

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Крупенина Владимира Александровича  
«Одноэлектронные наноструктуры и устройства на их основе»  
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук  
по специальности 01.04.04 – физическая электроника

Диссертационная работа Крупенина В.А. охватывает цикл работ, посвященных разработке методов создания и исследованию так называемых «одноэлектронных наноструктур», в частности, измерению их электрических характеристик, а также демонстрации электронных систем на их основе и обсуждению потенциальных возможностей для их практического применения.

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена физическими ограничениями с которыми столкнулась современная полупроводниковая электроника и необходимостью разработки одноэлектронных устройств и систем, работающих на новых физических принципах, которые, потенциально, могут существенно расширить возможности современной электронной компонентной базы. Исследованные в работе одноэлектронные устройства и системы, принцип работы которых основан на коррелированном транспорте элементарных зарядов, относятся семейству таких устройств и систем.

Цель представленной работы состояла в разработке способов изготовления, измерения, исследования, анализе и физической интерпретации наблюдаемых характеристик образцов наноструктур, демонстрирующих управляемый транспорт единичных зарядов, а также создание устройств и систем на их основе и исследовании потенциальных возможностей их практического использования.

При достижении поставленной цели были получены важные результаты, которые являются новыми и оригинальными:

- разработаны методы изготовления разнообразных одноэлектронных структур на основе  $Al/AlO_x/Al$  туннельных переходов, на основе резистивных пленок из хрома, на основе тонких пленок хрома, на основе кремния на изоляторе (КНИ), на основе единичных примесных атомов в кремнии;
- изготовлены предложенные одноэлектронные структуры, исследованы их структурные и электрические характеристики;
- проведены измерения корреляции зарядового шума в системе близкорасположенных транзисторов с целью определения локализации его источников;
- проведена оценка шумового и теплового взаимного влияния близкорасположенных транзисторов с целью определения влияния сенсора на исследуемый объект;
- проведено экспериментальное исследование и численное моделирование характеристик асимметричного одноэлектронного транзистора, как оригинального высокочувствительного полевого/зарядового сенсора;
- исследованы особенности поведения неоднородных двумерных массивов с одноэлектронным транспортом, обнаружены ранее не наблюдавшиеся эффекты;
- продемонстрирована одноэлектронная ячейка памяти емкостью в единичный элементарный заряд;
- продемонстрированы возможности одноэлектронного транзистора-электрометра при исследовании потенциала двумерного газа в режиме квантового эффекта Холла.

Большинство перечисленных выше результатов получены автором впервые и, несомненно, важны как для понимания фундаментальных аспектов физики процессов в мезоскопических объектах, так и для разработки новых устройств на их основе. Практическая значимость полученных результатов заключается в их использовании для создания разнообразных одноэлектронных устройств, таких как сверхчувствительные полевые/зарядовые сенсоры с высоким пространственным разрешением, ячейки памяти и элементы логики. Технологические и экспериментальные решения, предложенные в

диссертации, могут быть использованы для создания и исследования других наноразмерных устройств: полупроводниковых транзисторов, гетероструктур и пр.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка цитированной литературы. Ее объем составляет 266 страниц, включая 100 рисунков, 9 таблиц и список литературы из 167 ссылок. В конце диссертации представлены основные результаты.

Во Введении отмечена актуальность проведенных исследований, описаны цели и задачи исследования, отмечена ее научная и практическая значимость, указаны основные положения, выносимые на защиту, проанализирована научная новизна результатов по направлениям проведенных исследований, указан личный вклад автора в публикации по теме диссертации.

Первая глава посвящена экспериментальному исследованию одноэлектронного транзистора как сверхчувствительного электрометра. В ней представлена разработанная лабораторная технология изготовления одноэлектронных транзисторов на основе  $Al/AIO_x/Al$  туннельных переходов, высокоомных пленочных резисторов из хрома, неравномерно легированного по глубине кремния на изоляторе, проведены экспериментальные исследования транспортных и шумовых характеристик изготовленных оригинальных наноструктур. Показана зависимость зарядовой чувствительности одноэлектронных транзисторов от типа и качества диэлектрической подложки, на которой располагается изготовленная структура, а также от размера острова транзистора. Достигнутые значения зарядовой чувствительности одноэлектронных транзисторов находятся на уровне лучших результатов, продемонстрированных ведущими научными группами в мире. Глава заканчивается демонстрацией и анализом результатов исследования предельно малых структур - одноатомных одноэлектронных транзисторов на основе единичных примесных атомов мышьяка и фосфора в кремнии.

Во второй главе основное внимание уделено поиску и исследованию источников флуктуаций в одноэлектронных структурах и методов уменьшения их влияния на важные функциональные параметры разрабатываемых устройств. На основе структур из двух близко расположенных ( $\sim 150\div 200$  нм) одноэлектронных транзисторов исследована экспериментально и теоретически степень корреляции их шумовых сигналов, составившая величину  $\sim 15\div 20$  %. Установлено, что уровень шума поляризационного фонового заряда одноэлектронного транзистора в основном определяется источниками зарядовых флуктуаций в подложке, что позже подтверждено в экспериментах других исследователей. Далее приведены характеристики одноэлектронного транзистора оригинальной стековой геометрии с различной площадью контакта острова с подложкой (от 0 до 50%). Показано, что основной вклад в зарядовый шум одноэлектронного транзистора вносят источники шума, расположенные в диэлектрической подложке. Достигнут рекордно низкий уровень зарядового шума одноэлектронного транзистора стековой геометрии на низких частотах ( $f = 10$  Гц) -  $\leq 8 \times 10^{-6} e/\text{Гц}^{1/2}$ , который близок к теоретическому пределу ( $\sim 3 \times 10^{-6} e/\text{Гц}^{1/2}$ ) и более чем на порядок по амплитуде (и на 3 порядка по мощности) ниже лучших значений планарных одноэлектронных транзисторов.

Третья глава посвящена исследованию эффектов взаимного влияния в связанных одноэлектронных структурах. На основе системы из близкорасположенных одноэлектронных транзисторов теоретически и экспериментально изучены эффекты влияния на транзистор-электрометр связанного с ним емкостным образом другого одноэлектронного транзистора. Впервые рассмотрен нестационарный случай, когда через исследуемый транзистор протекает ненулевой ток. Показано, что для минимального флуктуационного воздействия на измеряемый объект, предпочтительным является режим работы транзистора-электрометра с малым транспортным током ( $I/(e/R_x C_x) < 0.1$ ) и в области значений поляризационного заряда  $-(n + 0.25) < Q_0/e < (0.25 + n)$ , где амплитуда флуктуаций потенциала острова транзистора минимальна. Далее в главе исследованы тепловые и шумовые воздействия на транзистор-электрометр в системе из трех близкорасположенных транзисторов. Продемонстрировано наличие флуктуационного и

теплового компонентов влияния. Данные эксперимента и теоретические расчеты позволили определить электронную и фононную температура острова транзистора-электромметра в результате теплового ( $0.03 \div 1.2$  пВт) и флуктуационного воздействия транзисторов, удаленных от него на 150 нм, а также константу электрон-фононного взаимодействия для алюминия при низких ( $\sim 100$  мК) температурах  $\Sigma_{Al} \approx 0.23$  нВт/град<sup>5</sup>/мкм<sup>3</sup>.

Четвёртая глава посвящена изучению особенностей электронного транспорта в неоднородных одноэлектронных структурах. В первой части главы теоретически и экспериментально исследован асимметричный одноэлектронный транзистор. Показана способность асимметричного транзистора к прямому обнаружению входных флуктуаций напряжения на нем, проанализирована возможность его использования в качестве детектора уровня шума в измерительных линиях чувствительных систем, микро- и наноразмерных объектах. Достигнутая чувствительность экспериментального образца составила величину  $\sim 20$  нВ/Гц<sup>1/2</sup> в диапазоне частот 0.1 – 100 кГц. Режим смещения асимметричного транзистора переменным или шумовым сигналом, при среднем нулевом токе через транзистор, может найти применение при проведении деликатных экспериментов с целью уменьшения обратного влияния электромметра на измеряемый объект. Вторая часть главы посвящена исследованию особенностей одноэлектронного транспорта в неоднородных двумерных массивах наноразмерных проводящих островов, разделенных туннельными переходами. Впервые в хромовых гранулированных нанополосках обнаружено явление скачкообразного изменения тока из состояния кулоновской блокады в проводящее состояние и обратно. С помощью численного моделирования на основе построенной модели показано, что обнаруженные особенности связаны с влиянием локальных неоднородностей в узких ( $d = 100$  нм) Cr полосках, которые образуют локальные зарядовые ловушки, попадая в которые электрон может полностью блокировать электронный транспорт, а покидая их - вызвать скачкообразное переключение в проводящее состояние. Продемонстрировано хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных по величине скачка тока, по границам переключения и по резкости переключения из блокадного состояния в проводящее.

Пятая глава посвящена исследованию мезоскопических структур с помощью одноэлектронного транзистора-электромметра. В первой части главы в широком диапазоне низких температур ( $35 \div 200$  мК) исследован прототип одноэлектронной ячейки памяти, логические состояния которой кодируются присутствием/отсутствием единичного электрона на острове памяти. Достигнуто время хранения зарядового состояния более 8 часов, что является одним из лучших результатов для таких структур. Проанализированы факторы, ограничивающие время жизни зарядового состояния одноэлектронной ловушки: дрейф распределения эффективного фонового заряда островов одноэлектронных структур, воздействие высокоэнергетичного ( $> 1$  ГГц) СВЧ шума, обратное влияние электромметра на измеряемый объект, рассмотренное в главе 3. Вторая часть главы посвящена исследованию потенциального профиля двумерного газа в гетероструктурах GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As при наблюдении целочисленного квантового эффекта Холла. Показано, что большие вихревые токи индуцируются при изменении магнитного поля в областях плато холловского сопротивления. На основе коррелированных измерений откликов одноэлектронных транзисторов, расположенных в разных областях на поверхности холловской структуры, показано, что вихревой ток образует единственную петлю по его периметру, а граница его локализации проходит на расстоянии  $\sim 1$  мкм от границы двумерного газа.

В заключении приведены основные результаты проведенных исследований.

По содержанию диссертации имеется несколько замечаний.

1. Не приведены шумовые характеристики одноатомных транзисторов, в то время как в остальных типах транзисторов эти характеристики присутствуют.

2. В разделе 1.5 предполагается, что высокое легирование кремния обеспечивает высокую проводимость электродов и она считается близкой к металлической, однако при используемых температурах ( $T = 15$  мК) степень ионизации примесей в кремнии резко падает. Было бы полезно дать оценку реальной проводимости легированных слоев кремния при температурах эксперимента.

3. В разделе 1.7 представлены результаты по созданию и исследованию характеристик одноатомного транзистора на основе единичных примесных атомов в кремнии. Поскольку примесные атомы располагаются хаотично в кристалле кремния, возникает вопрос о влиянии взаимного расположения примесного атома и электродов на характеристики транзистора. Было бы полезно привести статистику по нескольким образцам, чтобы можно было сделать заключение о воспроизводимости технологии и возможности ее масштабирования, например, для создания логических схем из одноатомных транзисторов.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации и не затрагивают сути полученных результатов.

Диссертационная работа, представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, развивает новое направление физической электроники – одноэлектронику, которое связано с исследованием и разработкой наноразмерных электронных устройств и систем, работающих на основе управляемого транспорта единичных зарядов. В диссертации изложены новые научно обоснованные положения, выводы и рекомендации по созданию подобных устройств и систем. Достоверность и новизна полученных результатов подтверждается оригинальными публикациями автора в ведущих научных изданиях многочисленными обсуждениями на профильных научных конференциях.

Результаты исследований, представленные в диссертации, опубликованы в 30 статьях рецензируемых научных журналов из списка Web of Science и Scopus, а также представлены в тезисах докладов на 36 международных научных конференциях. Диссертационная работа содержит новые научные результаты и основанные на них положения, выдвигаемые для публичной защиты, в ней также отражен личный научный вклад автора. Автореферат полно и точно отражает содержание диссертации. Диссертационная работа оформлена в соответствии с требованиями Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова.

По актуальности, новизне, качеству проведенных исследований, а также по их значимости для практического применения диссертационная работа удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а ее автор Крупенин В.А. заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Ведущий научный сотрудник НИИЯФ МГУ  
Доктор физико – математических наук

Н.В. Суетин

Подпись Н.В.Суетина удостоверяю  
Ученый секретарь НИИЯФ МГУ,

Е.А. СИГАЕВА

Суетин Николай Владиславович. Контактная информация  
Почтовый адрес: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2.  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»,  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына (НИИЯФ МГУ) Email: nsuetin@mail.ru Рабочий телефон: +7 495 939 5556