

РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

Многоэлектродная система для реализации твердотельных квантовых устройств, основанных на неупорядоченной системе примесных атомов в кремнии

С. А. Дагесян,^{1,2,а} С. Ю. Рыженкова,^{1,2} И. В. Сапков,^{1,2} Д. Е. Преснов,^{1,2,3}
А. С. Трифонов,^{1,2} В. А. Крупенин,^{1,2,б} О. В. Снигирев^{1,2}

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,

¹ *физический факультет, лаборатория криоэлектроники;*

² *Центр квантовых технологий;*

³ *Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

Поступила в редакцию 24.03.2020, после доработки 07.05.2020, принята к публикации 14.05.2020.

В настоящей работе продемонстрирована твердотельная наноразмерная структура, представляющая собой трехмерный массив туннельно связанных примесных атомов мышьяка в кремнии с системой подводящих к этой структуре металлических электродов. На поверхности неравномерно по глубине легированного мышьяком кремния на изоляторе изготовлены структуры из 8 металлических электродов, 4 из которых сходятся к области диаметром 50 нм, а остальные удалены от центра этой области на расстояние 200 нм. После удаления тонкого высокопроводящего верхнего слоя кремния в изготовленных структурах продемонстрирован одноэлектронный транспорт в массиве (резервуаре) расположенных между электродами примесных атомов мышьяка. Величина кулоновской блокады составила величину ~ 100 мВ при температуре 4.2 К. Предложенная структура может быть использована в качестве резервуарной нейронной сети, где одиночные примесные атомы выполняют роль нейронов, а электроды будут выполнять роль входных и выходных терминалов устройства, а также использоваться для настройки нейросети. Рабочая температура устройств может быть существенно повышена благодаря относительно небольшому эффективному размеру примесных атомов мышьяка в кремнии (3–5 нм).

Ключевые слова: резервуарная нейронная сеть, одноэлектроника, туннелирование, одноатомные структуры, электронно-лучевая литография.

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

ВВЕДЕНИЕ

Для увеличения быстродействия и уменьшения энергопотребления микро- и нанoeлектронных устройств необходимо уменьшать характерный размер большинства элементов. В настоящее время уже известен целый класс твердотельных устройств, где электронный перенос в системе определяется несколькими примесными атомами: были продемонстрированы прототипы квантового бита [1–3], квантового логического вентиля [4], устройства для квантовой метрологии [5, 6]. Исследования отдельных примесей в кремнии проводятся методами туннельной спектроскопии [7–12], сканирующей зондовой микроскопии [13–16], микроволнового облучения [17], емкостной спектроскопией [18] и RF рефлексометрией [19]. Так как энергия электронного уровня примеси может быть сопоставима с кулоновской энергией системы, рабочая температура устройства может достигать высоких значений [20, 21]. Весьма перспективной выглядит идея использовать массив примесных атомов в твердотельной матрице для реализации искусственных нейронных сетей [22]. В 2001 году была предложена новая парадигма обучения искусственной рекуррентной нейронной сети, где резервуар (система связанных нейронов) генерируется случайным образом и фиксирован [23]. Резервуарная нейронная сеть предполагает наличие системы случайно связанных нейронов

с фиксированными (нетренируемыми) связями между ними. Обучение нейронной сети происходит за счет тренировки внешних связей резервуара. Резервуарная нейронная сеть может быть создана как программным путем на базе компьютера с классической архитектурой, так и на базе реальных физических объектов, играющих роль нейронов. В работах [24, 25] были продемонстрированы системы на основе неупорядоченного массива наночастиц [24] и примесных атомов в кремнии [25], окруженные несколькими электродами. Электрические свойства системы настраивались подбором напряжений на управляющих электродах с помощью генетического алгоритма. Таким образом, было продемонстрировано реконфигурируемое выполнение любой бинарной или унарной булевой функции. Наночастицы и примесные атомы были связаны друг с другом туннельными и емкостными связями. Туннельный транспорт между ними носил одноэлектронный характер в связи малым размером наночастиц.

Цель настоящей работы — создание наноразмерной системы для использования в качестве твердотельной резервуарной нейронной сети. Для этого был разработан метод изготовления системы близко расположенных (50–200 нм) электродов, играющих роль внешних связей резервуара. Были изготовлены системы из 8 металлических электродов: 4 из них сходились к области диаметром 50 нм, 4 были удалены от центра этой области на расстояние 200 нм.

^а E-mail: dagesyan@physics.msu.ru

^б E-mail: krupenin@physics.msu.ru

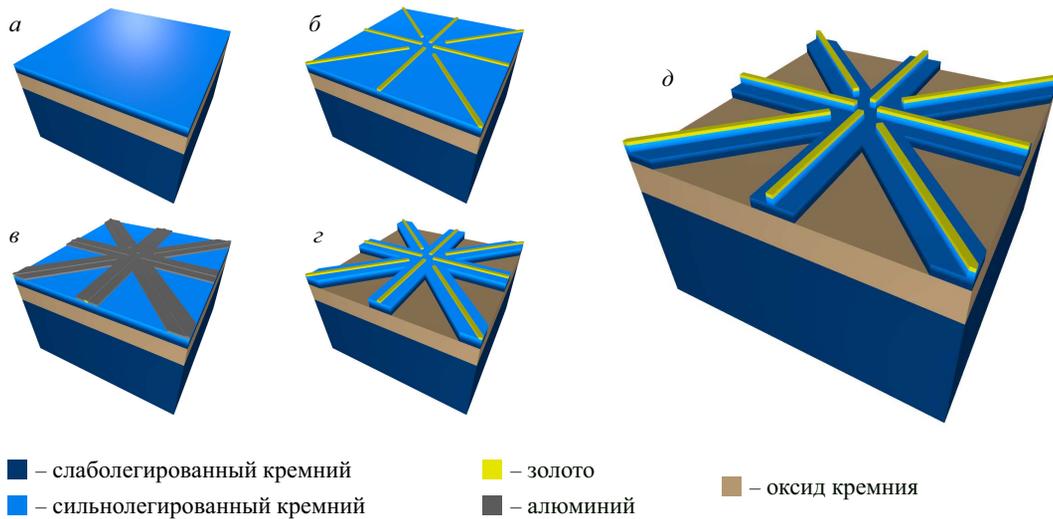


Рис. 1. Процесс изготовления экспериментальных структур: *a* — исходная пластина КНИ, *б* — металлические нанозлектроды, *в* — алюминиевая маска, *г* — образец после травления кремния и удаления алюминиевой маски, *д* — образец после дополнительного реактивно-ионного травления (в цвете online)

В изготовленных экспериментальных структурах была продемонстрирована туннельная проводимость в массиве расположенных между электродами примесных атомов мышьяка в кремнии (резервуаре). Предлагаемый метод изготовления позволяет контролировать плотность массива примесных атомов уровнем допирования или травлением приповерхностного слоя кремния [26, 27]. Ожидается, что разрабатываемая структура на основе примесных атомов будет работать при более высоких температурах из-за маленького эффективного размера атома мышьяка (3–5 нм) в кремнии [28, 29].

1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ

Для изготовления экспериментальных образцов использовались пластины кремния на изоляторе с 55 нанометровым верхним слоем кремния и 145 нанометровым слоем оксида кремния (рис. 1, *a*). Верхний слой кремния был неравномерно легирован

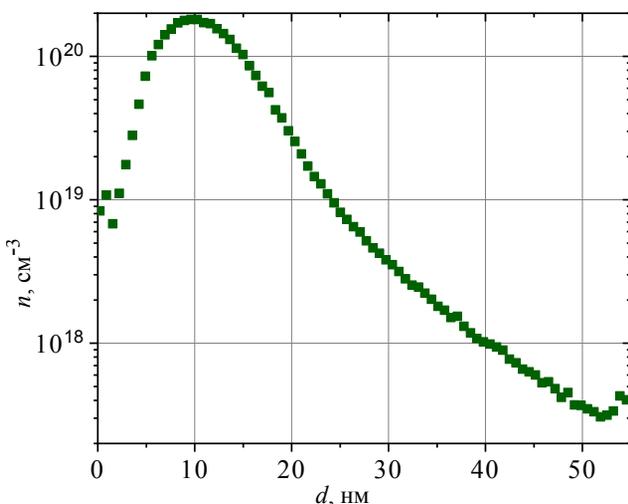


Рис. 2. Распределение концентрации примесных атомов мышьяка в кремнии внутри исходного 55-нанометрового слоя кремния в зависимости от глубины

атомами мышьяка с высокой концентрацией примесей около его поверхности (10^{20} см^{-3}) и низкой концентрацией ($10^{17} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$) в глубине кремниевого слоя (рис. 2). Легированная схожим образом подложка была ранее использована для создания одноэлектронного одноатомного транзистора на основе атомов мышьяка [28, 29]. Концентрация порядка 10^{20} см^{-3} обеспечивала металлическую проводимость верхнего кремниевого слоя и была слишком высока для формирования туннельных переходов малой прозрачности ($Rt \gg Rq = 26 \text{ кОм}$) между примесями мышьяка. Концентрация 10^{17} см^{-3} вблизи дна верхнего слоя кремния является слишком низкой и не обеспечивает заметного туннельного тока из-за слишком высокого значения Rt . Поэтому для создания резервуара устройства использовался проводящий слой на глубине порядка 20–30 нм с концентрацией примесей $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Разработанный процесс изготовления образцов состоял из 4 основных этапов:

1. Изготовление металлических электродов, ведущих к наноразмерной области (рис. 1, *б*).
2. Создание алюминиевой маски, защищающей в дальнейшем нанометровую область между электродами от травления (рис. 1, *в*).
3. Реактивно-ионное травление кремниевого слоя через металлическую маску и удаление алюминиевой маски (рис. 1, *г*).
4. Дополнительное травление верхней части кремниевого слоя с последующим контролем проводимости (рис. 1, *д*).

Этапы 1 и 2 были выполнены с использованием «взрывной» электронно-лучевой литографии и термического вакуумного напыления металлов. Этап 1 был ранее оптимизирован нами для получения минимального размера электродов [30]. В качестве материала электродов выступали слой Au толщиной 10 нм с подслоем из Cr толщиной 10 нм. В свою очередь, алюминиевая маска, созданная на 2-м этапе, имела толщину 10 нм.

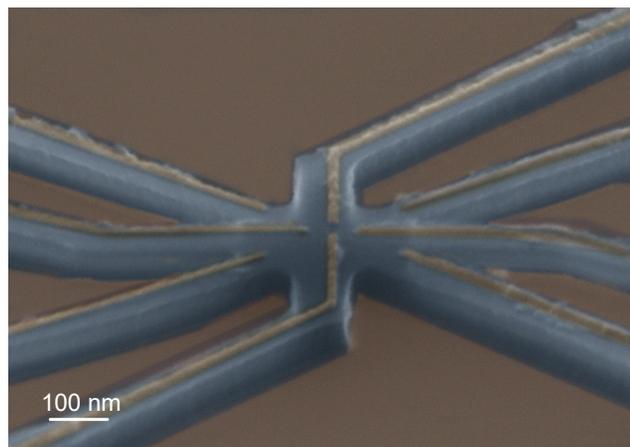


Рис. 3. Снимок структуры, полученный с использованием сканирующего электронного микроскопа (в цвете online)

Этап 3 был проведен с использованием анизотропного реактивно-ионного травления в емкостном ВЧ-разряде плазмы в атмосфере SF_6 при давлении 0.18 Па, мощности разряда 50 Вт и длительности процесса 25 с. За это время с поверхности полностью удалялся слой кремния со всех участков, не защищенных металлической пленкой. После этого этапа проводимость структуры полностью определяется наноразмерной областью между электродами. После этапа 3 был проведен контроль изготовленной структуры методом сканирующей электронной микроскопии. Фотография структуры представлена на рис. 3.

Этап 4 («дотравливание») был осуществлен с использованием анизотропного режима травления, обеспечивающего более низкую скорость травления кремния: разряд плазмы в смеси газов CF_4 и O_2 в соотношении 2:1 при давлении 0.18 Па и мощности разряда 25 Вт. Низкая скорость травления позволяла контролировать толщину удаляемой пленки с высокой точностью. С помощью лазерного интерферометрического контроля была определена скорость травления, которая составила величину 0.23 нм/с. В этом режиме слой кремния толщиной 55 нм полностью удаляется за время ~ 240 с. Время травления, при котором достигалась необходимая туннельная проводимость между электродами, было определено экспериментально и составило 90 с, что соответствовало удалению слоя кремния толщиной ~ 21 нм.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Таким образом, была разработана и изготовлена структура с системой тонкопленочных электродов из Сг, окружающих наноразмерную область диаметром 50–200 нм (4 электрода с 50-нанометровым зазором и 4 электрода с 200 нанометровым зазором между ними). Каждый электрод был сформирован на высоколегированном слое кремния, на остальных участках структуры высоколегированный слой кремния удалялся (рис. 1, д). Изготовленная структура изолирована от подложки 145-нанометровым слоем оксида кремния.

Электрические характеристики экспериментальных структур были измерены при температурах 4.2 и 300 К до и после дополнительного травления,

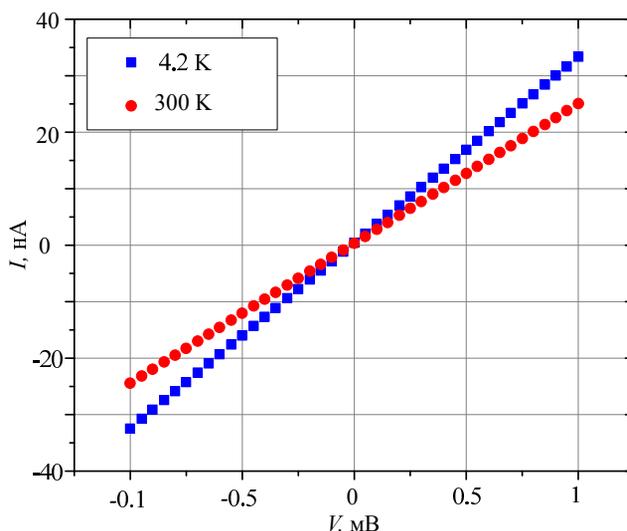


Рис. 4. Типичные вольт-амперные характеристики образцов с металлической проводимостью (в цвете online)

измерялась проводимость между парами электродов с 50-нанометровым зазором. Изначально, до проведения процессов дополнительного травления кремниевого слоя изготовленной структуры, в результате измерений были получены линейные вольт-амперные характеристики как при комнатной температуре, так и при температуре жидкого гелия (рис. 4). Структуры демонстрировали омическую проводимость с сопротивлением ниже 100 кОм при комнатной температуре с увеличением проводимости при охлаждении образца. Это соответствует практически «металлической» проводимости через приповерхностный, легированный до вырождения слой кремния с высокой концентрацией примесей.

Для достижения туннельной проводимости между электродами образец подвергался дополнительной процедуре анизотропного реактивно-ионного травления на протяжении 90 с, что соответствует удалению слоя кремния толщиной приблизительно 21 нм. Это хорошо согласуется с данными на рис. 2, по которым концентрация примесей на глубине 21 нм составляет $\sim 2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ — значение, при котором и должен реализовываться подобный режим электронного транспорта. При этом критерием туннельной проводимости через обособленные примесные атомы было наличие на вольт-амперных характеристиках участка кулоновской блокады величиной более 20 мВ. Типичные вольт-амперные характеристики «дотравленных» образцов представлены на рис. 5. При комнатной температуре образцы демонстрировали близкую к линейной зависимость тока от напряжения с характерным сопротивлением примерно 100 кОм. Максимальная величина кулоновской блокады при температуре 4.2 К была 100 мВ и выше.

В одноатомном одноэлектронном транзисторе на основе одиночного примесного атома мышьяка в кремнии величина кулоновской блокады была в районе 30–40 мВ [28]. В изготовленной структуре наблюдается существенно более высокое значение величины блокады туннелирования (на рис. 5, б порог кулоновской блокады составляет 100 мВ). Последовательный транспорт электронов через цепочку примесных атомов мышьяка, соединенных между

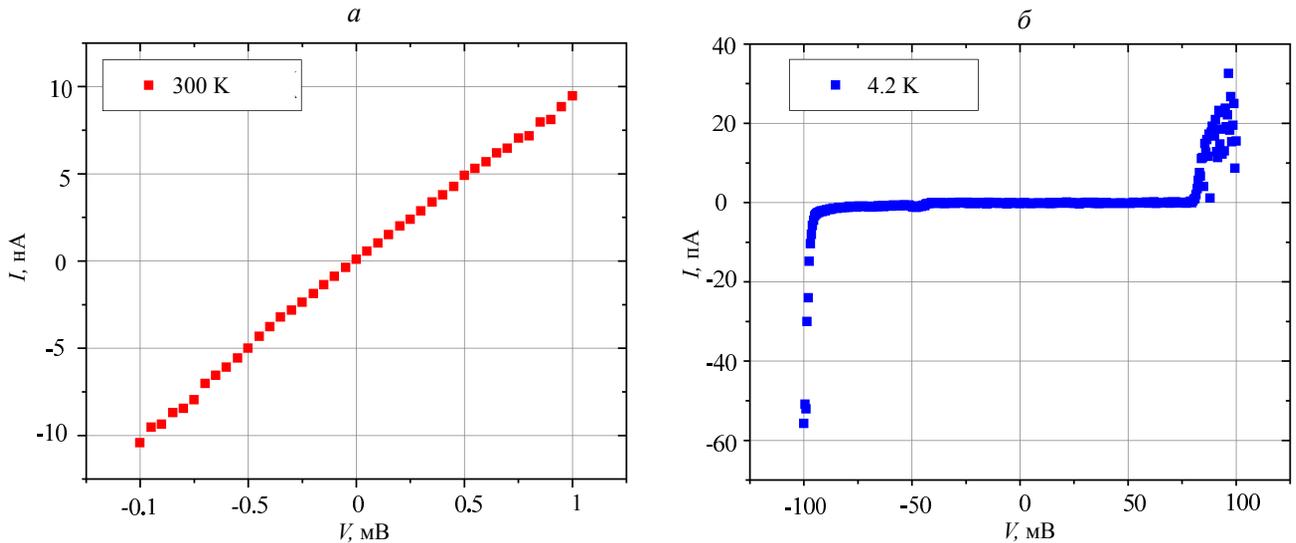


Рис. 5. Типичные вольт-амперные характеристики «дотравленных» образцов: а — при 300 К, б — при температуре 4.2 К (в цвете online)

собой туннельными переходами [31], обеспечивая более высокое значение кулоновской блокады. Электронный транспорт в изготовленных структурах близок именно к этому варианту: в трехмерном массиве зарядовых центров, образованных примесными атомами, происходит последовательное туннелирование электронов между зарядовыми центрами по сложной траектории. Похожее поведение наблюдалось ранее в структурах на основе гранулированных пленок [32], отличие состоит в том, что в гранулированной тонкой пленке массив зарядовых центров двумерный.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- На поверхности неравномерно по глубине легированного мышьяком кремния на изоляторе изготовлены структуры из металлических электродов, 4 из которых сходятся к области диаметром 50 нм и 4 других удалены от центра этой области на расстояние 200 нм.
- Была получена туннельная проводимость между этими электродами при температуре 4.2 К через трехмерный массив примесных атомов мышьяка с концентрацией $n \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ путем стравливания верхнего 21 нм слоя кремния с более высокой концентрацией примесей $n \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$.
- Величина кулоновской блокады в структуре составила величину $\sim 100 \text{ мВ}$ при температуре 4.2 К. Такое высокое значение подтверждает механизм последовательного туннелирования электронов через примесные центры, образованные атомами мышьяка в твердотельной матрице кремния.

Разработанный режим реактивно-ионного травления, позволяющий контролируемым образом удалить высокопроводящий приповерхностный слой кремния, обеспечил реализацию одноэлектронного транспорта в системе зарядовых центров, локализованных между близкорасположенными электродами структуры. Дальнейшая работа предполагает создание перестраиваемых логических элементов на основе

предложенной структуры. Работа включает разработку алгоритмов для настройки устройства и его экспериментальную проверку.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 16-12-00072). С. А. Дагесян и С. Ю. Рыженкова выражают отдельную благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований (грант № 18-37-00414). В работе использовалось оборудование Учебно-методического центра литографии и микроскопии МГУ им. М. В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kane B. E. // *Nature*. 1998. **393**. P. 133.
2. Pla J. J., Tan K. Y., Dehollain J. P. et al. // *Nature*. 2012. **489**. P. 541.
3. Fuechsle M., Miwa J. A., Mahapatra S. et al. // *Nature Nanotechnology*. 2012. **7**. P. 242.
4. Veldhorst M., Yang C. H., Hwang J. C. C. et al. // *Nature*. 2015. **526**. P. 410.
5. Yamahata G., Nishiguchi K., Fujiwara A. // *Nature Communications*. 2014. **5**. P. 5038.
6. Tettamanzi G. C., Wacquez R., Rogge S. // *New Journal of Physics*. 2014. **16**. P. 063036.
7. Sellier H., Lansbergen G. P., Caro J. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2006. **97**. P. 206805.
8. Lansbergen G. P., Rahman R., Wellard C. J. et al. // *Nature Physics*. 2008. **4**. P. 656.
9. Pierre M., Wacquez R., Jehl X. et al. // *Nature Nanotechnology*. 2010. **5**. P. 133.
10. Tan K. Y., Chan K. W., Mottonen M. et al. // *Nano Lett.* 2010. **10**. P. 11.
11. Prati E., De Michielis M., Belli M. et al. // *Nanotechnology*. 2012. **23**, N 21. P. 215204.
12. Moraru D., Samanta A., Mizuno T. et al. // *Nano Lett.* 2014. **4**. P. 6219.
13. Miwa J. A., Mol J. A., Salfi J. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2013. **103**. P. 043106.
14. Voisin B., Salfi J., Bocquel J. et al. // *J. of Physics: Condensed Matter*. 2015. **27**, N 15. P. 154203.
15. Trifonov A. S., Presnov D. E., Bozhev I. V. et al. // *Ultramicroscopy*. 2017. **179**. P. 33.
16. Presnov D. E., Bozhev I. V., Miakonkikh A. V. et al. // *J. of Appl. Phys.* 2018. **123**, N 5. P. 054503.

17. Prati E., Latempa R., Fanciulli M. // *Phys. Rev. B*. 2009. **80**. P. 165331.
18. Gasseller M., DeNinno M., Loo R. et al. // *Nano Lett.* 2011. **11**, N 12. P. 5208.
19. Hile S.J., House M.G., Peretz E. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2015. **107**. P. 093504.
20. Lovat G., Choi B., Paley D.W. et al. // *Nature Nanotechnology*. 2017. **12**. P. 1050.
21. Shin S.J., Lee J.J., Kang H.J. et al. // *Nano Lett.* 2011. **11**, N 4. P. 1591.
22. Gallicchio C., Micheli A., Pedrelli L. // *Neuro-computing*. 2017. **268**. P. 87.
23. Jaeger H. // German National Research Center for Information Technology GMD Technical Report. 2001. **148**, N 34. P. 13.
24. Bose S.K., Lawrence C.P., Liu Z. et al. // *Nature nanotechnology*. 2015. **10**, N 12. P. 1048.
25. Chen T., van Gelder J., van de Ven B. et al. // *Nature*. 2020. **577**. P. 341.
26. Dagesyan S.A., Shorokhov V.V., Presnov D.E. et al. // *Nanotechnology*. 2017. **28**, N 22. P. 225304.
27. Дагесян С.А., Шорохов В.В., Преснов Д.Е. и др. *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 2017. № 5. С. 32. (Dagesyan S.A., Shorokhov V.V., Presnov D.E. et al. // *Mosc. Univ. Phys. Bull.* 2017. **72**, N 5. P. 474.)
28. Shorokhov V.V., Presnov D.E., Amitonov S.V. et al. // *Nanoscale*. 2017. **9**, N 2. P. 613.
29. Преснов Д.Е., Дагесян С.А., Божьев И.В. и др. *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 2019. № 2. С. 64. (Presnov D.E., Dagesyan S.A., Bozhev I.V. et al. // *Mosc. Univ. Phys. Bull.* 2019. **74**, N 2. P. 165.)
30. Dagesyan S.A., Ryzhenkova S.Yu., Presnov D.E. et al. // *Proceedings of SPIE*. 2019. **11022**. P. 110221P.
31. Geigenmuller U., Schon G. // *Europhysics Lett.* **10**, N 8. P. 765.
32. Krupenin V.A., Zalunin V.O., Zorin A.B. // *Microelectronic engineering*. 2005. **81**, N 2–4. P. 217.

A Multi-Electrode System for the Implementation of Solid-State Quantum Devices Based on a Disordered System of Dopant Atoms in Silicon

S. A. Dagesyan^{1,2,a}, S. Yu. Ryzhenkova^{1,2}, I. V. Sapkov^{1,2}, D. E. Presnov^{1,2,3}, A. S. Trifonov^{1,2}, V. A. Krupenin^{1,2,b}, O. V. Snigirev^{1,2}

*Lomonosov Moscow State University*¹ *Cryoelectronics laboratory, Faculty of Physics;*
²*Quantum Technology Center;* ³*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics. Moscow 119191, Russia.*
E-mail: ^a*dagesyan@physics.msu.ru,* ^b*krupenin@physics.msu.ru.*

In this work, we present a nanoscale solid state structure, which is a 3D-array of tunnel-coupled arsenic dopants in silicon with a system of metallic electrodes leading to them. The structures of eight metal electrodes were fabricated on the inhomogeneously in depth doped with arsenic silicon surface, four of which converge to a region 50 nm in diameter, and four to a region of 200 nm. After removal of a thin highly conducting upper silicon layer, single-electron transport in an array (reservoir) of arsenic impurity atoms located between the electrodes is demonstrated. The Coulomb blockade was ~ 100 mV at a temperature of 4.2 K. The proposed structure can be used as a reservoir neural network, where single impurity atoms act as neurons, and electrodes will act as input and output terminals of the device, and also be used to configure the neural network. The operating temperature of such devices can be significantly increased due to the relatively small effective size of impurity arsenic atoms in silicon (3–5 nm).

Keywords: reservoir neural network, single-electronics, tunneling, single-atom structures, electron-beam lithography.

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

Received 24 March 2020.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2020. **75**, No. 4. Pp. 331–335.

Сведения об авторах

1. Дагесян Саркис Арменакович — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-59-35, e-mail: dagesyan@physics.msu.ru.
2. Рыженкова Серафима Юрьевна — студентка; тел.: (495) 939-59-35, e-mail: ryzhenkova.s@physics.msu.ru.
3. Сапков Иван Владимирович — мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-59-35, e-mail: ivan.sapkov@gmail.com.
4. Преснов Денис Евгеньевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-14, e-mail: denis.presnov@physics.msu.ru.
5. Трифонов Артем Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-14, e-mail: trifonov.artem@phys.msu.ru.
6. Крупенин Владимир Александрович — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-14, e-mail: krupenin@physics.msu.ru.
7. Снигирев Олег Васильевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-59-34, e-mail: oleg.snigirev@phys.msu.ru.