

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
ДАГЕСЯНА САРКИСА АРМЕНАКОВИЧА  
«**Одноэлектронные транзисторы с высокой зарядовой энергией**»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук по специальности  
01.04.04 – Физическая электроника

Диссертационная работа Дагесяна Саркиса Арменаковича изложена на 118 страницах, содержит 48 рисунков и 152 ссылки литературы. Целью его диссертационной работы является разработка лабораторной методики создания одноэлектронных транзисторов на основе нанобъектов (наночастицы золота 2...4 нм) и объектов атомарного масштаба (примесные атомы в решетке кремния), 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.

Актуальность представленной к защите работы не вызывает сомнений. Одноэлектроника — это одна из тех областей науки и техники, где ожидается прорыв в электронике будущего. В настоящий момент работу одноэлектронных транзисторов можно наблюдать только в исследовательских лабораториях, но в будущем их использование в массовом производстве может привести к резкому снижению энергопотребления и тепловыделения электронными схемами, увеличению быстродействия и плотности элементов микросхем. Развитие технологии одноэлектронных транзисторов позволит создать ячейки памяти с большим временем хранения, высокой плотностью записи информации и малой рассеиваемой мощностью, а также высокочувствительные химические/биохимические сенсоры.

Решение поставленных в работе задач нетривиально по следующим причинам: во-первых, в связи со сложностью манипулирования отдельными нанобъектами, а также в связи с необходимостью фиксировать их в пространстве между электродами транзистора для создания туннельных переходов, и, во вторых, технология изготовления одноэлектронных устройств для работы при температурах вплоть до комнатной до сих пор остаётся нерешённой проблемой, несмотря на то, что различные варианты одноэлектронных устройств на основе одиночных молекул или атомов реализованы и принципиальная возможность наблюдения коррелированного туннелирования электронов даже при комнатной температуре давно экспериментально показана.

Несомненным практическим достоинством работы является использование стандартной планарной технологии как при создании одноэлектронных транзисторов на основе нанобъектов (наночастицы золота 2...4 нм), так и объектов атомарного масштаба (примесные атомы в решетке кремния).

Таким образом, в представленной работе поставлены задачи, решение которых актуально для создания элементной базы одноэлектроники.

Во **Введении** дано обоснование актуальности работы, а также сделан обзор современного состояния научных исследований в рассматриваемых областях. Здесь же формулируется цель, ставятся цели и задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы, формулируются основные положения, выносимые на защиту, обосновывается достоверность полученных результатов, приведён список печатных работ и докладов на конференциях, в которых содержатся основные результаты диссертационной работы.

**В Первой главе** выполнен анализ методов создания одноэлектронных транзисторов на основе одиночных молекул, молекулярных кластеров, наночастиц и одиночных примесных атомов. В кратком обзоре основных известных на сегодняшний день свойств электронного транспорта в подобных структурах основное внимание уделено экспериментам при высоких (77...300 К) температурах. Глава состоит из четырех параграфов, каждый из которых посвящен одной из технологических проблем:

- создание системы электродов с нанометровым зазором;
- встраивание в зазор нанобъекта, который будет служить «островом» одноэлектронного транзистора.

В обзоре приводятся примеры создания системы электродов с нанометровым зазором зондовым методом, методом механически контролируемого разрыва соединения, создание планарной системы электродов методами современной литографии с последующим уменьшением величины зазора. Подробно рассмотрен метод электромиграции и отмечена его перспективность. Среди методов встраивания нанообъектов в зазор, как наиболее перспективный, выделен метод, основанный на эффекте диэлектрофореза. Отдельный, четвертый, параграф посвящен технологии создания одноэлектронных транзисторов на примесных атомах. Обзор литературы достаточно полно отражает современное состояние технологических задач создания одноэлектронных транзисторов на основе одиночных молекул, молекулярных кластеров, наночастиц и одиночных примесных атомов.

В последующих главах автор подробно описывает последовательность операций и результаты исследований полученных при его личном участии структур.

**Вторая глава** занимает четверть объема диссертации и состоит из четырех параграфов. В главе представлены оригинальная методика формирования планарных металлических электродов одноэлектронного транзистора и результаты исследования свойств полученных систем электродов на различных стадиях изготовления.

Методика формально состоит из трех стадий:

1. Изготовление методами электронно-лучевой и фотолитографии макроскопических электродов для соединения формируемой структуры с измерительной аппаратурой, затвора транзистора, а также золотых нанопроводов сечением около  $50 \times 14 \text{ нм}^2$ , являющихся заготовками для получения стока и истока будущего транзистора.

2. Контролируемое сужение поперечного сечения нанопровода-заготовки до значений порядка нескольких квадратных нанометров с помощью оригинальной системы управления процессом электромиграции атомов.

3. Регистрация результата самопроизвольной релаксации напряжений в плёнке, оставшихся после проведения процесса электромиграции, с образованием нанозазора в области сужения золотого нанопровода.

Каждая из этих стадий подробно описана в отдельном параграфе.

**По итогам Главы 2** в основные результаты работы вынесено 2 пункта:

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  $t \sim 10 - 10^5 \text{ с}$ .

2. Экспериментально исследованы электрические характеристики нанозазоров менее 5 нм между золотыми электродами. Продемонстрировано их высокое сопротивление ( $R > 300 \text{ ГОм}$ ), 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  $R \sim 10^6 - 10^{11} \text{ Ом}$ .

и 1 пункт сформулирован как положение, выносимое 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 %.

**Третья глава** посвящена описанию разработанной в данной диссертационной работе методики встраивания наноразмерного острова транзистора в предварительно изготовленный зазор между электродами, экспериментальному исследованию электронного транспорта в полученных структурах, интерпретации полученных данных и сравнению электрических характеристик созданных одноэлектронных устройств с характеристиками образцов, полученных в работах других авторов.

**По итогам Главы 3** в основные результаты работы вынесен 1 пункт:

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.

и 2 пункта сформулированы как положения, выносимые на защиту:

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.

**Четвертая глава** диссертационной работы посвящена описанию разработанного метода создания одноэлектронных транзисторов на основе одиночных примесных атомов, а также исследованию электрических характеристик полученных устройств.

Одноэлектронный транзистор был реализован на основе широко используемых в микро- и нанoeлектронных устройствах материалов. В качестве примесных атомов использовался фосфор, находящийся в кристаллической решётке кремния. Однако стоит заметить, что метод является достаточно универсальным, и в принципе может быть применён и для других материалов.

Как уже было сказано в главе 1, наиболее актуальной является задача создания одноатомных устройств на основе широко используемых в полупроводниковой индустрии технологий. Идея разработанного метода заключается в следующем. Первым шагом с помощью стандартных литографических процедур создаётся кремниевый нанопровод, электронный транспорт в котором осуществляется параллельно через большое количество примесных атомов, затем поперечное сечение нанопровода постепенно уменьшается с помощью коротких сеансов реактивно-ионного травления до достижения желаемых электрических характеристик образца.

Далее следует последовательная реализует данного метода, систематизация и анализ полученных результатов.

**По итогам Главы 4** в основные результаты работы вынесено 2 пункта:

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  $E_C \approx 10\text{--}15$  мэВ полученных одноэлектронных транзисторов на основе одиночных примесных атомов фосфора в кремнии позволило впервые наблюдать коррелированное туннелирование электронов в одноатомном транзисторе при температуре 77 К.

и 2 пункта сформулированы как положения, выносимые на защиту:

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.

Диссертационная работа Дагесьяна С.А. содержит большой экспериментальный материал. Здесь особо следует отметить, что им впервые при комнатной температуре исследована временная динамика квантового провода, образующегося в процессе электромиграции; впервые продемонстрировано влияние контаминации, образующейся под электронным лучом во время сканирующей электронной микроскопии, на электропроводность

нанозазора; разработана оригинальная методика контролируемого встраивания малых (2...4 нм) наночастиц золота в нанозазор между металлическими электродами с помощью эффекта диэлектрофореза; 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; разработана оригинальная технология изготовления кремниевых нанопроводов с сужением менее 50 нм из неравномерно легированного кремния на изоляторе; впервые разработана методика контролируемого постепенного уменьшения размера кремниевого нанопровода, обеспечивающая постепенный переход от провода с омическим сопротивлением к одноэлектронному транзистору на одиночных примесных атомах. Интерпретация полученных экспериментальных данных выполнена с помощью физически корректных моделей.

Результаты диссертационной работы опубликованы 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.

Автореферат диссертации полностью соответствует ее содержанию.

К работе имеются следующие замечания:

1. В тексте работы имеется ряд опечаток, например:  
стр. 23, строка 8 – ... на некоторое *время* (пропущено) помещается;  
стр. 42, строка 7 – опечатка в степени при указании величины плотности тока, а также стилистические погрешности, например, вместо термина «проводимость» было бы уместнее использовать «электропроводность».
2. При исследовании процессов электромиграции и самопроизвольной релаксации во второй главе было бы уместно обсудить влияние гранулированности напыленных золотых проводников.
3. Автор не указал, влияло ли на характеристики одноэлектронных транзисторов при изменении температуры изменение размера зазоров за счет температурных коэффициентов расширения подложки и электродов.

Указанные недостатки не носят принципиального характера и не умаляют научной и практической значимости диссертационной работы Дагесяна С.А. Разработка методики создания одноэлектронных транзисторов на основе объектов молекулярного и атомарного 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, направлена на решение задачи, имеющей важное значение для развития элементной базы одноэлектроники. Кроме того, в работе изложены новые технологические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны.

Диссертационная работа Дагесяна Саркиса Арменаковича «Одноэлектронные транзисторы с высокой зарядовой энергией» полностью соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова», а ее автор Дагесян Саркис Арменакович заслуживает присвоения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности «01.04.04 – Физическая электроника».

Старший научный сотрудник лаборатории «Физических основ нанокompозитных материалов для информационных технологий» ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, кандидат технических наук

Фионов А.С.

Подпись Фионова А.С. удостоверяю  
Ученый секретарь ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН,  
кандидат физико-математических наук

Чусов И.И.

Фионов Александр Сергеевич

Контактная информация

Почтовый адрес: 125009, Москва, ул. Моховая, дом 11, строение 72.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН)

Email: [fionov@cplire.ru](mailto:fionov@cplire.ru)

Рабочий телефон: +7 (495) 629-33-68