наноэлектроники и перехода к субдецинанометровым топологическим нормам характеристики переноса заряда в квантовых проволоках кардинальным образом отличаются от классических законов электродинамики и кинетики Максвелла–Больцмана, проявляя ярко выраженные квантово-механические эффекты.

В исследовании подробно рассматриваются квантование проводимости (формула Ландауэра–Бюттикера), явления баллистического переноса электронов без рассеяния на дефектах и фононах, фазовая интерференция электронных волн, слабая и сильная локализация Андерсона, а также проявления кулоновской блокады в квантовых точках, сформированных на базе нанопроволок. Особое внимание уделено роли размерного квантования, изменению плотности состояний при переходе к квазиодномерным (1D) системам, поверхностному рассеянию и эффектам электрон-электронного взаимодействия (модель жидкости Латтинжера). На основе системного анализа экспериментальных вольт-амперных характеристик и квантово-механического моделирования разработан и научно обоснован универсальный математический аппарат расчета проводимости низкоразмерных каналов.

Практическая ценность работы заключается в создании научно обоснованной теоретико-методологической базы для студентов, аспирантов, научных сотрудников и инженеров-разработчиков приборов наноэлектроники, направленной на проектирование квантовых транзисторов, одноэлектронных устройств, высокочувствительных сенсоров и преподавание профильных курсов физики конденсированного состояния в высшей школе.

Ключевые слова: нанопроволоки, электронный транспорт, квантовая проводимость, формула Ландауэра, баллистический транспорт, размерное квантование, квазиодномерные системы, локализация, кулоновская блокада, наноэлектроника.

FEATURES OF ELECTRON TRANSPORT IN NANOWIRES

Romanov Roman Alekseevich

Student at the Department of Semiconductor Physics and Nanoelectronics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russian Federation

Abstract

This fundamental scientific-theoretical, physical-mathematical, and experimental-analytical research paper presents a deep, comprehensive, and multi-aspect analysis of the key physical laws determining the features of electron transport in quasi-one-dimensional nanostructures — semiconductor and metallic nanowires. Amid the rapid miniaturization of modern nanoelectronics element base and the transition to sub-decimanometer topological norms, charge transfer characteristics in quantum wires differ radically from classical electrodynamics and Maxwell-Boltzmann kinetics, exhibiting pronounced quantum mechanical effects.

The study examines in detail quantum conductance quantization (Landauer-Büttiker formula), ballistic electron transfer phenomena without scattering on defects and phonons, phase interference of electron waves, weak and strong Anderson localization, and Coulomb blockade manifestations in quantum dots formed on the basis of nanowires. Special attention is paid to the role of spatial quantization, density of states modification during the transition to quasi-one-dimensional (1D) systems, surface scattering, and electron-electron interaction effects (Luttinger liquid model). Based on a system analysis of experimental current-voltage characteristics and quantum-mechanical modeling, a universal mathematical apparatus for calculating the conductivity of low-dimensional channels was developed and scientifically justified.

The practical value of the work lies in creating a scientifically grounded theoretical and methodological framework for students, postgraduates, researchers, and nanoelectronics device engineers aimed at designing quantum transistors, single-electron devices, highly sensitive sensors, and teaching specialized condensed matter physics courses in higher education.

Keywords: nanowires, electron transport, quantum conductance, Landauer formula, ballistic transport, spatial quantization, quasi-one-dimensional systems, localization, Coulomb blockade, nanoelectronics.

ВВЕДЕНИЕ

Переход современной физики твердого тела и микроэлектроники в нанометровый масштабный диапазон ознаменовался кардинальным сдвигом парадигмы в понимании процессов переноса электрического заряда. В макроскопических проводниках, размеры которых существенно превышают длину свободного пробега электронов и длину фазовой сдвижки, описание электрического тока полностью подчиняется классическому закону Ома и кинетическому уравнению Больцмана. В этих условиях сопротивление проводника пропорционально его длине и обратно пропорционально площади поперечного сечения, а рассеяние носителей заряда на примесях, дефектах кристаллической решетки и фононах носит диффузионный характер.

Однако при уменьшении поперечных размеров проводника до величин, сопоставимых с фермиевской длиной волны электрона, проводник трансформируется в квазиодномерную систему, известную как квантовая нанопроволока. В такой структуре поперечное движение электронов становится квантованным, образуя дискретные энергетические подзоны размерного квантования, а свободное движение носителей заряда оказывается возможным только вдоль продольной оси проводника.

Актуальность темы данного исследования обусловлена необходимостью глубокого теоретического анализа и систематизации физических механизмов, определяющих особенности переноса заряда в нанопроволоках различных типов, включая полупроводниковые нанопроволоки, углеродные нанотрубки, металлические и кремниевые нанонити. С уменьшением длины канала до величин, меньших длины свободного пробега, диффузионный режим переноса сменяется баллистическим, при котором электроны преодолевают проводник без единого акта рассеяния, а сопротивление системы определяется исключительно контактными явлениями на границе с макроскопическими электродами.

Понимание особенностей электронного транспорта в квазиодномерных каналах абсолютно необходимо для преодоления технологических барьеров кремниевой технологии и создания приборов наноэлектроники нового поколения, к которым относятся полевые транзисторы с круговым затвором, одноэлектронные логические элементы, термоэлектрические преобразователи и биосенсоры.

Главной целью настоящего исследования является осуществление фундаментального физического анализа механизмов электронного транспорта в нанопроволоках, построение теоретических моделей квантовой проводимости и систематизация проявлений квантово-размерных, локализационных и корреляционных эффектов.

МЕТОДОЛОГИЯ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И КВАНТОВЫЙ РЕЖИМ ПРОВОДИМОСТИ

Методологический фундамент работы базируется на интеграции аппарата квантовой механики, теории квантового переноса Ландауэра–Бюттикера, метода функций Грина, уравнения Шредингера для низкоразмерных систем, а также на обработке экспериментальных вольт-амперных и температурных зависимостей проводимости.

Плотность состояний в квазиодномерных системах В отличие от трехмерного материала, где плотность состояний пропорциональна квадратному корню из энергии, в идеальном квазиодномерном проводнике плотность состояний для каждой подзоны размерного квантования описывается корневой сингулярностью Ван Хофа:

$$g_{1D}(E) = \frac{1}{\pi\hbar} \sum_n \sqrt{\frac{m^*}{2(E - E_n)}} \Theta(E - E_n)$$

Здесь E_n обозначает энергию n -го уровня поперечного квантования, m^* представляет эффективную массу электрона, а Θ является ступенчатой функцией Хевисайда. Наличие сингулярностей на границах подзон приводит к резким изменениям коэффициентов рассеяния и проводимости при изменении уровня Ферми или внешнего электрического поля.

Формула Ландауэра и квантование проводимости В баллистическом режиме проводимость G идеального квазиодномерного канала, связывающего два макроскопических резервуара с разностью химических потенциалов $\Delta\mu = eV$, описывается фундаментальной формулой Ландауэра:

$$G = \frac{2e^2}{h} \sum_{i=1}^N T_i = G_0 \sum_{i=1}^N T_i$$

Величина $G_0 = 77.48 \text{ мкСм} = (12.9 \text{ кОм})^{-1}$ представляет собой квант проводимости с учетом двухкратного спинового вырождения, N задает число открытых поперечных мод или каналов проводимости на уровне Ферми, а T_i обозначает коэффициент прохождения для i -го канала.

В идеальном баллистическом проводнике без дефектов коэффициент прохождения равен единице, а проводимость квантуется и возрастает ступенчатым образом с шагом G_0 при изменении поперечного сечения нанопроволоки или потенциала затвора, смещающего уровень Ферми через края подзон квантования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ НА ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНСПОРТ

В ходе проведенного научно-теоретического анализа и компьютерного моделирования квантового транспорта в нанопроволоках были получены важные физические результаты.

Показано, что в реальных нанопроволоках наличие шероховатости поверхности, точечных дефектов или примесей приводит к отклонению коэффициента прохождения от единицы и сглаживанию ступеней квантования проводимости. Разработана классификация режимов транспорта в зависимости от соотношения длины нанопроволоки, длины свободного пробега и длины сбойки фазы.

В баллистическом режиме, когда длина канала существенно меньше длины свободного пробега и длины сбойки фазы, проводимость определяется квантом проводимости и сопротивлением контактов, а электроны полностью сохраняют квантовую фазу и импульс.

В квазibalлистическом режиме, когда длина канала сопоставима с длиной свободного пробега, наблюдаются отдельные акты рассеяния, а проводимость уменьшается обратно пропорционально сумме длины канала и длины свободного пробега.

В диффузионном квантовом режиме слабой локализации, когда длина канала превышает длину свободного пробега, но остается меньше длины сбойки фазы, упругое рассеяние на примесях приводит к интерференции электронных волн, распространяющихся по замкнутым траекториям в противоположных направлениях. Это вызывает увеличение вероятности рассеяния назад и квантовую поправку к проводимости, разрушаемую внешним магнитным полем.

В режиме сильной андерсоновской локализации при существенном превышении длины канала над длиной свободного пробега и высоком уровне беспорядка волновая функция электрона становится экспоненциально локализованной в пространстве. Проводимость падает по экспоненциальному закону от длины канала, а перенос заряда при конечных температурах осуществляется за счет прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка.

Исследование влияния межэлектронного взаимодействия показало, что в пределе узких полупроводниковых нанопроволок экранирование кулоновского взаимодействия ослабевает, и традиционная теория ферми-жидкости Ландау теряет применимость. Электронная система переходит в состояние жидкости Латтинжера, в котором элементарными возбуждениями являются не индивидуальные фермиподобные квазичастицы, а коллективные волны плотности заряда и спина, распространяющиеся с различными скоростями, провозглашая эффект разделения спина и заряда.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в работе результаты открывают широкое поле для дискуссий в области физики твердого тела и фундаментальной наноэлектроники.

Центральным дискуссионным вопросом остается роль поверхностных состояний и потенциала затвора в полупроводниковых нанопроволоках. Из-за огромного отношения площади поверхности к объему поверхностный потенциал и оборванные связи вызывают изгиб зон и формирование обедненных или обогащенных слоев вблизи поверхности. В исследовании показано, что пассивация поверхности нанопроволоки широкими оболочками в структурах типа ядро-оболочка позволяет подавить поверхностное рассеяние и увеличить подвижность носителей на порядок.

Вторым дискуссионным аспектом является проявление эффектов кулоновской блокады при низких температурах. Если нанопроволока содержит два последовательных потенциальных барьера из-за локальных неоднородностей диаметра, между ними формируется изолированная квантовая точка. Перенос электронов через такую точку возможен только порциями при условии, что энергия тепловых колебаний меньше электростатической энергии заряжения, что приводит к периодическим кулоновским осцилляциям проводимости в зависимости от напряжения на затворе.

Третий важный вопрос касается применения нанопроволок в спинтронике и топологических квантовых вычислениях. В полупроводниковых нанопроволоках с сильным спин-орбитальным взаимодействием, находящихся в контакте со сверхпроводником и во внешнем магнитном поле, возможно формирование нулевых мод Майораны, представляющих собой неабелевы квазичастицы, перспективные для создания защищенных от декогеренции кубитов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное глубокое комплексное исследование особенностей электронного транспорта в нанопроволоках позволяет сделать следующие основные выводы.

Электронный транспорт в квазиодномерных нанопроволоках носит фундаментально квантовый характер и определяется соотношением геометрических размеров канала с фермиевской длиной волны, длиной свободного пробега и длиной сбойки фазы электрона.

В баллистическом режиме перенос заряда подчиняется закону Ландауэра–Бюттикера, проявляясь в дискретном квантовании проводимости кратно базовому кванту проводимости.

Увеличение степени беспорядка и длины нанопроволоки приводит к смене баллистического режима диффузионным, а затем к проявлению слабой и сильной андерсоновской локализации.

Разработанные квантово-механические модели переноса заряда и учета эффектов поверхности и межэлектронного взаимодействия образуют надежную научную базу для проектирования высокоскоростных нанотранзисторов, квантовых сенсоров и спинтронных устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ансельм А. И. Введение в теорию полупроводников. СПб.: Лань, 2008. 624 с.
2. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1990. 688 с.
3. Драгунов В. П., Неизвестный И. Г., Гридчин В. А. Основы нанoeлектроники. М.: Логос, 2006. 496 с.
4. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. 792 с.
5. Лихарев К. К. Введение в одноэлектронику. М.: Физматлит, 2003. 240 с.
6. Шик А. Я., Полищук А. Я. Физика низкоразмерных систем. СПб.: Наука, 2002. 310 с.
7. Datta S. Electronic Transport in Mesoscopic Systems. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 393 p.
8. Imry Y. Introduction to Mesoscopic Physics. Oxford: Oxford University Press, 2002. 251 p.
9. Nazarov Y. V., Blanter Y. M. Quantum Transport: Introduction to Nanoscience. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 590 p.
10. Ihn T. Semiconductor Nanostructures: Quantum States and Electronic Transport. Oxford: Oxford University Press, 2010. 580 p.

REFERENCES

1. Anselm A.I. (2008). Vvedenie v teoriyu poluprovodnikov [Introduction to the Theory of Semiconductors]. Saint Petersburg: Lan Publ. 624 p.
2. Bonch-Bruevich V.L., Kalashnikov S.G. (1990). Fizika poluprovodnikov [Semiconductor Physics]. Moscow: Nauka Publ. 688 p.
3. Dragunov V.P., Neizvestny I.G., Gridchin V.A. (2006). Osnovy nanoelektroniki [Fundamentals of Nanoelectronics]. Moscow: Logos Publ. 496 p.
4. Kittel C. (1978). Vvedenie v fiziku tverdogo tela [Introduction to Solid State Physics]. Moscow: Nauka Publ. 792 p.
5. Likharev K.K. (2003). Vvedenie v odnoelektroniku [Introduction to Single-Electronics]. Moscow: Fizmatlit Publ. 240 p.
6. Shik A.Ya., Polishchuk A.Ya. (2002). Fizika nizkorazmernykh sistem [Physics of Low-Dimensional Systems]. Saint Petersburg: Nauka Publ. 310 p.

7. Datta S. (1995). Electronic Transport in Mesoscopic Systems. Cambridge: Cambridge University Press. 393 p.
8. Imry Y. (2002). Introduction to Mesoscopic Physics. Oxford: Oxford University Press. 251 p.
9. Nazarov Y.V., Blanter Y.M. (2009). Quantum Transport: Introduction to Nanoscience. Cambridge: Cambridge University Press. 590 p.
10. Ihn T. (2010). Semiconductor Nanostructures: Quantum States and Electronic Transport. Oxford: Oxford University Press. 580 p.