

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи



Дагесян Саркис Арменакович

ОДНОЭЛЕКТРОННЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С
ВЫСОКОЙ ЗАРЯДОВОЙ ЭНЕРГИЕЙ

Специальность 01.04.04 —
«Физическая электроника»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2017

Работа выполнена на кафедре атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Солдатов Евгений Сергеевич

Официальные оппоненты: **Лукичёв Владимир Фёдорович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
член-корр. РАН,
Физико-технологический институт РАН,
директор

Куприянов Михаил Юрьевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
НИИЯФ МГУ,
главный научный сотрудник

Фионов Александр Сергеевич,
кандидат технических наук,
Институт радиотехники и электроники РАН,
старший научный сотрудник

Защита диссертации состоится «23» ноября 2017 г. в 16:30 — 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, ЦФА.

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 20 октября 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
МГУ.01.12,
к.ф.-м.н.

Карташов Игорь Николаевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Разрешающая способность современных промышленных нанолитографических систем непрерывно растёт уже более полувека. Ширина канала полевых транзисторов современных процессоров достигла 14 нм [1]. Разделены каналы транзисторов интервалом в 42 нм. Есть серьёзные основания полагать, что размер электронных компонент на чипе будет и дальше уменьшаться. Уже сейчас активно используются в промышленности для формирования изолирующих слоёв различные методы атомно-слоевого осаждения [2]. Развивается технология нанолитографии, в том числе разрабатываются альтернативные процессы, такие как EUV литография [3], многолучевая электронная литография [4]. Уже анонсирован выход в серийное производство в 2017 году чипов, изготовленных по норме 7 нм [5]. Современная индустрия приближается к возможности стабильно создавать планарные элементы электронных схем практически на атомарном масштабе. На таком масштабе классический подход к созданию электронных устройств на основе легированных полупроводниковых полевых транзисторов сталкивается с серьёзными проблемами. Однако открывается возможность использования физических эффектов, проявляющихся на столь малых масштабах. Одним из таких эффектов является одноэлектронное туннелирование [6].

Первые одноэлектронные устройства были созданы уже более 25 лет назад [7]. Такие устройства обладают рядом уникальных свойств [8]. На их основе создан термометр для измерения криотемператур [9], наиболее точный метрологический стандарт тока с относительной точностью до 10^{-9} [10]. Перспективно их применение в качестве сенсоров электрического заряда, т. к. полученные рекордно низкие значения зарядового шума одноэлектронных устройств лишь немного отличаются от квантового предела $\delta Q \sim 10^{-6} e / \sqrt{\text{Гц}}$ [11]. Кроме того, одноэлектронные элементы обладают рекордно малой потребляемой мощностью ($W \sim 10^{-9} - 10^{-12}$ Вт). В связи с этим они уже нашли своё применение в метрологических целях, а также в качестве вспомогательного устройства (сенсора) в ряде уникальных экспериментов [12].

Однако применение таких устройств сильно ограничено по температуре. Поначалу одноэлектронные эффекты наблюдались исключительно в диапазоне температур ниже 1 К. Рабочая температура одноэлектронных устройств прямо пропорциональна кулоновской энергии зарядовых центров, на основе которых они созданы. В свою очередь, кулоновская энергия тем выше, чем меньше размер этих зарядовых центров. В этом смысле оптимальным было бы использование предельно малых объектов как основы одноэлектронных устройств. Очевидно, что максимальной зарядовой энергией будут обладать одноэлектронные устройства на основе одиночных атомов внутри кристаллической решётки или сложной молекулы. Предельно

малые размеры таких объектов и высокая энергоэффективность одноэлектронных устройств позволяют говорить о принципиальной возможности сверхплотной упаковки таких элементов ($n \sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$)

Простейшим и важнейшим элементом, в котором наблюдаются одноэлектронные эффекты, является одноэлектронный транзистор. Основными составляющими одноэлектронного транзистора являются остров (ключевой элемент устройства), надёжно отделённый туннельными переходами от стока и истока, а также электрод управления (затвор), влияющий на остров исключительно за счёт емкостной связи. В случае высокотемпературного одноэлектронного транзистора островом должен быть объект размером менее 5 нм: одиночная наночастица, молекула, молекулярный кластер или примесный атом в кристаллической решётке. Создание такого устройства является нетривиальной задачей в связи со сложностью манипулирования отдельными объектами столь малого размера, а также в связи с необходимостью очень близко подводить электроды транзистора к ним для создания туннельных переходов.

На сегодняшний день уже существует множество экспериментальных работ, где продемонстрированы различные варианты реализации одноэлектронных устройств на основе одиночных молекул или атомов [13], [14]. В них продемонстрирован ряд интересных квантовых эффектов, наблюдающихся при низких температурах [15]. Однако применение одноэлектронных устройств для высокотемпературных приложений до сих пор остаётся нерешённой задачей, несмотря на то, что принципиальная возможность наблюдения коррелированного туннелирования электронов даже при комнатной температуре давно экспериментально показана [16]. Дело в том, что сама технология изготовления подобных устройств достаточно специфична. Это либо методы, использующие иглу сканирующего туннельного микроскопа в качестве одного из электродов [16], либо методы, дающие крайне низкий выход годных образцов [17]. Поэтому разработка технологии изготовления одноэлектронных устройств на основе одиночных атомов и молекул в наиболее практически употребляемой планарной геометрии и исследование их свойств является на сегодняшний день актуальной задачей.

Целью данной работы является разработка лабораторной методики создания одноэлектронных транзисторов на основе объектов молекулярного (наночастицы золота 2 – 4 нм) и атомарного (примесные атомы в решётке кремния) масштаба, а также их воспроизводимое изготовление, исследование транспорта электронов в изготовленных элементах при различных температурах, в том числе высоких для одноэлектронных эффектов, их структурные исследования, физическая интерпретация полученных экспериментальных данных.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать лабораторную методику изготовления планарных электродов молекулярного транзистора на основе электронно-лучевой литографии и метода, использующего эффект электромиграции атомов в тонких плёнках.
2. Исследовать динамику разрыва нанопровода в результате проведения процесса электромиграции.
3. Исследовать электрические структурные характеристики полученных электродов для верной интерпретации данных последующих измерений зазоров со встроенными наночастицами.
4. Разработать лабораторную методику встраивания острова высокотемпературного одноэлектронного транзистора в полученный нанозазор между электродами.
5. Исследовать электрические характеристики одноэлектронных транзисторов молекулярного масштаба в широком диапазоне температур. Сопоставить данные электрических измерений со структурными исследованиями наносистем.
6. Разработать технологию изготовления кремниевых нанопроводов с сужением менее 50 нм из неравномерно легированного кремния-на-изоляторе (КНИ). Исследовать электронный транспорт в таких нанопроводах при температуре 4.2 К.
7. Разработать методику контролируемого уменьшения размера кремниевого нанопровода до состояния, когда в месте наибольшего сужения нанопровода электронный транспорт проходит через 1 – 3 примесных атома.
8. Исследовать электрические характеристики полученных одноэлектронных транзисторов на основе одиночных примесных атомов при температуре 4.2 К и 77 К.

Научная новизна:

1. Впервые исследована при комнатной температуре временная динамика проводимости квантового провода, образующегося в результате проведения процесса электромиграции и содержащего в поперечном сечении в месте наибольшего сужения менее 20 атомов золота. Продемонстрирована квантовая природа проводимости в таком проводе.
2. Исследованы электрические характеристики нанозазоров менее 5 нм между золотыми электродами. Впервые продемонстрировано влияние контаминации, образующейся под электронным лучом во время сканирующей электронной микроскопии, на проводимость нанозазора.
3. Разработана оригинальная методика контролируемого встраивания малых наночастиц золота (2 – 4 нм) из раствора в нанозазор между металлическими электродами с помощью эффекта диэлектрофореза.

4. Исследован туннельный электронный транспорт через одиночные золотые наночастицы, а также через несколько наночастиц в широком диапазоне температур (77 – 300 К). Впервые продемонстрирован одноэлектронный характер проводимости такой системы во всём диапазоне температур, а также возможность управления током через наночастицы с помощью электрического поля при температурах до 77 – 220 К
5. Разработана оригинальная технология изготовления кремниевых нанопроводов с сужением менее 50 нм из неравномерно легированного кремния на изоляторе.
6. Впервые разработана методика контролируемого постепенного уменьшения размера кремниевого нанопровода, обеспечивающая постепенный переход от провода с омическим сопротивлением к одноэлектронному транзистору на одиночных примесных атомах.

Практическая значимость

Результаты диссертационной работы могут быть использованы для создания разнообразных высокотемпературных одноэлектронных устройств, таких как сверхчувствительные зарядовые сенсоры с высоким пространственным разрешением для сканирующих зондовых микроскопов. Применение разработанных одноэлектронных транзисторов в качестве элементов электронных вычислительных схем, в том числе квантовых, перспективно в связи с полученным высоким значением зарядовой энергии этих устройств. Кроме того, разработанные в настоящей работе технологии создания одноэлектронных транзисторов на основе золотых наночастиц и атомов фосфора могут быть использованы также для создания и исследования одноэлектронных устройств на основе других наноразмерных объектов: различных молекул и примесных атомов.

Методология и методы исследования. Методика изготовления наноструктур, изучаемых в диссертационной работе, совместима со стандартной планарной технологией изготовления интегральных схем. Для создания экспериментальных образцов использовались следующие методы нанесения тонких плёнок: термическое вакуумное напыление, магнетронное распыление материалов. Для структурирования наносимых плёнок использовались два метода: фото- и электронно-лучевая литография. Использование глубокого ультрафиолета (длина волны 254 нм) при фотолитографии позволяло использовать для обоих методов литографии один и тот же слой позитивного полимерного резиста — полиметилметакрилат (ПММА). Для переноса рисунка, сформированного в слое резиста, в слой металла или кремния использовался один из двух методов: реактивно-ионное травление тонких плёнок и так называемая "взрывная" литография (lift-off). Для создания нанозазоров методом электромиграции в ходе выполнения этой работы был создан стенд на базе скоростных ЦАП и АЦП, интегрированных с процессором. Основными методами диагностики полу-

ченных структур были световая, атомно-силовая и сканирующая электронная микроскопия высокого разрешения, а также непосредственные прецизионные электрические измерения (с точностью по току до 1 пА), проводимые на постоянном токе.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Сопротивление утечки нанозазоров, изготовленных по разработанной в настоящей работе методике, превышает 300 ГОм в диапазоне напряжений до 0.5 В при величине зазора менее 5 нм, что делает их пригодными для создания планарных молекулярных одноэлектронных транзисторов и их исследования. Выход годных зазоров составляет более 90 %.
2. Разработанные лабораторные экспериментальные методики создания нанозазоров и встраивания наночастиц с помощью метода электротреппинга позволяют получать одноэлектронные транзисторы на основе малых (2 – 4 нм) наночастиц золота с выходом годных более 10 %.
3. Транспорт электронов через сформированные одноэлектронные транзисторы имеет коррелированный характер при температуре до 300 К. Продемонстрировано управление туннельным током через одиночную наночастицу с помощью затвора при температуре до 220 К.
4. Разработанная технология изготовления и контролируемого уменьшения размера кремниевого нанопровода с помощью коротких сеансов реактивно-ионного травления (5 – 10 с) позволяет получать экспериментальные образцы для исследования туннельного транспорта электронов через несколько (1 – 3) примесных атомов.
5. Коррелированное туннелирование электронов через сформированное сужение в кремниевых нанопроводах с единичными примесными атомами фосфора имеет место как при температуре 4.2 К, так и при 77 К.

Достоверность полученных результатов обеспечивается согласием экспериментально измеренных электрических характеристик полученных систем с теоретически предсказанными значениями и зависимостями, а также согласием с экспериментальными данными, известными из литературы.

Личный вклад. В диссертации приведены результаты, полученные непосредственно автором или при его активном участии. Соискатель принимал непосредственное участие в постановке задач, изготовлении экспериментальных образцов, проведении экспериментов, обработке и анализе результатов, подготовке статей и докладов на конференциях.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1. XIV Всероссийская научная школа-семинар «Физика и применение микроволн» («Волны-2013»), Красновидово, Московская область, Россия.
2. 4th International Conference on Superconductivity and Magnetism — ICSM-2014, Antalya, Turkey
3. International Conference “Micro- and Nanoelectronics — 2014” (ICMNE-2014), “Ershovo” resort, Zvenigorod, Moscow Region, Russia, 2014
4. V International Scientific Conference STRANN 2016, Санкт-Петербург, Россия, 2016
5. XV Всероссийская школа-семинар “Волновые явления в неоднородных средах” имени А.П. Сухорукова (“Волны-2016”), Красновидово, Московская область, Россия, 2016
6. 26-ая международная крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”, 2016 г., Севастополь, Россия, 2016
7. International Conference “Micro- and nanoelectronics — 2016” (ICMNE — 2016), Moscow, Zvenigorod, Russia, 2016

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 13 печатных изданиях, 3 из которых изданы в журналах, индексируемых Scopus и Web of Science, 1 — в рецензируемых трудах конференции, 9 — в тезисах докладов.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится короткий обзор по сегодняшнему состоянию нанoeлектроники в целом, а также более подробный обзор научной литературы по более узкой изучаемой теме: однопериодных устройств на основе одиночных молекул и атомов. Также формулируется цель, ставятся цели и задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, обосновывается достоверность полученных результатов, приведён список печатных работ и докладов на конференциях, в которых содержатся основные результаты данной диссертационной работы.

Первая глава состоит из 4-х параграфов. Она содержит в себе обзор методов создания однопериодных транзисторов на основе одиночных молекул, молекулярных кластеров, наночастиц и одиночных примесных атомов, а также обзор основных известных на сегодняшний день свойств электронного транспорта в подобных структурах.

В первом параграфе рассмотрены стоящие особняком методики, использующие для создания электродов молекулярного транзистора актив-

ное механическое устройство. В первой из них в качестве одного из электродов транзистора используется игла сканирующего туннельного микроскопа. В другой методике электроды создаются путём механического разрыва подвешенного нанопровода с помощью деформации подложки. Несмотря на то, что эти методы играют важную роль в научных исследованиях в области молекулярной электроники, их крайне сложно приспособить для решения каких-либо прикладных задач.

Далее представлен обзор различных методов создания молекулярных одноэлектронных транзисторов в более практически значимой планарной реализации. В этом случае задача создания транзистора естественным образом разделяется на два независимых технологических этапа:

1. Создание системы планарных металлических электродов с нанозазором величиной менее 5 нм.
2. Встраивание молекулярного объекта, служащего островом формируемого транзистора, в нанозазор.

Во втором параграфе представлен обзор методов создания планарных металлических систем электродов с нанометровым зазором между ними. Рассматриваются как возможности современной нанолитографии в качестве наиболее технологичного и воспроизводимого способа, так и различные лабораторные методики, позволяющие получать предельно маленькие зазоры (иногда даже менее 1 нм), но трудно переносимые в промышленное производство. Среди этих методик выделены наиболее часто используемые:

1. Способы контролируемого уменьшения предварительно созданного зазора путём электрохимического осаждения или вакуумного напыления металла.
2. Контролируемый разрыв предварительно сформированного металлического нанопровода с использованием эффекта электромиграции атомов в тонких плёнках.

Критериями оценки указанных методов выступали итоговый размер получаемых зазоров, их воспроизводимость, масштабируемость технологии. Обоснован выбор метода контролируемого разрыва нанопровода, а также указаны особенности метода, требующие изучения и модификации для успешного выполнения данной диссертационной работы.

В третьем параграфе представлен обзор методов встраивания и закрепления наночастиц или молекул в нанозазор между металлическими электродами. Представлены методы самосборки и самоорганизации молекул и наночастиц на поверхности. Также рассмотрены работы, использующие эффект диэлектрофореза, позволяющий обеспечить адресное встраивание наночастицы в зазор.

В четвёртом параграфе приведён обзор имеющихся на сегодняшний день работ по тематике транзисторов на основе одиночных примесных атомов. Рассмотрены основные методы изготовления лабораторных образцов.

В большинстве работ исследуются системы случайно распределённых в кристаллической структуре примесных атомов. При этом, интересующие образцы отбираются из числа большого количества изготовленных структур. Исключение составляют лишь техники, использующие остриё иглы зондового микроскопа. Поэтому одной из задач данной диссертационной работы было создание метода изготовления одноатомных структур исключительно на основе таких технологических операций, которые используются повсеместно в полупроводниковой индустрии. Обоснована необходимость создать структуру с открытым каналом транзистора для возможности модифицировать изготовленную структуру травлением или ионной имплантацией для получения желаемой конфигурации примесных атомов, а также для возможности использования полученных структур как высокочувствительных сенсоров.

Во второй главе представлена разработанная технология изготовления системы планарных электродов молекулярного одноэлектронного транзистора, а также результаты исследования электрических свойств системы на различных стадиях изготовления. Технология содержит следующие основные стадии:

1. Изготовление золотых нанопроводов сечением около $15 \times 50 \text{ нм}^2$ литографическими методами.
2. Процесс электромиграции, то есть контролируемое сужения сечения нанопровода до нескольких квадратных нанометров.
3. Релаксация полученной системы с формированием нанозазора.

В первом параграфе этой главы описана технология изготовления золотых нанопроводов и подводящих к ним электродов с помощью электронно-лучевой и фото литографии. Наноструктуры формируются на изолированной кремниевой подложке методом так называемой “взрывной” (lift-off) литографии. Формировались следующие структуры из золота: нанопровода шириной 30 – 70 нм; электрод на расстоянии 100 – 150 нм от нанопровода — будущий затвор транзистора; система макропроводов шириной 1 – 100 мкм для соединения наноструктур с электронной аппаратурой. Полученная в результате структура представлена на рис. 1.

Во втором параграфе описан разработанный алгоритм проведения контролируемого сужения золотого нанопровода, использующий эффект электромиграции атомов в тонких плёнках при пропускании через них тока большой плотности. Основная особенность используемого метода заключается в необходимости реализации быстрой обратной связи. Лабораторный стенд для проведения процесса был создан на основе быстродействующих ЦАП/АЦП. На выходе ЦАП создаётся плавно нарастающее напряжение. Показания АЦП позволяют непрерывно отслеживать сопротивление нанопровода. При условии небольшого изменения сопротивления, напряжение на выходе ЦАП обнуляется. Затем этот процесс циклически повторяется. Ключевые особенности созданной системы электромиграции, позво-

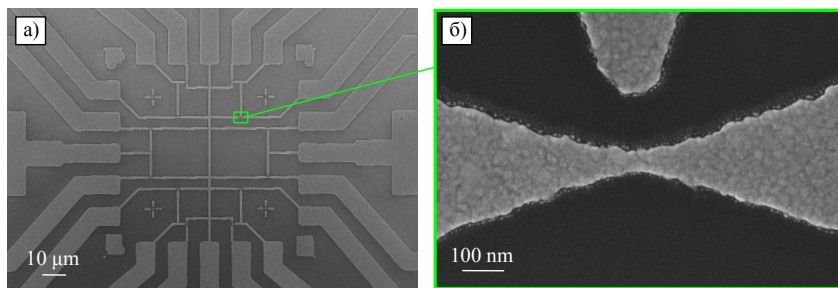


Рис. 1 — СЭМ-снимки образца после проведения всех литографических процедур: (а) — система проводов для соединения с измерительной аппаратурой; (б) — золотой нанопровод и затвор будущего транзистора. льющие проводить плавное сужение нанопровода: малое время обратной связи $\Delta t_{fb} \approx 10$ мкс, а также алгоритм, автоматически корректирующий уровень чувствительности обратной связи во время процесса.

В результате работы алгоритма сопротивление образца плавно увеличивается с изначальных 500 – 700 Ом до 2 – 4 кОм, это означает что полученный золотой провод имеет сечение $S \approx 1 - 3 \text{ нм}^2$ и содержит всего 15 – 40 фундаментальных каналов проводимости сечением $S_{ch} \sim (\lambda_F/2)^2 \approx (0.52/2)^2 \text{ нм}^2$. Такая система фактически является квантовым проводом.

Изучению провода в этом промежуточном состоянии посвящён третий параграф. С помощью небольшого приложенного к нему зондирующего напряжения $V = 3 \text{ мВ}$ отслеживалась временная динамика его проводимости. Исследование показало, что практически все созданные квантовые провода сопротивлением более 2 кОм впоследствии в ходе релаксации золотой плёнки разрываются, формируя нанозазор в нужном диапазоне размеров. Время разрыва варьируется в широком диапазоне $t \sim 10 - 10^5 \text{ с}$. Показано, что на завершающем этапе формирования зазора, проводимость системы меняется скачкообразно, проходя через значения, кратные фундаментальному кванту проводимости $G_0 = e^2/h \approx 3.874 \times 10^{-5} \text{ См}$, что соответствует разрушению одиночных связей атомов золота. Также показано, что на протяжении практически всего времени своего существования полученный квантовый провод находится в квазиравновесном состоянии: ковалентные связи атомов золота могут много раз образовываться и вновь разрушаться.

Процесс релаксации проводов с меньшим сопротивлением после электромиграции протекает в среднем медленнее, а получающиеся в результате зазоры оказываются меньше. Однако при сопротивлении нанопроводов заметно меньше 2 кОм нанопровод довольно часто остаётся неразорванным. Поэтому в дальнейшем для получения нанозазоров было решено прерывать работу алгоритма электромиграции при достижении сопротивления 2 кОм. В результате описанная выше технология обеспечивает получение

нанозазоров величиной менее 5 нм с выходом годных более 90 %. Пример полученного зазора представлен на рис. 2.

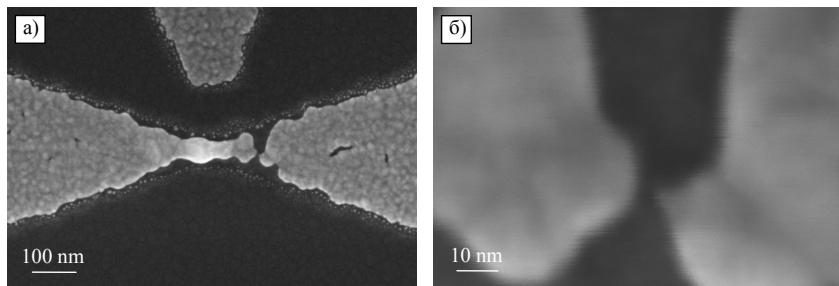


Рис. 2 — СЭМ-снимки одного из нанозазоров после контролируемого разрыва нанопровода методом электромиграции.

В заключительном параграфе главы представлены исследования электрических свойств полученных нанозазоров при температурах 77 и 300 К. Обнаружено влияние СЭМ-диагностики нанозазоров на их проводимость, связанное, по-видимому, с контаминацией, происходящей под электронным пучком. Образцы, прошедшие такую диагностику, показывают туннельное сопротивление в широком интервале значений $R \sim 10^6 - 10^{11}$ Ом, то есть зачастую много меньше сопротивления молекулярных одноэлектронных устройств, которые требуется изучать ($R > 10^8$ Ом). Поэтому данный вид диагностики далее проводился лишь после проведения всех интересующих электрических измерений. Сопротивление нанозазоров, не прошедших СЭМ-анализ, превышает 300 ГОм (за пределами возможностей используемой измерительной аппаратуры), поэтому такие нанозазоры полностью пригодны для создания молекулярных одноэлектронных устройств.

Третья глава посвящена описанию разработанной технологии встраивания наночастиц в нанометровые зазоры и исследованию электронного транспорта через них в диапазоне температур 77 – 300 К. Были использованы коммерчески доступные малые золотые наночастицы размером 2 – 4 нм, функционализированные октантиолами. Тиолы в нашем эксперименте выполняли роль туннельных переходов одноэлектронного транзистора.

В первом параграфе описаны две разработанные методики встраивания наночастиц в зазоры: традиционное высушивание раствора, а также метод электротреппинга.

В случае традиционного подхода образец на некоторое время погружался в раствор с наночастицами, а затем высушивался. При использовании данного подхода наночастица попадает в зазор лишь случайным образом с вероятностью, зависящей от концентрации раствора и времени

осаждения наночастиц. Был подобран режим, обеспечивающий их осаждение на поверхности в виде одиночных или малых групп наночастиц без образования крупных кластеров. Выход годных транзисторов после одиночной процедуры подобного встраивания наночастиц составил около 1 – 3 %. Годными транзисторами в данном случае считались те структуры, которые продемонстрировали электрические характеристики, типичные для одноэлектронного транзистора.

В случае реализации метода электротреппинга используется эффект диэлектрфореза. На образец, подключённый к измерительной аппаратуре, помещалась капля раствора с наночастицами. Затем на нанозазор подавалось медленно возрастающее напряжение. Параллельно с помощью специально созданной следящей системы на основе пикоамперметра отслеживалось сопротивление системы. При резком изменении его величины напряжение обнулялось. Характерная зависимость сопротивления от времени представлена на рис. 3а. Далее образец высушивался с помощью потока воздуха. СЭМ снимок типичной полученной структуры представлен на снимке рис. 3б.

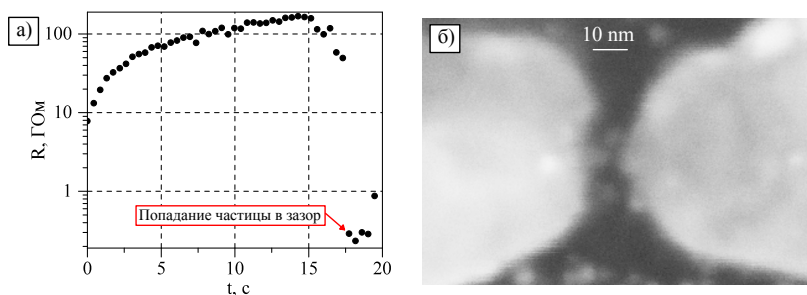


Рис. 3 — Контролируемое осаждение наночастиц методом электротреппинга: (а) — зависимость сопротивления одного из зазоров в ходе процесса, (б) — СЭМ снимок полученной в результате этого процесса структуры, на снимке видны три наночастицы, оказавшиеся в зазоре.

В результате выход годных транзисторов составил около 10 – 20 %. Основных механизмов, ограничивающих выход годных транзисторов, три. Первый — прилипание частиц в растворе друг к другу с формированием кластеров, которые затем эффективнее притягиваются в область зазора нежели одиночные наночастицы. Второй механизм связан с недостаточной чистотой раствора. Содержащиеся там примеси также могут изменять исследуемую область, приводя к появлению паразитной проводимости или препятствуя встраиванию наночастиц в зазор. Третий механизм связан с тем, что расположение встроенной в зазор наночастицы не всегда обеспечивает достаточный туннельный ток для его регистрации с помощью

имеющегося измерительного оборудования. То есть один из туннельных переходов оказывается слишком большим.

Во втором параграфе представлены электрические измерения полученных структур при температуре 77 К. Для полной характеристики системы были измерены так называемые диаграммы стабильности (ДС), представляющие собой зависимость тока через структуру от напряжения между стоком и истоком транзистора, а также от напряжения на затворе (рис. 4). Наблюдаемая на ДС ромбическая структура является доказательством одноэлектронного поведения системы. Вольт-амперные характеристики имеют ярко выраженную область подавления тока при низких напряжениях (Кулоновская блокада). Размер этой области периодически меняется с изменением напряжения на затворе, достигая максимального значения в 150 – 250 мВ в зависимости от образца. Исходя из величины кулоновской блокады был оценён эффективный размер острова транзистора, полученное значение совпадает с размером использованных наночастиц. В совокупности с результатами последующего СЭМ анализа образцов можно заключить, что наблюдаемый электронный транспорт обусловлен одиночными наночастицами золота.

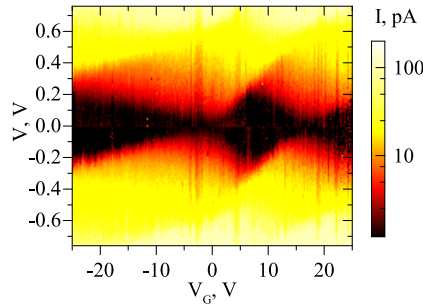


Рис. 4 — Экспериментально полученная диаграмма стабильности одноэлектронного транзистора на одиночной наночастице золота при $T = 77 \text{ K}$

Также при 77 К были исследованы электрические характеристики образцов с большим количеством наночастиц ($N > 10$), расположенных в области зазора. Продемонстрировано, что такие структуры могут иметь повышенную область подавления тока на вольт-амперных характеристиках, лежащую в диапазоне от 200 мВ до 1 В. Однако ток через такие структуры практически не зависит от напряжения на затворе.

В третьем параграфе продемонстрированы результаты электрических измерений одноэлектронных транзисторов на основе одиночных наночастиц золота в диапазоне температур от 77 до 300 К. Для проведения подобного эксперимента низкотемпературный зонд сначала охлаждался до температуры 77 К, а затем медленно (~ 20 мин) отогревался до комнатной

температуры. Одновременно с этим непрерывно проводились электрические измерения с температурным интервалом в несколько градусов. На рис. 5 представлены электрические характеристики транзистора для трёх значений температуры из исследуемого интервала. Продемонстрирована работоспособность изготовленных одноэлектронных транзисторов при высоких температурах вплоть до 220 К. Основным критерием оценки работоспособности являлось наличие регулярной и воспроизводимой зависимости тока через транзистор от напряжения на затворе. Таким образом, разработанная технология изготовления транзисторов на основе малых наночастиц золота позволяет получать планарные одноэлектронные устройства для высокотемпературных применений.

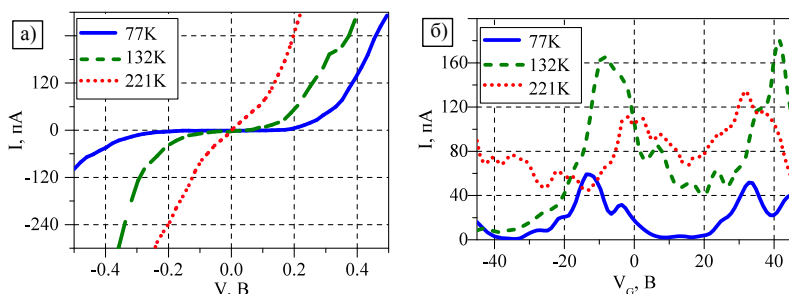


Рис. 5 — Электрические характеристики одноэлектронного транзистора на золотой наночастице при различных температурах: (а) — вольт-амперные характеристики, (б) — характеристики управления.

Также стоит отметить, что у некоторых транзисторов на вольт-амперных характеристиках участок с подавлением тока при низких напряжениях, определяемый по характерному изгибу ВАХ, сохраняется даже при повышении температуры до 300 К, что является свидетельством одноэлектронного транспорта через наночастицу. По-видимому, такое поведение характерно для частиц с наименьшим размером из диапазона 2 – 4 нм. Однако при комнатной температуре ни на одном из образцов не наблюдалась воспроизводимая зависимость тока от напряжения на затворе. Это связано с возрастающим влиянием флуктуаций заряда в зарядовых ловушках случайно расположенных в непосредственной близости к острову транзистора. Как правило, эти ловушки расположены в подложке. Возможно, в будущем данную проблему удастся решить, подвесив транзистор над подложкой.

Четвёртая глава посвящена созданию и изучению одноатомных одноэлектронных транзисторов на основе одиночных примесных атомов.

В первом параграфе описана технология изготовления кремниевых нанопроводов, из которых далее и будет формироваться одноатомный транзистор. Основой служил слой кремния-на-изоляторе (КНИ) толщи-

ной 55 нм, изолированный от подложки слоем SiO_2 . С помощью ионной имплантации слой кремния был неравномерно легирован атомами фосфора (рис. 6 а). Около поверхности был создан слой с высокой концентрацией примесей, обеспечивающий практически металлическую проводимость. В глубине их концентрация падает, поэтому там реализуется исключительно туннельный транспорт электронов.

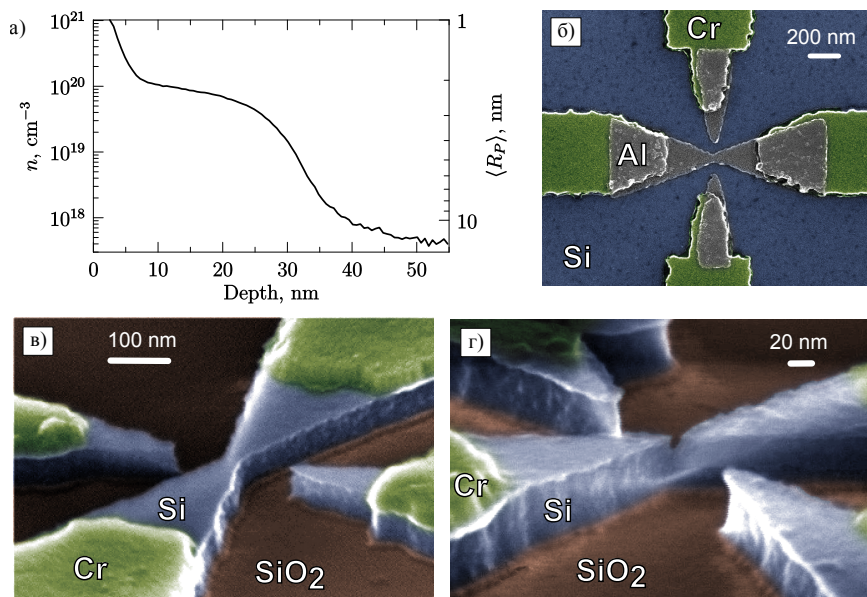


Рис. 6 — Изготовление кремниевых нанопроводов: (а) — зависимость концентрации и среднего расстояния между атомами фосфора от глубины; (б)–(г) — СЭМ снимки структур в искусственных цветах; (б) — после двух этапов литографии; (в)–(г) — после реактивно-ионного травления; (в) — с полностью целым верхним слоем кремния, (г) — с зазором в верхнем слое кремния.

Далее на поверхности образца с помощью электронно-лучевой литографии формировалась система электродов из хрома, обеспечивающая электрический контакт к формируемым впоследствии электродам транзистора: стоку, истоку и затворам (рис. 6 б — г). Затем с помощью ещё одной литографической процедуры формировалась маска из алюминия, защищающая канал формируемого транзистора от реактивно-ионного травления (рис. 6 б). После процедуры травления формировался кремниевый нанопровод шириной менее 30 нм (рис. 6 в, г), после чего алюминиевая маска удалялась в растворе КОН. Некоторые нанопровода имели выемку в верхнем высоколегированном слое кремния рис. 6 г в связи с тем, что процесс травления не был идеально анизотропным. Создание такой выемки и было

целью технологии, т. к. в этом случае электронный транспорт осуществляется лишь через нижний слаболегированный слой кремния, верхний же слой кремния играет роль электродов с наноразмерным зазором.

Второй параграф посвящён исследованию электрических характеристик изготовленных структур при температуре 4.2 К. Их можно разделить на несколько групп в зависимости от вида их электрических характеристик. Среди них есть образцы с омической проводимостью, а также одноэлектронные транзисторы с величиной кулоновской блокады 3 – 10 мВ, что оценочно соответствует острову размером $d \gtrsim 10$ нм.

Большой интерес представляют образцы, демонстрирующие более обширную область кулоновской блокады величиной до 20 мВ (рис. 7 а), что указывает на характерный размер острова менее 10 нм. Ток через такие образцы в зависимости от напряжения на затворе осциллирует, однако его зависимость далека от периодической (рис. 7 б). С увеличением напряжения на затворе средняя величина транспортного тока увеличивается, а размер кулоновской блокады уменьшается. Такое поведение типично для одноатомных структур.

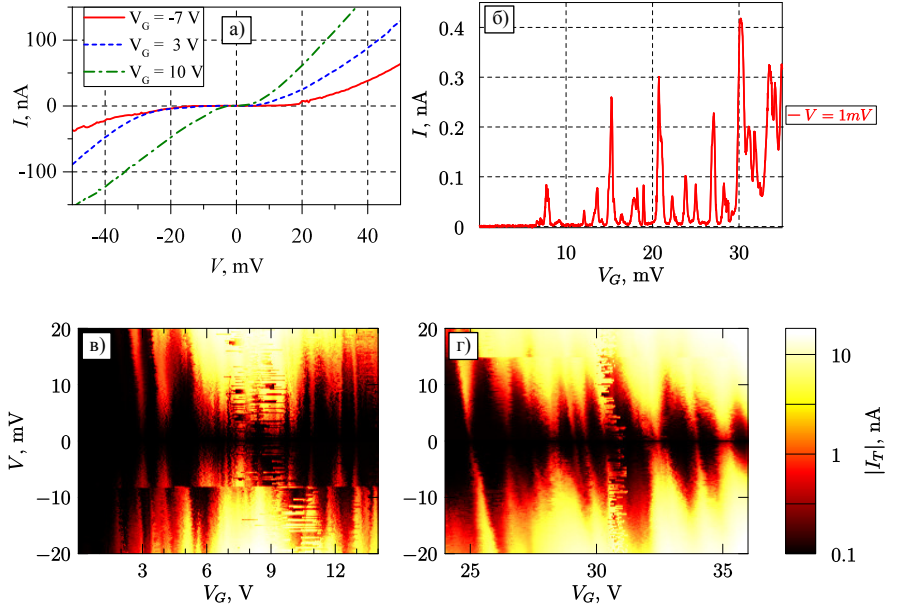


Рис. 7 — Электрические характеристики образца с параллельным транспортом электронов через локализованные зарядовые центры атомарного масштаба: (а) — вольт-амперные характеристики, (б) — характеристика управления, (в)–(г) — диаграммы стабильности.

Однако ДС подобных структур (рис. 7 в, г) содержат в себе особенно-сти, нехарактерные для одноатомного транзистора. Среди них стоит выделить наличие на ДС областей, состоящих из 5 – 6 расположенных рядом кулоновских ромбов близкого размера, вместе образующих более крупномасштабный кулоновский ромб (рис. 7 в). Наблюдаемые особенности поведения можно объяснить, если предположить, что электронный транспорт в некоторой области мостика осуществляется параллельно через небольшое количество (оценочно менее 10) зарядовых центров.

В третьем параграфе представлен разработанный метод последовательного уменьшения размера кремниевого мостика с помощью коротких (3 – 5 с) сеансов изотропного реактивно-ионного травления. После каждого сеанса травления электрические характеристики каждой структуры измерялись в тех же условиях, что и ранее, а затем процедура травления повторялась. Было замечено, что в ходе такого итерационного процесса сопротивление образцов увеличивалось. У образцов, демонстрировавших ранее линейную ВАХ, могла появиться кулоновская блокада. Размер кулоновской блокады, определяемый по асимптотическим веткам ВАХ, имел тенденцию увеличиваться по мере травления, достигая в итоге для некоторых структур значений, типичных для одноатомных транзисторов.

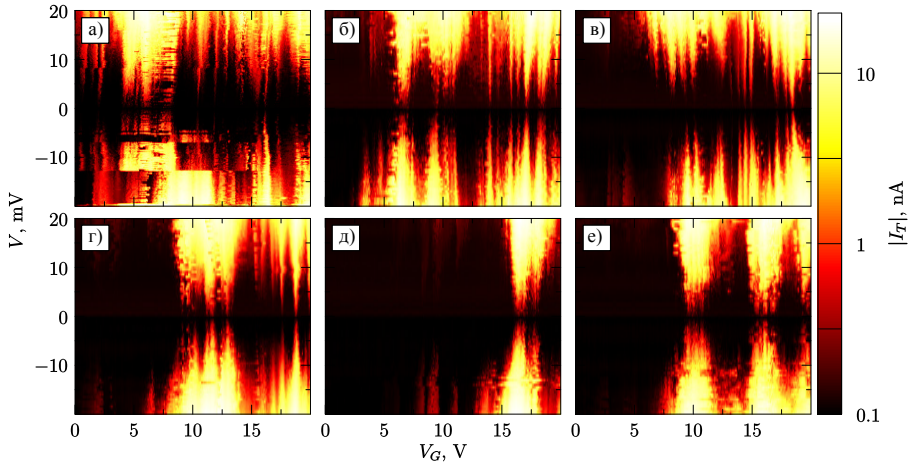


Рис. 8 — Изменение электрических характеристик одного из образцов в результате последовательного уменьшения сечения кремниевого мостика

Наиболее интересные изменения происходили с образцами, уже демонстрировавшими высокое значение кулоновской блокады. На рис. 8 показано изменение поведения такого образца в результате пяти последовательных сеансов травления. Количество кулоновских ромбов на ДС снижается. Также снижается и влияние переключения зарядовых ловушек вблизи канала транзистора. Оно хорошо заметно на ДС исходного транзистора

(рис. 8 а), “рваная” структура которой связана со сменой зарядового состояния одной или нескольких зарядовых ловушек вблизи острова транзистора. Подобные изменения связаны с уменьшением количества атомов фосфора в кремниевом мостике. В результате последнего травления была получена структура с характеристиками, практически идентичными наблюдаемым в одноатомных транзисторах (рис. 8 е).

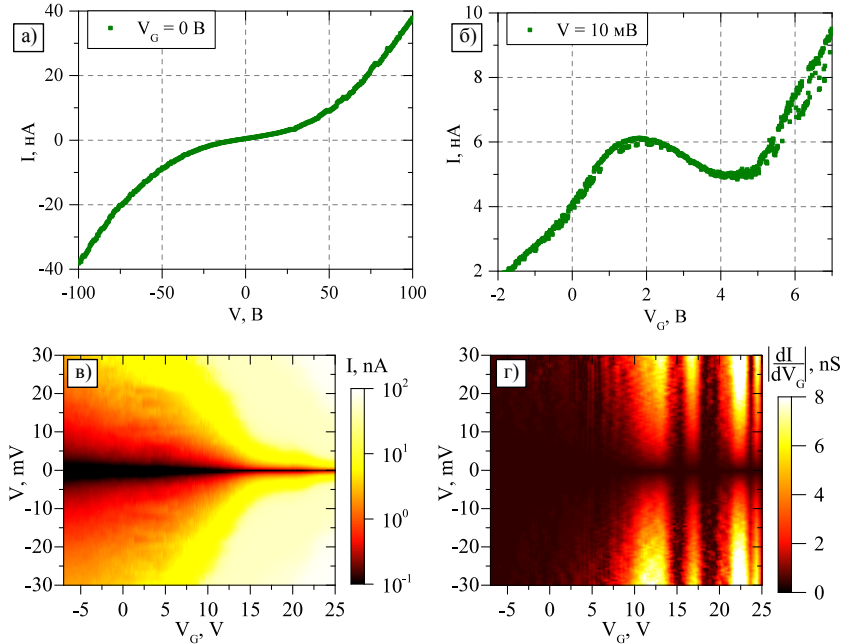


Рис. 9 — Электрические характеристики одноэлектронного транзистора на основе одиночных примесных атомов фосфора при температуре 77 К

В четвёртом параграфе приведено обсуждение результатов измерений одноэлектронного транзистора на одиночных примесных атомах. Полученное высокое значение зарядовой энергии острова транзистора $E_C \approx 10 - 15$ мэВ говорит о потенциально высокой рабочей температуре подобных транзисторов. Для проверки этого утверждения, электрические характеристики готовых устройств были дополнительно изучены при температуре 77 К. Зависимость тока от напряжений на электродах полученного устройства (рис. 9 а) практически не отличается от поведения классического полевого транзистора. Такое поведение является следствием наличия свободных носителей заряда в кремнии при 77 К. Однако если применить дифференцирование упомянутой ДС по затворному напряжению (процедура, традиционно используемая для анализа ДС одноэлектронных транзисторов), то на диаграмме видны особенности, которые являются свиде-

тельством наличия коррелированного транспорта электронов через исследованную структуру (рис. 9г).

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Впервые экспериментально исследована при комнатной температуре временная динамика состояния квантового провода, образующегося в результате проведения процесса электромиграции в месте наибольшего сужения нанопровода и содержащего в поперечном сечении менее 20 атомов золота. Продемонстрирована квантовая природа проводимости в таком проводе. Определён диапазон характерного времени разрушения провода $t \sim 10 - 10^5$ с
2. Экспериментально исследованы электрические характеристики нанозазоров менее 5 нм между золотыми электродами. Продемонстрировано их высокое сопротивление ($R > 300$ ГОм), а значит, их пригодность для создания молекулярных устройств. Также впервые продемонстрировано влияние контаминации, образующейся под электронным лучом во время сканирующей электронной микроскопии, на проводимость исследуемых наносистем. Сопротивление утечки в них после исследования в электронном микроскопе падает до величин $R \sim 10^6 - 10^{11}$ Ом
3. Экспериментально исследован туннельный электронный транспорт через одиночные малые (2 – 4 нм) золотые наночастицы, в широком диапазоне температур (77 – 300 К). Впервые продемонстрирован одноэлектронный характер проводимости такой системы, обладающей высокой зарядовой энергией (75 – 125 мэВ), в этом диапазоне температур, включая возможность управления током через такой одноэлектронный транзистор с помощью электрического поля при температурах 77 – 220 К.
4. Разработана технология изготовления кремниевых нанопроводов шириной менее 30 нм из неравномерно легированного кремния на изоляторе. Впервые продемонстрировано, что при температуре 4.2 К транспорт через такие нанопровода осуществляется одним из следующих способов: нанопровода с омическим сопротивлением, одноэлектронные транзисторы на основе острова размером более 10 нм, одноэлектронные транзисторы на основе отдельных примесных атомов. Разработан метод последовательного уменьшения поперечного сечения этих нанопроводов до состояния, когда электронный транспорт в них проходит через 1 – 3 примесных атома и имеет коррелированный (одноэлектронный) характер.
5. Высокое значение зарядовой энергии $E_C \approx 10 - 15$ мэВ полученных одноэлектронных транзисторов на основе одиночных примесных атомов фосфора в кремнии позволило впервые наблюдать коррели-

рованное туннелирование электронов в одноатомном транзисторе при температуре 77 К.

Публикации автора по теме диссертации

В рецензируемых журналах, индексируемых Scopus и Web of Science

1. Dagesyan S., Stepanov A., Soldatov E. Snigirev O. Properties of Extremely Narrow Gaps Between Electrodes of a Molecular Transistor. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 28, 787–790 (2015).
2. Дагесян С., Солдатов Е., Степанов А. Изготовление предельно малых зазоров в металлических нанопроводах и исследование их характеристик. *Известия Российской академии наук. Серия физическая* 78, 211–211 (2014).
3. Dagesyan S., Shorokhov V., Presnov D. et al., Sequential reduction of the silicon single-electron transistor structure to atomic scale. *Nanotechnology* 28, 225304 (2017).

В рецензируемых трудах конференций

4. Dagesyan S., Stepanov A., Soldatov E., Zharik G. High temperature single-electron transistor based on a gold nanoparticle. *Proc. of SPIE Vol 9440, 94400P–1* (2014).

Тезисы докладов на международных конференциях

5. Дагесян С., Солдатов Е. Степанов А. Изготовление предельно малых зазоров в металлических нанопроводах и исследование их характеристик. *Труды XIV Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн», Красновидово, 2013* (2013).
6. Дагесян С., Галстян А., Солдатов Е. Снигирев О. Использование метода электротреппинга для создания одноэлектронных транзисторов. *Сборник трудов XV Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова («Волны-2016»)* (2016).
7. Presnov D., Shorokhov V., Amitonov S. et al. Arsenic dopant single atom single-electron transistor. *International Conference “Micro- and Nanoelectronics – 2014” Book of Abstracts* (2014), P2–02.
8. Galstyan A., Dagesyan S., Soldatov E. Snigirev O. Dielectrophoresis method for single electron transistors creation. *International Conference “Micro- and Nanoelectronics – 2016” Book of Abstracts*, (2016), 171.21
9. Galstyan A., Dagesyan S. Soldatov E. Creating the single-electron transistors by electromigration and electrotrapping. *Proceedings of*

- the 26th International Conference "Microwave Telecommunication Technology (CriMiCo'2016) 7 (2016), 1520—1526.
10. Dagesyan S., Stepanov A., Soldatov E. Zharik G. High-temperature single-electron transistor based on a gold nanoparticle. International Conference “Micro- and Nanoelectronics – 2014” Book of Abstracts (2014), P2—01.
 11. Dagesyan S., Stepanov A., Soldatov E. Snigirev, O. Properties of extremely narrow gaps between electrodes of molecular transistor. 4th International Conference on Superconductivity and Magnetism 2014 Abstract Book (2014), 908.
 12. Dagesyan S., Shorokhov V., Presnov D. et al. Single-electron transistor based on single molecules and atoms. V International Scientific Conference STRANN 2016 Abstracts (2016), 16, 17.
 13. Dagesyan S., Shorokhov V., Presnov D. et al. Single-electron transistor based on several dopant atoms в International Conference “Micro- and Nanoelectronics – 2016” Book of Abstracts, (2016), 172.

Список литературы

- [1] Intel. (2016). Xeon Processor E5-2699 v4 (55M Cache, 2.20 GHz), url: http://ark.intel.com/products/91317/Intel-Xeon-Processor-E5-2699-v4-55M-Cache-2_20-GHz.
- [2] S. M. George, “Atomic layer deposition: An overview”, *Chemical reviews*, vol. 110, no. 1, p. 111–131, 2009.
- [3] A. Pirati, R. Peeters, D. Smith и др., “Performance overview and outlook of EUV lithography systems”, в *SPIE Advanced Lithography*, International Society for Optics и Photonics, 2015, 94221P—94221P.
- [4] I. Servin, N. A. Thiam, P. Pimenta-Barros и др., “Ready for multi-beam exposure at 5kV on MAPPER tool: lithographic and process integration performances of advanced resists/stack”, в *SPIE Advanced Lithography*, International Society for Optics и Photonics, 2015, с. 94231C—94231C.
- [5] (2016). GlobalFoundries Press Release, url: <http://www.globalfoundries.com/newsroom/press-releases/globalfoundries-extends-roadmap-to-deliver-industry-s-leading-performance-offering-of-7nm-finfet-technology>.
- [6] D. Averin и К. Likharev, “Single electronics: A correlated transfer of single electrons and Cooper pairs in systems of small tunnel junctions”, *Mesoscopic phenomena in solids*, т. 30, с. 173—271, 1991.
- [7] T. A. Fulton and G. J. Dolan, “Observation of single-electron charging effects in small tunnel junctions”, *Physical review letters*, vol. 59, no. 1, p. 109, 1987.

- [8] K. K. Likharev, “Single-electron devices and their applications”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 87, no. 4, p. 606–632, 1999.
- [9] J. Kauppinen, K. Loberg, A. Manninen, *et al.*, “Coulomb blockade thermometer: Tests and instrumentation”, *Review of scientific instruments*, vol. 69, no. 12, p. 4166–4175, 1998.
- [10] J. P. Pekola, O.-P. Saira, V. F. Maisi, *et al.*, “Single-electron current sources: Toward a refined definition of the ampere”, *Reviews of Modern Physics*, vol. 85, no. 4, p. 1421, 2013.
- [11] V. Krupenin, D. Presnov, M. Savvateev, *et al.*, “Noise in al single electron transistors of stacked design”, *Journal of applied physics*, vol. 84, no. 6, p. 3212–3215, 1998.
- [12] Y. Wei, J. Weis, K. v. Klitzing, and K. Eberl, “Edge strips in the quantum hall regime imaged by a single-electron transistor”, *Physical review letters*, vol. 81, no. 8, p. 1674, 1998.
- [13] S. Kubatkin, A. Danilov, M. Hjort и др., “Single-electron transistor of a single organic molecule with access to several redox states”, *Nature*, т. 425, № 6959, с. 698–701, 2003.
- [14] P. M. Koenraad and M. E. Flatté, “Single dopants in semiconductors”, *Nature materials*, vol. 10, no. 2, p. 91–100, 2011.
- [15] D. Goldhaber-Gordon, H. Shtrikman, D. Mahalu, *et al.*, “Kondo effect in a single-electron transistor”, *Nature*, vol. 391, no. 6663, p. 156–159, 1998.
- [16] E. Soldatov, V. Khanin, A. Trifonov, *et al.*, “Single-electron transistor based on a single cluster molecule at room temperature”, *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, vol. 64, no. 7, p. 556–560, 1996.
- [17] Y. A. Pashkin, Y. Nakamura, and J. Tsai, “Room-temperature al single-electron transistor made by electron-beam lithography”, *Applied Physics Letters*, vol. 76, no. 16, p. 2256–2258, 2000.

Дагесян Саркис Арменакович

ОДНОЭЛЕКТРОННЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С ВЫСОКОЙ ЗАРЯДОВОЙ
ЭНЕРГИЕЙ

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____