

Одноэлектронный транзистор с островом из нескольких примесных атомов фосфора

С. А. Дагесян^{1,a}, В. В. Шорохов¹, Д. Е. Преснов^{1,2}, Е. С. Солдатов¹,
А. С. Трифонов^{1,2}, В. А. Крупенин^{1,b}, О. В. Снигирёв¹

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра полупроводников, лаборатория «Криоэлектроника».

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ).
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

E-mail: ^a dagesyan@physics.msu.ru, ^b krupenin@physics.msu.ru

Статья поступила 15.11.2016, подписана в печать 18.01.2017.

В работе экспериментально исследован электронный транспорт через одиночные примесные атомы фосфора, внедренные в кристаллическую структуру кремния. Разработан оригинальный метод изготовления из высоколегированного кремния на изоляторе наноструктур одноэлектронных транзисторов на основе единичных примесных атомов в кремнии. Метод изготовления основан на технологических процессах, повсеместно используемых в полупроводниковой наноэлектронике, что делает возможным его широкое применение. Высокое значение характерной кулоновской энергии исследуемого одноэлектронного транзистора (~ 20 мэВ) позволяло наблюдать одноэлектронные эффекты в широком диапазоне температур, вплоть до 77 К. Измерены и проанализированы диаграммы стабильности экспериментальных структур. Продемонстрированы образцы транзисторов, в которых управляемый электронный транспорт определялся одноэлектронным туннелированием через 2–3 примесных атома.

Ключевые слова: одноэлектронный транзистор, одноатомный транзистор, кремний на изоляторе.

УДК: 537.9. PACS: 73.23.Nk.

Введение

Значительный прогресс в миниатюризации промышленно изготавливаемых компонентов интегральных схем, когда ширина канала транзистора современных процессоров достигла 14 нм [1], позволит перейти к технологиям изготовления устройств атомарного масштаба. В связи с этим крайне актуальным становится исследование одноэлектронного транспорта [2, 3] через одиночные примесные атомы в твердотельных структурах. В настоящее время эта достаточно новая область мезоскопической физики активно развивается и уже получены первые интересные результаты [4–8]. Предложено использовать твердотельные наноструктуры на одиночных примесных атомах как основу элементной базы для наноэлектроники на новых физических принципах [9], квантовых компьютеров [10–13], высокочувствительных зарядовых сенсоров [14–18]. Одним из простейших одноатомных устройств является одноэлектронный транзистор на основе примесного атома в кристаллической решетке. К настоящему времени опубликован ряд работ, в которых демонстрируются различные способы создания подобных структур [19–21]. Однако большинство из этих способов либо требуют крайне специфического дорогостоящего оборудования [19], либо являются крайне сложными и трудоемкими [20, 21]. В настоящей работе мы демонстрируем одноэлектронный транзистор, где в качестве острова выступают одиночные атомы фосфора, имплантированные в кристаллическую решетку кремния. Транзистор был из-

готовлен из материала кремний на изоляторе (КНИ) с применением традиционно используемых для изготовления полупроводниковых устройств процессов: ионной имплантации, электронно-лучевой литографии, напыления тонких пленок, реактивно-ионного травления [16, 17]. Такой подход упрощает процесс изготовления экспериментальных образцов и делает исследования по данной тематике доступными для большего количества исследовательских лабораторий. Ключевой особенностью предлагаемого метода является использование неравномерного распределения примесных атомов в зависимости от глубины их залегания в верхнем слое кремния КНИ, образующегося после процесса ионной имплантации и быстрого термического отжига. Приповерхностный слой кремния глубиной около 10–15 нм, обладающий близкой к металлической проводимостью за счет высокой концентрации атомов фосфора, использовался для создания подводящих электродов транзистора. Между электродами расположен узкий кремниевый мостик, в котором приповерхностный слой удален. Оставшийся в глубине слой с низким содержанием примеси содержит туннельно-связанные примесные центры, на основе которых формируется остров одноэлектронного транзистора. В настоящей работе проведено исследование нескольких типов экспериментальных образцов, отличающихся друг от друга характером электронного транспорта, который задается распределением примесных атомов в кремниевом мостике между транспортными электродами транзистора.

1. Изготовление образцов

Для изготовления экспериментальных образцов использовались пластины КНИ. Рабочим слоем в КНИ-пластине является 55-нанометровая пленка кристаллического кремния, отделенная от несущей кремниевой подложки слоем диоксида кремния толщиной 145 нм. С помощью ионной имплантации атомы фосфора внедрялись в кристаллическую решетку верхнего слоя кремния. Затем кристаллическая структура кремниевого слоя, частично разрушенная на этапе имплантации, восстанавливалась в управляемом процессе быстрого термического отжига. Итоговое распределение примесных атомов по глубине было измерено с помощью метода масс-спектрометрии вторичных ионов (ВИМС). Концентрация атомов фосфора в тонком слое порядка 10–15 нм вблизи поверхности достигала величины $n \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Такая концентрация обеспечивала практически металлическую проводимость легированного кремниевого слоя. В глубине образца концентрация атомов фосфора падала до уровня $n \sim 10^{19} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$, при котором примесные атомы локализованы и связаны между собой через туннельные барьеры. Верхний хорошо проводящий

высоколегированный слой использовался для формирования транспортных электродов транзистора. Между электродами формировалась обедненная область кремния размером $20 \times 30 \text{ нм}$ и толщиной 20–30 нм с пониженной концентрацией примеси за счет удаления верхнего высоколегированного слоя. Транспортные электроды обеспечивали электрическую (туннельную) связь с обедненной областью, где и были локализованы одиночные примесные атомы фосфора. Предложенный метод формирования существенно упрощал процедуру изготовления наноструктур транзисторов, снимая необходимость формирования в отдельном цикле изготовления транспортных электродов транзистора с зазором нанометрового масштаба между ними.

Следующим шагом проводилось изготовление макроскопических металлических электродов на поверхности верхнего кремниевого слоя (рис. 1, а) для электрического соединения исследуемой области размером в несколько сотен нанометров, где располагалась структура транзистора, с измерительной аппаратурой. Для каждого транзистора формировались четыре электрода (рис. 1, б) — два транспортных (сток, исток) и два управляющих

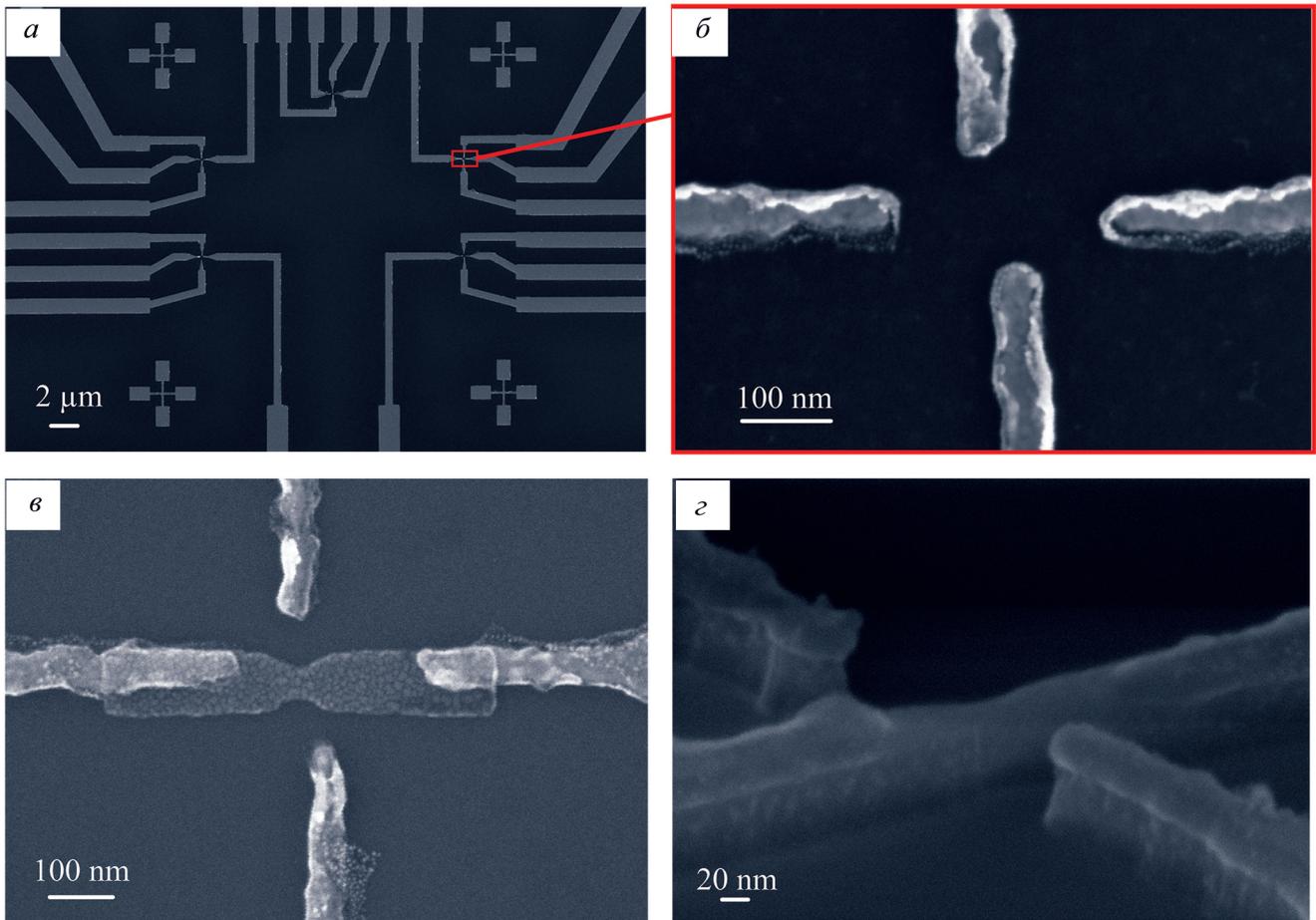


Рис. 1. СЭМ изображения образца на разных этапах изготовления: а, б — система макроскопических металлических электродов (а — общий вид, б — центральная часть структуры, в — алюминиевая маска для транзисторной структуры, совмещенная с макроскопическими электродами); г — транзисторная структура после процесса реактивного ионного травления

(затворы). Металлические электроды изготавливались по технологии «взрывной» литографии. На подложку методом центрифугирования наносился позитивный электронный резист РММА А2 при скорости вращения 3500 об./мин. Резист высыхивался 10 мин при температуре 180°C на горячей плитке. Экспонирование резиста по всей поверхности образца проводилось электронным лучом на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Supra 40 (Carl Zeiss), оборудованном литографической приставкой Elphy-Quantum (Raith), с дозой 260 мкКл/см². Тонкий рисунок, находящийся в непосредственной близости от исследуемой области, был экспонирован в режиме одиночного прохода луча вдоль линии с дозой 850 пКл/см. Экспонированные участки резиста были удалены во время проявления образца (1 мин) при температуре 20°C в смеси изопропанола и воды в соотношении 93:7. Далее весь образец покрывался Au-пленкой толщиной 15 нм методом вакуумного термического испарения. Для лучшей адгезии Au-пленки на подложку *in situ* предварительно напылялся буферный 5-нанометровый слой хрома. После растворения слоя резиста в ацетоне (процедура «взрыва») с подложки удалялась металлическая пленка (Cr + Au), покрывающая защищенные резистом участки. Оставшаяся на проявленных открытых участках поверхности образца пленка (Cr + Au) образовывала макроскопические электроды изготавливаемой структуры. Вместе с электродами на образце были сформированы маркеры в форме перекрестий для выполнения совмещения при последующих процессах литографии (рис. 1, а).

Затем методом «взрывной» литографии на подложку была нанесена маска из алюминия толщиной 10 нм, определяющая форму кремниевого мостика для структуры будущего транзистора (рис. 1, в). Ширина алюминиевой маски в наиболее узком месте составляла 25–40 нм. Точность совмещения алюминиевой маски с металлическими электродами была порядка 30 нм. Рисунок алюминиевой маски переносился в нижележащий слой кремния с помощью реактивного ионного травления в высокочастотном разряде плазмы SF₆ при давлении 0.18 Па. После травления алюминиевая маска удалялась в 3%-м водном растворе KOH. В результате между электродами образовывался кремниевый мостик шириной ~ 20 нм. Ширина мостика получалась меньше ширины алюминиевой маски ввиду того, что процесс реактивного ионного травления не был идеально анизотропным. На рис. 1, г показано характерное изображение структуры транзистора.

В некоторых случаях происходило формирование геометрии мостика, в которой верхняя часть кремниевого слоя практически удалялась в процессе травления из-за наличия изотропной компоненты. Это происходило, если перед травлением ширина алюминиевой маски в месте наименьшего сужения

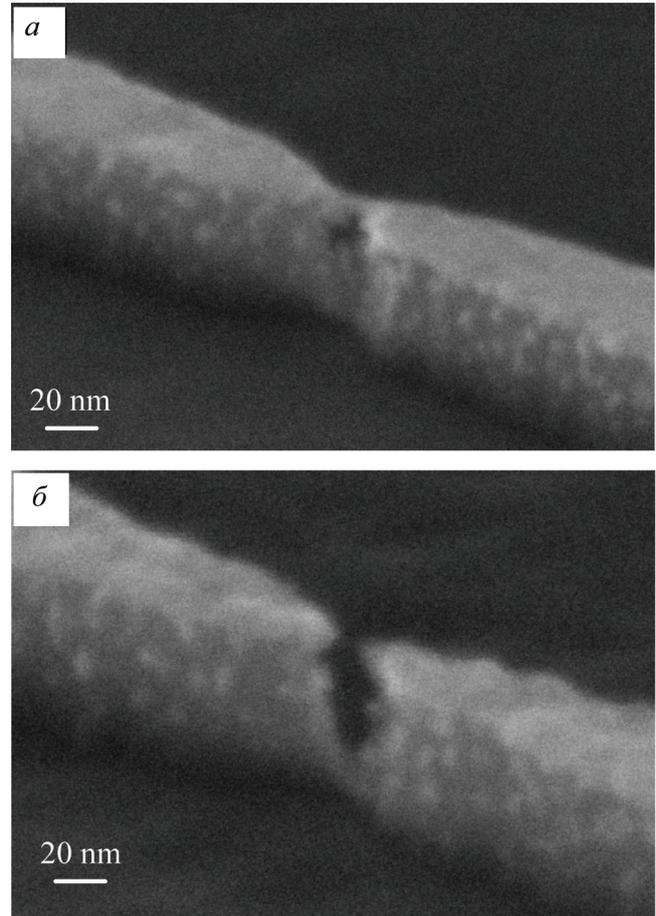


Рис. 2. Транзисторная структура после реактивного ионного травления кремния через алюминиевую маску: а — мостик с выемкой в верхнем высоколегированном слое кремния, образовавшейся при травлении через маску с сужением до 30 нм; б — разрыв в кремнии, образующийся при ширине маски менее 30 нм

находилась в диапазоне 30–35 нм. На рис. 2, а показан пример структуры после реактивного ионного травления, где в верхней части мостика образовывалась выемка размером ~ 20 нм. Нависающая над ней алюминиевая маска подтверждает наличие изотропной компоненты в анизотропном процессе травления. Именно такие варианты структур являются наиболее интересными и были исследованы более подробно. Если ширина алюминиевой маски оказывалась больше 35 нм, то такая выемка не образовывалась. В случае когда ее ширина оказывалась чуть менее нужного размера (30 нм), выемка становилась слишком глубокой и доходила почти до дна кремниевого слоя, как показано на рис. 2, б.

2. Результаты и обсуждение

Электрические характеристики изготовленных структур были подробно исследованы при температуре 4.2 К. Была измерена зависимость транспортно-тока I транзисторов от напряжения V между стоком и истоком, а также от напряжения на затворе V_G . На основе этих данных были построены контурные диаграммы стабильности (ДС) изме-

ряемых образцов. Измерения были проведены при нулевом потенциале поддерживающей кремниевой подложки экспериментальных образцов, симметричном напряжении сток–исток транзистора ($\pm V/2$) и одинаковом управляющем напряжении на обоих боковых затворах.

Изготовленные экспериментальные структуры можно разделить на несколько групп в зависимости от вида их вольт-амперных $I(V)$ и сигнальных (затворных) $I(V_G)$ характеристик. Далее они представлены в порядке увеличения их характерного асимптотического сопротивления.

К первой группе относятся структуры с почти обычной омической проводимостью. Эти образцы обладали наименьшим сопротивлением, лежащим в диапазоне 100–200 кОм, и характеризовались слабой или практически полностью отсутствующей зависимостью тока от напряжения на затворе. К этой группе образцов относятся структуры, у которых перед процессом травления ширина алюминиевой маски в наиболее узком месте мостика составляла величину порядка или немногим более 40 нм. В структурах такого типа высоколегированный проводящий слой кремния в месте сужения (мостике) утоньшался минимально за счет присутствия изотропной компоненты в анизотропном процессе травления, что и приводило к практически линейной зависимости транспортного тока от приложенного напряжения и отсутствию влияния управляющего затвора.

Структуры второй группы демонстрировали поведение, характерное для одноэлектронного транзистора с одним [22–24] или несколькими проводящими островами [25, 26]. Типичные транспортные характеристики подобных образцов показаны на рис. 3. Для них характерно наличие небольшого участка кулоновской блокады порядка 3–10 мВ (рис. 3, б) на вольт-амперной характеристике с асимптотическим сопротивлением в диапазоне 200–500 кОм. Зависимость тока от напряжения на затворе для этих образцов была близка к периодической (рис. 3, а). Изменения тока с периодом порядка 25 мВ по на-

пряжению на затворе промодулированы более медленным изменением их огибающей с периодом порядка 1.5 В. Это может быть свидетельством того, что в электронном транспорте участвуют несколько последовательно соединенных проводящих островов с разной взаимной емкостью к управляющему затвору. Отношение наблюдаемых периодов близко к отношению линейных размеров образовавшихся островов. Острова, по-видимому, формировались в месте наименьшей ширины мостика. В структурах этой группы высокопроводящий слой кремния утоньшался таким образом, что в месте сужения (мостике) в верхней части кремниевого слоя образовывались небольшие (менее 10–15 нм) проводящие островки из высоколегированного кремния, разделенные туннельными переходами, что и определяло форму наблюдаемых транспортных и сигнальных характеристик. При этом видимой выемки в верхней части мостика не наблюдалось (рис. 1, з).

К третьей группе относятся структуры, в которых электронный транспорт осуществлялся через достаточно большое количество зарядовых центров, образованных примесными атомами фосфора. Для них характерно наличие на вольт-амперных характеристиках участка кулоновской блокады величиной до 20 мВ, что указывает на характерный размер островов, через которые осуществляется одноэлектронный транспорт, порядка единиц нанометров. Этот размер соответствует эффективному размеру примесного атома фосфора в кристаллической решетке кремния [27, 28]. Типичные значения асимптотического сопротивления подобных образцов лежат в диапазоне от единиц до десятков МОм. Характерная ДС таких образцов показана на рис. 4. Ток в зависимости от напряжения на затворе осциллирует, однако его зависимость далека от периодической. С увеличением напряжения на затворе средняя величина транспортного тока увеличивается, а размер кулоновской блокады уменьшается. Такое поведение типично для одноатомных структур, где эффективный размер острова одноэлектронного транзистора, сформированного примесным атомом, растет

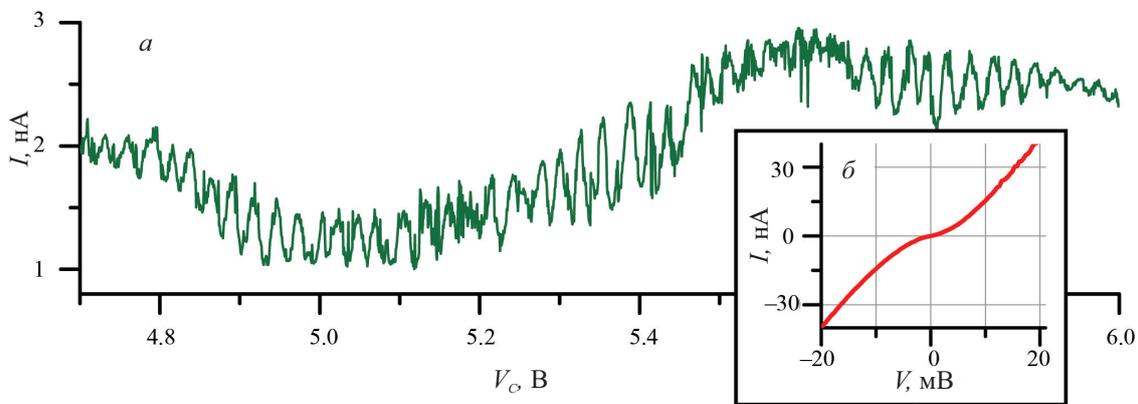


Рис. 3. Электрические характеристики одноэлектронных транзисторов второй группы образцов при 4.2 К: а — зависимость транспортного тока от напряжения на затворе, б — вольт-амперная характеристика

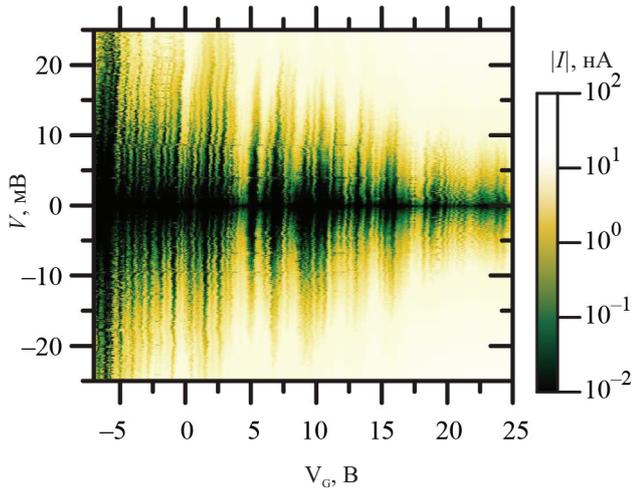


Рис. 4. Диаграмма стабильности одноэлектронного транзистора третьей группы образцов при 4.2 К

с увеличением количества локализованных на нем электронов [29–32]. Кроме этого наблюдаются особенности, характерные для рассматриваемой группы структур. Среди них стоит выделить наличие на ДС областей, состоящих из 5–6 расположенных рядом кулоновских ромбов одинакового размера. Наблюдаемые особенности поведения можно объяснить, если предположить, что электронный транспорт в некоторой области мостика осуществляется через 5–6 параллельных каналов, образованных локализованными зарядовыми центрами из примесных атомов фосфора. Более точное описание электронного транспорта через большое количество примесных центров возможно при построении достаточно точной модели подобной структуры, учитывающей пространственное расположение и зарядовые состояния центров. Структуры такого типа, по всей видимости, в самой узкой части мостика транзистора могли содержать порядка 10 примесных атомов.

В четвертой, наиболее интересной группе структур, электронный транспорт осуществлялся через единичные (2–3) примесные атомы фосфора. Для этих структур характерно наличие на вольт-амперных характеристиках участка кулоновской блокады величиной более 20 мВ, значения асимптотического сопротивления лежат в диапазоне от единиц до десятков МОм, и они демонстрируют уменьшение размера кулоновских ромбов с увеличением управляющего затворного напряжения. Характерная ДС подобных образцов одноатомных транзисторов представлена на рис. 5, из которого видно, что по сравнению с образцами третьей группы количество кулоновских ромбов на ДС существенно уменьшилось. Это объясняется тем, что в одноэлектронном транспорте участвуют единичные примесные центры. Некоторые особенности, в частности небольшое расщепление кулоновских ромбов на ДС (рис. 5), могут быть связаны с тем, что одноэлектронный транспорт осуществляется через 2–3 параллельных канала, образованных единичными примесными атомами, которые расположены достаточно близко

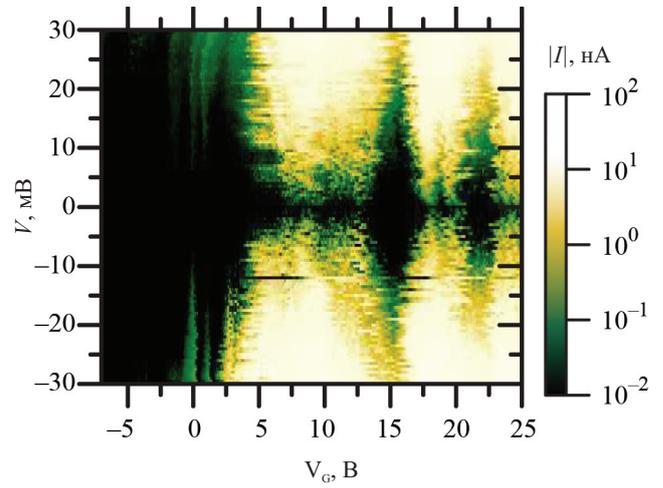


Рис. 5. Диаграмма стабильности одноэлектронного транзистора четвертой группы образцов при 4.2 К

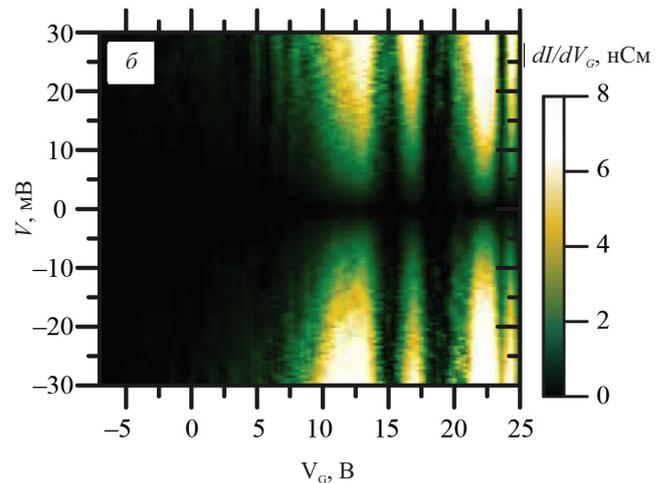
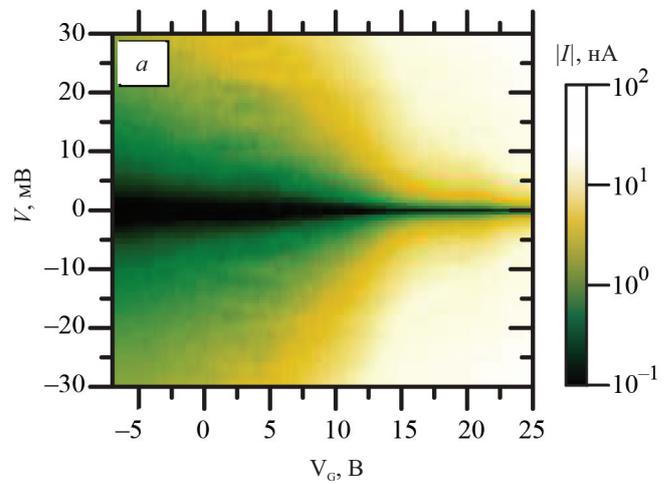


Рис. 6. а — Диаграмма стабильности одноэлектронного транзистора четвертой группы образцов при 77 К, б — контурная диаграмма зависимости dI/dV_G от транспортных и затворных напряжений при 77 К

друг от друга. Влияние затворного напряжения на них только слегка отличается, и наблюдаемая ДС представляет собой сложение ДС от 2–3 примесных центров. Таким образом, мы можем сказать, что нам

удалось сформировать структуру одноэлектронного транзистора на основе 2–3 примесных атомов.

Электрические характеристики разных групп наноструктур были также исследованы при температуре 77 К. Проявление одноэлектронного транспорта наблюдалось только для образцов третьей и четвертой групп. На рис. 6, *a* представлена ДС образца четвертой группы при 77 К. Видно, что поведение образца близко к поведению полевого транзистора [16, 17]. Однако присутствие одноэлектронного транспорта можно выявить, продифференцировав эту зависимость по напряжению на затворе. На рис. 6, *б* приведена контурная диаграмма зависимости производной dI/dV_G от напряжений на электродах транзистора, на которой видны участки с пониженным значением dI/dV_G , появляющиеся периодически вместе с изменением напряжения на затворе транзистора. Проведенные измерения показывают, что характерные особенности поведения одноатомной структуры транзистора сохраняются вплоть до 77 К.

Заключение

В настоящей работе разработан метод изготовления из высоколегированного КНИ одноэлектронных транзисторов на основе единичных примесных атомов фосфора. Метод содержит операции, повсеместно используемые в полупроводниковой нанoeлектронике, что делает возможным его широкое применение в лабораторных исследованиях. На основе анализа вольт-амперных, сигнальных (затворных) характеристик и токовых диаграмм стабильности изготовленных наноструктур был экспериментально исследован электронный транспорт через одиночные примесные атомы фосфора в кристаллической решетке кремния. Продемонстрирована структура одноэлектронного транзистора на основе единичных примесных атомов. Высокое значение кулоновской энергии острова одноэлектронного транзистора (около 20 мэВ) позволяло наблюдать одноэлектронные эффекты, характерные для одноатомных структур, даже при относительно высокой для подобных систем температуре 77 К. Продемонстрированный в настоящей работе метод может быть использован для создания одноатомных устройств на основе широкого спектра примесных атомов, полупроводниковых и диэлектрических материалов.

Несмотря на свойственную для рассмотренных в настоящей работе одноэлектронных систем разупорядоченность активных зарядовых центров и нарушающуюся регулярность транспортных характеристик, такие системы предоставляют возможность для построения настраиваемых многоэлектродных систем, которые можно использовать для построения вычислительных зарядовых автоматов и нейронных зарядовых сетей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РНФ 16-12-00072).

Список литературы

1. Intel Xeon Processor E5-2699 v. 4 (55 M cache, 2.20 GHz).
2. Averin D.V., Likharev K.K. // *Mesoscopic Phenomena in Solids*. **30**. P. 173. Amsterdam: North-Holland, 1991. ISBN 9780444600417.
3. Gerasimov Y.S., Shorokhov V.V., Snigirev O.V. // *J. Supercond. Novel Magn.* 2015. **28**, N 3. P. 781.
4. Miwa J.A., Mol J.A., Salfi J. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2013. **103**, N 4. 043106.
5. Koenraad P.M., Flatte M.E. // *Nat. Mater.* 2011. **10**, N 2. P. 91.
6. Tettamanzi G.C., Wacquez R., Rogge S. // *New J. of Physics*. 2014. **16**, N 6. P. 63036.
7. Ligowski M., Moraru D., Anwar M. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2008. **93**, N 14. 142101.
8. Park J., Pasupathy A.N., Goldsmith J.I. et al. // *Nature*. 2002. **417**, N 6890. P. 722.
9. Mol J.A., Verduijn J., Levine R.D. et al. // *Proc. Nat. Acad. Sci.* 2011. **108**, N 34. P. 13969.
10. Veldhorst M., Yang C., Hwang J. et al. // *Nature*. 2015. **526**. P. 410.
11. Pla J.J., Tan K.Y., Dehollain J.P. et al. // *Nature*. 2012. **489**, N 7417. P. 541.
12. Kane B.E. // *Nature*. 1998. **393**, N 6681. P. 133.
13. Laucht A., Kalra R., Simmons S. et al. // *Nat. Nanotechnol.* 2016.
14. Maehashi K., Katsura T., Kerman K. et al. // *Anal. Chem.* 2007. **79**, N 2. P. 782. PMID: 17222052.
15. Yan R., Park J.H., Choi Y. et al. // *Nature Nanotech.* 2012. **7**, N 3. P. 191.
16. Presnova G., Presnov D., Krupenin V. et al. // *Biosensors and Bioelectronics*. 2017. **88**. P. 283.
17. Presnov D.E., Amitonov S.V., Krutiitskii P.A. et al. // *Beilstein J. of Nanotechnol.* 2013. **4**. P. 330.
18. Krupenin V.A., Presnov D.E., Zorin A.B., Niemeyer J. // *Physica B: Condensed Matter*. 2000. **284–288**, Pt 2. P. 1800.
19. Fuechsle M., Miwa J.A., Mahapatra S. et al. // *Nat. Nanotechnol.* 2012. **7**, N 4. P. 242.
20. Tan K.Y., Chan K.W., Mottonen M. et al. // *Nano Lett.* 2009. **10**, N 1. P. 11.
21. Prati E., Belli M., Cocco S. et al. // *Applied Physics Letters*. 2011. **98**, N 5. P. 053109.
22. Pashkin Y.A., Nakamura Y., Tsai J.S. // *Applied Physics Letters*. 2000. **76**, N 16. P. 2256.
23. Zorin A.B., Ahlers F.J., Niemeyer J. et al. // *Phys. Rev. B. Cond. Matter and Materials Physics*. 1996. **53**, N 20. P. 13682.
24. Soldatov E.S., Khanin V.V., Trifonov A.S. et al. // *JETP Letters*. 1996. **64**, N 7. P. 556.
25. Zalunin V.O., Krupenin V.A., Vasenko S.A., Zorin A.B. // *JETP Lett.* 2010. **91**, N 8. P. 402.
26. Krupenin V.A., Zorin A.B., Savateev M.N. et al. // *J. Appl. Phys.* 2001. **90**, N 5. P. 2411.
27. Usman M., Bocquel J., Salfi J. et al. // *Nature nanotechnology*. 2016. **11**. P. 763.
28. Gasseller M., DeNinno M., Loo R. et al. // *Nano Lett.* 2011. **11**, N 12. P. 5208.
29. Sellier H., Lansbergen G.P., Caro J. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2006. **97**, N 20. P. 206805.

30. *Lansbergen G.P., Rahman R., Wellard C.J. et al. // Nat. Phys.* 2008. **4**, N 8. P. 656.
31. *Moraru D., Samanta A., Mizuno T. et al. // Sci. Rep.* 2014. **4**, N 6219. P. 1.
32. *Pierre M., Wacquez R., Jehl X. et al. // Nat. Nanotechnol.* 2010. **5**, N 2. P. 133.

Single-electron transistor with an island formed by several dopant phosphorus atoms

S. A. Dagesyan^{1,a}, **V. V. Shorokhov**¹, **D. E. Presnov**^{1,2}, **E. S. Soldatov**¹, **A. S. Trifonov**^{1,2}, **V. A. Krupenin**^{1,b}, **O. V. Snigirev**¹

¹*Department of Semiconductors; Laboratory of Cryoelectronics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.*

²*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.*

E-mail: ^adagesyan@physics.msu.ru, ^bkrupenin@physics.msu.ru.

We present the results of an experimental study of electron transport through individual phosphorus dopants implanted into a silicon crystal. We developed an original technique for single-electron transistor fabrication from silicon-on-insulator material with an island formed by single phosphorus atoms. The proposed method is based on well-known CMOS compatible technological processes that are standard in semiconductor electronics and may be used in most research groups. The large Coulomb blockade energy value of the investigated single-electron transistor (~ 20 meV) allows one to observe single-electron effects in a wide temperature range up to 77 K. We measured and analyzed stability diagrams of fabricated experimental structures. We demonstrated a single-electron transistor with controllable electron transport through two to three phosphorus dopants only.

Keywords: single-electron transistor, single-atom transistor, silicon-on-insulator.

PACS: 73.23.Hk.

Received 15 November 2016.

English version: *Moscow University Physics Bulletin.* 2017. **72**, No. 5. Pp. 474–479.

Сведения об авторах

1. Дagesян Саркис Арменакович — аспирант; тел.: (495) 939-59-35, e-mail: dagesyan@physics.msu.ru.
2. Шорохов Владислав Владимирович — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-59-35, e-mail: shorokhov@phys.msu.ru.
3. Преснов Денис Евгеньевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-39-87, e-mail: denis.presnov@phys.msu.ru.
4. Солдатов Евгений Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-59-35, e-mail: esold@phys.msu.ru.
5. Трифонов Артем Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-39-87, e-mail: trifonov.artem@phys.msu.ru.
6. Крупенин Владимир Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-39-87, e-mail: krupenin@physics.msu.ru.
7. Снигирёв Олег Васильевич — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-59-34, e-mail: oleg.snigirev@phys.msu.ru.