

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Крупенин Владимир Александрович

**ОДНОЭЛЕКТРОННЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ
И УСТРОЙСТВА НА ИХ ОСНОВЕ**

01.04.04 - физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в лаборатории «Криоэлектроника» кафедры полупроводников
физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
Владимир Федорович Лукичев
член-корреспондент РАН, директор
Физико-технологического института РАН

доктор физико-математических наук
Суетин Николай Владиславович
ведущий научный сотрудник
отдела микроэлектроники
НИИЯФ МГУ имени М.В. Ломоносова

доктор физико-математических наук
Илюшин Александр Сергеевич
профессор, заведующий кафедрой
физики твердого тела физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова

Защита диссертации состоится «13» сентября 2018 г. в 15-30 на заседании диссертационного
совета МГУ.01.12 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по
адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2, Физический факультет МГУ, ауд. СФА.

E-mail: igorkartashov@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ
имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д.27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»:

http://istina.msu.ru/dissertation_councils/councils/34133295/

Автореферат разослан «7» июня 2018 года

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н.

И.Н.Карташов

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Бурное развитие микроэлектроники привело к созданию нанoeлектронных устройств, обладающих уникальными характеристиками: сверхбыстрых полевых транзисторов, сверхчувствительных датчиков слабых электрических и магнитных полей, нанoeлектромеханических систем, лазеров с новыми диапазонами длин волн и др. Даже в традиционной области микроэлектроники, как производство микропроцессоров и элементов памяти, в последние годы наблюдается переход к нанoeлектронике. Если в первом однокристальном микропроцессоре фирмы Intel в 1971 году технологический размер составлял 10 мкм и процессор содержал 2300 транзисторов, то в процессорах семейства 2017 года этот размер составляет 10 нм и количество транзисторов превышает 2.5 миллиарда. Такое уменьшение размеров элементов вычислительных устройств обеспечивает все возрастающие вычислительные возможности, однако, ставит и дополнительные концептуальные трудности перед разработчиками. Разработка устройств и систем, работающих на новых физических принципах, становится как нельзя более актуальной. К семейству таких устройств и систем относятся одoeлектронные устройства и системы [1,2], принцип работы которых основан на коррелированном транспорте элементарных зарядов (электронов, дырок, куперовских пар). Их разработке и исследованию посвящена настоящая работа.

Цели и задачи исследования

Цель настоящего цикла работ состояла в разработке технологии изготовления одoeлектронных структур, измерении и исследовании их электрических характеристик, анализе и физической интерпретации наблюдаемых свойств изготовленных экспериментальных образцов, демонстрации устройств и систем на их основе и исследовании потенциальных возможностей для их практического применения.

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

разработаны оригинальные методы изготовления разнообразных одoeлектронных структур:

- транзисторов и систем (структуры из близкорасположенных транзисторов, одoeлектронная ловушка, транзистор на образце с квантовым эффектом Холла) на основе $Al/AlO_x/Al$ туннельных переходов,
- транзисторов на основе резистивных пленок из хрома,
- двумерных массивов наноразмерных проводящих островов на основе тонких пленок хрома;
- транзисторов на основе кремния на изоляторе (КНИ),
- одoeатомных транзисторов на основе единичных примесных атомов в кремнии;

продемонстрированы и исследованы одноэлектронные транзисторы

- с $Al/AlO_x/Al$ туннельными переходами, включая их стековый и асимметричный варианты,
- с резистивными пленками хрома вместо туннельных переходов,
- на основе высоколегированного КНИ,
- на основе единичных примесных атомов в кремнии;

проведены корреляционные шумовые измерения в системе близкорасположенных одноэлектронных транзисторов с целью определения степени влияния источников зарядового шума, локализованных в подложке;

проведено теоретическое и экспериментальное исследование шумового и теплового влияния транзисторов друг на друга в системе из трех близкорасположенных одноэлектронных транзисторов;

проведено исследование и численное моделирование транспортных характеристик асимметричного одноэлектронного транзистора, работающего с шумовой накачкой и нулевым транспортным напряжением;

экспериментально и методом численного моделирования исследованы особенности электронного транспорта в неоднородных двумерных массивах наноразмерных проводящих островов, разделенных туннельными переходами;

проведено исследование с помощью одноэлектронного транзистора зарядовой динамики одноэлектронной ячейки памяти емкостью в единичный элементарный заряд;

с помощью одноэлектронного транзистора экспериментально исследована динамика изменения потенциала двумерного газа в гетероструктурах в режиме квантового эффекта Холла.

Научная новизна результатов

К первой группе оригинальных результатов можно отнести работы, связанные с разработкой оригинальных методов изготовления, исследованием и совершенствованием одноэлектронного транзистора – уникального электрометра с зарядовой чувствительностью в миллионные доли электрона в единичной полосе частот ($T < 1$ К) [A1,A2,A7-A11,A13,A16,A20,B1,П1]. Исследования низкочастотного зарядового $1/f$ шума в одноэлектронных транзисторах на основе $Al/AlO_x/Al$ туннельных переходов и поиски его источников позволили предположить, что основной причиной избыточного шума в транзисторах являются двухуровневые флуктуаторы, расположенные в диэлектрической подложке транзистора. Переход от предположения к утверждению произошел после проведения экспериментального исследования корреляции зарядовых флуктуаций в системе из двух близкорасположенных транзисторов [A3]. Разработка и исследование одноэлектронного транзистора стековой геометрии [A14,A17-A18,B1,B2] еще более

укрепило это утверждение и привело к достижению рекордного значения уровня шума на низких частотах. Совершенствование характеристик одноэлектронного транзистора продолжалось в исследованиях различных его модификаций (асимметричный [A18,A23], с резистивными переходами [A19,A21]) и привело к созданию кремниевого транзистора с высокой рабочей температурой (> 10 К) [B2,A25,A27], а затем и одноатомного транзистора [A28-A30].

Ко второй группе новых результатов относится исследование системы из трех близкорасположенных транзисторов с различными значениями зарядовой энергии, где удалось экспериментально и теоретически продемонстрировать эффекты обратного теплового и флуктуационного влияний транзистора на измеряемый объект, а также определить константу электрон-фононного взаимодействия для Al в милликельвиновом диапазоне температур [A4,A12,A15].

К третьей группе новых результатов относятся экспериментальные исследования и численное моделирование особенностей электронного транспорта в неоднородных одноэлектронных структурах [A24,A26].

К четвертой группе работ относятся эксперименты, в которых продемонстрированы уникальные возможности одноэлектронного транзистора, как сверхчувствительного электрометра. Это исследования зарядовой динамики одноэлектронной зарядовой ловушки [A5-A6] и динамики изменения потенциала двумерного газа образца в режиме квантового эффекта Холла [A22,B3].

Научная и практическая значимость работы

Настоящая работа представляет законченное исследование, охватывающее широкий круг проблем, связанных с изучением свойств одноэлектронных структур. Получен ряд фундаментальных результатов, имеющих, по мнению автора, большую практическую ценность.

На основе предложенных методов могут быть существенно улучшены транспортные и шумовые характеристики одноэлектронных устройств. На примере транзистора стековой геометрии показано, каким образом можно уменьшить порог зарядового шума в одноэлектронном транзисторе-электрометре более чем на порядок. В частности, на основе разработанных одноэлектронных транзисторов из КНИ могут быть созданы сверхчувствительные полевые/зарядовые сенсоры с высокой рабочей температурой и нанометровым пространственным разрешением для локальных и сканирующих зондовых устройств с широким спектром применения в научных и прикладных исследованиях.

Результаты, полученные при исследовании особенностей электронного транспорта в неоднородных двумерных массивах наноразмерных проводящих островов, разделенных

туннельными переходами, могут быть полезны при разработке устройств на их основе или устройств, использующих элементы на основе таких структур.

Результаты, полученные в ходе исследования свойств асимметричного одноэлектронного транзистора, работающего в режиме накачки переменным сигналом, могут быть использованы для реализации электрометра, имеющего ослабленное обратное влияние на источник сигнала, а также детектора уровня шума в измерительных системах при экспериментальном исследовании чувствительных одноэлектронных и джозефсоновских устройств.

Одноатомный транзистор, продемонстрированный в работе, в будущем может служить основой элементной базы электроники нового поколения, работающей на новых физических принципах.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Избыточный низкочастотный ($f < 100$ Гц) $1/f$ шум одноэлектронных транзисторов с $Al/AlO_x/Al$ туннельными переходами имеет зарядовую природу. Уровень зарядового шума одноэлектронных транзисторов различной геометрии и расположенных на различных диэлектрических подложках находится в интервале $10^{-3} \div 10^{-4} e/\text{Гц}^{1/2}$, зависит от размеров острова транзистора, увеличиваясь с его размером, и от разновидности и состояния диэлектрического слоя, контактирующего с островом.
2. Низкочастотные зарядовые шумы одноэлектронных транзисторов, острова которых расположены друг от друга на расстоянии порядка 150-200 нм, имеют коэффициент корреляции $\sim 15 \div 20$ %. Разработанная теоретическая модель показывает, что зарядовый уровень шума исследуемых образцов транзисторов - $(2.5 \div 5.5) \times 10^{-4} e/\text{Гц}^{1/2}$ - при наблюдаемом и расчетном (13 \div 22 %) коэффициентах корреляции определяется в основном источниками шума в подложках (SiO_2 , Al_2O_3).
3. Эффекты взаимного влияния в системе близкорасположенных одноэлектронных транзисторов, острова которых расположены друг от друга на расстояниях порядка 150 \div 200 нм, определяются флуктуационным и тепловым механизмами их взаимодействия. Данные эксперимента и разработанная теоретическая модель позволяют определить электронную и фононную температуры острова транзистора-электрометра в результате теплового (0.03 \div 1.2 пВт) и флуктуационного воздействий транзисторов, удаленных от него на 150 \div 200 нм, а также константу электрон-фононного взаимодействия Σ_{Al} для Al ($\Sigma_{Al} = 0.23$ нВт/град⁵/мкм³).
4. Уменьшение площади контакта острова одноэлектронного транзистора с диэлектрической подложкой приводит к уменьшению низкочастотного ($f < 100$ Гц) зарядового $1/f$ шума устройства. Впервые предложенная стековая геометрия одноэлектронного транзистора уменьшает на порядок уровень зарядового шума за счет ослабления влияния источников

шума, расположенных в подложке, и позволяет достичь крайне низкого значения — $2.5 \times 10^{-5} e/\text{Гц}^{1/2}$ на частоте 10 Гц.

5. Разработанная и впервые продемонстрированная конструкция одноэлектронного транзистора с островом, полностью изолированным от контакта с подложкой, исключает шумовое воздействие подложки и более чем на порядок уменьшает уровень низкочастотного зарядового шума транзистора до значения - $8 \times 10^{-6} e/\text{Гц}^{1/2}$ (30 *h*), близкого к теоретическому пределу устройства - $3 \times 10^{-6} e/\text{Гц}^{1/2}$ (3 *h*).

6. Разработанный метод формирования пленочных резистивных структур с сопротивлением на квадрат от 1 кОм до 30 кОм на основе тонких (6÷8 нм) пленок хрома позволяет создавать резистивные элементы микронных и субмикронных размеров, которые используются вместо традиционных туннельных переходов в оригинальной, впервые продемонстрированной структуре одноэлектронного транзистора. Устройство демонстрирует сильное подавление тока сотуннелирования, обеспечивая возможность работы в качестве электрометра при предельно низких значениях транспортного тока $I = 200$ фА.

7. Одноэлектронный транзистор с сильно асимметричными туннельными переходами ($R_1/R_2 \approx C_2/C_1 > 10$) демонстрирует необычный режим работы в качестве электрометра при нулевом постоянном смещении, которое заменяется воздействием переменного или шумового сигнала ($T = 35$ мК). Чувствительность транзистора как детектора переменного сигнала составляет величину 20 нВ/Гц^{1/2} в диапазоне частот $\Delta f = 0.1 \div 100$ кГц.

8. Кремниевые одноэлектронные транзисторы, изготовленные из неравномерно легированного КНИ на основе разработанного оригинального метода, позволяют существенно уменьшить размеры элементов структуры транзисторов и повысить рабочую температуру устройств ($T > 10$ К). Транспортные и шумовые характеристики транзисторов отличаются повышенной чувствительностью (~ 10 нА/*e* по сравнению с $1 \div 2$ нА/*e* *Al* транзистора) и низким уровнем зарядового шума - $1.5 \times 10^{-4} e/\text{Гц}^{1/2}$ (10 Гц), как у лучших образцов *Al* транзисторов ($T = 15$ мК).

9. Хромовые тонкие (6÷8 нм) полоски шириной 100 нм и длиной 200÷1000 нм, состоящие из двумерных неоднородных массивов изолированных гранул размером 5÷20 нм, при низких температурах ($T = 25 \div 200$ мК) демонстрируют в области кулоновской блокады на ВАХ впервые наблюдаемое явление скачкообразного изменения тока ($0.05 \div 1$ нА) с характерным гистерезисом. Разработанная теоретическая модель показывает согласие с экспериментальными данными по величине скачка тока ΔI , по границам переключения и по резкости переключения из блокадного в проводящее состояние. Наблюдаемый эффект связан с влиянием локальных неоднородностей в нанополосках и резким повышением электронной температуры островов *Cr* плёнок при протекании тока.

10. Прототип одноэлектронной ячейки памяти, состоящей из одноэлектронной ловушки на основе 9 туннельных $Al/AlO_x/Al$ переходов и считывающего электрометра, демонстрирует до 4-х зарядовых состояний на острове хранения с максимальным временем хранения отдельного зарядового состояния более 8 часов ($T = 35$ мК), которое определяется дрейфом фонового заряда подложки, проникающими высокочастотными шумами и обратным влиянием считывающего электрометра.

11. Коррелированные во времени отклики одноэлектронных транзисторов, расположенных в разных областях на поверхности гетероструктуры GaAs/ $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$, образующей двумерный газ на глубине около 90 нм, показывают, что при изменении магнитного поля в областях плато зависимости холловского сопротивления $R_{xy}(B)$ при наблюдении квантового эффекта Холла индуцируются большие вихревые токи, которые образуют единственную петлю по периметру образца.

12. Одноатомные одноэлектронные транзисторы на основе единичных примесных атомов мышьяка и фосфора в кремнии, изготовленные на основе разработанного оригинального метода из неравномерно легированного КНИ, обладают предельно малым размером острова (~ 3 нм), определяемым эффективным радиусом верхней по энергии электронной оболочки примесного атома. Измеренные диаграммы стабильности транзистора позволяют определить величину характерной зарядовой энергии ($E_C = 16$ мэВ), расстояния между одночастичными энергетическими уровнями (0.98 мэВ, 0.99 мэВ, 1.18 мэВ), собственную емкость зарядового центра ($C \approx 5 \times 10^{-18}$ Ф).

Достоверность результатов

подтверждается согласием полученных экспериментальных и теоретических результатов с результатами экспериментов, проведенных различными научными группами, а также с результатами теоретических работ других авторов из списка цитируемой литературы, соответствием между результатами математического моделирования и экспериментальными данными. Численные и получисленные методы моделирования процессов в исследованных наноструктурах базируются на применении хорошо проверенной классической ортодоксальной теории одноэлектронного туннелирования.

Вопросы авторства и публикаций

В диссертации приведены результаты, полученные непосредственно автором, под его руководством или при его активном участии. Результаты исследований автора были опубликованы в работах [А1-А30, Б1-Б2, В1-В3, П1], приведенных отдельным списком в конце диссертации. В разработке конструкции большинства экспериментальных образцов наноструктур автору принадлежит идея, совместно с соавторами разрабатывалась технология их изготовления, все образцы изготовлены под его руководством и часть из них - с его участием. Автором лично планировался эксперимент, разрабатывалась измерительная

система, методика измерений и проводилось большинство измерений. В работах [A15, A26], выполненных под руководством автора, в теоретических расчетах ему принадлежит участие в постановке задачи и обсуждении промежуточных результатов. В работах [A22, B3] автору принадлежит идея практической реализации эксперимента, с его участием разрабатывались методы изготовления экспериментальных образцов, им разработана и изготовлена измерительная система и проведены измерения. В работах [A8, A11, A20] совместно с соавторами разрабатывалась технология изготовления образцов, обсуждались полученные результаты.

Апробация работы

Основные научные результаты работы докладывались на российских и международных конференциях и симпозиумах, в том числе:

International Conference "Nanostructures: physics and technology", International Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), Trilateral German-Russian-Ukrainian Seminar on High-Temperature Supercond. (1996-1998); International Conference on Low Temperature Physics (1996, 1999); Phantoms Strategic Domain Meetings (PHASDOM, 1997); International Superconductive Electronics Conference (1997); Workshop on Fundamental Aspects of Applications of Single Electron Devices (1997); International Conference "Mesoscopic and strongly correlated systems" (1997, 2000); European Meeting on the Technology and Application of SET-Devices (2000); International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (2002); International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems (2002); International Conference "Nano and Giga Challenges in Microelectronics" (2004); International Conference "Micro- and nanoelectronics" (ICMNE-2005, 2012, 2014); «Ломоносовские чтения - 2008»; General Meeting of Asian Consortium on Computational Materials Science (2009, 2012); Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (2016), а также на ряде других конференций, симпозиумов, школ и на семинарах в МГУ.

Структура и объем диссертации

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

Основное содержание работы

Во **Введении** отмечена актуальность проведенных исследований, важность разработки устройств и систем, работающих на новых физических принципах, к которым относятся одноэлектронные структуры и устройства, состоящие из микро- и наноразмерных

проводящих островов, разделенных туннельными переходами с малой емкостью. Отмечено, что на основе одноэлектронных структур возможно создание полевых/зарядовых сенсоров с субэлектронной чувствительностью, ячеек памяти, в которых информация кодируется присутствием единичного электрона, метрологических стандартов тока, элементов цифровой логики, а разработка твердотельных одноэлектронных устройств ключевыми элементами которых будут отдельные атомы, позволит создать информационные системы обработки, хранения и передачи информации чрезвычайно высокой плотности, быстродействия и энергоэффективности, а также перейти к проектированию электронных вычислительных устройств, работающих на новых физических принципах.

В разделе 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.

В конце введения кратко описывается структура диссертации, а также указан личный вклад автора в публикации по теме диссертации, написанные совместно с другими авторами.

Первая глава посвящена экспериментальному исследованию одноэлектронного транзистора как сверхчувствительного электрометра. Вначале излагается принцип работы одноэлектронного транзистора [1-3], проводится оценка его зарядовой чувствительности для конкретных параметров транзистора и рабочей температуры, обсуждается проблема фонового эффективного заряда и влияние его флуктуаций на работу и характеристики одноэлектронного транзистора, описывается современное знание о поляризационном фоновом заряде до появления настоящей работы [4-7]. Далее в разделах главы анализируются результаты экспериментальных исследований, направленных на поиск вероятного расположения источников зарядового шума одноэлектронного транзистора.

Представлена разработанная лабораторная технология изготовления одноэлектронных транзисторов на основе $Al/AlO_x/Al$ туннельных переходов [8, A1], использующая метод напыления Al пленок под различными углами через подвешенную маску [9]. Для подтверждения зарядовой природы избыточного $1/f$ шума измерены спектры шумов в точках модуляционной характеристики с различной крутизной $\eta = dV/dQ$ ($\eta = \max$ и $\eta = 0$). Показано, что уровень флуктуаций зависел от крутизны модуляционной характеристики транзистора (рис. 1а), а амплитуда шумового сигнала (рис. 1б) в точке минимума ($\eta = 0$) была в 4÷5 раз меньше измеренной в точках максимальной крутизны ($\eta = 2.28$ мВ/е, $\eta = 1.57$ мВ/е), что свидетельствует о зарядовой природе шума.

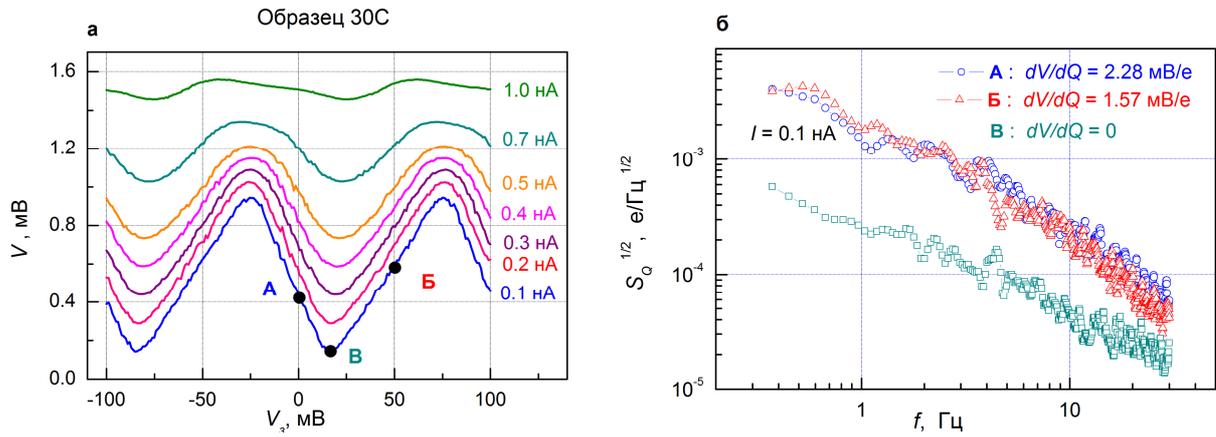


Рис. 1. **а** - модуляционные характеристики транзистора; **б** - спектр зарядового шума в различных рабочих точках (А, Б, В) кривой $V(V_3)$. $T = 35$ мК.

Исследовались транзисторы с различными размерами острова и туннельных переходов, расположенные на различных диэлектрических слоях (табл. 1). Обнаружено, что транзисторы с большим островом имели более высокий уровень зарядового шума (табл. 1). Причиной такой зависимости может быть разница в суммарном влиянии от источников флуктуаций в диэлектрической подложке, что также отмечали другие авторы [10]. Наблюдаемые в образцах формы спектра $1/f$ объяснены совокупным влиянием зарядовых ловушек (двухуровневых флуктуаторов - ДУФ), расположенных в толще диэлектрического слоя подложки и в интерфейсном слое металл-диэлектрик под островом транзистора [5].

Образец	Материал подложки	Размер (мкм ²)	C_Σ (аФ)	R_Σ (МОм)	δQ_{in} (10Гц) ($10^{-4} e/\text{Гц}^{1/2}$)
30С	Al ₂ O ₃ 200 нм	0.1×0.15	170	0.74	2.0
32В	Si	0.1×0.15	730	1.0	3.0
35F-1	SiO ₂ 200 нм	0.1×0.4	490	0.14	5.5
35F-2	SiO ₂ 600 нм	0.1×0.4	490	0.13	5.5
1SD	Al ₂ O ₃	0.1×0.15	600	0.4	1.5
2SA	Al ₂ O ₃	0.1×0.15	1600	0.08	3.0
3SF	SOG 100 нм	0.1×0.15	640	0.15	1.0÷1.5

Таблица 1. Параметры экспериментальных образцов. $T = 35$ мК.

Активные флуктуаторы, расположенные очень близко к острову транзистора, могут доминировать и тем самым искажать форму $1/f$ спектра [7,10-12]: в образце 1SD (табл. 1) при значениях тока < 20 пА спектр имел форму $1/f$, при токах $20 \text{ пА} < I < 100 \text{ пА}$ происходило переключение между спектрами $1/f$ и $1/f^2$, а в диапазоне токов $I \geq 200 \text{ пА}$ спектр шума имел форму $1/f^2$. Часть образцов и была изготовлена на тонких (~ 100 нм) диэлектрических пленках (1SD, 2SA - на Al₂O₃, 3SF – на SOG – spin on glass) с металлическими экранами под ними, которые изолировали остров транзистора и одновременно служили его затворами.

Измененная топология структуры не повлияла на уровень шума транзистора и форму его спектра и показала, что существенным является влияние флуктуаторов, расположенных лишь в непосредственной близости от острова транзистора (< 100 нм). Для транзисторов с измененной топологией к экранирующему затвору прикладывалось значительное постоянное напряжение $V_3 \sim 250$ мВ. Возросшее в диэлектрическом слое более чем на порядок электрическое поле ($E \approx V_3/d \approx 2.5$ кВ/см) активировало чувствительные к нему источники шума и уровень зарядового шума в транзисторе возрос в $2 \div 3$ раза ($f = 10$ Гц). Уровень шума в нечувствительной к заряду точке ($dV/dQ = 0$) оставался по-прежнему низким.

Последним их *Al* транзисторов исследован сверхпроводящий транзистор, содержащий в своей структуре два сверхпроводящих перехода, джозефсоновская энергия связи которых $E_{J,2}$, близка к зарядовой энергии острова E_C . Исследуемая экспериментальная структура представляла собой тонкопленочный *Al* транзистор с *Cr* резисторами, изготовленными методом последовательного напыления *in situ* под тремя различными углами. Резисторы реализовывали режим работы при высоком импедансе электродинамического окружения Z_e , $|Z_e| \gg R_Q$ [13], обеспечивающий когерентное туннелирование куперовских пар. Туннельные барьеры формировались традиционным способом окисления *Al* в атмосфере кислорода, *Cr* резисторы имели сопротивление 80 кОм при толщине пленки 6.5 нм, ширине 100 нм и длине 10 мкм, определенная из ВАХ транзистора величина $R_1 + R_2 \approx 40$ кОм, а $E_J = \Delta_{Al}(R_Q/2R) \approx 30$ мкэВ. Проведенный расчет [A13] порога чувствительности дал выражение $\delta Q = aC(k_B T R \Delta f)^{1/2}$ (Δf - полоса частот, $a = 2\sqrt{3} \approx 3.5$), подобное выражению для традиционного одноэлектронного электрометра $\delta Q^{SET} \approx 5.4 C_{min} (k_B T R \Delta f)^{1/2}$ ($C_{min} = \min(C_1, C_2)$). При типичных значениях $C \sim 2 \cdot 10^{-16}$ Ф, $R \sim 10^5$ Ом и $T \sim 50$ мК теоретические оценки близки, $\delta Q \approx \delta Q^{SET} \approx 5 \times 10^{-6}$ е/Гц^{1/2}. Полученное экспериментальное значение составило величину $\delta Q \approx (0.8 \div 1.0) \times 10^{-3}$ е/Гц^{1/2} ($f = 10$ Гц), в пределах диапазона для стандартных одноэлектронных транзисторов. Спектр шума имел характерную $1/f$ зависимость от частоты, величины уровня шума для различных значений $\eta(Q_0)$ указывали на зарядовую природу шума (рис. 2). В проведенных измерениях исследовался образец транзистора с достаточно малыми значениями E_J и E_C , что приводило к размытию флуктуациями вольтамперных и модуляционных характеристик транзистора и к ухудшению его шумовых характеристик. Использование сверхпроводящих материалов с существенно большей шириной щели Δ должно существенно улучшить чувствительность сверхпроводящего транзистора.

Исследование шумовых характеристик *Al* транзисторов различной топологии и расположенных на различных диэлектрических подложках позволяет утверждать, что уровень шума транзистора зависит как от его собственной топологии, так и от разновидности

диэлектрического слоя, контактирующего с его островом. Это также подтверждает наличие источников шума в диэлектрической подложке и их заметное влияние на уровень измеряемого шума транзистора [A10].

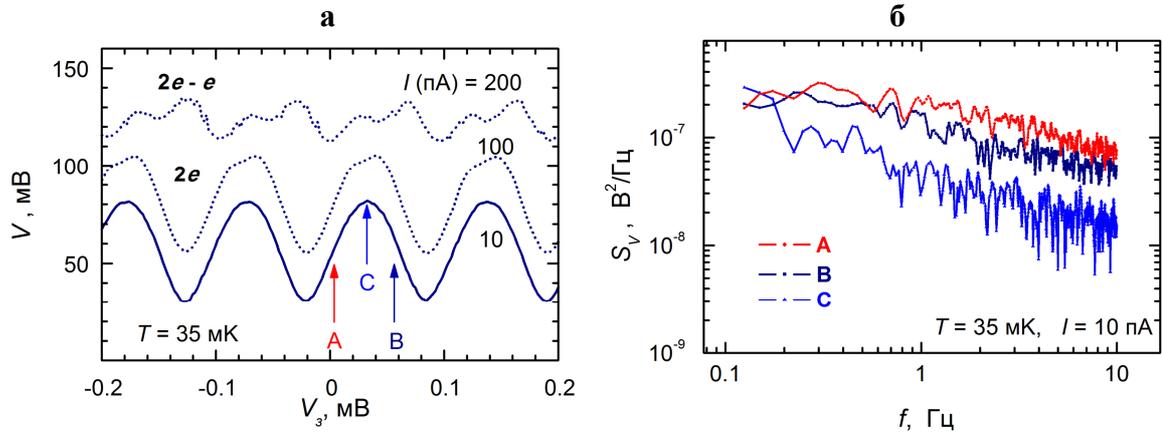


Рис. 2. **а** - модуляционные характеристики сверхпроводящего транзистора; **б** - спектр зарядового шума в различных рабочих точках (А, Б, С) кривой $V(V_g)$.

В следующем разделе главы представлено экспериментальное исследование металлического одноэлектронного транзистора с высокоомными ($R > R_Q$) пленочными резисторами из хрома, заменяющими традиционные туннельные барьеры между островом и внешними электродами транзистора. Идея основана на теоретической работе Назарова [14], в которой предсказаны одноэлектронные эффекты на небольшом металлическом острове, связанном с электронным резервуаром с помощью произвольного рассеивателя. Экспериментальные структуры формировались на кремниевой подложке с 200 нм буферным слоем Al_2O_3 методом теневого напыления через подвешенную маску [15]. Транзисторная структура состояла из Al острова (100×1000 нм²), затвора и двух Cr полосок (100×1000 нм²) толщиной 6÷8 нм и сопротивлением на квадрат $R_{кв} = 4$ кОм (рис. 3а). Полное асимптотическое сопротивление R образца составляло величину около 110 кОм.

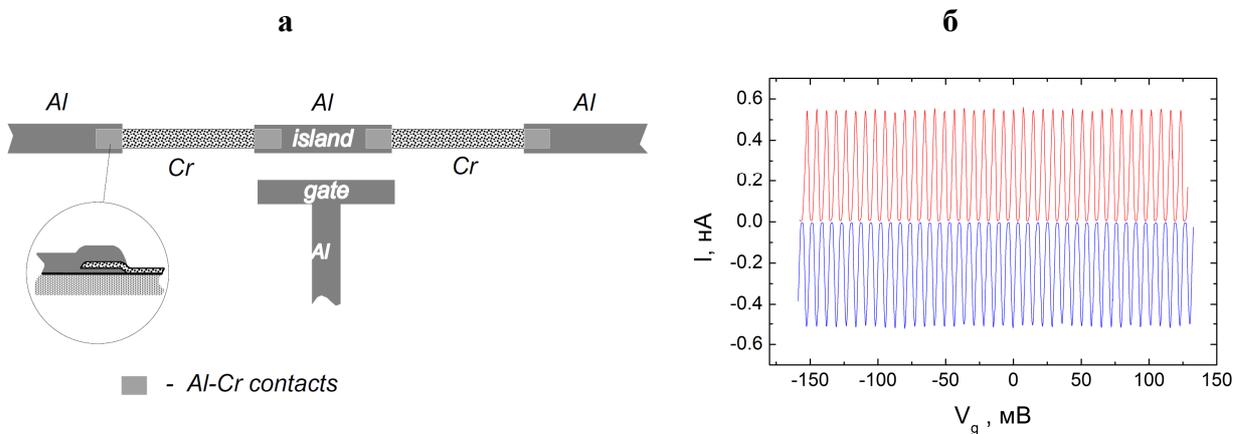


Рис. 3. **а** - структура Cr транзистора (ширина Cr полосок - 100 нм, длина - 1 мкм); **б** - модуляционные характеристики Cr транзистора. $T = 30$ мК.

ВАХ транзистора демонстрировали типичное одноэлектронное поведение устройства: сильный эффект блокады тока на ВАХ и модуляцию порога блокады затвором. Постоянная

амплитуда и стабильный период ($\Delta V_g \approx 7$ мВ) модуляционной кривой сохранялись в широком диапазоне измерений (рис. 3б). Форма спектра зарядового шума (рис. 4а) была близка к $1/f$, а его уровень определялся площадью контакта острова транзистора с подложкой [10, A17] и равнялся $5 \times 10^{-4} e/\text{Гц}^{1/2}$ ($I = 5$ пА, $f = 10$ Гц). Особенность *Cr* транзистора - значительное подавление тока сотуннелирования, которое происходит в одномерных массивах туннельных переходов с большим количеством переходов [16] или в устройствах с миниатюрными встроенными резисторами (*R*-SET [17]) из-за влияния диссипативного электромагнитного окружения [18]. Эта особенность дала возможность наблюдать модуляционные характеристики $V(V_g)$ транзистора при предельно малом транспортном токе ($I = 0.1, 0.2, \dots, 1$ пА) (рис. 4б).

Простота изготовления, стойкость к электрическому стрессу и сильное подавление тока сотуннелирования обеспечивают *Cr* транзистору возможность работы в качестве электрометра при предельно низких значениях транспортного тока, а также в качестве переключателя с малой утечкой в тонких экспериментах с мезоскопическими структурами, такими как одноэлектронные ловушки, насосы и т.д.

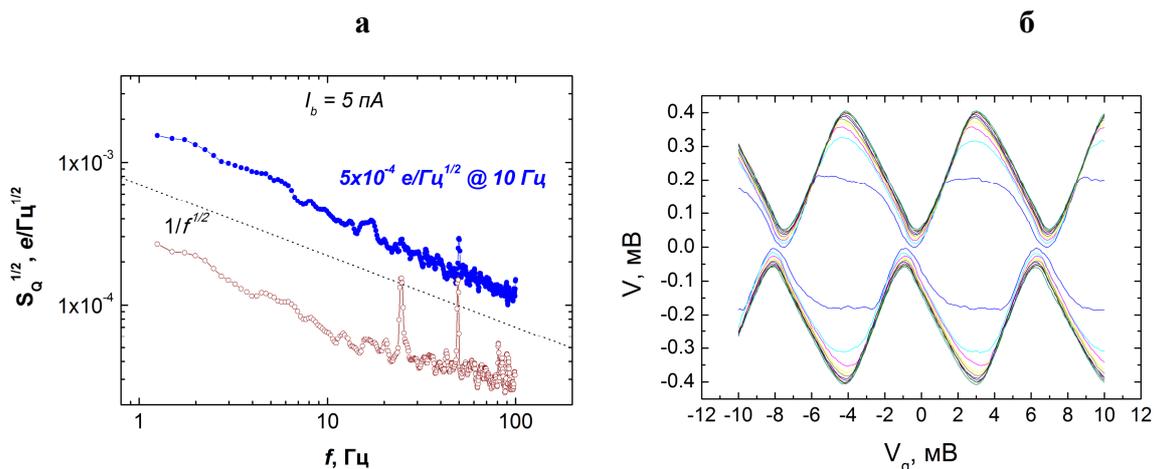


Рис. 4. **а** - спектр зарядового шума транзистора; **б** - модуляционные характеристики $V(V_g)$ при предельно малом транспортном токе I транзистора ($I = 0.1, 0.2, \dots, 1$ пА)

Далее в главе исследуются кремниевые одноэлектронные транзисторы. На основе кремния на изоляторе разработан оригинальный метод изготовления одноэлектронных транзисторов [19, A27, B2]. Верхний слой кремния легировался ионами мышьяка As^+ или фосфора P^+ , затем проводился быстрый термический отжиг пластины, что обеспечивало слою квазиметаллическую проводимость и неравномерное по толщине распределение примесей. Структуры транзисторов формировались в верхнем слое КНИ. Резистивные области, являющиеся аналогом туннельных переходов, формировались в локальных сужениях, отделяющих остров транзистора от подводящих электродов (рис. 5а). При 4.2 К транзисторы демонстрировали четкую модуляционную характеристику (рис. 5б). Более подробно характеристики кремниевых транзисторов исследованы при температуре 15 мК, включая измерения шумовых характеристик (рис. 6) в диапазоне частот $0.5 \div 250$ Гц [20].

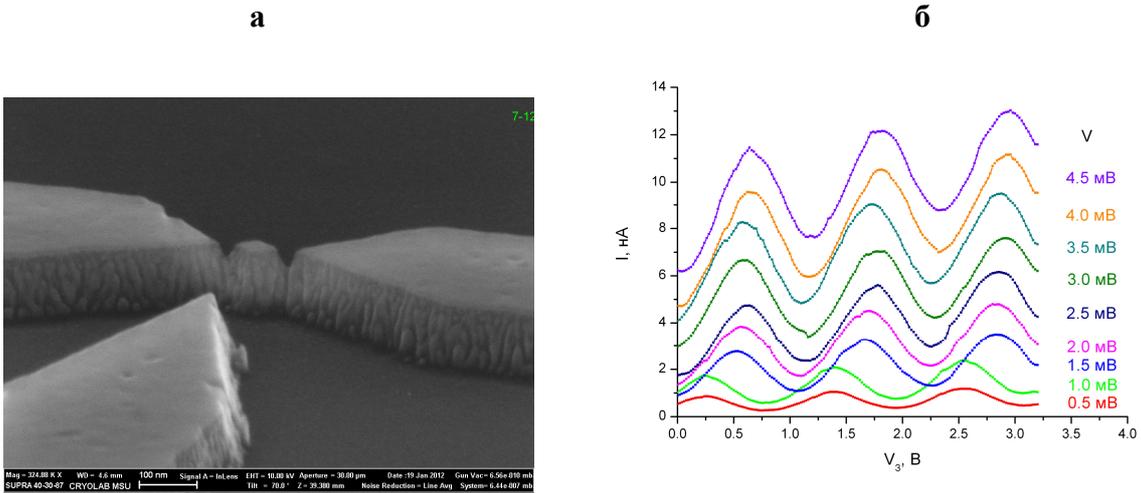


Рис. 5. **а** – микрофотография, **б** - модуляционные характеристики кремниевого одноэлектронного транзистора при различных напряжениях смещения. $T = 4.2$ К.

Зарядовый шум транзистора имел форму $1/f$ и доминировал над прочими источниками шума, его минимальная величина при токе $I \approx 0.5$ нА и напряжении $V_{cu} = -2$ мВ составила величину $1.6 \times 10^{-4} e/\text{Гц}^{1/2}$ ($f = 10$ Гц). В кремниевых транзисторах, где проводящий поверхностный слой КНИ обеспечивался легированием фосфором [A25], отмечен повышенный уровень шума в точках максимума тока, связанный, вероятнее всего, с флуктуациями проводимости переходов транзистора.

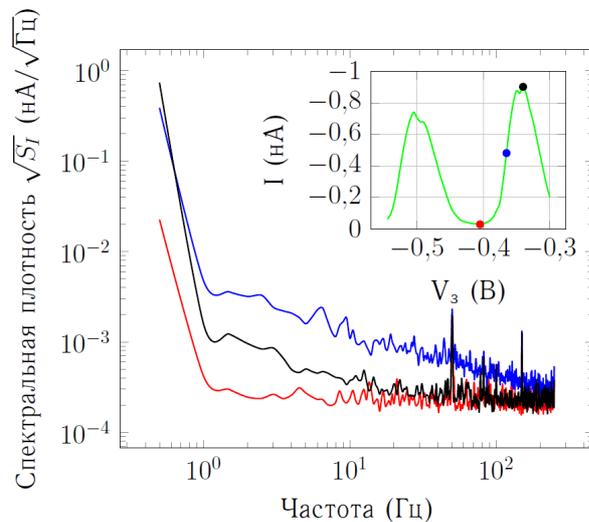


Рис. 6. Спектральная плотность флуктуаций кремниевого транзистора в различных точках модуляционной кривой. $V_{cu} = -2$ мВ, $T = 15$ мК.

Более высокая рабочая температура кремниевых одноэлектронных транзисторов, механическая прочностью, устойчивость к электрическим перегрузкам, а также возможность их интеграции с другими устройствами на основе традиционной кремниевой технологии, позволяют рассматривать их в качестве основных кандидатов для высокочувствительных полевых/зарядовых сенсоров для локальных и сканирующих зондовых систем с нанометровым пространственным разрешением [П1].

Глава заканчивается анализом результатов исследования одноатомных одноэлектронных транзисторов на основе примесных атомов мышьяка и фосфора в кремнии.

Представлен оригинальный и достаточно простой метод изготовления одноатомного транзистора из неравномерно легированного по глубине КНИ [A28-A29], островом транзистора являлся одиночный примесный атом (P , As), размещенный в сужении между транспортными и управляющими электродами (рис. 7а). Оценка его размера дала величину ~ 3 нм для атома мышьяка [22]. Из детальной диаграммы стабильности (рис. 7б) проведена оценка расстояния между одночастичными энергетическими уровнями (α , β , γ) примесного атома мышьяка: $\Delta E_{\alpha\beta} = 0.98$ мэВ, $\Delta E_{\beta\gamma} = 0.99$ мэВ, $\Delta E_{\gamma\delta} = 1.18$ мэВ, что согласуется с данными работы [21].

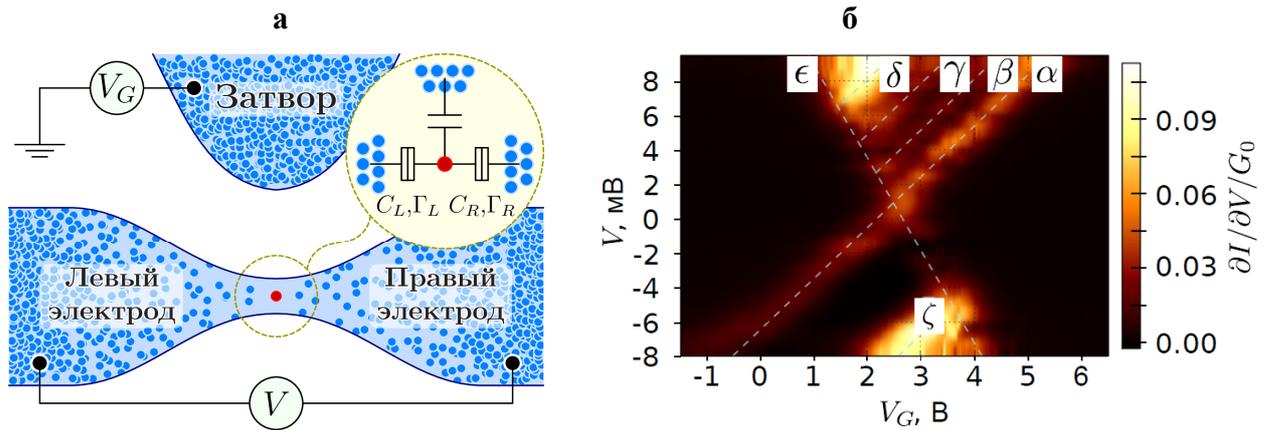


Рис. 7. а - схематическое изображение, б - токовая диаграмма стабильности транзистора.

Полученные результаты позволяют надеяться на создание в будущем одноэлектронных одноатомных сенсорных, а также вычислительных устройств и устройств памяти, работающих на новых физических принципах.

Глава 2 посвящена поиску и исследованию источников флуктуаций в одноэлектронных структурах и методов уменьшения их влияния на важные функциональные параметры разрабатываемых устройств.

Разработана и изготовлена одноэлектронная структура из двух близко расположенных транзисторов (расстояние между островами $\sim 150 \div 200$ нм). Исследовалась степень корреляции их шумовых сигналов, генерируемых источниками зарядового шума в подложке. Источники зарядового шума в барьерах экранированы друг от друга металлическими электродами и их шумовые сигналы некоррелированы.

Экспериментальные образцы (рис. 8а) изготовлены на кремниевых подложках, покрытых слоями Al_2O_3 (200 нм) и SiO_2 (600 нм), с использованием двух-теневого напыления Al через подвешенную Ge маску [A3]. Измерения выполнены в рефрижераторе растворения ($T = 30$ мК). Через транзисторы (рис. 8б) пропускались независимые токи $I^{(1,2)}$, выходные напряжения $V^{(1,2)}$ измерялись в полосе частот от 0 до 300 Гц. Измерения корреляции шумов проводились при максимальных значениях зарядовой чувствительности обоих транзисторов ($\eta^{(1)} \approx 510$ мкВ/ e , $\eta^{(2)} \approx 580$ мкВ/ e). Амплитуды спектров флуктуаций напряжения $S_{1,2}(\omega)$

были близки ($\eta^{(1)} \approx \eta^{(2)}$). Среднее значение амплитуды зарядового шума составило величину $Q_{ш} = V_{ш}/(\eta^{(1)}\eta^{(2)})^{1/2} \approx 5.5 \times 10^{-4} \text{ e}/\text{Гц}^{1/2}$ ($f = 10 \text{ Гц}$), типичную для Al транзисторов.

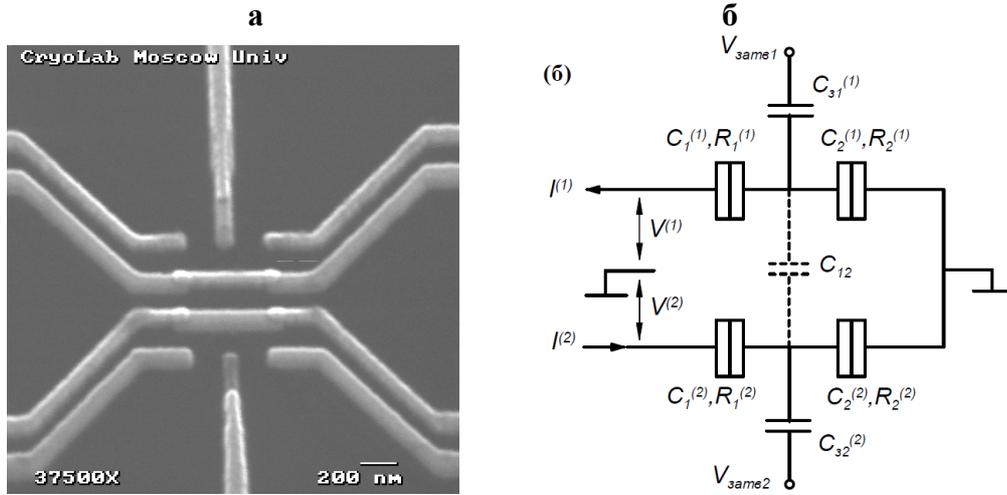


Рис. 8. **а** – фотография, **б** - электрическая схема двойного транзистора.

Корреляция шумовых сигналов транзисторов (рис. 9а) определялась по перекрестному спектру флуктуаций $S_{12}(\omega) \equiv |\langle V_{\omega}^{(1)} \times V_{\omega}^{(2)*} \rangle|$. Безразмерные коэффициенты корреляции $\gamma \equiv S_{12} / (S_1 \times S_2)^{1/2}$ для 3-х образцов структур в области частот 1÷10 Гц:

$\gamma_1 = 0.15 \pm 0.05$

подложка Al_2O_3

$\gamma_2 = 0.20 \pm 0.05$

подложка SiO_2

$\gamma_3 = 0.15 \pm 0.05$

подложка SiO_2

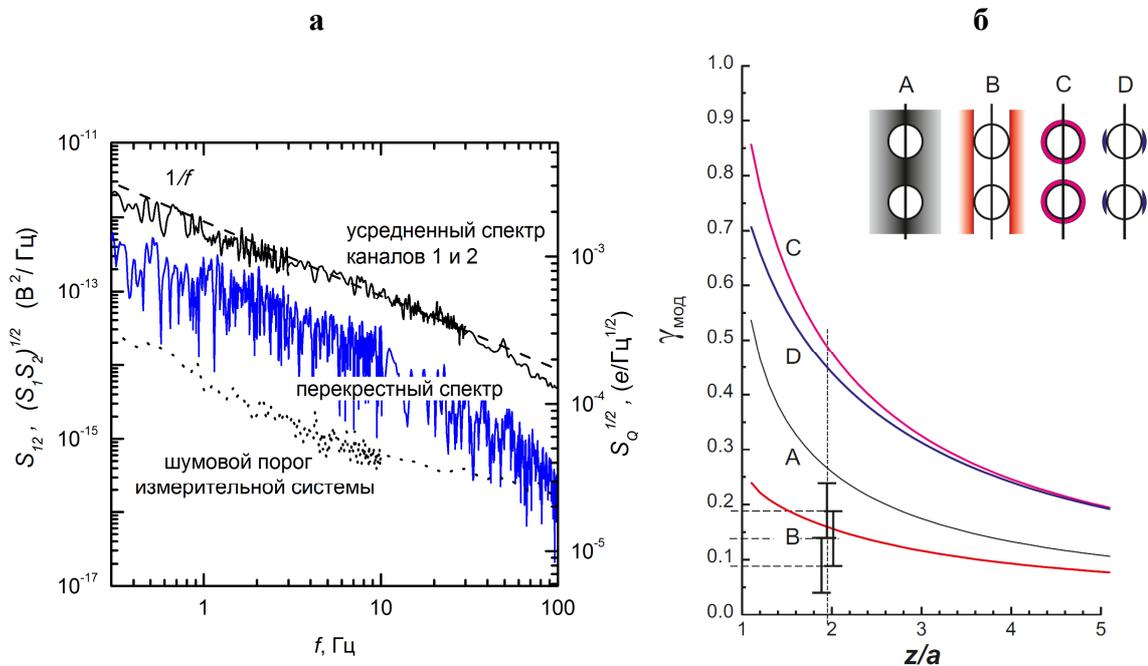


Рис. 9. **а** – спектры зарядового шума; **б** - зависимость $\gamma_{\text{мод}}$ от расстояния между двумя сферическими островами для различного распределения флуктуирующих источников в пространстве (A,B,C,D).

Для теоретических оценок $\gamma_{\text{мод}}$ построена модель [А3] - система из двух одинаковых проводящих и заземленных сфер радиуса a (рис. 9б), которые являлись аналогами островов

транзисторов. Аналогом флуктуирующей ловушки, расположенной в произвольной точке внешнего пространства r , принято возникновение (исчезновение) диполя с электрическим моментом $p = e \cdot \delta r$, где δr ($\delta r \ll a$) - смещение элементарного заряда e .

Показано, что однородное распределение зарядовых флуктуаторов во всем пространстве (рис. 9б, кривая А) или в пределах цилиндра $\rho = (r^2 - z^2)^{1/2} = a$ (рис. 9б, кривая В) дает коэффициент корреляции $\gamma_{mod} \approx 0.13 \div 0.22$, наиболее близкий к измеренным экспериментально. Установлено, что причина существенной доли шума поляризационного фонового заряда одноэлектронного транзистора связана с источниками зарядовых флуктуаций в подложке, что позже подтверждено в экспериментах других исследователей [24].

Глава продолжается исследованием характеристик одноэлектронного транзистора оригинальной стекловой геометрии. Изготовлены структуры с различной площадью контакта острова с подложкой: от транзистора с полностью изолированным островом до транзистора с островом, полностью расположенным на подложке (рис. 10а). Проведено изучение зависимости уровня зарядового шума транзисторов от площади контакта их островов с подложкой [25, А14] ($T = 30$ мК).

Величины C_S и R_S транзисторов находились в диапазоне $350 \div 450$ аФ и $200 \div 450$ кОм соответственно, при номинальных размерах нижнего перехода - 100×80 нм², верхнего - 60×40 нм². Измерения зарядового шума проводились при небольших транспортных токах в диапазоне $30 \div 70$ пА (табл. 2).

Транзистор, №	1	2	3	4
Площадь контакта острова с подложкой, в %% от полной площади острова	50	40	20	0
Уровень шума на частоте 10 Гц, $10^{-5} e/\text{Гц}^{1/2}$	25	14	11	7

Таблица 2. Зависимость зарядового шума транзисторов от площади контакта острова с подложкой - 200 нм Al_2O_3 .

В прямом эксперименте показано, что основной вклад в зарядовый шум одноэлектронного транзистора вносят источники шума, расположенные в диэлектрической подложке: уровень шума транзистора 4 с полностью изолированным островом в 3.5 раза меньше уровня шума транзистора 1, остров которого наполовину расположен на подложке.

На следующем этапе исследовались транзисторы с минимальной площадью контакта острова с подложкой - транзисторы 4-го варианта (рис. 10а), измерялись их уровни зарядового шума (табл. 3). Получено рекордное на момент исследований значение зарядовой чувствительности - $2.5 \times 10^{-5} e/\text{Гц}^{1/2}$.

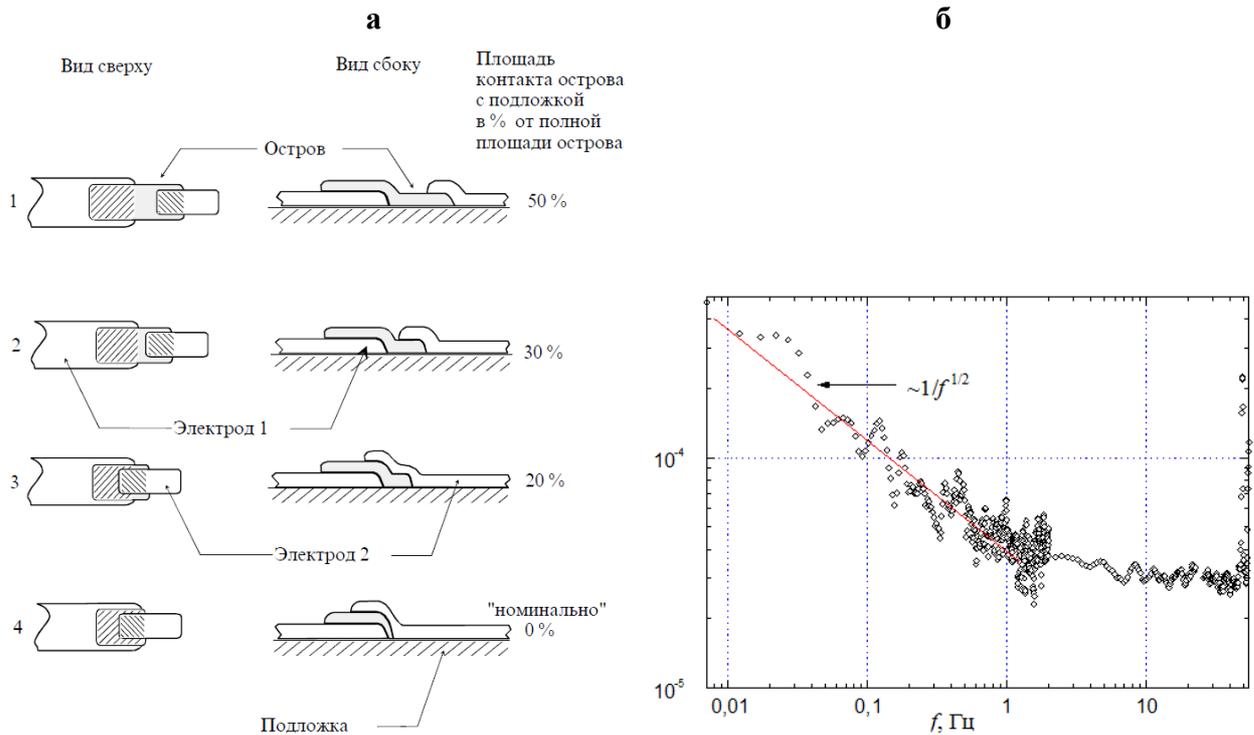


Рис. 10. **а** - схематическое изображение 4-х вариантов транзисторов с различной площадью контакта острова с подложкой; **б** - зависимость уровня зарядового шума $\delta Q(f)$ стекового транзистора образца А (табл. 3) от частоты ($I = 50$ пА).

Образец	А	В	С	Д
уровень шума на частоте 10 Гц, $10^{-5} e/\text{Гц}^{1/2}$	2.5	4	7	5

Таблица 3. Уровень зарядового шума транзисторов 4-го варианта (рис. 10), изготовленных на различных чипах ($I = 20 \div 30$ пА).

Отмечена характерная особенность стековых транзисторов: шумовой спектр (рис. 10б) имел зависимость $1/f$ только до частоты в $1 \div 2$ Гц, выше которой уровень шума не менялся. Такое низкое значение частоты, при которой исчезал $1/f$ шум, зарегистрировано впервые и объяснено изоляцией острова транзистора от источников зарядового шума, расположенных в диэлектрической подложке.

Исследовано экспериментально и теоретически anomальное поведение образца D, связанное с повышенным уровнем шума в точке максимума транспортного тока на модуляционной кривой - случаем, редко встречающимся на практике. Наблюдаемое поведение объяснено флуктуациям проводимости туннельных переходов.

В результате проведенных исследований показано, что достигнутый низкий уровень шума в стековых транзисторах обусловлен их конструкцией, в которой существенно ослаблено шумовое влияние подложки.

Глава заканчивается исследованием шунтированного стекового транзистора - оригинальной структуры одноэлектронного транзистора, с полностью изолированным от подложки островом (рис. 11а – этапы а-д) [A17-A18,Б1]. Шунтирующий туннельный переход

(рис. 11а – этап д) образовывался при наложении верхнего электрода на открытую торцевую область нижнего электрода (его второй части).

Характеристики интегральной структуры представляли собой суперпозицию характеристик одноэлектронного транзистора и одиночного туннельного перехода (рис. 11б). Уровень зарядового шума транзистора на характерной частоте 10 Гц при токе $I = 6$ пА составил величину $\delta Q_x \leq 8 \times 10^{-6} e/\Gamma\text{ц}^{1/2}$, которая близка к теоретическому пределу ($\sim 3 \times 10^{-6} e/\Gamma\text{ц}^{1/2}$) и более чем на порядок ниже лучших значений планарных одноэлектронных транзисторов.

При малых токах через транзистор ($I_{\text{Тр}} = I - I_{\text{ш}} \sim 5 \div 10$ пА, рис. 11б) уровень шума не зависел от напряжения на затворе транзистора, т.е. зарядовая компонента шума не являлась доминирующей, и основную роль играли другие источники шума. При больших значениях тока уровень шума возрастал до $4.2 \times 10^{-5} e/\Gamma\text{ц}^{1/2}$ ($I = 40$ пА), зависел от положения рабочей точки транзистора и имел зарядовую природу. Такое поведение объяснено активизацией зарядовых ловушек, расположенных в области естественного окисла алюминия, покрывающем поверхность образца и примыкающей к периметру его острова.

Использование стекowej конструкции одноэлектронного транзистора, позволило

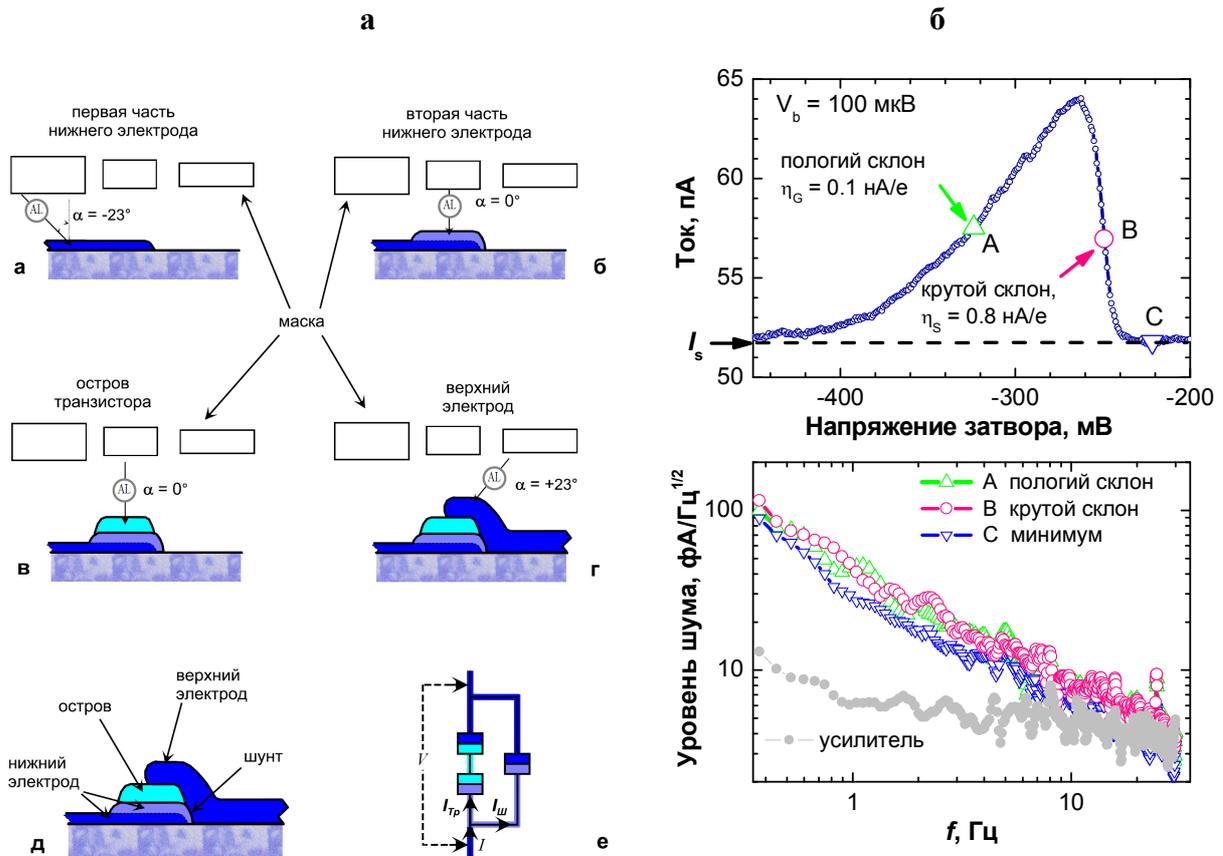


Рис. 11. **а** - последовательность изготовления (а, б, в, г), итоговая структура (д) и эквивалентная схема (е) шунтированного стекowej транзистора; **б** - модуляционная характеристика шунтированного стекowej транзистора с отмеченными рабочими точками (А,В,С) и шумовые спектры, измеренные в рабочих точках.

более чем на порядок по амплитуде (и на 3 порядка по мощности) уменьшить уровень его шума, что указывает на основной вклад ($\geq 90\%$) в интенсивность шума источников, расположенных в подложке (рис. 12б). Остаточный уровень шума, возможно, связан с источниками, расположенными в естественном окисле, покрывающем поверхность образца, и с флуктуациями проводимости туннельных переходов.

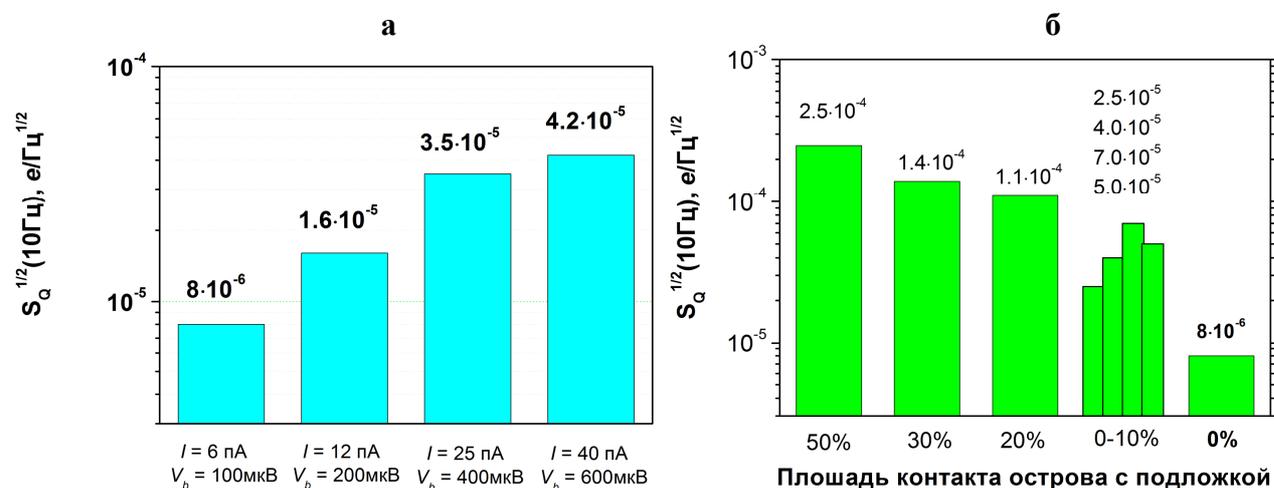


Рис. 12. **а** - уровень шума транзистора в зависимости от транспортного тока; **б** - уровень шума в структурах стечовой геометрии в зависимости от площади контакта острова с подложкой.

Глава 3 посвящена исследованию эффектов взаимного влияния во многоэлементных одноэлектронных структурах. Экспериментальный образец представлял собой систему близкорасположенных одноэлектронных транзисторов с $Al/AlO_x/Al$ туннельными переходами и изготавливался (рис. 13а) на кремниевой пластине с 800 нм слоем SiO_2 . Измерения выполнены в рефрижераторе растворения в области температур 35-200 мК.

В *образце 1* изучены эффекты взаимодействия одноэлектронного транзистора (электрометра) и связанного с ним емкостным образом другого одноэлектронного транзистора, впервые рассмотрен нестационарный случай, когда через исследуемую одноэлектронную структуру (транзистор) протекает ненулевой ток. В эксперименте использовались транзисторы *a* и *b* (табл. 4), транзистор *c* был закорочен и не влиял на работу транзисторов *a* и *b*.

Транзистор *a* вначале работал как электронный бокс, а транзистор *b* использовался в качестве электрометра с малым транспортным током 1 пА. Дискретные изменения заряда на острове транзистора *a* происходили в соответствии с изменением напряжения U_3^a на его затворе, а потенциал острова измерялся электрометром через емкость связи C^{ab} . Подобно результатам эксперимента Лафаржа и др. [26], было зарегистрировано размытие ступенчатой зависимости среднего числа электронов на острове $\langle n \rangle$ от напряжения на затворе при $I^a = 0$ (рис. 14а). Впервые исследованы неравновесные зарядовые состояния острова транзистора *a* (рис. 14а), через который протекал небольшой ток I^a (до 50 пА $\sim 0.2 e/R_{\Sigma}^a C_{\Sigma}^a$). “Средний”

заряд острова определялся средним количеством избыточных электронов на нем $\langle n^a \rangle = \sum n^a \sigma(n^a)$, где $\sigma(n)$ плотность вероятности n электронов на острове транзистора.

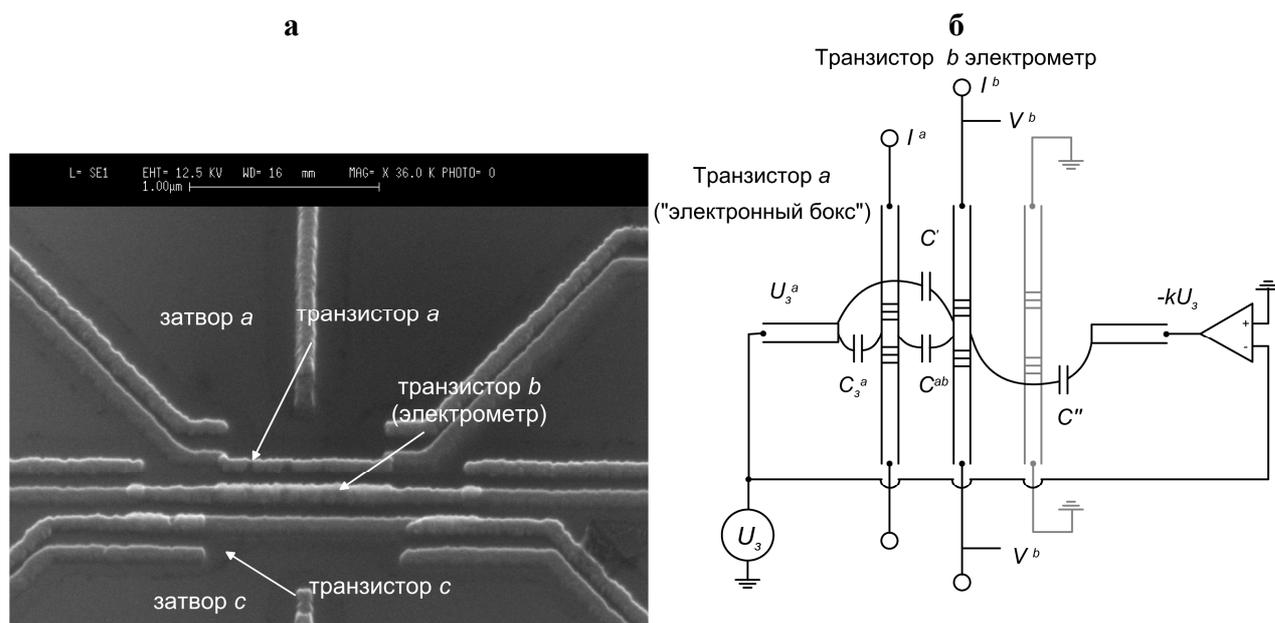


Рис. 13. **а** – микрофотография, **б** - схематическая диаграмма трех близкорасположенных одноэлектронных транзисторов.

Теоретические кривые (рис. 14а) и зависимости $\sigma(n^a)$ в случае малого и большого токов (рис. 14б) для параметров экспериментальной структуры рассчитаны на основании ортодоксальной теории [1].

	Транзистор а	Транзистор b
$C_\Sigma / a\Phi$	260	360
$C^{ab} / a\Phi$	36	
$R_1 + R_2 / \text{Мом}$	2.6	2.3
R_1 / R_2	1.24	1.51

Таблица 4. Электрические параметры транзисторов *a* и *b* образца 1.

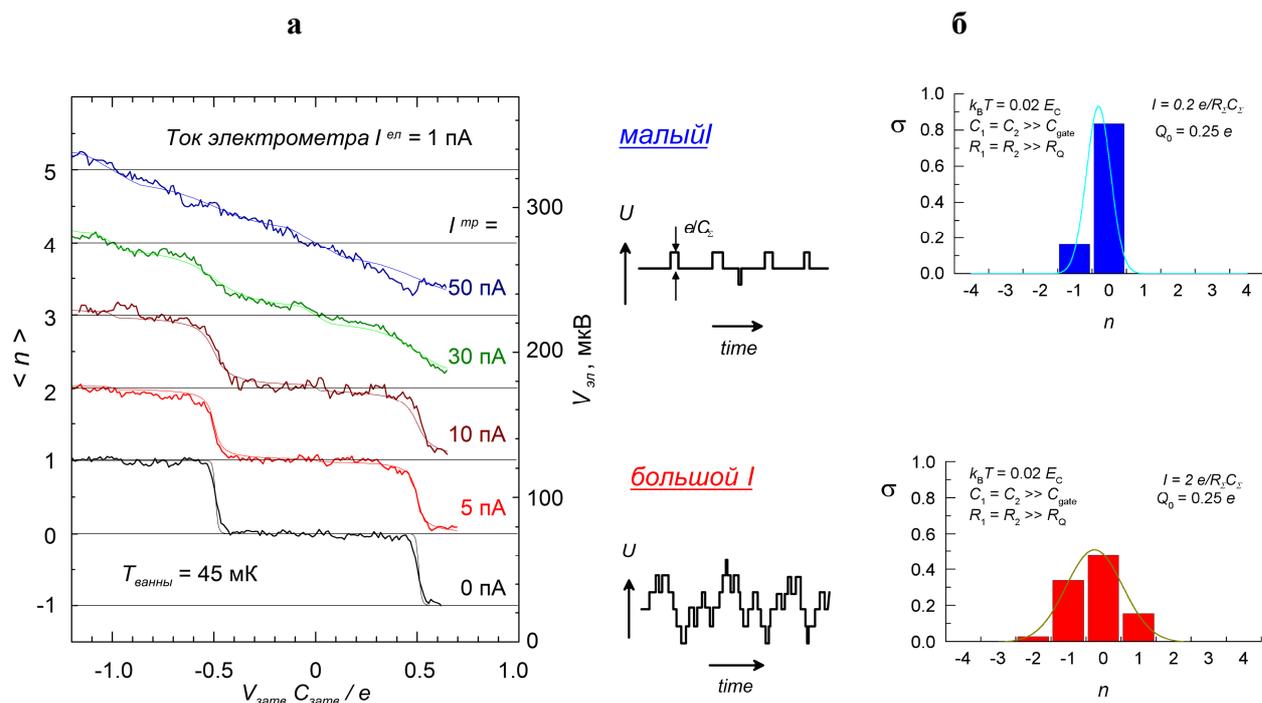


Рис. 14. **а** – неравновесные зарядовые состояния $\langle n^a \rangle$ острова транзистора a в зависимости от транспортного тока I^a ; **б** - плотность вероятности количества электронов $\sigma(n^a)$ на острове транзистора a в случае малого и большого токов.

Промоделирована динамика транзистора [A15] и вычислен спектр флуктуаций напряжения на его острове (рис. 15а) путем численного решения соответствующего нестационарного уравнения ортодоксальной теории [27].

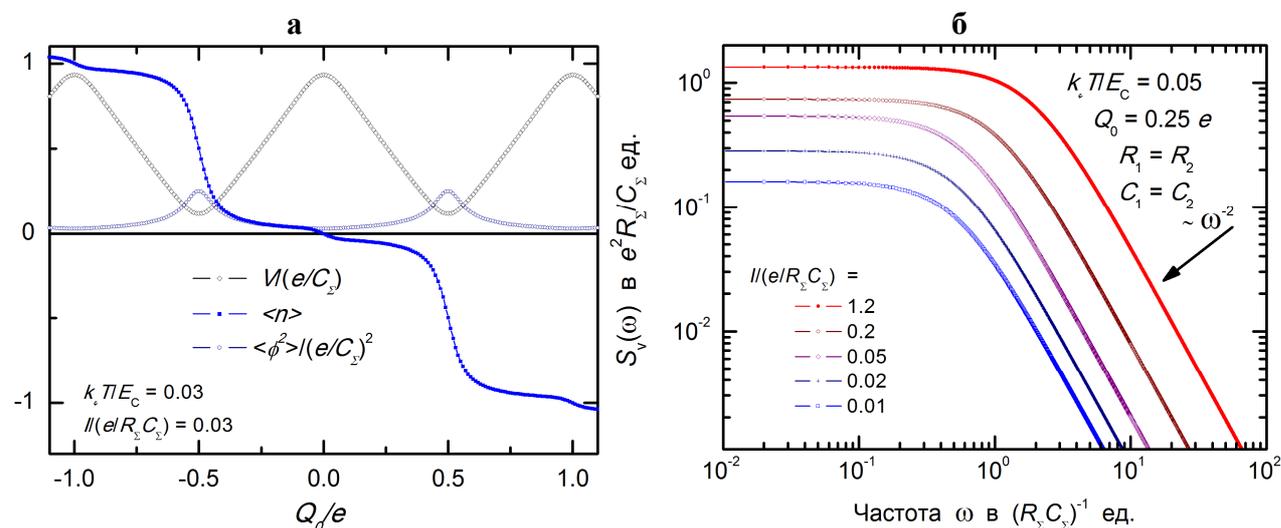


Рис. 15. **а** – модуляционная характеристика $V(Q_0)$, среднее количество электронов $\langle n \rangle$ и спектр шума на острове транзистора a ; **б** - спектры флуктуаций напряжения на острове транзистора a для различных значений транспортного тока I^a .

Показано, что с точки зрения минимального флуктуационного воздействия на измеряемый объект, предпочтительным является режим работы транзистора-электрометра с малым транспортным током ($I/(e R_{\Sigma} C_{\Sigma}) < 0.1$) и в области значений поляризационного заряда $-(n + 0.25) < Q_0/e < (0.25 + n)$, где амплитуда флуктуаций потенциала острова транзистора ϕ минимальна (рис. 15а).

В образце 2 исследовались тепловые и шумовые воздействия в системе близкорасположенных транзисторов. Образец состоял из трех различных по параметрам транзисторов (табл. 5). Транзистор *a* использовался как флуктуационный "генератор", производящий дробовой шум, транзистор *c* - как тепловой "генератор", а транзистор *b* - в качестве "детектора".

	Транзистор а (маленький)	Транзистор b (средний)	Транзистор с (большой)
$C_{\Sigma} / \text{аФ}$	320	620	2300
$(C_1 + C_3/2)/(C_2 + C_3/2)$	0.86	0.87	0.6
$R_1 + R_2 / \text{Мом}$	2.0	1.16	0.275
R_1/R_2	1.24	1.51	1.93

Таблица 5. Электрические параметры транзисторов *a*, *b* и *c* образца 2.

Регистрировались модуляционные кривые зависимости напряжения на электрметре V^b от напряжения на затворе транзистора *c* (U_3^c) при различных значениях тока I^a "генератора" флуктуаций ($T_{\text{ванны}} = 75 \text{ мК}$). Аналогичным образом проведены измерения с транзистором *c* - "генератором" тепла. Рисунки 16а и 17а показывают эффект транспортного тока транзисторов *a* и *c* на амплитуду модуляционных кривых электрметра *b*. Значения I^a и I^c подобраны так, чтобы соответствовать одинаковому рассеиваемому теплу в транзисторах *a* и *c*. Показано (рис. 16а и 17а), что, при одинаковой рассеиваемой мощности, ток I^a вызывал

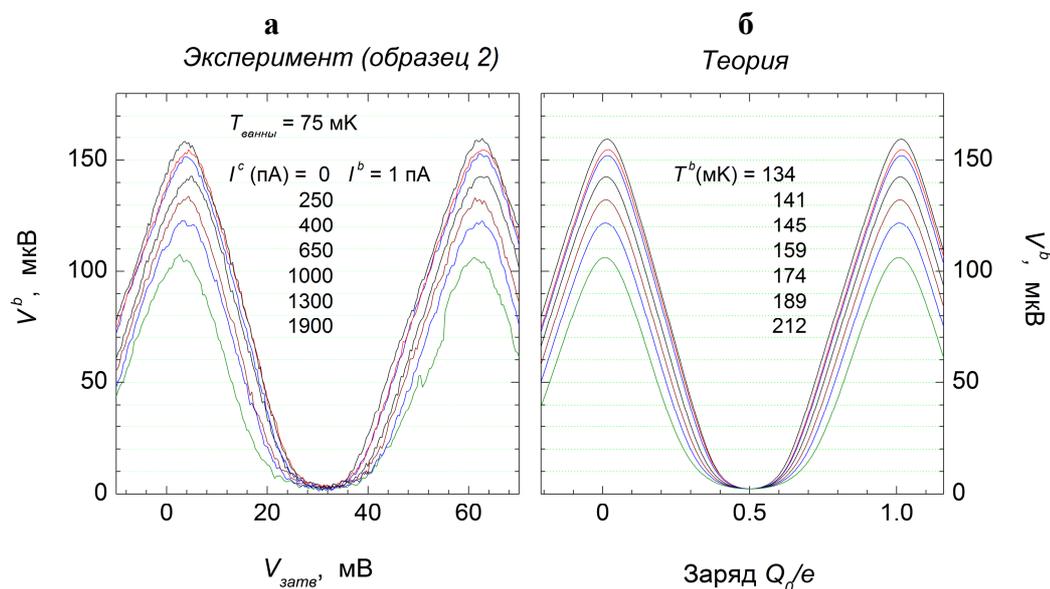


Рис. 16. **а** - экспериментальные модуляционные кривые электрметра *b* при различных токах через транзистор *c*; **б** - теоретические кривые при электронных температурах электрметра *b*, обеспечивающих максимальное совпадение с экспериментальными кривыми.

большее подавление амплитуды модуляции чем I^c .

Для определения степени нагрева электрметра построена соответствующая теоретическая модель [A15] в рамках ортодоксальной теории. На ее основании и использовании модели Рукаса и др. [28] при $I^b = 1 \text{ пА}$, $I^a = I^c = 0$ определена температура

электронного газа на острове электрометра b - $T_{el} = 134$ мК, а затем и константа электрон-фононного взаимодействия при таких температурах $\Sigma_{Al} \approx 0.23$ нВт/град⁵/мкм³.

На следующем этапе определены зависимости электронной температуры острова электрометра T_{el}^b и фононной температуры T_{ph} от полной мощности, рассеянной в транзисторе c (рис. 18).

Продemonстрировано, что в системе близко расположенных одноэлектронных транзисторов, существует флуктуационный и тепловой механизм взаимовлияния. Данные эксперимента и теоретические расчеты позволяют определить электронную и фононную температуры острова электрометра в результате теплового (0.03÷1.2 пВт) и флуктуационного воздействия транзисторов, удаленных от него на 150 нм.

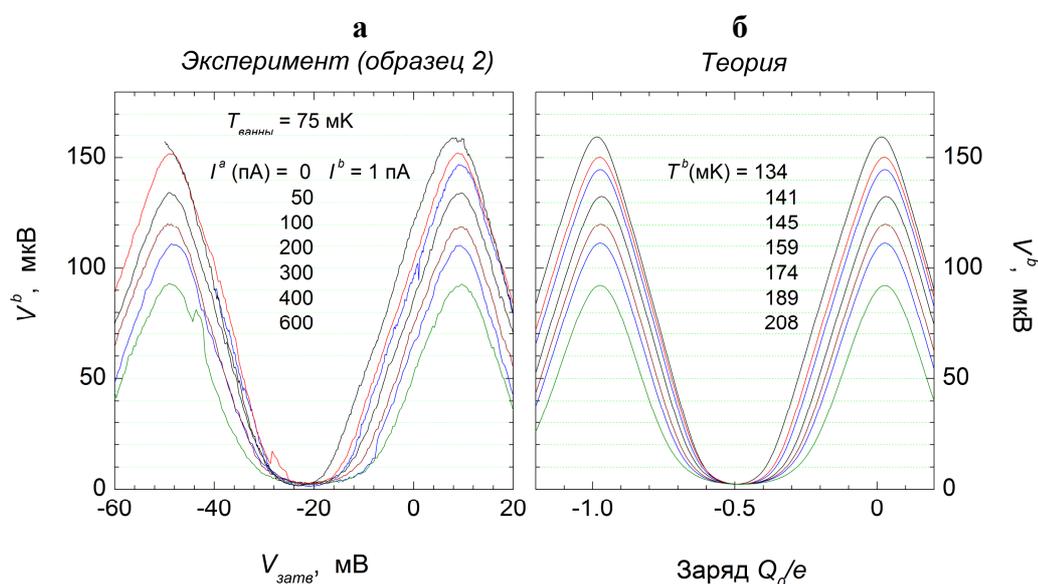


Рис. 17. **а** - экспериментальные модуляционные кривые электрометра b при различных токах через транзистор a ; **б** - теоретические кривые с электронными температурами острова электрометра b , взятыми из зависимости T^b от рассеиваемой мощности.

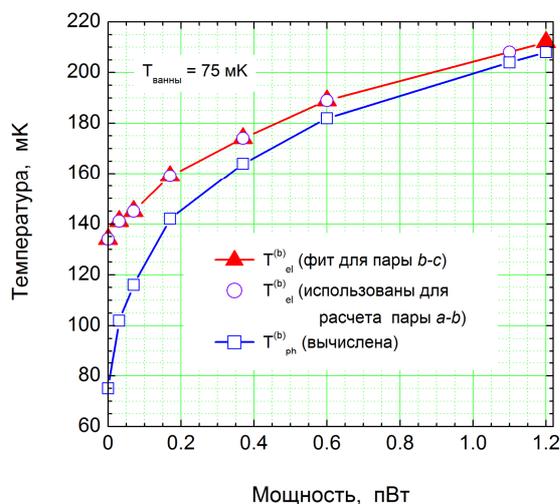


Рис. 18. Электронная T_{el}^b и фононная T_{ph}^b температуры острова электрометра в зависимости от мощности, рассеиваемой в соседнем транзисторе c .

Глава 4 посвящена изучению особенностей электронного транспорта в неоднородных одноэлектронных структурах. В первой части главы анализируется асимметричный

одноэлектронный транзистор, обладающий некоторыми преимуществами для создания элементов одноэлектронной логики [29] и в исследовании кубитов [30] в качестве считывающего устройства.

Асимметричный одноэлектронный транзистор изготовлен на основе упоминавшейся в главе 2 стековой технологии [A18]. В нем реализован и исследован оригинальный режим работы без постоянного напряжения смещения ($V = 0$), когда периодические токовые отклики на модуляционной кривой формируются в результате выпрямления входного гармонического или шумового сигнала. Подобный режим работы транзистора независимо реализован в работе [31]. В настоящей работе применены получисленные методы для моделирования процессов в транзисторе, позволившие подробно исследовать характеристики транзистора и сравнить их для случая постоянного и гармонического смещения.

Изготовление одноэлектронного транзистора с большой степенью асимметрии (≥ 10) туннельных переходов проводилось с использованием трёх последовательных напылений Al пленок через подвешенную маску и их окисления после каждого напыления (глава 2, раздел 2.2). На основе измерения вольтамперных и модуляционных характеристик [A23] определены параметры транзистора: $R_1/R_2 = 60 \text{ кОм}/0.6 \text{ Мом} = 1/10$, $C_1/C_2 = 2.6\text{фФ}/0.3\text{фФ} \approx 9$.

Отмечена особенность асимметричных транзисторов: при нулевом постоянном напряжении смещения через образец регистрировался ненулевой ток, меняющийся от положительного к отрицательному значению. Зависимость тока от заряда острова $I(Q)$ имела вид острых антисимметричных пиков в окрестности значений $Q \approx e/2 + en$ (отсутствие кулоновской блокады) (рис. 19а). Причина наблюдаемого явления - эффект усреднения переменной компоненты напряжения на нелинейности ВАХ, появляющейся в транзисторе с большой степенью асимметрии. Подобные пики тока наблюдались и в случае, когда переменное гармоническое напряжение $V = V_{ac} \sin \omega_{act}$ прикладывалось к транспортным электродам асимметричного транзистора. Амплитуда токовых пиков зависела от амплитуды шумового или переменного напряжения V_{ac} и от степени асимметрии туннельных переходов транзистора.

Для исследуемого экспериментального образца максимальная крутизна преобразования η составила величину $0.7 \text{ нА}/e$ при величине амплитуды переменного напряжения $V_{ac} = 20 \text{ мкВ}$ и постоянном среднем токе $I = 0$ (рис. 19б). Исследуемый транзистор в традиционном режиме постоянного смещения демонстрировал чувствительность близкую к $0.7 \text{ нА}/e$ при токе через транзистор $I = 8 \text{ пА}$. На основе теоретических расчетов и численного моделирования проведена оценка зависимости крутизны преобразования η от степени асимметрии C_1/C_2 для случаев использования переменного и постоянного напряжений смещения и проведено их сравнение (рис. 20).

Способность одноэлектронного транзистора к прямому обнаружению входного шума делает возможным его использование в качестве детектора уровня шума в измерительных линиях чувствительных систем, различных микро- и наноразмерных объектах и нанoeлектронных схемах. Чувствительность исследованного образца асимметричного транзистора составила величину $20 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$ в диапазоне частот $\Delta f = 0.1 - 100 \text{ кГц}$.

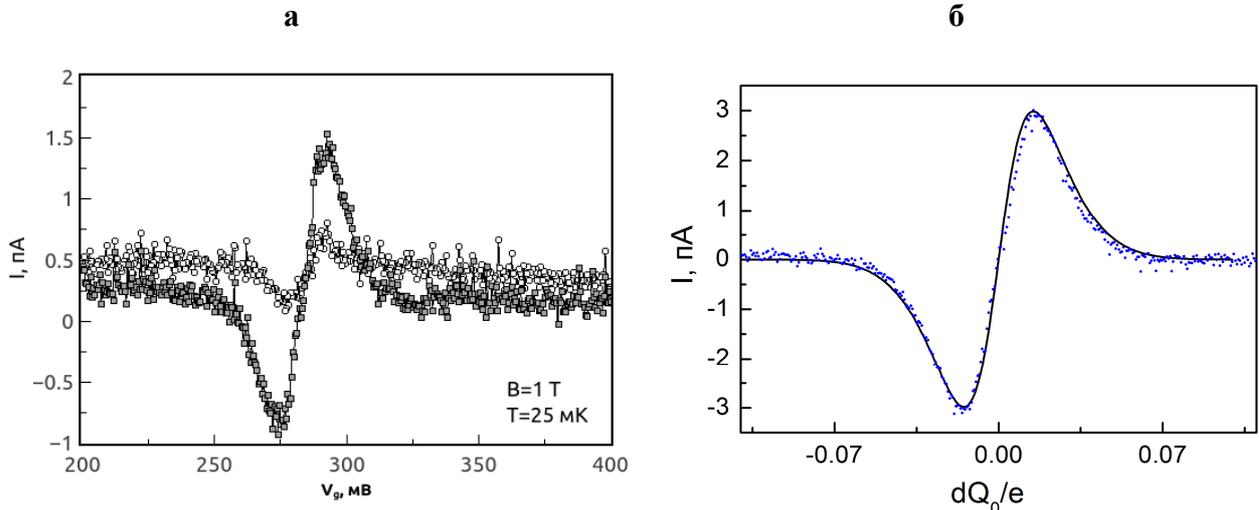


Рис. 19. - Токковый отклик асимметричного транзистора при воздействии шумового сигнала (а) и переменного сигнала (б). $V_{ac} = 20 \text{ мкВ}$, точки - экспериментальные значения, сплошная линия - результат моделирования.

Режим смещения асимметричного транзистора переменным или шумовым сигналом, при среднем токе через транзистор $I = 0$, может найти применение при проведении деликатных экспериментов с целью уменьшения обратного влияния электрометра на измеряемую объект или структуру.

Вторая часть главы посвящена исследованию особенностей одноэлектронного транспорта в хромовых гранулированных нанополосках - неоднородных двумерных массивах наноразмерных проводящих островов, разделенных туннельными переходами.

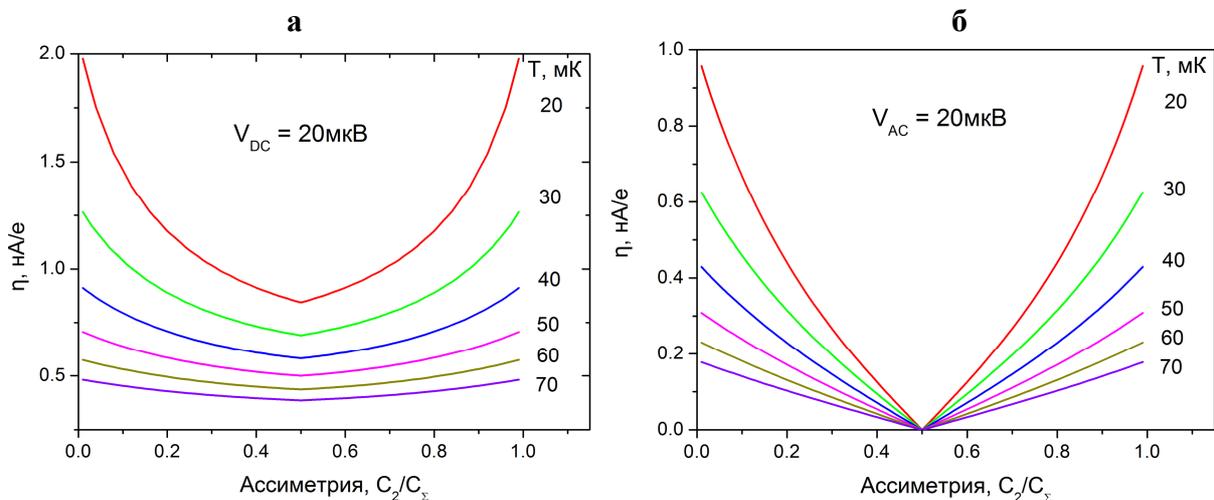


Рис. 20. Зависимость крутизны η преобразования асимметричного от степени асимметрии транзистора. а - смещение постоянным напряжением, б - смещение переменным напряжением.

Для их изготовления использовалась двух-теневая технология, с помощью которой формировались нанополоски и подводящие к ним алюминиевые электроды. Формирование *Cr* плёнок с требуемым сопротивлением проходило в процессе испарения хрома в атмосфере чистого кислорода при давлении $\sim 10^{-5}$ мБар. Гранулированная структура *Cr* пленок была подтверждена просвечивающей электронной микроскопией (ПЭМ). Характерный размер гранул, имеющих неправильную форму, находился в интервале 5 – 20 нм (рис. 21а), что соответствовало собственным емкостям гранул 0.4 - 1.4 аФ. Исследовались *Cr* полоски толщиной $6 \div 8$ нм, шириной 100 и 200 нм, длиной 200, 500 и 1000 нм и асимптотическим сопротивлением на квадрат $R_{\text{кв}}$ от 15 до 35 кОм. Параметры *Cr* полосок, определенные из эксперимента, представлены в таблице 6.

Длина, нм	$E_a/k_B, \text{K}$	$C, \text{аФ}$	$C_0, \text{аФ}$	$R_{\text{кв}}, \text{кОм}$	Λ
200	7.35	31.6	$0.7 \div 1.4$	35.5	6.7
500	6.31	36.8	$0.7 \div 1.4$	17	7.2
1000	6.03	38.5	$0.7 \div 1.4$	14.7	7.4

Таблица 6. Экспериментально определённые параметры *Cr* полосок (E_a - активационная энергия, C_0 и C - собственная и взаимная ёмкости гранул, Λ - радиус одноэлектронного солитона, выраженный в числе перекрываемых в каждую сторону островов массива).

При температуре $T = 25$ мК на ВАХ *Cr* полосок проявлялись участки кулоновской блокады туннельного тока величиной V_c от 1 до 4 мВ. Образцы демонстрировали необычное поведение: на участке кулоновской блокады на ВАХ при достижении $V = V_c^+$ наблюдался резкий переход в проводящую область, а после изменения направления сканирования на противоположное - переключение из проводящего состояния в блокадное, но при меньшем значении напряжения $V = V_c^-$ ($V_c^- < V_c^+$). Транспортный ток изменялся лавинообразно

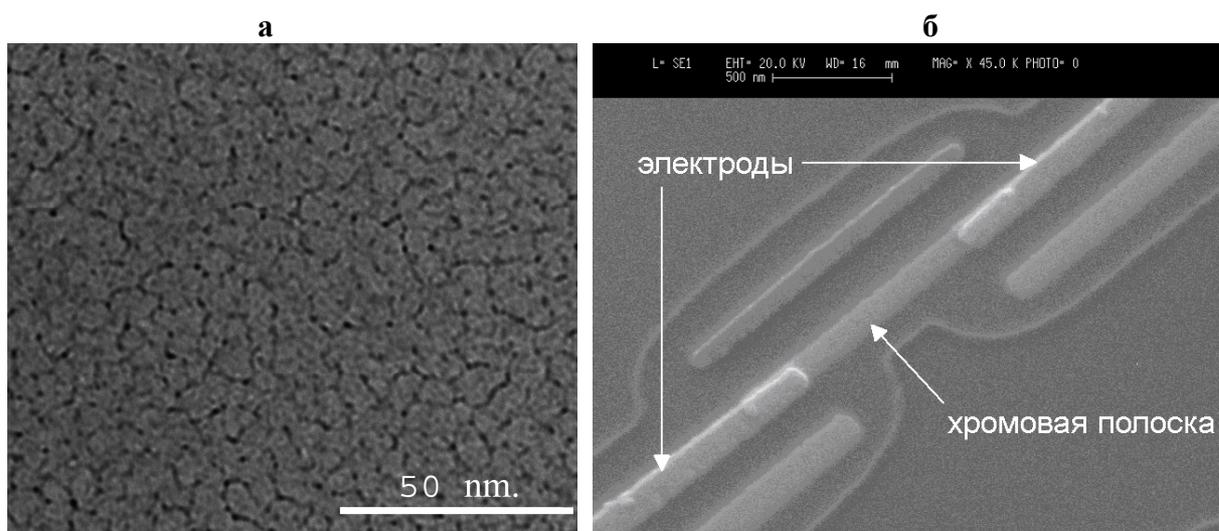


Рис. 21. **а** - ПЭМ фотография *Cr* плёнки; **б** - микрофотография *Cr* полоски с подводящими *Al* электродами.

на величину ΔI от нескольких единиц пикоампер до одного наноампера (рис. 22а). С уменьшением длины *Cr* полоски величины скачка тока уменьшались, но появлялись

многократные переключения из блокадного состояния в проводящее и обратно. Подобное поведение наблюдалось в квази-одномерных полосках нанокристаллов золота [32] и было объяснено влиянием движения зарядов в диэлектрической подложке. Это объяснение можно применить и к *Cr* полоскам. При увеличении температуры до 100 мК существенно уменьшался гистерезис и величина скачка тока, переключения становились многократными, при $T = 200$ мК оставались слабые многократные скачки тока с небольшой амплитудой, а при $T = 400$ мК и выше эффект исчезал (рис. 22б).

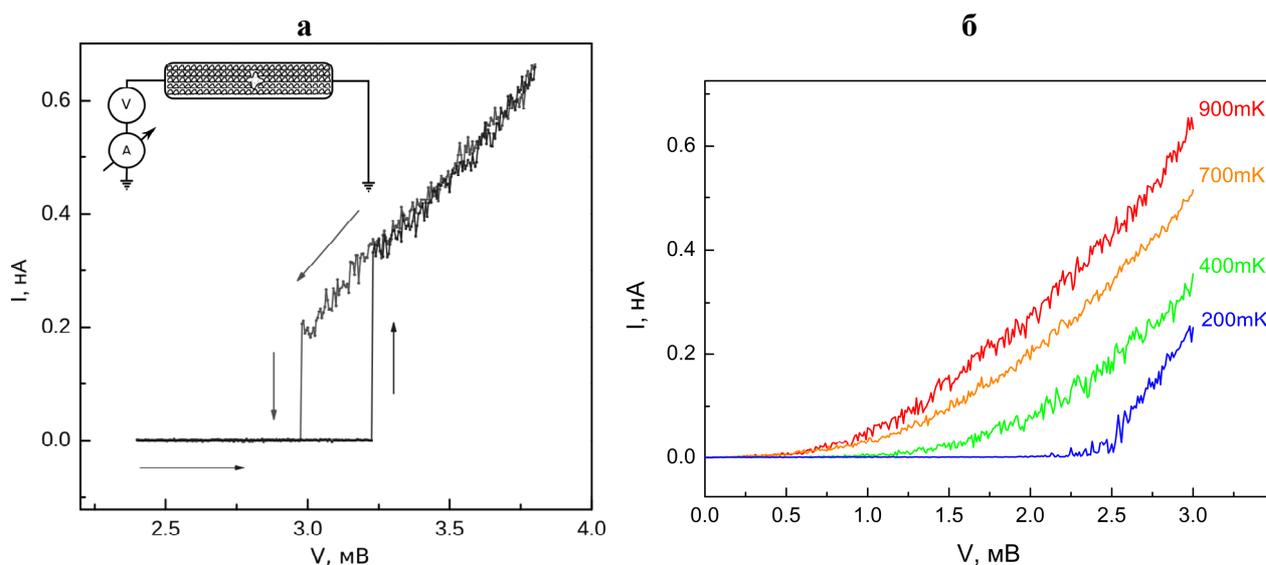


Рис. 22. **а** - примеры однократных переключений полоски длиной 1000 нм ($T = 25$ мК); **б** - ВАХ *Cr* полоски длиной 1000 нм при различных температурах.

Теоретический анализ показал [A26], что обнаруженные особенности связаны с влиянием локальных неоднородностей в *Cr* полосках, которые образуют локальные зарядовые ловушки, сильно влияющие на электронный транспорт. Радиус поляризации электрона в ловушке может быть оценен как $\Lambda = (C/C_0)^{1/2} \approx 7$ островов [33,34], что сравнимо с шириной полоски. Попадая в ловушку, электрон может полностью блокировать электронный транспорт в узкой полоске, а покидая ее и резко уменьшая порог блокады, может вызвать скачкообразное переключение в проводящее состояние.

Расчёты показали, что избыточный электрон, удерживаемый в ловушке, меняет форму профиля потенциальной энергии, приводя к появлению энергетического барьера в районе неоднородности и дополнительной потенциальной ямы между неоднородностью и левым краем массива (рис. 23б). Рассчитанный радиус экранирования Λ электрона в ловушке (≈ 7 элементарных ячеек) превышает полуширину массива (≈ 5 ячеек), что приводит к возникновению к блокированию электронного транспорта по всей ширине массива туннельных переходов. Численно рассчитаны ВАХ модельных структур, на которых присутствовала область резкого возрастания тока при переходе структуры из блокадного состояния в проводящее (рис. 24а). Для объяснения наблюдаемых особенностей (резкого изменения тока и гистерезиса), в модели дополнительно был учтен перегрев электронного

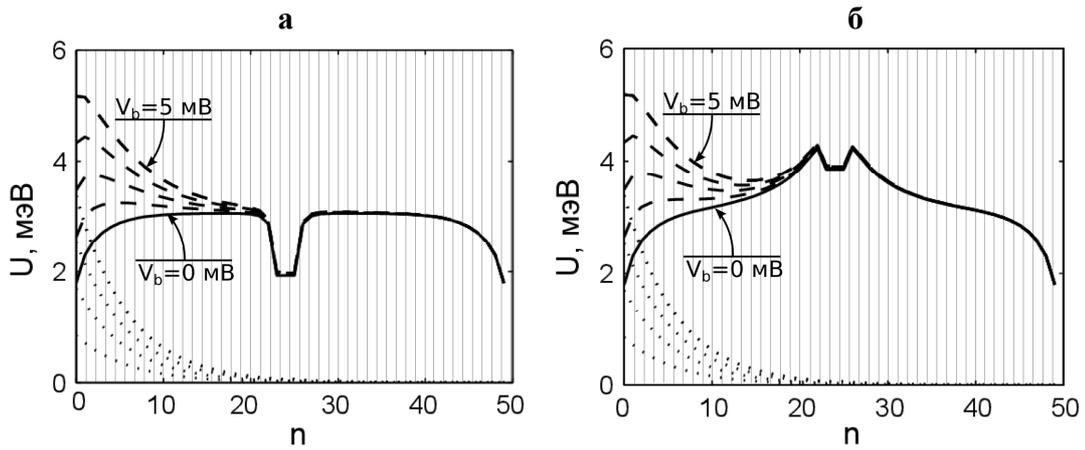


Рис. 23. Профиль потенциальной энергии массива проводящих гранул (продольное по центру сечения) с одной симметричной неоднородностью (**а** - без заряда в центре неоднородности, **б** - с одним избыточным электроном в центре неоднородности). Сплошная линия - собственная энергия электрона U_0 , линия из точек - $U^{ext} = eV_b$, пунктирная - $U_0 + U^{ext}$, n - длина массива в гранулах.

газа, возникающий в исследуемой гранулированной структуре при протекании тока при низких температурах. При переходе системы в проводящее состояние, увеличение температуры электронного газа приводит к дальнейшему росту темпов туннелирования между островами и к увеличению тока через систему - появление незначительного тока в системе приводит к его лавинообразному нарастанию и к дополнительному увеличению температуры электронного газа. Обратное переключение Cr полоски из проводящего в блокадное состояние возможно лишь при заметном уменьшении электронной температуры, т.е. при меньшем напряжении смещения $V = V_c^-$, что объясняет наблюдаемый гистерезис. Похожий эффект был ранее предсказан в теоретической работе [35]. Расчеты показали хорошее согласие с экспериментальными данными по величине скачка тока ΔI , по границам переключения и по резкости переключения из блокадного состояния в проводящее (рис. 24б).

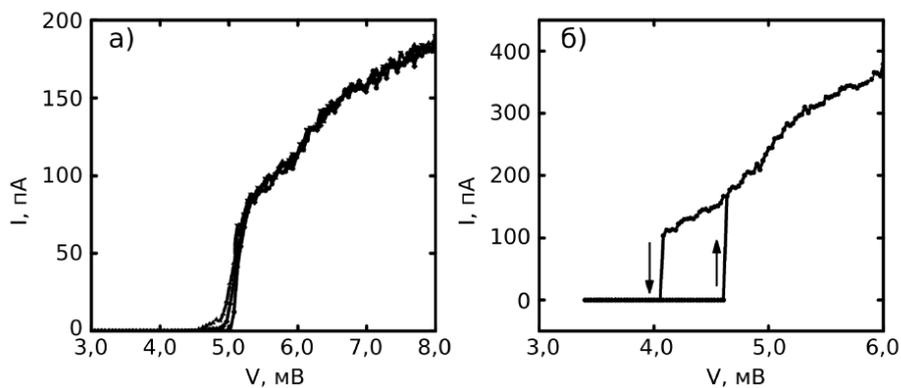


Рис. 24. Рассчитанные ВАХ массива размером 10×50 гранул с неоднородностью в центре: **а** - без учета разогрева электронной подсистемы в островах ($T = 5, 10$ и 15 мК); **б** - с учетом разогрева электронной подсистемы в островах.

Выбор формы и места расположения неоднородностей в массиве качественно не меняет картину наблюдаемого эффекта, а амплитуда скачка тока ближе к экспериментальной в случае наличия нескольких (≥ 3) неоднородностей.

ВАХ Cr полосок шириной 200 нм не содержали особенностей, наблюдавшихся у Cr полоски шириной 100 нм. Ширина 200 нм Cr полоски соответствует 20 островам и солитон, образованный захваченным электроном в потенциальной яме, не может блокировать транспорт по всей ширине Cr полоски, так как его радиус ($\lambda \approx 7$ островов) меньше полуширины Cr полоски. Для проверки предположения проведён численный расчёт, подтвердивший отсутствие особенностей, наблюдаемых у 100 нм полосок.

Глава 5 посвящена исследованию мезоскопических структур с помощью одноэлектронного транзистора. Первая часть главы посвящена экспериментальному исследованию прототипа одноэлектронной ячейки памяти - одноэлектронной ловушки (рис. 25).

Наноразмерные структуры изготавливались на кремниевой подложке с диэлектрическим подслоем Al_2O_3 толщиной 200 нм методом двух-теневого напыления Al [A7,A10]. Структуры состояли из Al островов и разделяющих их $Al/AlO_x/Al$ туннельных контактов малой площади (80×80 нм²) (рис. 25а), на основе которых сформированы одноэлектронная ловушка и считывающий электрометр (рис. 25). И использованная топология структуры позволила определить ее основные электрические параметры без привлечения топологических расчетов емкостей (табл. 7).

Параметр	R_1+R_2	R_1/R_2	C_{gt}	C_g	C_{int}	C_t	C_Σ	C	C_s
Значение	2 МОм	0.91	7.6 аФ	70 аФ	10 аФ	200 аФ	240 аФ	45 аФ	15 аФ

Таблица 7. Численные значения параметров экспериментальной структуры.

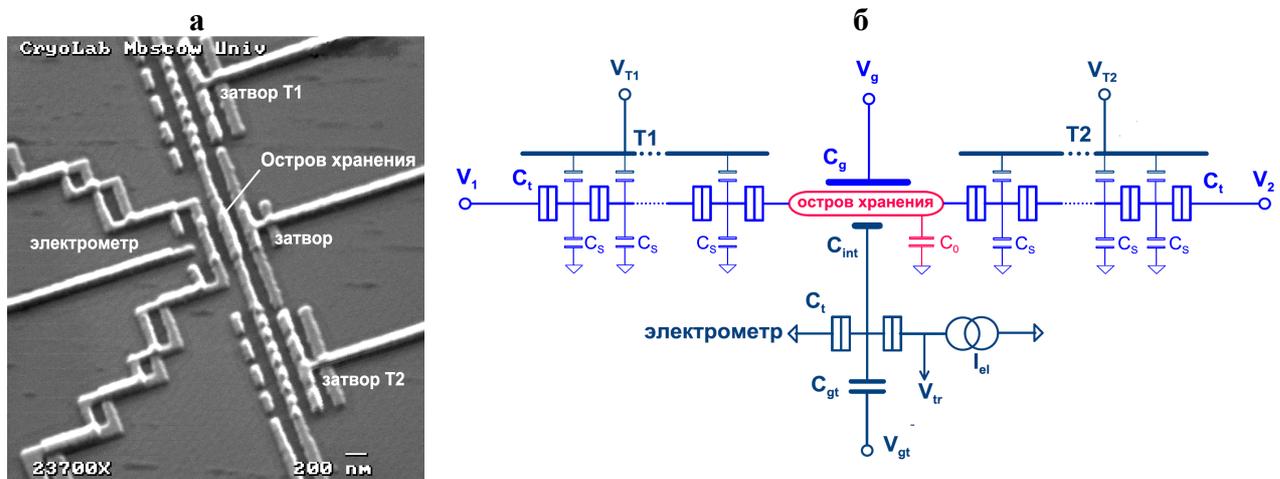


Рис. 25. а – микрофотография, б - электрическая схема одноэлектронной ловушки и считывающего электрометра.

Измерения электрических характеристик производились в рефрижераторе растворения при температурах от 35 до 200 мК. Образец был помещен в вакуумно плотную герметичную металлическую капсулу, а на электрических соединительных линиях от образца к измерительной аппаратуре были установлены кабельные коаксиальные СВЧ-фильтры [23], для измерений использовалась специальная малошумящая измерительная аппаратура.

С помощью одноэлектронного транзистора-электрометра исследованы зарядовые состояния ловушки. Единичный электрон, входящий на остров хранения ловушки приводил к изменению заряда острова транзистора на $\Delta Q = e/24$. Такой сигнал уверенно регистрировался электрометром на фоне собственных шумов (рис. 25а,б).

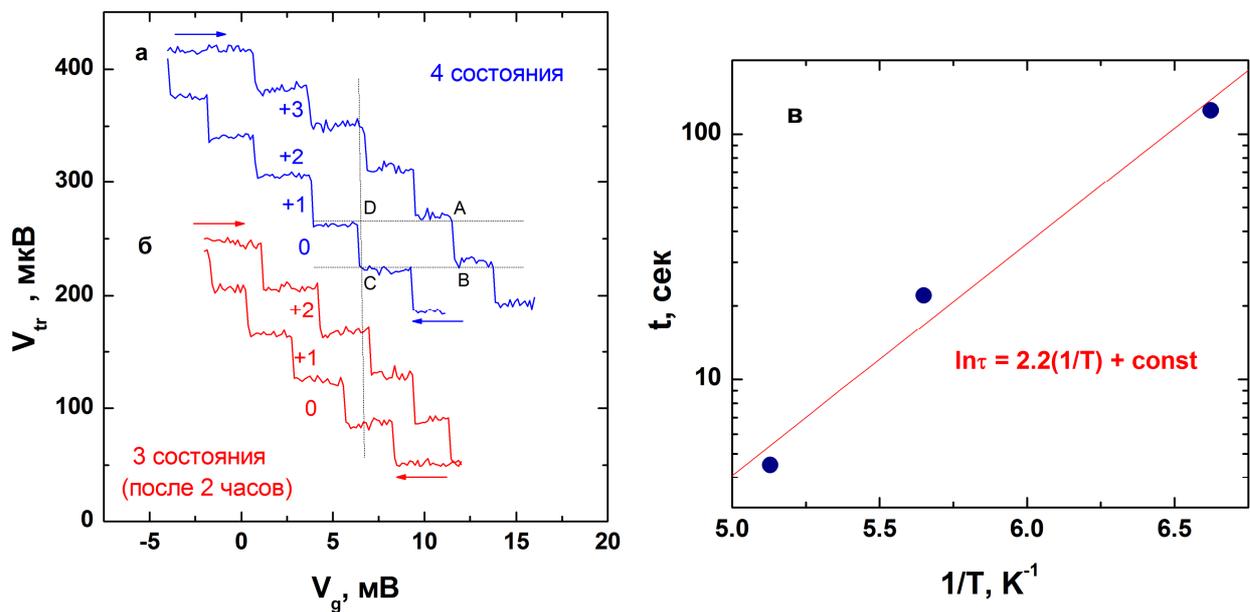


Рис. 25. а,б – отклик электрометра V_{tr} на вход и выход электронов на/с острова хранения, управляемые напряжением на затворе V_g ; в - зависимость среднего времени жизни зарядового состояния от температуры.

Рассмотрен ряд механизмов, приводящих к переключениям между зарядовыми состояниями ловушки и, тем самым, снижающих надежность хранения цифровой информации: *термическая активация туннелирования* [36], *макроскопическое квантовое туннелирование* [11], *туннелирование за счет фотонного возбуждения* [37], *случайный дрейф фонового эффективного заряда островов структуры*.

На основании измерений при температурах 151, 177 и 195 мК построена зависимость времени жизни зарядового состояния τ от температуры (рис. 25в). В случае термического механизма активации туннелирования электронов время жизни состояния [36]

$$\langle \tau \rangle \propto \exp(\Delta E/kT), \quad \text{где } \Delta E - \text{высота энергетического барьера.}$$

Оценка τ при температуре 35 мК экстраполяцией данных по экспериментальному графику $\tau(1/T)$ (рис. 25в) дала величину $\sim 10^{23}$ секунд, что много больше времени экспериментального наблюдения.

На основании работы [38, ch. 6, 217], в пределе низких температур ($eV \gg k_B T$) и малости собственных емкостей промежуточных островов C_0 ($C_0 \ll C_T$), получено выражение для времени жизни состояния, определяемое процессом сотуннелирования:

$$\tau^{(N)} = 2RC_T \left(\frac{2\pi R}{R_q} \right)^{N-1} \frac{(2N-1)!((N-1)!)^2}{N^{2N}} \left[\frac{e^2/2C_T}{eV} \right]^{2N-1} (C_T - \text{емкость, } N - \text{количество контактов}),$$

которое дало величину также много больше времени экспериментального наблюдения $\sim 10^{32}$ секунд.

Экспериментальное измерение времени жизни зарядового состояния одноэлектронной ловушки проведено для соседних зарядовых состояний острова памяти. Рабочая точка по V_g выбрана в середине петли гистерезиса, с помощью затворов T1 и T2 произведена подстройка ВАХ цепочек туннельных контактов в состояние, соответствующее максимальной величине кулоновской блокады. Поведение ловушки при 35 мК наблюдалось в течение более 17 часов [A5, A9]. Зарядовое состояние, сохранявшееся в течение более 8 часов, было считано электрометром, чтобы убедиться в его неизменности (рис. 26а).

Показано, что одним из доминирующих факторов, ограничивающих время жизни зарядового состояния одноэлектронной ловушки, является дрейф распределения эффективного фонового заряда островов одноэлектронных структур, что демонстрируют петли гистерезиса $V_{lr}(V_g)$ на рис. 25а,б, зарегистрированные электрометром с временным интервалом 2 часа, при оптимальной настройке затворов T1 и T2 (максимум ширины кулоновской блокады на ВАХ ловушки).

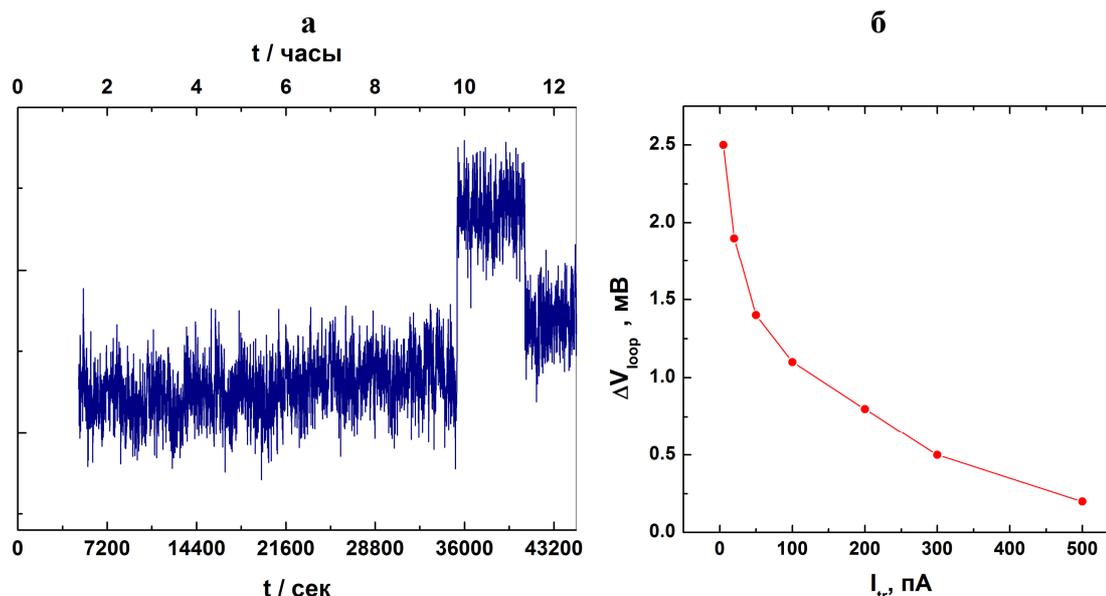


Рис. 26. а - эволюция во времени зарядового состояния одноэлектронной ловушки; б - зависимость ширины петли гистерезиса от тока через электрометр.

Вторым ограничивающим фактором является проникновение в экспериментальный образец высокоэнергетического СВЧ шума, отдельных квантов которого достаточно для

изменения заданного зарядового состояния. Для ослабления высокочастотного шума разрабатывались СВЧ фильтры на чипе [A2]. Третьим ограничивающим фактором является возбуждение ловушки и ее локального окружения (источники шума в подложке) транспортным током электрометра, что подтверждает эффект обратного влияния электрометра на измеряемый объект, рассмотренный в главе 3 (рис. 26б).

Вторая часть главы посвящена исследованию потенциального профиля двумерного газа в гетероструктурах GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As при наблюдении целочисленного квантового эффекта Холла, когда большие вихревые токи индуцируются в двумерной электронной системе при изменении магнитного поля [39-41, A22, B3]. Для выяснения локализации этих токов использованы одноэлектронные транзисторы, которые исполняли роль локальных потенциальных зондов и изготавливались непосредственно на поверхности образца в заданных областях. В разработанной измерительной системе каждый из транзисторов был включен в петлю обратной связи, которая поддерживала ток через транзистор постоянным, соответствующим рабочей точке с максимальным откликом (dI/dU_G) на внешнее воздействие. Потенциал транзистора сдвигался напряжением обратной связи U_{FB} (рис. 27а) таким образом, чтобы разность потенциалов между двумерным газом и одноэлектронным транзистором поддерживалась постоянной, а напряжение обратной связи U_{FB} отражало изменения потенциала двумерного газа в окрестности транзистора. Измерения проводились в рефрижераторе растворения ³He-⁴He при базовой температуре $T = 25$ мК. Холловские структуры размером 2×1 мм² сформированы жидкостным химическим травлением. Одноэлектронные транзисторы изготовлены из алюминия без паразитных теней (вставка на рис. 27б), острова имели круглую форму диаметром ~ 150 нм.

В областях плато зависимости $R_{xy}(B)$ зарегистрированы пики напряжения $U_{FB}(B)$, меняющие знак при изменении направления развертки магнитного поля и исчезающие при остановке развертки магнитного поля ($dB/dt = 0$) (рис. 27а). Показано, что наблюдаемые всплески напряжения порождаются вихревыми токами, индуцируемыми изменяющимся полем и текущими внутри области с двумерным газом. Одновременное сравнение сигналов обратной связи одноэлектронных транзисторов, расположенных в разных областях холловской структуры, позволило определить, что вихревые токи образуют единственную петлю по периметру холловской структуры, а не много небольших петель вокруг локальных неоднородностей. Обнаружено, что положение, форма и амплитуда регистрируемых пиков напряжения близки для всех транзисторов. Для изучения эффектов у границы двумерного газа одноэлектронный транзистор изготавливался на расстоянии 1 мкм от дополнительного бокового затвора, перекрывающего край холловской структуры на 10 мкм (рис. 27б). Двумерный газ вытеснялся из под бокового затвора увеличением амплитуды отрицательного

напряжения на нем и его граница перемещалась по направлению к одноэлектронному транзистору, что приводило к уменьшению амплитуды пиков $U_{FB}(B)$.

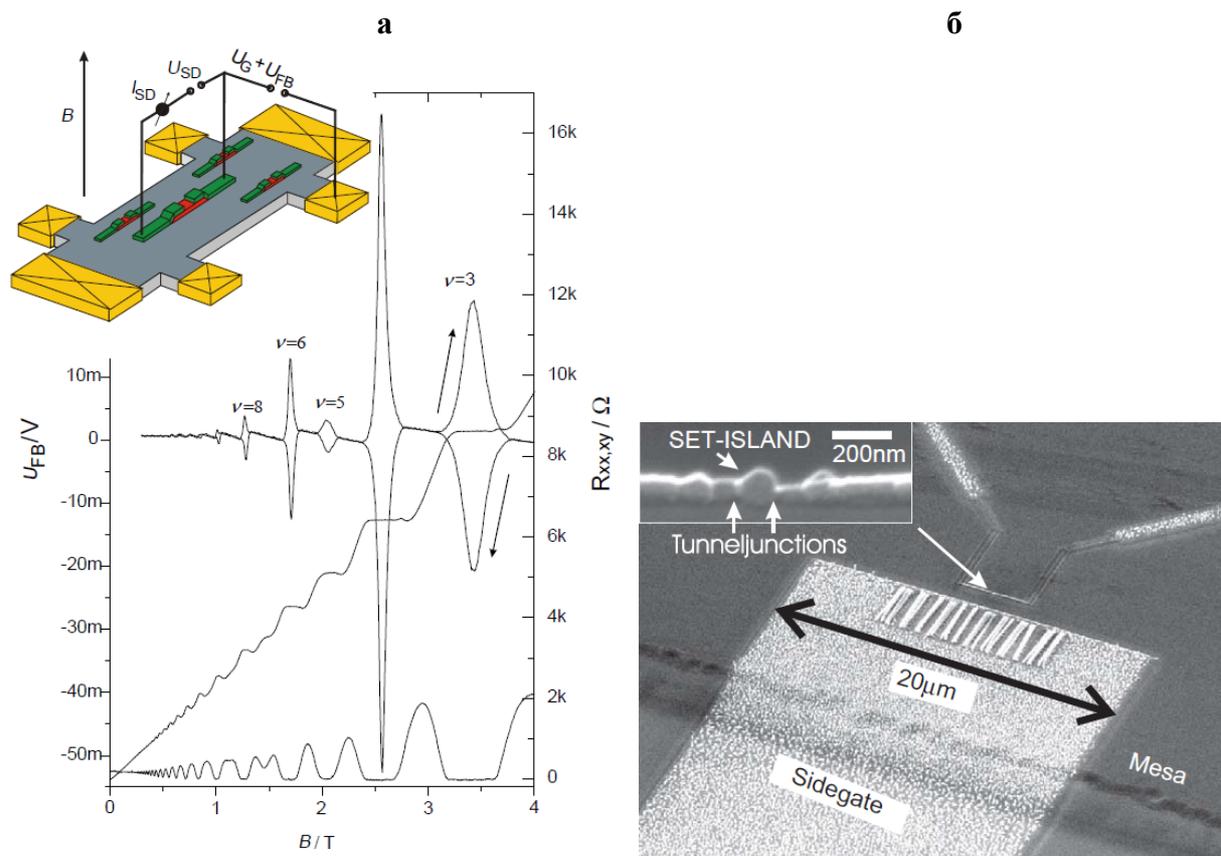


Рис. 27. **а** - напряжение обратной связи U_{FB} , холловское (R_{xy}) и продольное (R_{xx}) сопротивление при развертке магнитного поля ($dB/dt = 0.8\text{T/мин}$) в сторону увеличения и уменьшения ; **б** - микрофотография одноэлектронного транзистора, расположенного у края границы двумерного газа.

Измерения отклика транзистора в диапазоне $U_{FB}(B)$ от 0 до -1.3 В показали, что граница локализации вихревого тока проходит на расстоянии $\sim 1\text{ мкм}$ от границы двумерного газа.

В результате проведенных исследований показано, что большие вихревые токи индуцируются при изменении магнитного поля в областях плато холловского сопротивления при целочисленном квантовом эффекте Холла. 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 $\sim 1\text{ мкм}$ от границы двумерного газа.

В Заключение приводятся **основные результаты работы**:

1. Разработаны методы изготовления одноэлектронных транзисторов с $Al/AlO_x/Al$ туннельными различной геометрии и расположенных на различных диэлектрических подложках, исследованы их транспортные и шумовые характеристики. Показано что уровень их зарядового шума находится в интервале $10^{-3} \div 10^{-4} \text{ e/Гц}^{1/2}$, зависит от размеров острова

транзистора, увеличиваясь с его размером, и от разновидности диэлектрического слоя, контактирующего с островом.

2. Впервые экспериментально установлено, что низкочастотные зарядовые шумы одноэлектронных транзисторов, расположенных на расстоянии порядка размеров его острова (150-200 нм), имеют коэффициент корреляции $\sim 15-20\%$. На основе разработанной теоретической модели показано, что зарядовый уровень шума исследуемых образцов транзисторов при наблюдаемом и расчетном (13÷22 %) коэффициентах корреляции определяется в основном источниками шума в подложке.

3. Впервые экспериментально исследовано взаимное влияние одноэлектронных близкорасположенных транзисторов (на расстоянии порядка размера его острова - 150-200 нм). Доказано существование флуктуационного и теплового механизмов их взаимодействия. Разработана теоретическая модель, позволяющая рассчитать характеристики электрометра, электронную и фононную температуру его острова в результате теплового и флуктуационного воздействия транзисторов, удаленных от него на 150 нм, а также константу электрон-фононного взаимодействия $\Sigma_{Al} = 0.23 \text{ нВт/град}^5/\text{мкм}^3$.

4. Впервые предложена и продемонстрирована стековая геометрия одноэлектронного транзистора, позволяющая значительно уменьшить влияние источников шума в диэлектрической подложке. Экспериментально показано, что с уменьшением площади контакта острова транзистора с подложкой уменьшается низкочастотный ($f < 100 \text{ Гц}$) зарядовый $1/f$ шум устройства. Получено на порядок меньшее значение уровня шума для одноэлектронных транзисторов на низких частотах (10 Гц) — $2.5 \times 10^{-5} e/\text{Гц}^{1/2}$.

5. Впервые найдена и реализована геометрия транзистора, позволяющая практически исключить шумовое воздействие подложки. Получено предельно низкое значение зарядового шума одноэлектронного транзистора на низких частотах (10 Гц) - $8 \times 10^{-6} e/\text{Гц}^{1/2}$ ($30 h$), близкое к теоретическому пределу устройства - $3 \times 10^{-6} e/\text{Гц}^{1/2}$ ($3 h$).

6. Впервые разработан, изготовлен и исследован одноэлектронный транзистор с резистивными элементами на основе тонких (6÷8 нм) пленок хрома вместо традиционных туннельных переходов. Разработан оригинальный метод формирования пленочных резистивных структур с сопротивлением на квадрат от 1 кОм до 30 кОм. Продемонстрирована возможность наблюдения модуляционных характеристик одноэлектронного транзистора при предельно низких значениях транспортного тока $I = 200 \text{ фА}$.

7. Экспериментально реализован, аналитически и численно промоделирован оригинальный режим работы асимметричного Al одноэлектронного транзистора при нулевом постоянном смещении в присутствии накачки переменным или шумовым сигналом. Чувствительность

транзистора к переменному входному сигналу составила величину $20 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$ в диапазоне частот $\Delta f = 0.1 - 100 \text{ кГц}$.

8. Разработан оригинальный метод изготовления кремниевых одноэлектронных транзисторов на основе неравномерно легированного КНИ, позволяющий существенно уменьшить размеры элементов структуры транзисторов и повысить рабочую температуру устройств. Впервые подробно исследованы транспортные и шумовые характеристики кремниевых одноэлектронных транзисторов из неравномерно легированного КНИ в диапазоне температур $15 \text{ мК} - 4.2 \text{ К}$, достигнут уровень зарядового шума $1.5 \times 10^{-4} \text{ e/Гц}^{1/2}$ (10 Гц).

9. Впервые в двумерных неоднородных массивах изолированных гранул на основе тонких ($6 \div 8 \text{ нм}$) пленок хрома на вольтамперной характеристике экспериментально обнаружено и теоретически исследовано явление скачкообразного изменения тока ($0.05 \div 1 \text{ нА}$) в области кулоновской блокады с характерным гистерезисом.

10. Разработан, изготовлен и исследован прототип одноэлектронной ячейки памяти, состоящей из одноэлектронной ловушки на основе 9 туннельных $\text{Al}/\text{AlO}_x/\text{Al}$ переходов и считывающего электрометра, с временем хранения электрона более 8 часов. Проведены исследования зарядовых состояний одноэлектронной ловушки и причин, определяющих время их жизни – термической активации, процесса сотуннелирования, дрейфа фонового заряда, обратного влияния считывающего электрометра.

11. Проведены оригинальные исследования, связанные с разработкой, изготовлением локальных сенсоров на базе одноэлектронного транзистора на поверхности гетероструктуры $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ и измерением с их помощью локальных потенциалов образца в условиях квантового эффекта Холла.

10. Разработан оригинальный метод изготовления одноатомных одноэлектронных транзисторов на основе единичных примесных атомов мышьяка и фосфора в кремнии, исследованы их характеристики. На основе измеренных диаграмм стабильности транзистора определены основные параметры: величина характерной зарядовой энергии ($E_C = 16 \text{ мэВ}$), расстояния между одночастичными энергетическими уровнями (0.98 мэВ , 0.99 мэВ , 1.18 мэВ), собственная емкость зарядового центра ($C \approx 5 \times 10^{-18} \text{ Ф}$).

Список работ по теме диссертации в журналах Scopus, WoS, RSCI

- A1. Krupenin V.A., Lotkhov S.V., Vyshenskii S.V., Photo and electron-beam lithography sharing common stencil. // *Journal of vacuum science & technology B* 11 (6) 2132 (1993).
- A2. Крупенин В.А., А.Б.Паволоцкий, И.Г.Прохорова, О.В.Снигирев, Технология изготовления и характеристики диэлектрических слоев тонкопленочных RC фильтров для джозефсоновских и одноэлектронных устройств // *Письма в ЖТФ* 2, 19 (1996).
V.A. Krupenin, A.B. Pavolotskii, I.G. Prokhorova, O.V. Snigirev. Technology of manufacturing and characteristics of dielectrical layers of thin-film RC filters for Josephson and monoelectron devices. // *Pisma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki* 22(2), 19 (1996).
- A3. A.B. Zorin, F.-J. Ahlers, J. Niemeyer, T. Weimann, H. Wolf, S.V. Lotkhov, Krupenin V.A., Background charge noise in metallic single-electron tunneling devices. // *Phys. Rev. B*, 53, 13682 (1996).
- A4. A.B. Zorin, Krupenin V.A., S.V. Lotkhov, J. Niemeyer, D.E. Presnov, H. Scherer, H. Wolf, F.- J. Ahlers, T. Weimann, Detection of the single-electron tunneling noise using Coulomb blockade electrometer. // *Czechoslovak Journal of Physics*, 46-Suppl., 2281 (1996).
- A5. Krupenin V.A., S. V. Lotkhov, D. E. Presnov, A. B. Zorin, F.-J. Ahlers, J. Niemeyer, H. Scherer, T. Weimann, H. Wolf, Charge state instabilities in the single-electron trap. // *Czechoslovak Journal of Physics*, 46-Suppl., 2283 (1996).
- A6. Крупенин В.А., С. В. Лотхов, Д. Е. Преснов, Факторы нестабильности одноэлектронной памяти при низких температурах в структурах типа Al/AlO_x/Al. // *ЖЭТФ* 111 (1), 344 (1996).
V. A. Krupenin, S. V. Lotkhov, and D. E. Presnov. Instability of single-electron memory at low temperatures in Al/AlO_x/Al structures. *JETP*, 84(1), 190 (1997).
- A7. Д. Е. Преснов, Крупенин В.А., С. В. Лотхов, Одноэлектронные структуры на основе сверхмалых туннельных переходов Al/AlO_x/Al: технология изготовления, экспериментальные результаты. // *УФН* 166(8), 906 (1996).
D.E. Presnov, V.A. Krupenin, S.V. Lotkhov, Single-electron structures of supersmall Al/AlO_x/Al tunnelling junctions: manufacturing techniques and experimental results. // *Physics Uspekhi*, 39(8), 847 (1996).
- A8. T. Weimann, H. Wolf, H. Scherer, Krupenin V.A., J. Niemeyer, Metallic single electron devices fabricated using a multilayer technique. // *Appl. Phys. Lett.*, 71, 713 (1997).
- A9. H. Wolf, F.-J. Ahlers, J. Niemeyer, H. Scherer, T. Weimann, A.B. Zorin, Krupenin V.A., S.V. Lotkhov, D.E. Presnov, Investigation of the offset charge noise in single electron tunneling devices. // *IEEE Trans. on Instr. & Meas.*, 46 (2), 303 (1997).

- A10. Крупенин В.А., С. В. Лотхов, Ю.А. Пашкин, Д. Е. Преснов, Экспериментальное исследование зарядовых эффектов в сверхмалых туннельных переходах. // УФН 167(5), 566 (1997).
- V. A. Krupenin, S. V. Lotkhov, Y. A. Pashkin, and D. E. Presnov. An experimental study of charge effects in ultrasmall tunnel junctions. *Physics Uspekhi*, 40(5), 542 (1997).
- A11. Th. Weimann, H. Scherer, H. Wolf, V.A. Krupenin and J. Niemeyer, A New Technology for Metallic Multilayer Single Electron Tunneling Devices. // *Microelectronic Engineering*, 41(42), 559 (1998).
- A12. Крупенин В.А., С.В. Лотхов, Х. Шерер, Т. Вайманн, А.Б. Зорин, Ф.-Й. Алерс, Й. Нимайер, Х. Вольф, Зондирование динамических зарядовых состояний с помощью одноэлектронных туннельных транзисторов. // УФН 168 (2), 219 (1998).
- V.A. Krupenin, S.V. Lotkhov, H. Scherer, A.B. Zorin, F.J. Ahlers, J. Niemeyer and H. Wolf, Sensing of Dynamic Charge States Using Single-Electron Tunneling Transistors. // *Physics-Uspekhi (Russia)* 41, 204 (1998).
- A13. A.B. Zorin, Yu.A. Pashkin, Krupenin V.A., H. Scherer, Coulomb Blockade Electrometer Based on Single Cooper Pair Tunneling. // *Applied Superconductivity (Elsevier)* 6 (7-9), 453 (1998).
- A14. Krupenin V.A., D.E. Presnov, M.N. Savvateev, H. Scherer, A.B. Zorin, J. Niemeyer, Noise in Al Single Electron Transistors of Stacked Design. // *J. Appl. Phys.* 84(6), 3212 (1998).
- A15. Krupenin V.A., S.V. Lotkhov, H. Scherer, Th. Weimann, A.B. Zorin, F.-J. Ahlers, J. Niemeyer, H. Wolf, Charging and Heating Effects in a System of Coupled Single-electron Devices. // *Phys. Rev. B* 59(16), 10778 (1999).
- A16. A.B. Zorin, S.V. Lotkhov, Yu.A. Pashkin, Krupenin V.A., H. Zangerle, Th. Weimann, H. Scherer, J. Niemeyer, Highly Sensitive Electrometers based on Single Cooper Pair Tunneling. // *Journal of Superconductivity (Plenum)* 12(6), 747 (1999).
- A17. Krupenin V.A., D.E. Presnov, A.B. Zorin, J. Niemeyer, Aluminum Single Electron Transistors with Islands Isolated from the Substrate. // *J. Low Temp. Phys.* 118(5-6), 287 (2000).
- A18. Krupenin V.A., D.E. Presnov, A.B. Zorin, J. Niemeyer, A Very Low Noise Single Electron Electrometer of Stacked-Junction Geometry. // *Physica B*, 284, 1800 (2000).
- A19. V.A. Krupenin, A.B. Zorin, M.N. Savvateev, D.E. Presnov, J. Niemeyer, Single-electron transistor with metallic microstrips instead of tunnel junctions. // *J. Appl. Phys.*, 90 (5), 2411 (2001).
- A20. T. Weimann, H. Scherer, V.A. Krupenin et al., Four-angle evaporation method for the preparation of single electron tunneling devices. // *Microelectronic Engineering*, 57(8), 915 (2001).

- A21. V.A. Krupenin, A.B. Zorin, D.E. Presnov, M.N. Savvateev, J. Niemeyer, Metallic single-electron transistor without traditional tunnel barriers. // *Physics-Uspekhi (Russia)* 44, Supplement 171(10), 113 (2001).
- A22. Klaffs T., Krupenin V.A., Weis J, et al, Eddy currents in the integer quantum Hall regime spatially resolved by multiple single-electron transistor electrometers. // *Physica E* 22 (1-3), 737 (2004).
- A23. V.A. Krupenin, D.E. Presnov, V.O. Zalunin, S.A. Vasenko, A.B. Zorin, Strongly asymmetric single-electron transistor operating as zero-biased electrometer. // *Письма в ЖЭТФ*, 82(2), 77 (2005).
- V.A. Krupenin, D.E. Presnov, V.O. Zalunin, S.A. Vasenko, A.B. Zorin, Strongly asymmetric single-electron transistor operating as zero-biased electrometer. // *JETP Letters*, 82(2), 82 (2005).
- A24. Krupenin V.A., Zalunin V.O., Zorin A.B. The peculiarities of single-electron transport in granular Cr films. // *Microelectronic Engineering* 81 (2-4), 217 (2005).
- A25. В.А. Крупенин, Д.Е. Преснов, В.С. Власенко. Зарядовый шум в одноэлектронном транзисторе из высокодопированного кремния-на-изоляторе. // *Радиотехника*, 1, 78-84 (2008).
- A26. В.О. Залуин, В.А. Крупенин, С.А. Васенко, and А.Б. Зорин. Моделирование одноэлектронных транспортных процессов в тонких гранулированных хромовых пленках. // *Письма в ЖЭТФ*, 91(8) 436 (2010).
- V.O. Zalunin, V.A. Krupenin, S.A. Vasenko, and A.B. Zorin. Simulation of single-electron transport processes in thin granulated chromium films. // *JETP Letters*, 91(8) 402 (2010).
- A27. Д.Е. Преснов, С.В. Амитонов, В.С. Власенко, В.А. Крупенин. Одноэлектронный транзистор из высоколегированного кремния на изоляторе. // *Радиотехника*, 1, 35 (2014).
- D. E. Presnov, S. V. Amitonov, V.S Vlasenko, V. A. Krupenin. Set transistor from highly doped silicon on insulator. // *Journal Radioengineering*, 1, 35 (2014).
- A28. S. A. Dagesyan, V. V. Shorokhov, D. E. Presnov, E. S. Soldatov, A. S. Trifonov, and V. A. Krupenin. Sequential reduction of the silicon single-electron transistor structure to atomic scale. // *Nanotechnology*, 28, 225304 (2017).
- A29. V. V. Shorokhov, D. E. Presnov, S. V. Amitonov, Yu A. Pashkin, and V. A. Krupenin. Single-electron tunneling through an individual arsenic dopant in silicon. // *Nanoscale*, 9, 613 (2017).
- A30. С. А. Дагесян, В. В. Шорохов, Д. Е. Преснов, Е. С. Солдатов, А. С. Трифонов, В. А. Крупенин, and О. В. Снигирёв. Одноэлектронный транзистор с островом из нескольких примесных атомов фосфора. *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия*, 5, 32 (2017).

S.A. Dagesyan, V.V. Shorokhov, D.E. Presnov, E.S. Soldatov, A.S. Trifonov, V.A. Krupenin, O.V. Snigirev. Single-electron transistor with an island formed by several dopant phosphorus atoms. // MOSCOW UNIVERSITY PHYSICS BULLETIN, 72(5), 474 (2017).

в журналах, включенных в списки ВАК

Б1. В.А. Крупенин, Д.Е. Преснов, А.Б. Зорин, С.А. Васенко, Ю. Нимайер, Проблема флуктуаций фонового заряда в металлических одноэлектронных транзисторах и ее возможное решение. // Нелинейный Мир, 3(1-2) 27 (2005).

Б2. Д.Е. Преснов, С.В. Амитонов, В.С. Власенко, В.А. Крупенин. Одноэлектронный транзистор из высоколегированного кремния на изоляторе. // Нанотехнологии: разработка, применение — XXI век, 2, 37 (2014).

D. E. Presnov, S. V. Amitonov, V.S Vlasenko, V. A. Krupenin. Set transistor from highly doped silicon on insulator. // Journal Nanotechnology: development and applications - XXI Century, 2, 37 (2014).

статьи в сборниках Scopus, WoS, RSCI

Б1. F.-J. Ahlers, V.A. Krupenin, S.V. Lotkhov, J. Niemeyer, D.E. Presnov, H. Scherer, Th. Weimann, H. Wolf and A.B. Zorin, Investigation of the Offset Charge Noise in Single Electron Tunneling Devices. // CPEM'96, Braunschweig, Germany. Digest, 507 (1996).

Б2. V.A. Krupenin D.E. Presnov, M.N. Savvateev et al. Low noise single electron transistors of stacked design. // CPEM 98, WASHINGTON, D.C., Digest, 140 (1998).

Б3. T. Klaffs, D.E. Presnov, V.A. Krupenin, et al. Hysteresis effects due to eddy currents in the integer quantum hall regime probed by an SET-electrometer. // ASDAM '02, SMOLENICE CASTLE, SLOVAKIA, PROCEEDINGS, 337 (2002).

патент

П1. Крупенин В.А., Преснов Д.Е., Амитонов С.В., Снигирев О.В., Трифонов А.С. Кантилевер с одноэлектронным транзистором для целей зондовой микроскопии. // Патент, номер 2505823, дата публикации патента: 27 января 2014 г.

Цитированная литература

1. D.V. Averin and K.K. Likharev, Single-Electronics: a Correlated Transfer of Single Electrons and Cooper Pairs in Systems of Small tunnel Junctions. // in Mesoscopic Phenomena in Solids, Edited by B.Al'tshuler, P.A. Lee, and R. Webb (Elsevier, Amsterdam, 1991), Chap.6

2. K.K. Likharev, Single-Electron Devices and Their Applications. // Proc. IEEE **87**, 606–632 (1999).

3. A.N. Korotkov, D.V. Averin, K.K. Likharev and S.A. Vasenko, Single electron transistors as ultrasensitive electrometers. // *Single electron tunneling and mesoscopic devices*, (ed. H. Koch, H. Lubbig) Springer series in electronics and photonics N 31 (1991).
4. C.T. Rogers, R.A. Buhrman, W.J. Gallagher, S.I. Raider, A.W. Kleinsasser, and R.L. Sandstrom, Electron trap states and low frequency noise in tunnel junctions. // *IEEE Trans. Magn.* **23**, 1658 (1987).
5. N.F. Hooge, $1/f$ Noise Sources. // *IEEE Trans. Electron Devices* **41**, 1926 (1994).
6. D. Song, A. Amar, C.J. Lobb and F.C. Wellstood, Advantages of superconducting coulomb-blockade electrometers. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5**, (2) 3085 (1995).
7. G. Zimmerli, R.L. Kautz, and J.M. Martinis, Voltage Gain in the Single-Electron Transistor. // *Appl. Phys. Lett.* **61**, 2616 (1992).
8. В.А. Крупенин, Экспериментальное исследование зарядовых флуктуаций и взаимного влияния элементов в одноэлектронных структурах. // Кандидатская диссертация, Физический факультет МГУ, Москва (1998).
9. J. Niemeyer, Eine einfache methode zur herstellung kleinster Josephson-elemente. // *PTB-Mitt.* **84**, 251 (1974); G.D. Dolan, Offset masks for lift-off photoprocessing. // *Appl. Phys. Lett.* **31**, 337 (1977).
10. S.M. Verbrugh, M.L. Benhamadi, E.H. Visscher, and J.E. Mooij, Optimization of island size in single-electron tunneling devices, experiment and theory. // *J. Appl. Phys.* **78** (4), 2830 (1995).
11. D.V. Averin and A.A. Odintsov, Macroscopic quantum tunneling of the electric charge in small tunnel junctions. // *Phys. Lett. A* **140** (5), 251 (1989).
12. L.J. Geerligs, V.F. Anderegg, and J.E. Mooij, Tunneling time and offset charging in small tunnel junctions. // *Physica B* **165**, 973 (1990).
13. D.B. Haviland, Yu.A. Pashkin and L.S. Kuzmin, Measurement of the Superconducting Single Electron Transistor in a High Impedance Environment. // *Physica B* **203**, 347 (1994)
14. Yu.V. Nazarov, Coulomb Blockade without Tunnel Junctions. // *Phys. Rev. Lett.* **82**, 1245 (1999).
15. J. Niemeyer, Eine einfache methode zur herstellung kleinster Josephson-elemente. // *PTB-Mitt.* **84**, 251 (1974); G.D. Dolan, Offset masks for lift-off photoprocessing. // *Appl. Phys. Lett.* **31**, 337 (1977).
16. L.J. Geerligs, D.V. Averin, and J.E. Mooij, Observation of macroscopic quantum tunneling through the Coulomb energy barrier. // *Phys. Rev. Lett.* **65**, 3037 (1990).
17. A.B. Zorin, S.V. Lotkhov, H. Zangerle, and J. Niemeyer, Coulomb blockade and cotunneling in single electron circuits with on-chip resistors: Towards the implementation of the R pump. // *J. Appl. Phys.* **88**, 2665 (2000).

18. A.A. Odintsov, V. Bubanja, and G. Schoen, Influence of electromagnetic fluctuations on electron cotunneling. // *Phys. Rev. B* **46**, 6875 (1992); D.S. Golubev and A.D. Zaikin, Charge fluctuations in systems of mesoscopic tunnel junctions. // *Phys. Lett. A* **169**, 475 (1992).
19. D.E. Presnov, V.A. Krupenin, N.N. Afanasiev, D.N. Erkhov. Single-electron transistor from highly doped silicon-on-insulator. // ICMNE-2005, Zvenigorod, Russia, (3-7 October 2005).
20. D.E. Presnov, S.V. Amitonov, V.I. Rudakov, S.V. Lotkhov, A.B. Zorin, and V.A. Krupenin. Noise properties of SET transistor made from highly doped SOI. // ICMNE 2014, Zvenigorod, Russia, (October 6-10 2014).
21. M. Pierre, R. Wacquez, X. Jehl, M. Sanquer, M. Vinet and O. Cueto, Single-donor ionization energies in a nanoscale CMOS channel. // *Nature Nanotechnology* **5**, 133 (2010).
22. J. Salfi, J.A. Mol, R. Rahman, G. Klimeck, M.Y. Simmons, L.C. Hollenberg and S. Rogge. Quantum simulation of the Hubbard model with dopant atoms in silicon. // *Nat. Mater.*, **13**, 605 (2014).
23. A.B. Zorin, Termocoax ® Cable as the Microwave Frequency Filter for Single Electron Circuits. // *Rev. Sci Instruments* **66**, 4296 (1995).
24. A.J. Manninen, J.P. Pekola, Background Charge Fluctuations in SET-transistors. // *LT-21, Czech. J. Phys.* **46-S4**, 2293 (1996).
25. V.A. Krupenin, D.E. Presnov, M.N. Savvateev, H. Scherer, A.B. Zorin and J. Niemeyer, Low Noise Single Electron Transistors of Stacked Design. // *CPEM'98*, Washington, DC, ed. by T.L. Nelson, 140 (6-10 July 1998).
26. P. Lafarge, H. Pothier, E.R. Williams, D. Esteve, C. Urbina, and M.H. Devoret, Direct observation of macroscopic charge quantization. // *Z. Phys. B* **85**, 327 (1991).
27. A.N. Korotkov, Intrinsic noise of single-electron transistor. // *Phys. Rev. B.* **49** (15), 10381 (1994).
28. M.L. Roukes, M.R. Freeman, R.S. Germain, R.C. Richardson, and M.B. Ketchen, Hot electrons and energy transport in metals at millikelvin temperatures. // *Phys. Rev. Lett.* **55**, 422 (1985).
29. W.C. Zhang, N.J. Wu, T. Hashizume and S. Kasai, Multiple-Valued Logic Gates Using Asymmetric Single-Electron Transistors. // 39th International Symposium on Multiple-Valued Logic, Naha, Okinawa, 337 (21-23 May 2009).
30. S.A. Gurvitz, G.P. Berman, Single qubit measurements with an asymmetric single-electron transistor. // *Phys. Rev. B*, **72**, 073303 (2005).
31. C. Walliser // Ph. D. thesis: In Forschungszentrum Karlsruhe. GmbH. (2002).
32. K. Elteto, X.-M. Lin, H.M. Jaeger, Electronic transport in quasi-one-dimensional arrays of gold nanocrystals. // *Phys. Rev. B.*, **71**, 205412 (2005).

33. N.S. Bakhvalov, G.S. Kazacha, K.K. Likharev, S.I. Serdyukova, Statics and dynamics of single-electron solitons in two-dimensional arrays of ultrasmall tunnel junctions. // *Physica B: Condensed Matter*, **173** (3), 319 (1991).
34. Н.С. Бахвалов, Г.С. Казача, К.К. Лихарев, С.И. Сердюкова, Одноэлектронные солитоны в одномерных туннельных структурах. // *ЖЭТФ*, **95** (3), 1010 (1989).
35. A.N. Korotkov, M.R. Samuelson, S.A. Vasenko, Effects of overheating in single electron transistor. // *J. Appl. Phys*, **76**, 3623 (1994).
36. J.E. Lukens, P.D. Dresselhaus, Siyuan Han, L. Ji, K.K. Likharev, W. Zheng, Comparison of single electron traps in the superconducting and normal states. // *Physica B* **203** (3-4), 354 (1994).
37. J.M. Martinis and M. Nahum, Effect of environmental noise on the accuracy of Coulomb-blockade devices. // *Phys.Rev. B* **48**, 18316 (1993).
38. P. Delsing, One-dimensional arrays of small tunnel junctions. // in: *Single Charge Tunneling*, edited by H. Grabert and M.H. Devoret, NATO ASI Series B 294, Plenum, New York, Chapter 7, 249 (1992).
39. C.L. Jones, A. Usher, M. Elliott, W.G. Herrenden-Harker, A. Potts, R. Shepherd, T.S. Cheng, C.T. Foxon, Contactless detection of current breakdown of the quantum Hall effect. // *Solid State Commun.* **97** (9), 763 (1996).
40. M.P. Schwarz, M.A. Wilde, S. Groth, D. Grundler, Ch. Heyn, and D. Heitmann, Sawtoothlike de Haas–van Alphen oscillations of a two-dimensional electron system. // *Phys. Rev. B* **65**, 245315 (2002).
41. J.P. Watts, A. Usher, A.J. Matthews, M. Zhu, M. Elliott, W.G. Herrenden-Harker, P.R. Morris, M.Y. Simmons, and D.A. Ritchie, Current Breakdown of the Fractional Quantum Hall Effect through Contactless Detection of Induced Currents. // *Phys. Rev. Lett.* **81**, 4220 (1998).