

## ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

**Одноэлектронные структуры на основе одиночных примесных атомов мышьяка, фосфора, золота и калия в кремнии**

Д. Е. Преснов,<sup>1,2,а</sup> С. А. Дагесян,<sup>1</sup> И. В. Божьев,<sup>1</sup> В. В. Шорохов,<sup>1</sup> А. С. Трифонов,<sup>1</sup>  
А. А. Шемухин,<sup>2</sup> И. В. Сапков,<sup>1</sup> И. Г. Прохорова,<sup>1</sup> О. В. Снигирев,<sup>1</sup> В. А. Крупенин<sup>1,б</sup>

<sup>1</sup> Центр квантовых технологий, физический факультет, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

Поступила в редакцию 14.11.2018, после доработки 04.12.2018, принята к публикации 10.12.2018.

В статье представлены КМОП-совместимые методы изготовления и результаты экспериментального исследования одноатомных одноэлектронных транзисторов из кремния на изоляторе на основе различных примесных атомов. Изготовлены и изучены транзисторы с каналами, легированными атомами мышьяка (As), фосфора (P), золота (Au) и калия (K). Представлены два метода изготовления экспериментальных структур транзисторов. Первый метод (As-, P-транзисторы) использовал неоднородно легированный по глубине слой кремния и контролируемое уменьшение размера транзисторного канала в последовательных циклах изотропного реактивно-ионного травления. Второй метод (Au- и K-транзисторы) использовал нелегированный слой кремния и последующую имплантацию атомов в предварительно сформированный транзисторный канал. Примесные электронные и дырочные уровни атомов Au и K в кремнии расположены вблизи середины запрещенной зоны кремния, что обеспечивает малый эффективный размер примесного зарядового центра и, как результат, высокое значение зарядовой энергии и рабочей температуры транзистора по сравнению с традиционными легирующими примесями (P, As, Sb, B). Оцененные из измерений значения зарядовой энергии Au- и K-транзисторов ( $E_c \geq 150$  мэВ) были значительно выше аналогичных величин As- и P-транзисторов ( $E_c < 30$  мэВ). Важные особенности предлагаемых методов: контролируемый процесс легирования различными примесями и возможность чередования циклов травления и имплантации при формировании экспериментальной структуры.

**Ключевые слова:** одноэлектронный транзистор, одноатомный транзистор, легирование золотом, легирование калием, кремний на изоляторе, наномостик, наноканал.

УДК: 537.9. PACS: 85.35.-p, 73.23.Nk, 68.35.bg, 85.40.-e.

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время характерный размер транзисторов коммерчески выпускаемых интегральных схем составляет 14 нм. Дальнейшее уменьшение размера приведет к тому, что электронный перенос через канал транзистора будет определяться несколькими или даже одиночным легирующим атомом. Таким образом, в ближайшем будущем роль отдельных легирующих атомов превратится из пассивных носителей заряда в ключевые элементы транзисторов или других функциональных устройств. Эффект коррелированного туннелирования элементарных носителей заряда будет определять электронное поведение транзистора.

Использование квантовых свойств отдельных атомов в качестве ключевых элементов нанoeлектронных устройств является очень привлекательной идеей, поскольку атомы обладают стабильной электронной структурой и четко определенными свойствами. Поскольку энергия одночастичного электронного валентного уровня легирующей примеси может быть сопоставима с кулоновской энергией системы, при определенных комбинациях кристаллической среды и легирующего атома рабочая температура транзистора может достигать высоких значений [1, 2]. Прототипы квантового бита [3–5] и квантовых логических вентилей [6]

уже были продемонстрированы на основе одноатомных одноэлектронных туннельных устройств. Кроме того, были продемонстрированы возможные приложения для квантовой метрологии [7, 8]. Исследования отдельных легирующих примесей в кремнии стали доступными благодаря таким методам характеристики, как туннельная спектроскопия [9–14], сканирующая зондовая микроскопия [15–18], метод микроволнового облучения [19], емкостная спектроскопия [20] и RF-рефлексометрия [21]. Помимо одноатомного одноэлектронного туннелирования, транзисторы с нанопроводом очень перспективны для создания биосенсоров на основе полевых транзисторов, обладающих достаточно высокой чувствительностью для обнаружения низких концентраций конкретных молекул в биологических системах [22, 23].

В настоящей работе мы сообщаем об изготовлении и изучении одноатомных одноэлектронных транзисторов из кристаллического кремния на основе примесных атомов мышьяка [24], фосфора [25, 26], золота и калия. Выбор атомов золота и калия в качестве легирующей примеси обусловлен тем, что их электронные и дырочные уровни расположены вблизи середины запрещенной зоны кремния, что обеспечивает малый эффективный размер примесного центра и, как результат, высокое значение зарядовой энергии транзистора по сравнению с традиционными примесями [27].

<sup>а</sup> E-mail: denis.presnov@physics.msu.ru

<sup>б</sup> E-mail: krupenin@physics.msu.ru

1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ НАНОСТРУКТУР

Методы изготовления As- и P-транзисторов подробно описаны в работах [24–26] и основаны на процессах электронно-лучевой литографии и реактивного ионного травления (РИТ). Транзисторные структуры формировались в верхнем слое кремния пластины кремния на изоляторе (КНИ). Этот слой был предварительно неоднородно легирован по глубине атомами As или P с концентрацией примесей  $> 10^{20} \text{ см}^{-3}$  вблизи поверхности, что обеспечивало практически металлическую проводимость подводящих электродов при температуре жидкого гелия (4.2 К) и выше. Между электродами стока и истока транзистора формировался наномостик сечением  $\sim 20 \times 30 \text{ нм}^2$  и длиной менее 20 нм. Благодаря удалению верхнего высокопроводящего слоя в районе нанопровода канал транзистора имел на два–три порядка меньшую концентрацию легирующей примеси и содержал счетное количество легирующих атомов (вплоть до одного), ответственных за электронный перенос. Авторами была разработана оригинальная методика, позволяющая поэтапно уменьшать размер нанопровода и таким образом контролируемым образом уменьшать количество легирующих примесей в нанопровode от сотен до отдельных атомов [25, 26].

Для изготовления транзисторов с легирующими примесями Au и K использовался нелегированный верхний слой кристаллического кремния КНИ пластин. В нем методом реактивно ионного травления (РИТ) кремния через металлическую маску формировались предварительные структуры транзисторов.

Для структур на основе примесных Au атомов на первом этапе методом электронной литографии в электронном резисте (ПММА) формировался рисунок металлической маски подводящих проводов от контактов по периметру чипа в область размером  $650 \times 650 \text{ нм}$  (рис. 1, а). Проявление рисунка проводилось в смеси изопропанола (93%) и воды (7%). Этап формирования маски подводящих проводов завершался последовательным термическим напылением двух слоев металла (Cr – 12 нм, Au – 8 нм) и процессом «взрыва» (*lift-off*) (рис. 1, б).

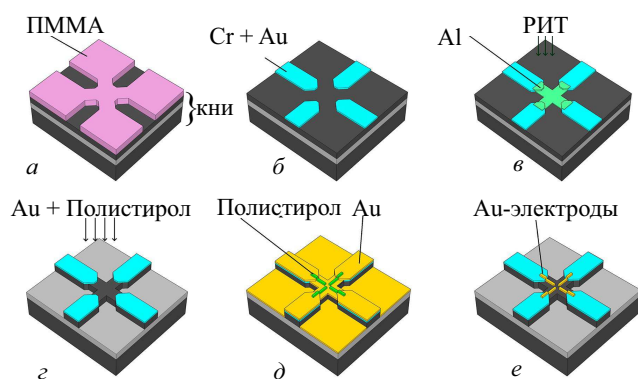


Рис. 1. Технологический процесс изготовления предварительной структуры Au-транзистора: а – рисунок маски в позитивном резисте ПММА; б – макроскопические электроды Au/Cr; в – формирование маски Au/Cr + Al для травления Si-слоя; з – травление Si-слоя и удаление Al-маски; д – формирование маски из негативного резиста после осаждения слоев Au и полистирола (P); е – окончательная структура после травления Au-слоя

На втором этапе в области  $650 \times 650 \text{ нм}$  формировался рисунок металлической (Al) маски в форме креста, совмещенный с подводящими проводами. Точность совмещения обеспечивалась на уровне  $< 30 \text{ нм}$ . Этап завершался термическим напылением 10 нанометровой пленки алюминия и процессом «взрыва» (рис. 1, в).

Сформированная составная (Au/Cr+Al) металлическая пленка служила маской для травления верхнего слоя кремния КНИ пластины на третьем этапе изготовления. Анизотропное травление кремния проводилось в SF<sub>6</sub>-плазме при давлении  $p = 0.18 \text{ Па}$  и мощности  $P = 50 \text{ Вт}$ . Остатки алюминиевой маски удалялись в слабом растворе KOH (рис. 1, з).

Для формирования центральной части предварительной структуры с предельно узкими ( $\sim 10 \text{ нм}$ ) транспортными и затворными электродами использовался негативный электронный резист на основе полистирола [29, 30]. На поверхность чипа магнетронным распылением наносилась Au-пленка толщиной 20 нм, на которую затем термическим испарением наносилась пленка негативного резиста – полистирола толщиной 20 нм. Проявление экспонированного резиста проводилось в ксилоле. Сформированная структура электродов из резиста (рис. 1, д) служила маской для травления Au-пленки, которое проводилось в Ag-плазме ( $p = 5 \times 10^{-3} \text{ мбар}$ ,  $P = 200 \text{ Вт}$ ). Скорость травления пленки Au ( $\sim 0.25 \text{ нм/с}$ ) совпадала со скоростью травления резиста, остатки которого удалялись в кислородной плазме. Окончательный вид предварительной структуры показан на рис. 1, е и рис. 2, а.

Для внедрения примесных атомов в область слоя кремния, расположенную между сформированными электродами, проводилось ее экспонирование ионами Au при ускоряющем напряжении 35 кВ и экспозиционной дозе  $\sim 0.5 \text{ мкК/см}^2$ . Использовалась оригинальная система с фокусированным ионным пучком ionLINE (Raith GmbH). Основным фактором, подтверждающим определяющее влияние внедренных одиночных примесных атомов Au на электрические характеристики экспериментальных структур, являлось отсутствие электрической проводимости между туннельными электродами (сопротивление более 10 ГОм) и появление таковой после их имплантации.

Структуры на основе примесных атомов калия изготавливались аналогично одноатомным транзисторам на основе атомов фосфора [25, 26]. Отличие заключалось в использовании нелегированного верхнего слоя КНИ. Имплантация калия осуществлялась в уже готовую структуру (рис. 2, б) за несколько шагов, с промежуточным тестированием образцов. При каждом шаге имплантации использовались небольшие поверхностные дозы легирования ( $n \sim 10^{12} - 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) и низкие значения ускоряющего напряжения (300 эВ) для того, чтобы атомы калия встраивались исключительно в приповерхностный слой, не проникая в глубину. Кроме того, в таких режимах имплантации кристаллическая решетка кремния практически не подвергалась разрушению ионным пучком [31, 32]. Время экспонирования зависело от плотности тока ионного пучка и находилось в пределах от одной до 30 мин.

Во всех используемых методиках применяется топология образца с открытым каналом транзистора, что при необходимости дает возможность производить

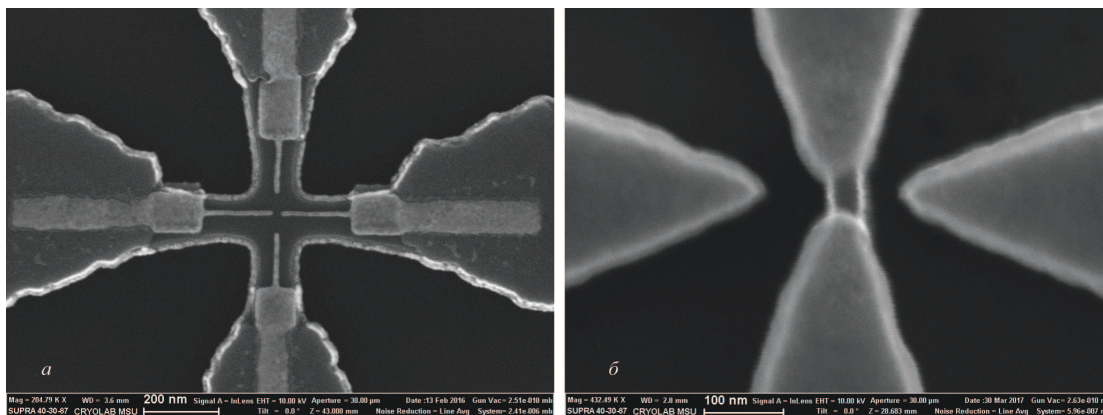


Рис. 2. Изображения в электронном микроскопе одноатомных структур на основе примесных атомов Au (а) и К (б) в кремнии

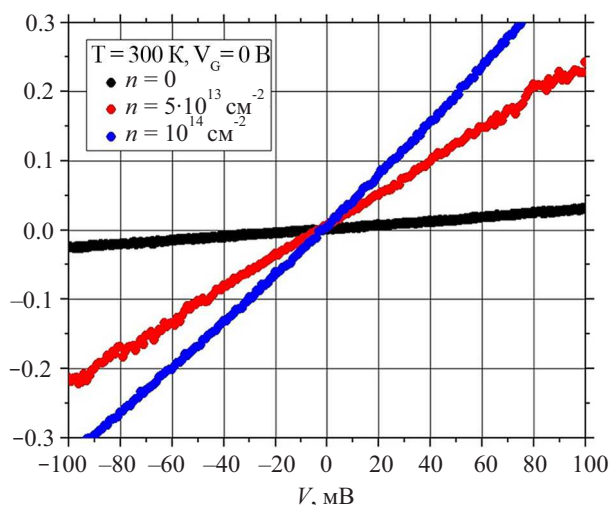


Рис. 3. Серия вольт-амперных характеристик одного и того же наномостика после нескольких последовательных циклов имплантации атомов калия

его дополнительную модификацию последовательными циклами травления и/или имплантации различными примесями. Такая технологическая особенность является важным преимуществом предложенного метода. На рис. 3 представлена серия вольт-амперных характеристик одного и того же наномостика после нескольких последовательных циклов имплантации атомов калия. Проводимость кремниевого мостика увеличивалась после каждого цикла имплантации.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Ранее авторами были продемонстрированы транзисторы на основе одиночного атома мышьяка [24] и атомов фосфора [25, 26]. Измеренные диаграммы стабильности подтверждали одноатомную структуру экспериментальных образцов, одноэлектронный транспорт в которых изучался при температурах 4.2 и 77 К. Зарядовые энергии легирующих атомов оказались равными 16 мэВ для мышьяка и 5–30 мэВ для фосфора.

Выбор атомов золота и калия в качестве легирующей примеси связан с тем, что их электронные и дырочные уровни расположены вблизи середины запрещенной зоны кремния, что обеспечивает небольшой эффективный размер атома и, как следствие, высокое значение его зарядовой энергии по сравнению с традиционными легирующими атомами (P, As, Sb, B).

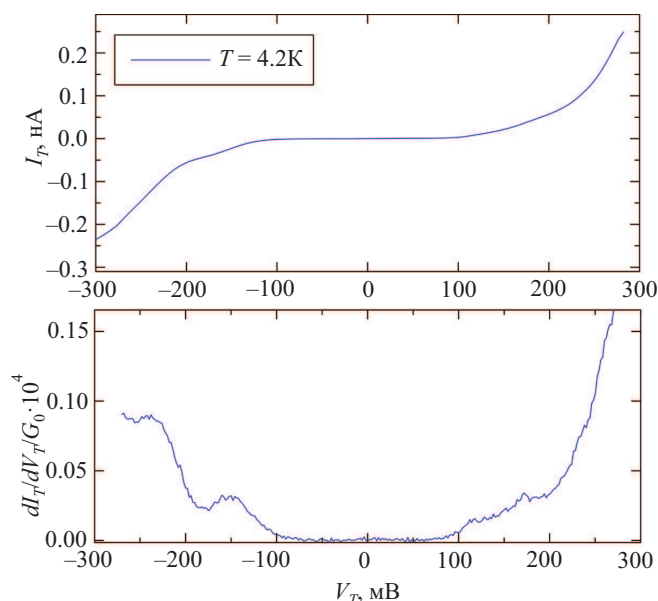


Рис. 4. Характерные зависимости тока (а) и дифференциальной проводимости (б) от транспортного напряжения транзистора на основе примесных атомов Au, измеренные при температуре 4.2 К

Транзисторы на основе примесных атомов Au демонстрировали четкое одноэлектронное поведение при температуре жидкого гелия. Подтверждением одноэлектронного режима туннелирования в исследуемых транзисторах является малость туннельной проводимости, которая на 4–5 порядков меньше квантовой единицы проводимости, наличие больших блокадных участков туннельного тока на вольт-амперных характеристиках (ВАХ), достигающих до значений 150–200 мВ, а также наличие ступенек тока на ВАХ, свидетельствующих о дискретном энергетическом спектре электронов в примесных атомах (рис. 4). Нелинейности на ВАХ, определяемые одноэлектронным поведением образцов, регистрировались вплоть до комнатной температуры. Наблюдаемые величины кулоновской блокады туннельного тока являются чрезвычайно большими для любых типов одноэлектронных устройств и свидетельствуют о сверхмалых эффективных размерах кулоновских центров — примесных атомов. Например, при величине кулоновской энергии  $e^2/2C_{\text{eff}} \sim 200$  мэВ эффективный радиус  $r_{\text{eff}}$  примесного атома Au в приповерхностном слое кремния равняется  $\sim 1$  нм. На рис. 4, б представлены зависимости дифференциальной проводимости

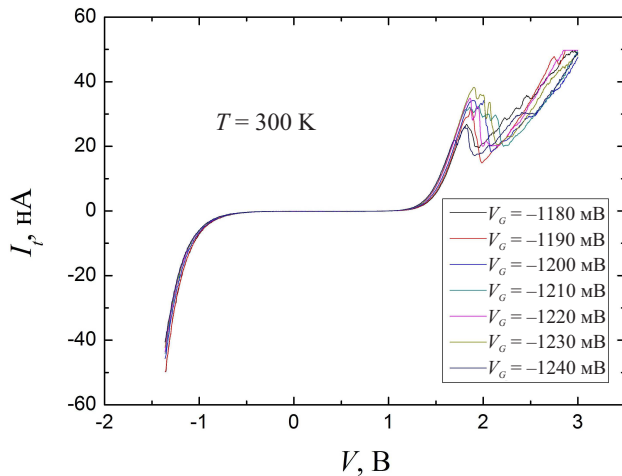


Рис. 5. Семейство ВАХ транзистора на основе примесных атомов К, измеренные при температуре 300 К

транзистора от транспортного напряжения  $V_T$ , на которой за блокадной областью присутствуют пики, свидетельствующие о наличии дискретного энергетического спектра электронов. Несимметричность пиков и ВАХ транзистора относительно нуля транспортного напряжения ( $V_T = 0$ ) можно объяснить близостью рабочего примесного атома к тому или иному транспортному электроду и, как результат, разным воздействием на левый и правый туннельные барьеры при положительных и отрицательных значениях  $V_T$ .

На рис. 5 изображены ВАХ, измеренные для разных значений напряжения на затворе при комнатной температуре одного из одноэлектронных транзисторов на примесных атомах калия. Наблюдаемые ВАХ имеют несимметричную форму из-за несимметричного ( $0-V_T$ ) подключения транспортного напряжения. Поскольку К — донорная примесь, информативной для анализа является положительная ветвь ВАХ. Величина кулоновской блокады по транспортному напряжению для исследуемого образца достигала величины  $\sim 0.8$  В. Это свидетельствует о транспорте не через единичные примесные атомы калия, характерная кулоновская энергия которого составляет порядка 260 мэВ, а, вероятнее всего, через цепочку примесных атомов в наномостике, что и приводит к эффективному увеличению величины кулоновской блокады.

На представленных графиках можно видеть изменение формы ВАХ в зависимости от величины управляющего напряжения, т. е. наличие эффекта управления. В области положительных значений транспортных напряжений на ВАХ наблюдаются всплески тока, причину появления которых можно объяснить следующим образом: в самой узкой части наномостика располагается всего несколько примесных атомов со случайно заданной пространственной конфигурацией. Среднее расстояние между атомами таково, что одночастичные волновые функции электронов, связанные с дискретными валентными энергетическими уровнями примесных атомов, имеют слабое перекрытие, что позволяет отдельным электронам быть локализованным на этих уровнях и под действием приложенного электрического поля совершать акты туннелирования от атома к атому. В каждый конкретный момент времени система примесных атомов и локализованных на них

электронов обладает определенной электростатической энергией, которая определяется значениями энергий уровней, собственной кулоновской энергией электронов на примесных атомах и электростатическим взаимодействием различных примесных атомов между собой. Количество открытых комбинаций распределения электронов по примесным атомам, при которых возможны туннельные события, зависит от приложенного электрического поля, определяемого значениями транспортного и управляющего напряжений. Оно может как увеличиваться, так и уменьшаться, что и приводит к падению и росту проводимости системы. Такой эффект на примесных атомах экспериментально зарегистрирован впервые.

Таким образом, изготовленные и измеренные образцы одноэлектронных транзисторов позволяют говорить о возможности создания одноатомных транзисторов на основе атомов золота и калия в кремнии, работающих при высоких температурах.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена оригинальная КМОП-совместимая технология изготовления одноэлектронных одноатомных транзисторов из КНИ. Технология использует слой кристаллического кремния, неравномерно легированный по глубине, контролируемое уменьшение размера канала транзистора в серии процессов изотропного реактивно-ионного травления (для легирующих атомов мышьяка и фосфора) и нелегированный слой кристаллического кремния, в котором формируется предварительная структура транзистора с последующей имплантацией атомов золота в канал транзистора. Были изготовлены транзисторы с каналом-нанопроводом, допированным атомами Р, As, Au, К. Атомы Au и К в качестве легирующей примеси в кремнии имеют уровни, которые расположены вблизи середины запрещенной зоны, в отличие от Р и As, уровни которых расположены вблизи зоны проводимости. Это обеспечивает небольшой эффективный размер зарядного центра и, как результат, высокое значение его зарядовой энергии и рабочей температуры по сравнению с традиционными легирующими примесями (Р, As, Sb, В). Измеренное значение зарядовой энергии для транзисторов с каналом, легированным атомами Au и К, было значительно выше ( $\sim 150-800$  мэВ), чем у транзисторов с каналом, легированным мышьяком или фосфором. Важным преимуществом предлагаемых методов является возможность контролируемой имплантации различных легирующих примесей, что позволяет изготавливать многоэлектродные устройства на основе гетерогенных легирующих примесей, например твердотельные квантовые биты. Также предложенные методики позволяют чередовать циклы травления и имплантации при изготовлении образца.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 16-12-00072). Использовалось оборудование Учебно-методического центра литографии и микроскопии МГУ им. М. В. Ломоносова. Авторы выражают глубокую признательность S. Bauerdick, P. Mazarov, A. Nadzeyka, A. Rudzinski (Raith GmbH) и V. Vlasenko (OPTEC LLC) за предоставленную возможность использования уникального оборудования ionLINE для ионной имплантации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Lovat G., Choi B., Paley D. W. et al. // *Nature Nanotechnology*. 2017. **12**, P. 1050.
- Shin S.J., Lee J.J., Kang H.J. et al. // *Nano Lett.* 2011. **11**, N 4. P. 1591.
- Kane B.E. // *Nature*. 1998. **393**. P. 133.
- Pla J.J., Tan K.Y., Dehollain J.P. et al. // *Nature*. 2012. **489**. P. 541.
- Fuechsle M., Miwa J.A., Mahapatra S. et al. // *Nature Nanotechnology*. 2012. **7**. P. 242.
- Veldhorst M., Yang C.H., Hwang J.C.C. et al. // *Nature*. 2015. **526**. P. 410.
- Yamahata G., Nishiguchi K., Fujiwara A. // *Nature Communications*. 2014. **5**. P. 5038.
- Tettamanzi G.C., Wacquez R., Rogge S. // *New Journal of Physics*. 2014. **16**. 063036.
- Sellier H., Lansbergen G.P., Caro J. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2006. **97**. 206805.
- Lansbergen G.P., Rahman R., Wellard C.J. et al. // *Nature Physics*. 2008. **4**. P. 656.
- Pierre M., Wacquez R., Jehl X. et al. // *Nature Nanotechnology*. 2010. **5**. P. 133.
- Tan K.Y., Chan K.W., Mottonen M. et al. // *Nano Lett.* 2010. **10**. P. 11.
- Prati E., De Michielis M., Belli M. et al. // *Nanotechnology*. 2012. **23**, N 21. 215204.
- Moraru D., Samanta A., Mizuno T. et al. // *Nano Lett.* 2014. **4**. P. 6219.
- Miwa J.A., Mol J.A., Salfi J. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2013. **103**. 043106.
- Voisin B., Salfi J., Bocquel J. et al. // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2015. **27**, N 15. 154203.
- Trifonov A.S., Presnov D.E., Bozhev I.V. et al. // *Ultramicroscopy*. 2017. **179**. P. 33.
- Presnov D.E., Bozhev I.V., Miakonkikh A.V. et al. // *J. of Appl. Phys.* 2018. **123**, N 5. 054503.
- Prati E., Latempa R., Fanciulli M. // *Phys. Rev. B*. 2009. **80**. 165331.
- Gasseller M., DeNinno M., Loo R. et al. // *Nano Lett.* 2011. **11**, N 12. P. 5208.
- Hile S.J., House M.G., Peretz E. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2015. **107**. 093504.
- Zhang A., Zheng G., Lieber C.M. // *Nanowires. Building Blocks for Nanoscience and Technology*. Springer, Cham. 2016. P. 307.
- Rubtsova M.Yu., Presnova G.V., Krupenin V.A. et al. // «Biosensors 2016», *Procedia Technology*. **27**. P. 234.
- Shorokhov V.V., Presnov D.E., Amitonov S.V. et al. // *Nanoscale*. 2017. **9**, N 2. P. 613.
- Дагесян С.А., Шорохов В.В., Преснов Д.Е. и др. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 2011. № 5. С. 32. (Dagesyan S.A., Shorokhov V.V., Presnov D.E. et al. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2017. **72**, N 5. P. 474.)
- Dagesyan S.A., Shorokhov V.V., Presnov D.E. et al. // *Nanotechnology*. 2017. **28**, N 22. 225304.
- Sze S.M., Ng K.K. // *New York: Wiley*. 2006. **6**.
- Шорохов В.В. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 2017. № 3. С. 60. (Shorokhov V.V. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2017. **72**, N 3. P. 279.)
- Zhang J., Con C., Cui B. // *ACS Nano*. 2014. **8**, N 4. P. 3483.
- Жарик Г.А., Дагесян С.А., Солдатов Е.С. и др. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 2017. № 6. С. 120. (Zharik G.A., Dagesyan S.A., Soldatov E.S. et al. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2017. **72**, N 6. P. 627.)
- Shemukhin A.A., Balakshin Yu.V., Evseev A.P., Chernysh V.S. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 2017. **406(B)**. P. 507.
- Balakshin Yu.V., Shemukhin A.A., Nazarov A.V. et al. // *Technical Physics*. 2018. **63**, N 12. P. 1900.

### Single-Electron Structures Based on Solitary Dopant Atoms of Arsenic, Phosphorus, Gold, and Potassium in Silicon

D. E. Presnov<sup>1,2,a</sup>, S. A. Dagesyan<sup>1</sup>, I. V. Bozhev<sup>1</sup>, V. V. Shorokhov<sup>1</sup>, A. S. Trifonov<sup>1</sup>, A. A. Shemukhin<sup>2</sup>, I. V. Sapkov<sup>1</sup>, I. G. Prokhorova<sup>1</sup>, O. V. Snigirev<sup>1</sup>, V. A. Krupenin<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup>Quantum Technology Centre, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

<sup>2</sup>Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

E-mail: <sup>a</sup>denis.presnov@physics.msu.ru, <sup>b</sup>krupenin@physics.msu.ru.

Here we present CMOS compatible fabrication methods and the results of an experimental study of single-atom single-electron transistors made from silicon on insulator and based on various dopant atoms. Transistors with channels doped with arsenic (As), phosphorus (P), gold (Au) and potassium (K) atoms were fabricated and studied. Two methods for fabricating of experimental transistor structures are presented. The first method (As, P transistors) used an inhomogeneously doped in depth silicon layer and controlled reduction of the size of the transistor channel in several cycles of isotropic reactive-ion etching. The second method (Au and K transistors) used an undoped silicon layer and the subsequent implantation of dopant atoms into a preformed transistor channel. Dopant electron and hole levels of Au and K atoms in silicon are located near the middle of the silicon band gap, which provides a small effective size of the dopant charge center and, as a result, a high value of the charge energy and operating temperature of the transistor compared to the traditional dopants (P, As, Sb, B). The values of the charge energy of the Au and K transistors, which were estimated from the measurements ( $E_c \geq 150$  meV), are much higher than those of the As and P transistors ( $E_c < 30$  meV). Important advantages of the proposed methods are: controlled implantation of various impurities and possibility to combine etching and implantation cycles during sample preparation.

**Keywords:** single-electron transistor, single-atom transistor, Au dopant, K dopant, silicon-on-insulator, nanobridge, nanowire.

PACS: 85.35.-p, 73.23.Hk, 68.35.bg, 85.40.-e.

Received 14 November 2018.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2019. **74**, No. 2. Pp. 165–170.

#### Сведения об авторах

- Преснов Денис Евгеньевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-39-87, e-mail: denis.presnov@physics.msu.ru.
- Дагесян Саркис Арменакович — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-59-35, e-mail: dagesyan@physics.msu.ru.
- Божьев Иван Вячеславович — аспирант; тел.: (495) 939-39-87, e-mail: bozhjev.ivan@physics.msu.ru.
- Шорохов Владислав Владимирович — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-59-35, e-mail: shorokhov@phys.msu.ru.
- Трифонов Артем Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-39-87, e-mail: trifonov.artem@phys.msu.ru.
- Шемухин Андрей Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-29-89, e-mail: shemuhin@gmail.com.
- Сапков Иван Владимирович — мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-59-35, e-mail: ivan.sapkov@gmail.com.
- Прохорова Ирина Георгиевна — мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-39-88, e-mail: i.g.mansfeld@gmail.com.
- Снигирев Олег Васильевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-59-34, e-mail: oleg.snigirev@phys.msu.ru.
- Крупенин Владимир Александрович — доктор. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-39-87, e-mail: krupenin@physics.msu.ru.