Кулоновская блокада в наноструктуре на основе одиночного внутримолекулярного зарядового центра

В. Р. Гайдамаченко^{1,*a*}, Е. К. Белоглазкина², Р. А. Петров², С. А. Дагесян¹, И. В Сапков¹, Е. С. Солдатов^{1,*b*}

 ¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, лаборатория «Криоэлектроника». Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
 ² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, химический факультет, кафедра органической химии. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 3.

E-mail: ^a 1994vg@gmail.com, ^b esold@phys.msu.ru

Статья поступила 25.05.2017, подписана в печать 08.09.2017.

Разработана оригинальная методика изготовления металлических электродов нанотранзистора с нанозазором менее 4 нм между ними с помощью контролируемой электромиграции предварительно «подвешенных» нанопроводов системы. Разработан метод встраивания между полученными электродами молекулы аурофильного производного терпиридина на основе родия. Приведены характеристики электронного транспорта через систему, включающую указанную молекулу с одноатомным зарядовым центром, свидетельствующие о реализации в ней режима коррелированного (одноэлектронного) туннелирования электронов.

Ключевые слова: электромиграция, атом, молекула, молекулярная электроника, одномолекулярный транзистор, коррелированное туннелирование электронов.

УДК: 538.971. РАСS: 85.65.+h.

Введение

Основной тенденцией развития электроники последних десятилетий было увеличение степени интеграции рабочих элементов на чипе, в том числе за счет уменьшения их размеров. За последние 2 года в производство были запущены чипы, созданные по норме 14 нм, а на 2017 г. компанией Intel запланирован выход на норму 10 нм [1]. С выходом технологии на рабочие слои элементов с толщиной в единицы атомов, независимого от того, металлы это, полупроводники или сверхпроводники, в работу устройства начинают вмешиваться размерные квантовые эффекты. Их наличие приводит к усложнению и удорожанию процесса изготовления чипов [2], а в предельном случае и вовсе делает невозможным реализацию элементов на прежних физических принципах [3], заставляя искать альтернативные пути развития электроники.

Одним из перспективных устройств нового поколения наноэлектроники может стать мономолекулярный одноэлектронный транзистор, принцип работы которого основан на явлениях коррелированного туннелирования электронов и кулоновской блокаде [4–6]. Для обеспечения высокой рабочей температуры ($T_{\text{раб}} > 77$ K) одноэлектронные транзисторы должны иметь характерный размер 3–5 нм. В качестве центрального/туннельного «острова» транзистора при этом может использоваться молекула или малая наночастица. Развитие современного компьютерного дизайна материалов, в том числе и дизайна одиночных молекул, позволяет рассчитывать на возможность подбирать «остров» под различные цели и задачи [7].

В настоящей работе использовалась оригинальная методика изготовления металлических электродов нанотранзистора путем контролируемой электромиграции системы в предварительно подвешенных нанопроводов, в результате которой в последних формированись нанозазоры менее 4 нм, пригодные для помещения вакантной молекулы. Разработаны методы такого встраивания в транзистор молекулы аурофильного производного терпиридина на основе родия, а также измерены характеристики электронного транспорта через полученную систему, включающую данную молекулу.

1. Технология изготовления образцов

1.1. Создание системы нанопроводов

На кристаллах размером 3×3 мм методами стандартной фото- и электронно-лучевой литографий формировалась система заготовок будущих наноэлектродов транзистора в виде тонкопленочных металлических проводов постепенно уменьшающейся ширины (от 1 мм до 40–60 нм) (рис. 1).

Для этого на стандартную полированную кремниевую пластину с предварительно напыленным на ее поверхность слоем SiO₂ (400 нм) наносился методом центрифугирования резист РММА A4, чувствительный как к ультрафиолетовому излучению, так и к воздействию электронного луча. Затем подложка разрезалась на кристаллы размером 3 × 3 мм методом скрайбирования.

Все структуры изготавливались в два цикла экспонирования с обязательной промежуточной проявкой. В первом цикле формировалась внешняя часть разводки, включающая провода переменной ширины от 1 мм до 7 мкм, путем экспонирования резиста через шаблон из кварцевого стекла под ртутной лампой ДРК-120; длина волны 291 нм.



Рис. 1. Центральная часть системы заготовок (16 штук) будущих наноэлектродов транзистора в виде тонкопленочных металлических проводов постепенно уменьшающейся ширины (от 7 мкм до 40–60 нм)

Затем образцы предварительно проявлялись в смеси ОСЧ изопропанола с водой (93 на 7). Возникающий при этом контраст между слоем оставшегося резиста и оксидом кремния подложки позволяет продолжить создание итоговой маски, включающей провода шириной от 7 мкм до 40 нм (рис. 1), но уже с помощью электронно-лучевого микроскопа. Этот второй этап экспонирования осуществлялся с помощью микроскопа ZEISS Supra 40, укомплектованного дополнительным модулем Raith для проведения процесса электронно-лучевой литографии. После экспонирования центральной части резист повторно проявлялся, в результате чего на образце формировалась итоговая маска из резиста для напыления металлических пленок будущих электродов.

В окна сформированной маски последовательно напылялись два слоя металла: нижний слой титана (2 нм), верхний — золота (16 нм). Титан в качестве буферного слоя для обеспечения лучшей адгезии золота к диоксиду кремния был выбран из-за принципиальной для описываемого метода возможности его стравливания в плавиковой кислоте. Оба напыления проводились в одном цикле в вакуумной установке для напыления материалов Leybold L-560 при давлениях не хуже 10^{-6} мбар электронно-лучевым и термическим методами: это обеспечило однородность полученной пленки.

Последним шагом в формировании наноструктуры являлось удаление резистной маски и лишнего металла, лежащего на ней. Образец помещался в емкость с ацетоном, а сама емкость в ультразвуковую ванну. Для ускорения процесса и лучшего взаимодействия ацетона с резистом ацетон предварительно нагревался до 50°С. В результате на поверхности чипа оставалась металлическая структура, включающая 16 металлических нанопроводов в центре изготовленной структуры (рис. 1).

1.2. Обеспечение нависания нанопровода

Принципиальная идея, отличающая реализованный нами метод изготовления нанозазора от известных нам других подходов с использованием электромиграции (например, [8–13]), заключается в том, что электромиграция проводилась на предварительно подвешенных нанопроводах, т.е. до электромиграции из-под нанопровода был частично убран слой диоксида кремния. Одним из явных преимуществ такого подхода является исключение возможного влияния подложки на результаты измерений, а именно протекание паразитных токов, а также максимальное удаление от области зазора нежелательных зарядовых центров (дефектов) и случайных загрязнений подложки.

Нависание нанопроводов было обеспечено жидкостным травлением диоксида кремния в 10%-м растворе буферизованной плавиковой кислоты (BHF). В ходе эксперимента была выявлена необходимость проводить чистку образцов в плазме кислорода перед травлением. Такая чистка, по-видимому, удаляет малозаметные при оптическом контроле остатки резиста, препятствующие изотропному травлению материала подложки. Очистка проводилась в установке Alcatel RDE-300 в плазме кислорода при давлении 10 Па в течение 20 с. Далее образец помещался в раствор буферизованной плавиковой кислоты на 20 с, что обеспечивало нависание нанопровода над подложкой в области максимального сужения (высота нависания около 50 нм, скорость травления составила 3 нм/с при комнатной температуре).

Таким образом удается создать нанопровода, которые в дальнейшем разрываются с помощью электромиграции, формируя транспортные электроды транзисторов. На завершающем этапе изготовления транзистора (или непосредственно в ходе проведения электромиграции) в получившийся зазор помещается ключевой элемент молекулярного одноэлектронного транзистора: наночастица или молекула. Типичный вид подвешенного нанопровода показан на рис. 2.



Рис. 2. Типичный вид подвешенного нанопровода (вид под углом, сбоку). Светло-серая область снимка — металлический нанопровод, сужающийся до 40-60 нм; темная — диоксид кремния

1.3. Электромиграция и получение нанозазора

Для того чтобы одноэлектронный транзистор работал при комнатной температуре, необходимо в зазор размером меньше 5 нм поместить частицу или молекулу еще меньшего размера. Зазор столь малой ширины крайне затруднительно получить методами стандартной электронно-лучевой литографии. Задача изготовления необходимого нанозазора решается в настоящей работе помощью электромиграции. Электромиграция — это явление перемещения атомов кристаллической решетки под влиянием протекания по проводу электрического тока большой плотности [14]. Увеличение подвижности атомов вызывает в пленке цепочку процессов (локализацию дефектов кристаллической решетки металла в одном месте, рост температуры, миграцию атомов и др.), из-за чего на этом участке непрерывно возрастает плотность тока, при этом с определенного момента электромиграция носит лавинообразный характер и для получения малых нанозазоров требует своевременной остановки. Ранее нами была разработана автоматизированная программа для проведения контролируемого процесса электромиграции с помощью системы сбора экспериментальных данных ADwin Gold, что в итоге позволило достигнуть стабильного получения зазоров размером 2-4 нм в 95% случаев [15].

Ход процесса создания нанозазора заключается в следующем: на приготовленную по описанной выше методике заготовку электродов, электрическое сопротивление которой определяется в основном самым узким (40–50 нм) нанопроводом, подается ступенчато возрастающее напряжение с шагом 30 мВ. Для этого образец крепится на специально сделанной плате, а затем с помощью установки WEST-BOND методом ультразвуковой разварки алюминиевой нити диаметром 20 мкм контактные площадки образца соединяются с контактными площадками платы, которые вставляются в разъем установки для подачи напряжения. Таким образом, образец готов к подаче на него напряжения.

При каждом значении напряжения проводится 100 измерений сопротивления. Если оно отличается больше, чем на заранее заданную определенную долю от изначально измеренного сопротивления, то напряжение обнуляется, а последнее значение запоминается программой. Затем процесс начинается заново. Такой цикл идет до тех пор, пока сопротивление нанопровода не достигнет значения 2 кОм, определенного как финальное эмпирическим путем. При таком сопротивлении в нанопроводе в результате электромиграции формируется короткий квантовый провод с 10-15 квантовыми каналами проводимости [16]. При этом в нем остаются механические напряжения, под действием которых квантовый провод рвется самопроизвольно без всякого вмешательства программы или внешних условий (на воздухе при комнатной температуре). Время возникновения такого саморазрыва определяется, по всей видимости, предысторией изготовления заготовки и лежит в диапазоне от 1 до 10 ч для различных образцов.

Процесс электромиграции был отработан на структурах, полностью лежащих на подложке. Вопрос, как пойдет электромиграция в условиях отсутствия подложки (подвешенный нанопровод), насколько известно авторам, до сих пор не изучался.



Рис. 3. Типичный вид полученного нанозазора: а — общий вид, где светлая часть электродов объясняется отсутствием диоксида кремния под ними вследствие жидкостного травления; б — вид самого зазора — по оценке, менее 4 нм

Как говорилось ранее, для адгезии золота к подложке в качестве буферного слоя был использован титан. Выбор этого материала был обусловлен тем, что про него известно, что он успешно травится в плавиковой кислоте [17], которую мы использовали на этапе обеспечения нависания нанопровода, т.е. титан удаляется из области нависания нанопровода вместе с оксидом кремния. Типичный вид полученного нанозазора показан на рис. 3.

2. Методика помещения молекулы в нанозазор

После получения зазора завершающим шагом на пути к созданию молекулярного одноэлектронного транзистора является помещение в изготовленный нанозазор молекулы. В настоящей работе для использования в качестве центрального (туннельного) острова одноэлектронного транзистора были



Рис. 4. Модель молекулы аурофильного производного терпиридина на основе родия Rh(tpy-C₆H₄-O-C(O)-(CH₂)₄-C₃H₅S₂)₂, имеющая длину 4.7 нм и используемая в процессах осаждения. В центре молекулы расположен одиночный атом родия, выступающий единичным зарядовым центром, два «хвоста» — аурофильные тиольные группы, обеспечивающие прочную ковалентную связь между молекулой и наноэлектродами транзистора, сделанными из золота

выбраны молекулы аурофильного производного терпиридина на основе родия $Rh(tpy-C_6H_4-O-C(O)-$ (CH₂)₄-C₃H₅S₂)₂ [18], имеющие длину 4.7 нм, т.е. достаточную для того, чтобы замкнуть электроды транзистора. Эти молекулы обладают единственным зарядовым центром в виде одиночного атома родия (рис. 4), т.е. являются основой, по сути, одноатомного транзистора. Основное технологическое преимущество этих молекул для построения одноэлектронного транзистора - наличие на их концах аурофильных тиольных групп, обеспечивающих прочную ковалентную связь между такими молекулами и наноэлектродами транзистора, сделанными из золота. Другими словами, молекулы «прилипают» к золоту, формируя прочный проводящий контакт с электродами на краях нанозазора и обеспечивая тем самым электронный транспорт через молекулу.

Встраивание молекул в нанозазор проводилось путем помещения образца в диметилформамид (ДМФА), в котором растворены молекулы, на 12 ч. Изначально концентрация молекул в растворе была равна 10^{-2} моль/л. В ходе работ была определена оптимальная рабочая концентрация, которая в итоге составила 10^{-3} моль/л.

В работе были использованы два способа встраивания молекул в нанозазор, разница которых заключается в очередности этапов изготовления транзистора.

В первом способе образец с уже изготовленными нанозазорами помещался на 12 ч в раствор, содержащий молекулы, для реализации связывания тиольных терминальных функциональных групп молекулы с золотой пленкой на краях зазора и замыкания его таким образом. Используя такой метод, замыкание нанозазора молекулой (встраивание молекулы), которое регистрировалось путем измерения вольт-амперных характеристик, было получено только на одном зазоре из 24.

Во втором способе процесс электромиграции (создание нанозазора) проводился на нанопроводах с уже предварительно осажденными на них молекулами путем помещения образца в раствор молекул на 12 ч. Встраивание молекулы в нанозазор происходит, видимо, во время саморазрыва оставшегося после окончания электромиграции квантового провода. В этом случае выход годных образцов оказался в 7 раз больше, что определило предпочтительность такого способа встраивания молекул в нанозазор.

3. Исследование транспортных характеристик

После встраивания молекул в нанозазор проводились измерения вольт-амперных характеристик каждого из сформированных молекулярных наноэлементов в жидком азоте при T = 77 К для уменьшения тепловых флуктуаций, существенно затрудняющих наблюдение одноэлектронных эффектов в обсуждаемой системе. Измерение вольт-амперных характеристик проводилось по двухточечной схеме на постоянном токе. Напряжение на зазоре задавалось с помощью ЦАП, управляемого компьютером, а для прецизионного измерения тока в цепь последовательно был включен пикоамперметр Keithley 6487, обеспечивающий измерения тока с точностью около 1 пА



Рис. 5. Вольт-амперная характеристика туннельного транспорта электронов. В начале координат виден участок кулоновской блокады туннелирования с пониженной проводимостью размером около 400 мВ

(типичный шумовой разброс шумового тока при разомкнутом входе составлял около 2 пА). Это позволяло уверенно измерять сопротивление нанозазоров величиной до 300–500 ГОм.

Характеристики незамкнутых молекулой нанозазоров демонстрировали сопротивление утечки более 400 ГОм. Характеристики молекулярных наноэлементов имели типичный для туннельных структур вид с туннельным сопротивлением при малых напряжениях (менее 1 В) около 50 ГОм. При этом на характеристиках нескольких образцов при напряжении от -200 до 200 мВ были замечены участки с характерной для одноэлектронного туннелирования нелинейностью. На рис. 5 показана одна из таких характеристик. Отчетливо видна область подавления туннельного тока (кулоновской блокады туннелирования [4, 5]) с размером около 400 мВ. Это указывает на коррелированный характер туннелирования электронов через исследуемый молекулярный элемент с единственно возможным центром локализации заряда в виде атома родия.

4. Обсуждение

В настоящей работе нами изготовлены планарные молекулярные туннельные транзисторы на основе молекул $Rh(tpy-C_6H_4-O-C(O)-(CH_2)_4-C_3H_5S_2)_2$ и измерены характеристики электронного транспорта через них. При изготовлении их электродов был предложен и реализован модифицированный вариант разработанного нами ранее способа [19] создания наноэлектродов таких транзисторов, нависающих над подложкой. Нависающие над подложкой («оторванные» от нее) электроды более предпочтительны для одноэлектронных систем из-за существенного уменьшения при этом паразитного влияния на систему зарядового шума из-за хаотических перескоков зарядов между зарядовыми ловушками, образующимися в материале подложки из-за дефектов ее структуры (дислокации, паразитные примеси и др.) [20]. Кроме этого, такая геометрия гарантирует отсутствие любых паразитных токов, шунтирующих туннельный ток транзистора.

Использованная в работе методика совмещает преимущества методики создания нависающих электродов [19] с преимуществами метода электромиграции для создания нанозазоров [16]. При этом, кроме создания электродов транзистора, был также найден убедительный ответ на часто обсуждаемый теоретически в публикациях [21, 22] и важный для получения предельно узких нанозазоров вопрос о влиянии теплоотвода в подложку на ход и результат процесса электромиграции, не имевший до сих пор экспериментального подтверждения. Экспериментальный ответ состоит в том, что отвод тепла в подложку не играет большой роли при электромиграции. Ход, режимы и результаты (т.е. размеры зазоров) процесса электромиграции, проводимого на нанопроводах, лежащих на подложке и нависающих над ней (т. е. не имеющих с ней теплового контакта в области концентрации тока), оказались полностью одинаковыми. Выделяющееся в области концентрации тока и будущего разрыва тепло, видимо, уходит из нее в основном в более массивные подводящие металлические пленочные электроды (см. рис. 1 (топология чипа)), а не в подложку.

Ключевым шагом при формировании молекулярного транзистора является встраивание рабочей молекулы в нанозазор между транспортными электродами транзистора. В настоящей работе это проводилось путем использования процесса самосборки (self-assembly), при котором атомы серы, входящие в состав серосодержащих терминальных групп молекулы, прочно связывались с атомами золота на поверхности наноэлектродов. Сравнение двух вариантов реализации этого процесса (с проведением самосборки молекул до создания нанозазора и после его формирования) показало более эффективное/частое встраивание молекулы в зазор при использовании первого способа. Это, видимо, связано с тем, что в этом случае для замыкания/перекрытия нанозазора молекулой после его образования необходимо связывание терминальной тиольной группы молекулы только на одном краю зазора, так как на втором молекула уже закреплена во время нанесения на нанопровод до его разрыва. Такой процесс должен быть более вероятен, чем одновременное связывание с пленкой золота тиольных групп на обоих концах молекулы, что и объясняет причину полученной большей эффективности этого способа.

Измеренные характеристики туннельного транспорта электронов через сформированный молекулярный транзистор, одна из которых представлена на рис. 5, в начале координат имеют участки кулоновской блокады туннелирования с подавленной проводимостью размером около 400 мВ (видные на этом участке выбросы тока величиной около 1 пА обусловлены собственным шумом пикоамперметра Keithley 6487). Используя формулы теории одноэлектроники [4] и обычной электростатики, из величины участка кулоновской блокады можно оценить эффективные геометрические размеры зарядового центра, на котором происходит локализация электронов в процессе их туннельного транспорта через молекулу. Эта оценка дает значение диаметра этой области около 2 нм, что согласуется с размером ядра (центральной части) молекулы (см. рис. 4 (модель молекулы)), на котором, вероятнее всего, происходит эта локализация.

Таким образом, в настоящей работе с помощью ряда разработанных оригинальных методик были впервые изготовлены молекулярные туннельные нанотранзисторы на основе одиночной молекулы аурофильного производного терпиридина на основе родия с внутримолекулярным одноатомным зарядовым центром. Характеристики электронного транспорта в этих транзисторах свидетельствуют о коррелированном (одноэлектронном) характере туннелирования электронов через этот зарядовый центр на основе одиночного атома родия. Это дает все основания считать, что изготовленные транзисторы являются атомными одноэлектронными транзисторами. Подробное изучение таких элементов позволит в перспективе установить связь их параметров и характеристик со структурой атома и его квантовыми состояниями, обеспечивающими транспорт электронов через транзистор. Это, в свою очередь, даст возможность успешно использовать эти наноэлектронные атомные элементы при построении квантовых компьютеров, квантовых клеточных автоматов и информационных систем.

Заключение

В настоящей работе разработан новый способ изготовления методами нанолитографии планарных металлических электродов туннельных нанотранзисторов. В этом способе на заключительном этапе изготовления в нависающем над подложкой пленочном нанопроводе толщиной 18 нм и шириной около 40 нм с помощью электромиграции атомов металла формируется квантовый провод с 10-15 квантовыми каналами проводимости. Наноэлектроды транзистора формируются в результате саморазрыва квантового провода в процессе релаксации механических напряжений в изготовленной пленочной наноструктуре и образованием при этом нанозазора шириной около 4 нм. При этом впервые было экспериментально показано, что выделяющееся при электромиграции тепло отводится в основном не в подложку, а в металлическую пленку подводящих электродов.

В настоящей работе также была разработана методика надежного встраивания молекул аурофильного производного терпиридина на основе родия в сформированные нанозазоры между электродами транзисторов с помощью процесса самосборки. При оптимизации этой методики показано, что более эффективное/частое встраивание молекулы в зазор происходит при самосборке/закреплении молекул на нанопроводе, проведенной до начала процесса электромиграции (создания квантового провода).

Характеристики электронного транспорта в изготовленных молекулярных туннельных нанотранзисторах, измеренные при 77 К, показали реализацию в них режима коррелированного (одноэлектронного) туннелирования электронов через уединенный внутримолекулярный зарядовый центр на основе одиночного атома родия. Это дает возможность перейти к проектированию и созданию электронных устройств на базе элементов наноэлектроники молекулярного и атомарного масштаба, работающих на новых физических принципах, и построению на их основе квантовых компьютеров на чипе, нейронных сетей на основе квантовых клеточных автоматов. Это, безусловно, создаст новую генерацию информационных систем обработки, хранения, передачи и защиты информации чрезвычайно высокой плотности, быстродействия и энергоэффективности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 16-12-00072) и Президентской программы поддержки научных школ (НШ-8168.2016.2).

Список литературы

- 1. Courtland R. // IEEE Spectrum. 2017. 54. N 1. P. 52.
- Neisser M., Wurm S. // Advanced Optical Technologies. 2015. 4, N 4. P. 235.
- 3. Zhirnov V.V., Cavin R.K., Hutchby J.A., Bourianoff G.I. // Proc. IEEE. 2003. **91**, N 11. P. 1934.
- Averin D.V., Likharev K.K. // J. Low Temp. Phys. 1986.
 P. 345.
- Thijssen J.M., Van der Zant H.S.J. // Phys. Stat. Sol. (b). 2008. 245. P. 455.
- 6. *Van Ruitenbeek J.M.* Single-Molecule Electronics. P. 1–23. Singapore: Springer, 2016.
- 7. Sun L., Diaz-Fernandez Y.A., Gschneidtner T.A. et al. // Chem. Soc. Rev. 2014. **43**. P. 7378.
- Park H., Lim A.K.L., Alivisatos A.P. et al. // Appl. Phys. Lett. 1999. 75.
- Strachan D.R., Smith D.E., Johnston D.E. et al. // Appl. Phys. Lett. 2005. 86. 043109.
- Mahapatro A.K., Ying J., Ren T., Janes D.B. // Nano Lett. 2008. 8(8). P. 2131.
- Ghosh S., Halimun H., Mahapatro A.K. et al. // Appl. Phys. Lett. 2005. 87. 233509.
- 12. Lambert M.F., Goffman M.F., Bourgoin J.P., Hesto P. // Nanotechnology. 2003. 14. P. 772.
- Bolotin K.I., Kuemmeth F., Pasupathy A.N., Ralph D.C. // Nano Lett. 2006. 6. P. 123.
- Ceric H., Selberherr S. // Materials Science and Engineering R. 2011. 71, N 5–6. P. 53.
- 15. Дагесян С.А., Солдатов Е.С., Степанов А.С. // Изв. PAH. Cep. физ. 2014. **78**, №2. C. 211. (Dagesyan S.A., Stepanov A.S., Soldatov E.S. // Bulletin of the RAS. Physics. 2014. **78**, N 2, P. 139.)
- Dagesyan S.A., Stepanov A.S., Soldatov E.S., Snigirev O.V. // J. of Superconductivity and Novel Magnetism. 2015. 28, N 3. P. 787.
- 17. Williams K.R., Muller R.S. // J. of Microelectromechanical Sys. 1996. **5**, N 4.
- 18. Beloglazkina E.K., Majouga A.G., Manzheliy E.A. et al. // Polyhedron. 2015. 85. P. 800.
- Sapkov I.V., Soldatov E.S., Elensky V.G. // Proc. SPIE. 2008. 7025. P. 70250P.
- Zorin A.B., Ahlers F.-J., Niemeyer J. et al. // Phys. Rev. B. 1996. 53. 13682.
- Jeong W., Kim K., Kim Y. et al. // Scientific Rep. 2014.
 N 4975.
- Kießig B., Schäfer R., von Löhneysen H. // New J. Phys. 2014. 16. P. 013017.

A Coulomb blockade in a nanostructure based on single intramolecular charge center

V. R. Gaydamachenko^{1,a}, E. K. Beloglazkina², R. A. Petrov², S. A. Dagesyan¹, I. V. Sapkov¹, E. S. Soldatov^{1,b}

¹Laboratory of Cryoelectronics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia. ²Department of Organic Chemistry, Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia. E-mail: ^a1994vg@gmail.com, ^besold@phys.msu.ru.

A novel technique for the production of metal electrodes of a nanotransistor with a nanogap less than 4 nm between them is developed on the basis of controlling the electromigration of previously suspended nanowires of the system. A method that allows the embedding of a molecule of Rh(III) terpyridine with aurophilic ligands between electrodes is elaborated, as well. The characteristics of electron transport through a system that consists of the specified molecule with a single-atom charge center indicate the correlated (singleelectron) tunneling of electrons.

Keywords: electromigration, atom, molecule, molecular electronics, single-molecule transistor, correlated tunneling of electrons.

PACS: 85.65.+h. *Received 25 May 2017.*

English version: Moscow University Physics Bulletin. 2018. 72, No. 2. Pp. 193-198.

Сведения об авторах

1. Гайдамаченко Виктор Ринатович — студент; тел.: (495) 939-59-35, e-mail: 1994VG@gmail.com.

2. Белоглазкина Елена Кимовна — доктор хим. наук, профессор; тел.: (495)-939-40-20, e-mail: bel@org.chem.msu.ru.

3. Петров Ростислав Александрович — аспирант; тел. (495) 939-22-92, e-mail: petrovrostaleks@gmail.com.

4. Дагесян Саркис Арменакович — мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-59-35, e-mail: dagesyan@physics.msu.ru.

5. Сапков Иван Владимирович — мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-59-35, e-mail: ivan.sapkov@gmail.com.

6. Солдатов Евгений Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-59-35, e-mail: esold@phys.msu.ru.