

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Саркиса Арменаковича Дагесяна
"Одноэлектронные транзисторы с высокой зарядовой энергией",
представленную на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.04 – физическая электроника.

Диссертационная работа С.А. Дагесяна посвящена исследованию широкого круга проблем, связанных с разработкой лабораторной методики изготовления одноэлектронных транзисторов на основе объектов молекулярного (наночастицы золота 2 – 4 нм) и атомарного (примесные атомы в решётке кремния) масштаба, проведению структурных исследований изготовленных устройств, изучению электронного транспорта и одноэлектронных эффектов в изготовленных элементах в широкой области температур, верхняя граница которой ранее в планарных структурах аналогичного типа не была достигнута.

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена необходимостью повышения рабочей температуры работающих на одноэлектронных эффектах зарядовых сенсоров, которые в настоящее время достаточно широко начали использоваться для исследования свойств больших биологических молекул, а также необходимостью разработки методов изготовления одноэлектронных структур с воспроизводимыми и заранее заданными параметрами.

Важнейшими результатами данной работы являются:

- разработка лабораторной методики изготовления планарных электродов молекулярного одноэлектронного транзистора на основе электроннолучевой литографии с зазором между электродами менее 5 нм и сопротивлением 300 Гом при выходе годных более 90 %;
- разработка лабораторной методики встраивания наночастиц в зазор между электродами с помощью метода электротреппинга позволяющей изготавливать одноэлектронные транзисторы на основе малых (2 – 4 нм) наночастиц золота с выходом годных более 10 %;
- экспериментальное доказательство коррелированного характера электронного транспорта через сформированные одноэлектронные транзисторы до температуры 300К и демонстрация управления туннельным током через одиночную наночастицу с помощью затвора в области температур до 220К;
- разработка лабораторной методики изготовления и контролируемого уменьшения размера кремниевого нанопровода с помощью коротких сеансов реактивно-ионного травления (5 – 10 с) с целью изготовления устройств, в которых электронный транспорт осуществляется через несколько (1 – 3) примесных атомов;
- экспериментальное доказательство коррелированного характера электронного транспорта в кремниевых нанопроводах, изготовленное сужение которых содержит единичные примесные атомы фосфора при температурах до 77 К.

Все перечисленные выше результаты являются новыми, оригинальными и получены автором впервые. Они, несомненно, важны как для понимания фундаментальных аспектов физики процессов в наноразмерных мезоскопических объектах, так и для применения таких объектов в практически значимых сенсорных устройствах.

Их практическая значимость состоит в том, что они могут быть использованы для создания разнообразных высокотемпературных одноэлектронных устройств, таких как сверхчувствительные зарядовые сенсоры с высоким пространственным разрешением для сканирующих зондовых микроскопов. Кроме того, полученные в работе технологические решения могут быть использованы для создания и исследования одноэлектронных устройств на основе других наноразмерных объектов: различных молекул и примесных атомов отличных от золотых наночастиц и атомов фосфора. Необходимо особо отметить, что развиваемые в данной диссертационной работе методы изготовления одноатомных структур базируются исключительно на основе таких технологических операций, которые используются повсеместно в полупроводниковой индустрии.

Обоснованность и достоверность выводов и результатов диссертационной работы обеспечены согласием экспериментально измеренных электрических характеристик полученных систем с теоретически предсказанными значениями и зависимостями, а также согласием с экспериментальными данными, известными из литературы.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка цитируемой литературы, состоящего из 152 ссылок. Она изложена на 118 страницах, включая 48 рисунков.

Во введении дается литературный обзор исследований одноэлектронных устройств на основе одиночных молекул и атомов, обосновывается актуальность проводимых исследований, формулируются их цели, научная новизна и практическая значимость, а также 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 содержит обзор методов создания одноэлектронных 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 ней дается обоснование выбора направления, в котором автор считает необходимым осуществлять разработку технологических решений направленных на создание одноэлектронных устройств.

Во второй главе дано описание используемой автором технологии изготовления системы планарных электродов молекулярного одноэлектронного транзистора, а также результаты исследования электрических свойств системы на различных стадиях изготовления. Описан разработанный им алгоритм проведения контролируемого сужения золотого нанопровода, использующий эффект электромиграции атомов в тонких плёнках при пропускании через них тока большой плотности. Показано, что использование быстродействующей (порядка 10 мкс) обратной связи позволяет плавно увеличивать сопротивление от 500 – 700 Ом до 2 – 4 кОм. Установлено также, что в процессе релаксации структур с сопротивлением 2 кОм возникает разрыв нанопровода с образованием зазора 5 нм с сопротивлением более 300 ГОм и выходом годных 90%. Показано, что исследования полученных структур методами сканирующей электронной микроскопии сопровождаются уменьшением данного сопротивления до значений ($10^6 - 10^{11}$ Ом) существенно меньших сопротивления изготавливаемых молекулярных одноэлектронных устройств.

Третья глава посвящена описанию разработанной технологии встраивания наночастиц в нанометровые зазоры и исследованию электронного транспорта таких структур в диапазоне температур 77 – 300 К. В ней дано описание двух разработанных методик встраивания наночастиц в зазоры: традиционное высушивание раствора, а также метод электротреппинга, продемонстрировано что первая из них дает выход годных одноэлектронных транзисторов на уровне 3%, в то время как вторая – на уровне 10-20%. Обоснованы три основных механизма, ограничивающих выход годных транзисторов. Представлены электрические измерения полученных структур при температуре 77 К. Показано, что их вольт-амперных характеристиках имеет место кулоновская блокада, то есть они имеют ярко выраженную область подавления тока при низких напряжениях. Исходя из величины этой блокады дана оценка эффективного размера острова транзистора, и сделан вывод о том, что наблюдаемый электронный транспорт обусловлен одиночными наночастицами золота с размером 2-4 нм. Продemonстрирована работоспособность изготовленных одноэлектронных транзисторов при температурах вплоть до 220 К.

Четвёртая глава посвящена созданию и изучению одноатомных одноэлектронных транзисторов на основе одиночных примесных атомов. В ней описана технология изготовления кремниевых нанопроводов шириной менее 30 нм, содержащих вследствие анизотропного травления выемку в верхнем слое легирования. Наличие выемки обеспечивает электронный транспорт лишь через нижний слаболегированный слой кремния при этом верхний слой кремния играет роль подводящих ток электродов. Предложен и реализован оригинальный метод последовательного уменьшения размера кремниевого мостика с помощью коротких (3 – 5 с) сеансов изотропного реактивно-ионного травления. Показано, что в результате последовательного импульсного травления можно изготовить структуры с характеристиками, практически идентичными наблюдаемым в одноатомных транзисторах. Высокое значение зарядовой энергии $E_c \approx 10-15$ 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.

В заключении приведены основные результаты диссертации.

По содержанию диссертации имеется несколько замечаний.

1. На странице 47 диссертации дается оценка числа проводящих каналов в нанопровode. Из факта увеличения сопротивления структуры с 5 Ом до $(1.5 \div 3)$ КОм в результате процесса электромиграции делается заключение о том, что результирующее оценочное поперечное сечение нанопровода составляет $1 \div 3$ нм². Как получена данная оценка не вполне ясно. При таком поперечном сечении и приведенном значении удельного сопротивления золота $(3 \div 5) \times 2.2 \times 10^{-8}$ Ом см, длина канала с сопротивлением $(1.5 \div 3)$ КОм оказывается неоправданно большой. С нашей точки зрения получившаяся структура – это чистое сужение, число каналов в котором определяется отношением квантового сопротивления к измеренному. Это дает 8-10 каналов, а не 10-40, как написано на странице 47. Такая оценка согласуется с экспериментальными данными, представленными на рис.2.9 на странице 48.

2. Второе замечание связано с использованием классических формул туннельного тока для фитирования ВАХ зазоров изложенное в параграфе 2.4.2 диссертации. Использование для этого формул классической туннельной теории позволяет воспроизвести форму ВАХ при использовании весьма малых значений работы выхода электронов - 0.2 эВ. С нашей точки зрения в данном случае имеет место неупругое резонансное туннелирование через локализованные состояния в подложке и на ее поверхности. Как правило, такие состояния распределены равномерно по пространству и по энергии. Поэтому приложение управляющего напряжения не приводит к изменению сопротивления. Просто происходит перестройка перколяционной сетки. При наличии на резонансной траектории более 5 центров, а их количество растет с ростом напряжения, можно по теории Глазмана-Матвеева (Письма ЖЭТФ 49 570 (1989)) получить форму ВАХ практически любой кривизны. Для резонансного туннелирования работа выхода не есть параметр задачи.
3. Измерения ВАХ проводились по двухточечной, а не четырехточечной схеме.

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

Данная диссертация на соискание ученой степени кандидата наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей значение для развития раздела физической электроники, нацеленного на создания высокочувствительных зарядовых сенсоров. В ней изложены новые научно обоснованные технологические решения вопроса создания датчиков таких сенсоров, работающих при температурах выше азотных, что имеет существенное значение для развития сенсорики больших биологических молекул.

Автореферат полно отражает содержание диссертации, которая оформлена в соответствии с требованиями Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова.

Материалы диссертации своевременно опубликованы в рецензируемых трудах конференции и трех статьях в научных журналах из списка Web of Science и Scopus, один из которых является высокорейтинговым, а также в 9 тезисах докладов, которые были доложены на семи российских и международных конференциях. Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, а также данные о личном научном вкладе автора диссертации.

По объему, новизне, значимости для практики и качеству проведенных исследований диссертационная работа удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а ее автор С.А. Дагесян заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.04 – физическая электроника.

Главный научный сотрудник НИИЯФ МГУ,
доктор физико-математических наук

М.Ю. КУПРИЯНОВ

Подпись М.Ю. Куприянова удостоверяю
Ученый секретарь НИИЯФ МГУ,

Е.А. СИГАЕВА

Куприянов Михаил Юрьевич

Контактная информация

Почтовый адрес:

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына (НИИЯФ МГУ)

Email: mkupr@pn.npi.msu.ru

Рабочий телефон: +7 495 939 25 88