

Резервуарная сеть на основе единичных примесных атомов в кремнии

А.С. Андреева,^{1,*} А.С. Трифонов,¹ В.В. Шорохов,¹ Д.Е. Преснов,¹ О.В. Снигирев,¹ В.А. Крупенин^{1,†}¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики полупроводников и криоэлектроники
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 04.10.2024; после доработки 14.11.2024; подписана в печать 22.11.2024)

Настоящая работа направлена на решение проблемы экспериментальной реализации и исследования одноэлектронных резервуарных сетей с примесными атомами As в квазидвумерном приповерхностном слое твердотельной матрицы на основе материала кремний на изоляторе (КНИ). Исследование электронного транспорта в изготовленных экспериментальных структурах показало наличие горизонтальных участков кулоновской блокады на вольтамперных характеристиках (ВАХ), характерных для одноэлектронного транспорта. Форма регистрируемой ВАХ между парой выбранных управляющих электродов резервуарной сети существенным образом зависела от потенциалов остальных окружающих электродов, которые изменяли структуру проводящих каналов, проходящих через примесные центры. Перестройка управляющих напряжений, использование внутренней нелинейности системы разупорядоченных единичных примесных атомов As, имеющей колоссальное пространство состояний, позволили продемонстрировать возможность реализации в одноэлектронной резервуарной сети настраиваемого наноразмерного токового ключа и логических функций «НЕ», «И», «ИЛИ». Для поиска необходимой для реализации функциональных элементов конфигурации резервуарной сети применялся векторный метод настройки.

PACS: 85.35.-p, 73.23.Hk, 68.35.bg, 85.40.-e. УДК: 537.9, 53.082.731.3, 538.935, 538.915, 621.382.2/.3, 53.097.

Ключевые слова: резервуарная сеть, одноэлектронный транспорт, туннелирование, одноатомные структуры, примесные атомы, твердотельная матрица, наноструктуры, электронно-лучевая литография.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.80.2520302](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.80.2520302)

ВВЕДЕНИЕ

Рост разрешающей способности современных промышленных нанолитографических систем за последние полвека позволил перейти от 3 мкм процесса к 2–3 нм [1–3]. Современная индустрия приближается к возможности стабильно создавать элементы электронных схем практически на атомарном масштабе. На таком масштабе возникают эффекты, вызванные дискретной структурой электронных уровней, и для создания устройств становится возможным использовать неклассические физические принципы, такие как одноэлектронный транспорт и квантоворазмерные эффекты. Первые одноэлектронные устройства, основанные на эффекте коррелированного электронного туннелирования, были продемонстрированы более 35 лет назад [4]. Их отличает наличие уникальных свойств [5]. Особый интерес представляют одноэлектронные устройства на основе примесных атомов в качестве зарядовых центров. Такие устройства позволяют достичь комнатной рабочей температуры благодаря малой собственной емкости зарядовых центров. Одними из наиболее простых структур подобного типа являются транзисторы на основе единичных примесных

атомов в твердотельной матрице. К настоящему времени продемонстрированы различные способы реализации таких структур [6–9].

Как правило, одноатомный транзистор содержит единичный примесный атом, расположенный в центре наноразмерного канала между транспортными электродами. Но на практике встречаются структуры, в которых в центре канала находятся 2–3 примесных атома [10]. Несмотря на то, что в последние годы удалось перейти к измерению свойств отдельных легирующих добавок [11–13], а в направлении позиционирования легирующих примесей достигнут значительный прогресс [14–16], методы изготовления одноатомных структур остаются дорогостоящими и трудоемкими или используют вероятностный подход [17].

При этом системы с разупорядоченными активными зарядовыми центрами предоставляют возможность для построения настраиваемых вычислительных зарядовых автоматов и резервуарных сетей. Подобные системы обладают надежной вычислительной функциональностью. Концепция резервуарных вычислений вдохновлена принципами обработки информации в мозге. В 2001 году этот принципиально новый подход к проектированию и обучению рекуррентных нейронных сетей был предложен независимо Вольфгангом Маассом [18] и Гербертом Йегером [19]. Основной компонент системы резервуарных вычислений — многомерное

* E-mail: andreeva.as18@physics.msu.ru† E-mail: krupenin@physics.msu.ru

пространство состояний (резервуар), которое является случайной, фиксированной нейронной сетью. Основное достоинство резервуарных вычислений в сравнении с другими рекуррентными нейронными сетями состоит в быстром обучении. В то время как входной и выходной слои могут быть обучены или настроены, сама структура резервуара остается неизменной, что упрощает процесс обучения и снижает вычислительные затраты, так как не требует обучения всех слоев нейронной сети. На ряду с моделированием рекуррентных нейронных сетей методом резервуарных вычислений интерес исследователей привлекла возможность реализации подобных систем в твердотельной электронике. В 2002 г. было реализовано моделирование структур молекулярных устройств в наночейке, которая не была сконструирована как конкретный логический элемент, и обладала по большей части неупорядоченной внутренней топологией [20]. Размер пространства решения обеспечивает устойчивость к дефектам и отказам, а моделирование доказывает перспективность общего резервуарного подхода.

Несмотря на то, что симуляции и теоретические оценки подобных систем начали появляться более 20 лет назад, на сегодняшний день существует счетное число экспериментальных работ, в которых резервуарные сети сформированы на основе реальных физических объектов [21–23], при этом появились они сравнительно недавно. Предложенные реализации резервуарных сетей основаны на эффекте коррелированного туннелирования. Ключевой элемент одноэлектронной резервуарной сети — наноразмерная область, окруженная управляющими электродами, в которой реализуется резервуар. В резервуаре реализована туннельная проводимость между зарядовыми центрами, число которых может варьироваться в широком диапазоне (от единиц до сотен). Примерами зарядовых центров могут служить проводящие наночастицы, квантовые точки или одиночные примесные атомы в твердотельной матрице. Управляющие электроды связаны с массивом зарядовых центров туннельным образом. Конфигурация зарядовых состояний примесных атомов определяет электрические свойства системы. Определенные функциональные состояния настраиваются заданием напряжений на управляющих электродах.

Одноэлектронная резервуарная сеть является ключевым элементом в области разработки и создания оригинальных функциональных и диагностических систем нового типа. При интеграции с другими технологиями, например с машинным обучением, с ее помощью возможно решать сложные задачи классификации микро- и нанобъектов, создавать оригинальные вычислительные системы сверхвысокой плотности и высокой энергоэффективности. Кроме того, интересным направлением исследований является изучение возможностей применения резервуарных сетей в качестве полевых сенсоров для исследования полевой/зарядовой динамики и структуры нанобъектов.

Настоящая исследовательская работа направлена на решение проблемы экспериментального создания и исследования одноэлектронных резервуарных сетей. В работе предложен и реализован перспективный метод формирования резервуарной сети, исследованы характеристики системы при температурах 20 мК и 2.4 К.

1. МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ

Ключевой особенностью предлагаемого метода создания резервуарной сети является использование разупорядоченного распределения примесных атомов As в квазидвумерном приповерхностном слое твердотельной матрицы на основе материала кремний на изоляторе (КНИ). Основой для изготовления структур резервуарных сетей являются пластины КНИ, изготовленные по технологии UniBond с толщиной верхнего слоя монокристаллического кремния 55 нм и изолирующим промежуточным слоем термического оксида SiO₂ 140 нм. Верхний кремниевый слой был легирован атомами мышьяка (ускоряющее напряжение 6 кВ, общая доза 1.25×10^{15} см²) и отожжен при температуре 925°C в течение 10 с для восстановления кристаллической структуры кремния, нарушенной после имплантации. В результате этих процессов было реализовано неравномерное по глубине распределение примесных атомов As в твердотельной матрице верхнего слоя кремния КНИ пластины с предельно высокой их концентрацией в приповерхностном слое, что обеспечивало «металлическую» проводимость слоя. Одноэлектронный транспорт в резервуарной сети достигался уменьшением концентрации примесных центров путем утоньшения верхнего легированного слоя кремния в процессах последовательных циклов анизотропного реактивно-ионного травления. Циклы травления проводились до образования туннельных связей между примесными центрами, а наличие одноэлектронного транспорта подтверждалось появлением участков кулоновской блокады на вольтамперных характеристиках (ВАХ), измеренных между парами управляющих электродов.

Процесс изготовления исследуемой резервуарной сети включал в себя три основных этапа:

1. формирование транспортных/управляющих электродов;
2. формирование резервуара — рабочей области, легированной примесными атомами;
3. травление до получения туннельной проводимости.

В качестве материала для изготовления экспериментальных образцов использовались пластины кремния на изоляторе (КНИ).

Рисунок транспортных/управляющих электродов был сформирован в тонком (80 нм) слое

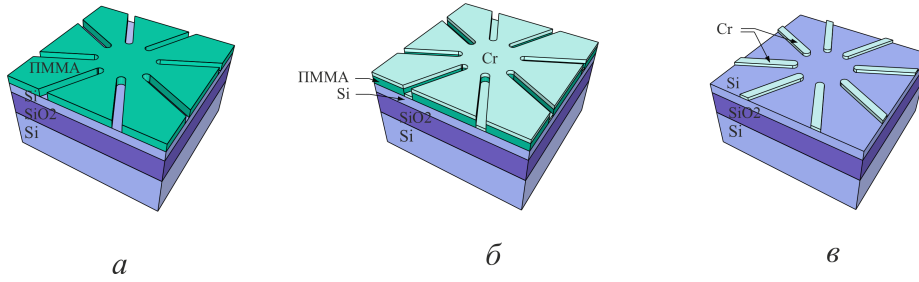


Рис. 1. Этапы изготовления системы транспортных/управляющих электродов: *a* — формирование рисунка в слое резиста ПММА, *б* — напыление металла, *в* — удаление неэкспонированного резиста

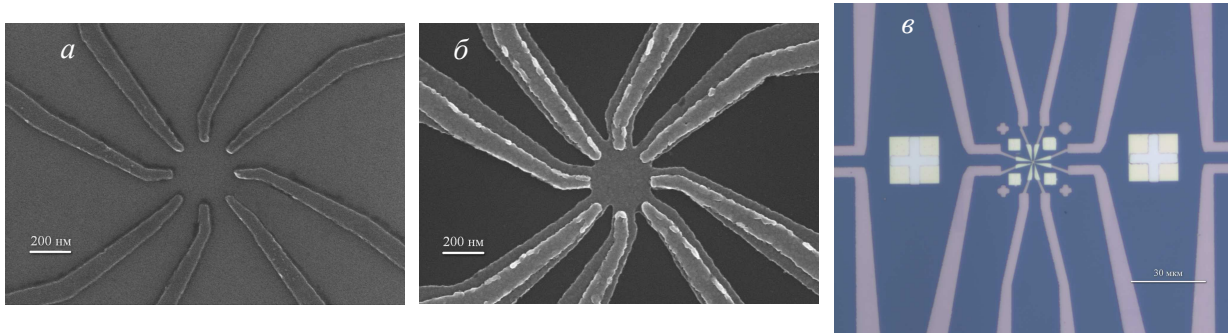


Рис. 2. РЭМ изображения: *a* — центральной области системы Cr транспортных/управляющих электродов, *б* — алюминиевой маски, закрывающей рабочую область (резервуар) образца; *в* — общий вид центра (оптический микроскоп) образца со сформированной алюминиевой маской

резиста ПММА с применением электронно-лучевой литографии (сканирующий электронный микроскоп «Supra-40» Zeiss с литографической приставкой «Elphy Quantum» Raith — 420 мкКл/см^2 , 20 кВ). Сформированный рисунок после проявления (рис. 1, *a*) являлся основой для изготовления маски при формировании электродов. Для изготовления маски методом вакуумного электронно-лучевого термического распыления (2×10^{-7} мбар, «L-560», Leybold) (рис. 1, *б*) проводилось напыление тонкой пленки хрома толщиной 15 нм на сформированную в резисте структуру. Удаление неэкспонированного резиста с напыленным поверх него слоем металла проводилось в разогретом до 180°C растворе метилпирролидона (рис. 1, *в*, рис. 2, *a*).

Структура резервуарной сети формировалась в верхнем слое кремния пластины КНИ, неравномерно легированном по глубине, методом анизотропного реактивно-ионного травления (РИТ) кремния во фторсодержащей плазме (SF_6 , 0.2 Па, 50 Вт, 40 с, «RDE-300», Alcatel) через алюминиевую маску до промежуточного слоя SiO_2 . Рисунок маски формировался на образце с напыленными транспортными/управляющими электродами (рис. 1, *в*, рис. 2, *a*) методом электронно-лучевой литографии с последующим напылением алюминиевой пленки толщиной 12 нм методом электронно-лучевого испарения (рис. 3, *a-г*, рис. 2, *б-в*). После этапа РИТ (рис. 3, *д*) удаление алюминиевой маски проводилось слабым щелочном растворе КОН (рис. 3, *е*).

На следующем этапе образец подвергался последовательным циклам анизотропного реактивно-

ионного травления в атмосфере смеси газов CF_4 и O_2 с соотношением потоков 60:2 (0.18 Па, 25 Вт, «RDE-300», Alcatel) с промежуточными измерениями проводимости между парами электродов (рис. 4, *a*).

По верхней оценке, за время $t = 425 \pm 1$ с был удален слой кремния толщиной $H = 33 \pm 2$ нм. Концентрация примесных атомов на этом уровне определялась по профилю распределения примесей по глубине (рис. 4, *б*) и составляла величину $\sim 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, что соответствует среднему расстоянию между примесями:

$$r_{As|H=33 \text{ нм}} = (1/n_{As})^{\frac{1}{3}} \approx 8 \pm 1 \text{ нм}. \quad (1)$$

Количество активных зарядовых центров в рабочих областях диаметром 200–400 нм в изготовленных структурах при этом составляет величину в нескольких сотен единиц. На рис. 5 приведена микрофотография резервуарной сети после процедуры утоньшения верхнего слоя кремния, приводящей к уменьшению концентрации примесных центров.

2. ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОННОГО ТРАНСПОРТА

Разупорядоченные примесные центры образуют сложную систему параллельных и пересекающихся проводящих одноэлектронных каналов, соединяющихся с туннельными электродами эксперимен-

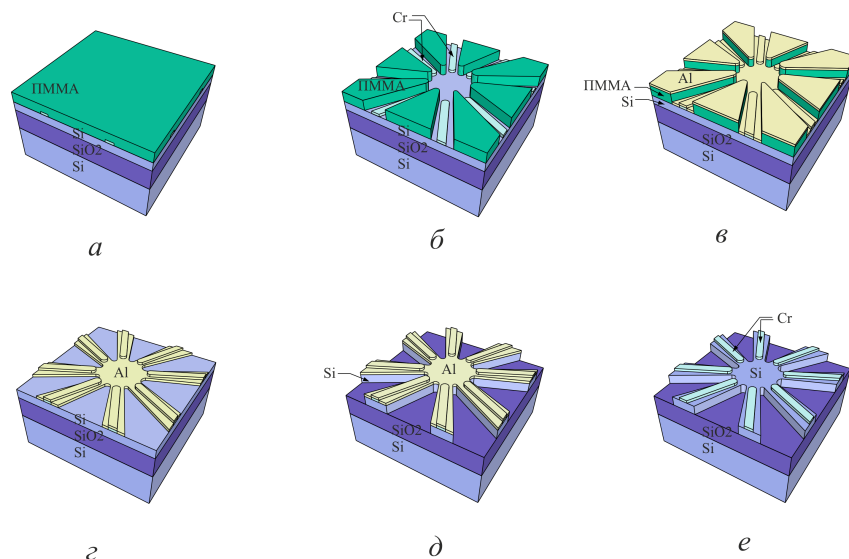


Рис. 3. Этапы формирования резервуара: *a* — формирование слоя резиста, *b* — создание маски, *в* — напыление алюминия, *г* — удаление неэкспонированного резиста, *д* — перенос рисунка алюминиевой маски в верхний слой кремния с помощью РИТ, *e* — удаление алюминиевой маски

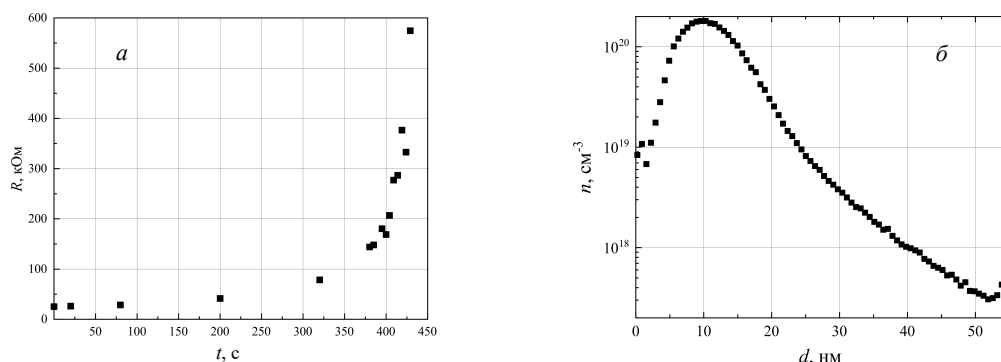


Рис. 4. *a* — Рост сопротивления структуры в процессе анизотропного травления легированного кремния, *б* — профиль распределения концентраций примесных атомов As по глубине поверхностного монокристаллического Si слоя КНИ

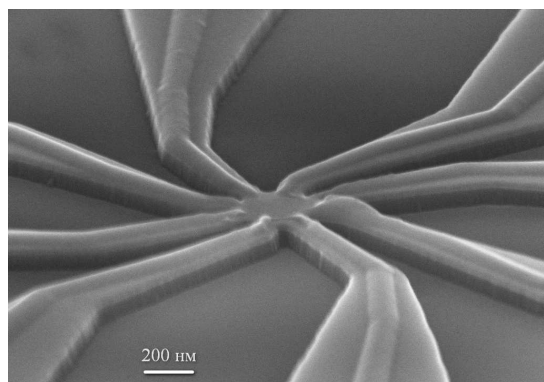


Рис. 5. РЭМ изображение рабочей области готового к измерениям образца

тальной структуры. Экспериментальное исследование электронного транспорта одноэлектронной системы проводилось методом измерения вольтамперных характеристик между различными пара-

ми туннельных электродов. Такие ВАХ являются срезами многопараметрического пространства состояний резервуарной сети. Свидетельством наличия одноэлектронного транспорта в системе были характерные участки кулоновской блокады транспортного тока на вольтамперных кривых, измеренных между разными парами электродов структуры. Транспортный ток, регистрируемый измерительной системой, является результатом последовательного туннелирования электронов через примесные зарядовые центры, расположенные в кремниевом слое центральной области структуры резервуарной сети.

При температуре 2.4 К на всех измеренных ВАХ присутствовал участок кулоновской блокады, характерный для одноэлектронного транспорта. Экспериментально продемонстрировано, что изменение потенциалов окружающих электродов приводит к значительному изменению структуры проводящих каналов, образованных примесными центрами в резервуаре, и как следствие, формы вольт-

амперной характеристики, регистрируемой между парой выбранных измерительных электродов. Например, ВАХ между электродами 5 и 7 образца 1, измеренная при отсоединенных от источников напряжения остальных электродах, заметно изменялась при подключении 3-го электрода к нулевому потенциалу (рис. 6). Еще большего эффекта удалось достичь, когда соединение с нулевым потенциалом электродов 2, 5, 7 образца 1 приводило к существенному изменению проводимости канала между электродами 4 и 8 (рис. 6). Величина кулоновской блокады транспортного канала при подключении нулевых потенциалов увеличилась с 3.5 мВ до 17 мВ, дифференциальное сопротивление в нуле изменялось от 520 кОм до состояния почти полной кулоновской блокады (>100 МОм).

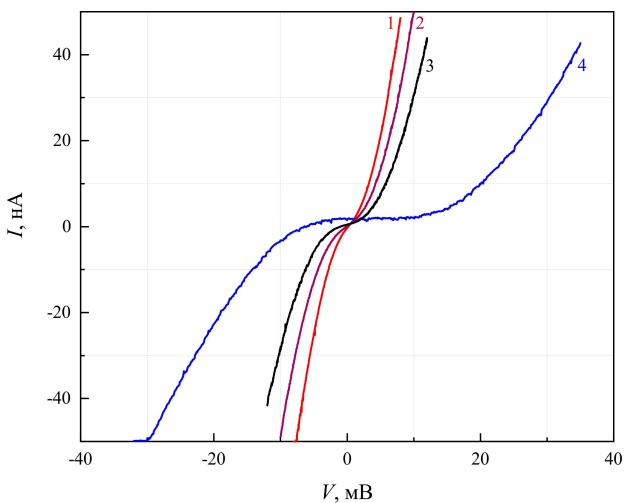


Рис. 6. ВАХ образца 1 при температуре $T = 2.4$ К: между электродами 5–7 образца 1 в случаях, когда остальные электроды открыты 1 и когда 3 электрод присоединен к нулевому потенциалу 2; между электродами 8–4 в случаях, когда остальные электроды открыты 3 и 2, 5, 7 электроды присоединены к нулевому потенциалу 4

Подбор напряжений на управляющих электродах экспериментального образца 2, где величина кулоновской блокады достигала значений порядка 300 мВ (рис. 7, а), позволил продемонстрировать состояния резервуарной сети, когда транспортный ток через электрод 4 не изменяет своего направления при изменении полярности приложенного напряжения. При этом происходит трансформация ВАХ в зависимости от напряжения на электроде 6 (рис. 7, б), позволяющая использовать одноэлектронную резервуарную сеть в качестве настраиваемого наноразмерного токового ключа для применения в экспериментах с наноструктурами, а также в сложных мезоскопических системах. Такая перестройка управляющих напряжений образца 2 позволила реализовать и логическую функцию «НЕ» (инвертор), выполняющую операцию логического отрицания. При фиксировании рабочей точки резервуарной сети установкой напряжения $V_{1-4} = 1$ В импульс напряжения амплитудой 1.5 В подавался

на электрод 6, а инвертированный токовый сигнал регистрировался на электроде 4 (рис. 8). Потенциалы остальных управляющих электродов были зафиксированы: $V_2 = -0.7$ В, $V_3 = 0.2$ В, $V_5 = 0$ В, $V_7 = 0$ В, $V_8 = 1.3$ В.

Более сложные настраиваемые функциональные элементы также могут быть построены на основе одноэлектронной резервуарной сети с массивом единичных примесных атомов в твердотельной матрице. Сложные функциональные элементы на основе настраиваемой одноэлектронной резервуарной сети (логические элементы «И» и «ИЛИ»), требующие перебора большого количества ее состояний, были продемонстрированы при исследовании образцов в рефрижераторе растворения при температуре 20 мК.

Для поиска в пространстве состояний одноэлектронной резервуарной сети нужных функций применялся векторный метод настройки сети. В отличие от систем со скалярным откликом (рис. 9, а), требующих механического переключения для соединения предусилителя с выбранным электродом, оригинальная измерительная система векторного типа (рис. 9, б) позволяла задавать напряжения на всех электродах и одновременно регистрировать протекающие через них транспортные токи. Каждый из восьми измерительно-задающих каналов имел собственный предусилитель с нелинейной передаточной характеристикой, позволяющий без переключения диапазонов регистрировать транспортные токи от единиц нА до десятков мкА. При одновременном подключении всех электродов к измерительным каналам и медленном варьировании напряжения на одном из них регистрировались изменения транспортного тока через все подключенные электроды. Продemonстрированные на рис. 9, в семейства вольтамперных характеристик образца 3 были измерены с использованием измерительной системы с векторным откликом. Векторный метод измерений позволяет получать информацию о малых изменениях, вызванных управляющими напряжениями, устанавливающими условия для логических операций, в системе проводящих каналов.

Применение векторного метода настройки, позволяющего регистрировать отклики на воздействие одновременно по всем 8 каналам и переключать входные терминалы исследуемой структуры программным способом, значительно упрощает настройку резервуарной сети и позволяет найти состояния сети, реализующие логические элементы «И» и «ИЛИ», без использования сложных алгоритмов. Ранее подобная информация была получена сложным методом поиска с помощью генетического алгоритма [24]. Рис. 10, а демонстрирует найденное в пространстве состояний настраиваемой одноэлектронной резервуарной сети образца 5 состояние, соответствующее логическому элементу «ИЛИ». Функциональный элемент продемонстрирован использованием электродов 2 и 5 в качестве входных терминалов, а электрода 1 в качестве выходного. Значения управляющих напряжений на

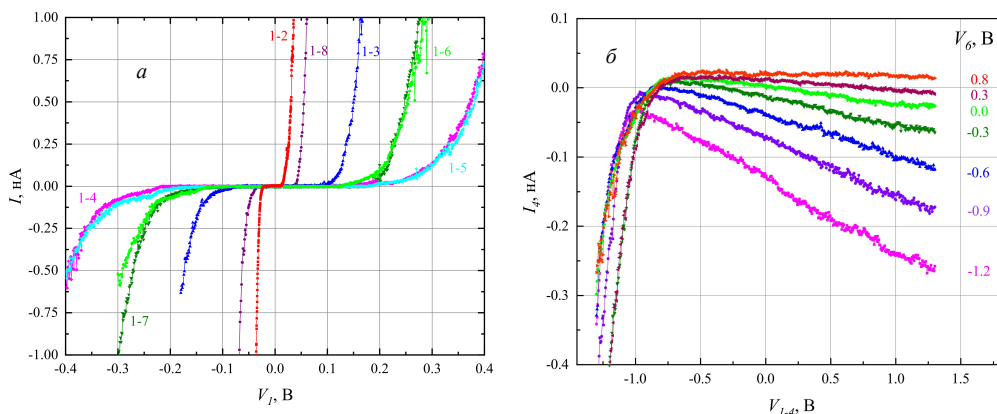


Рис. 7. Семейства ВАХ образца 2 при температуре $T = 2.4$ К: *a* — между некоторыми парами управляющих электродов, *б* — между электродами 1–4 при $V_2 = 0.8$ В, $V_3 = 0.3$ В, $V_5 = 0$ В, $V_7 = 0$ В, $V_8 = -1.5$ В и различных V_6

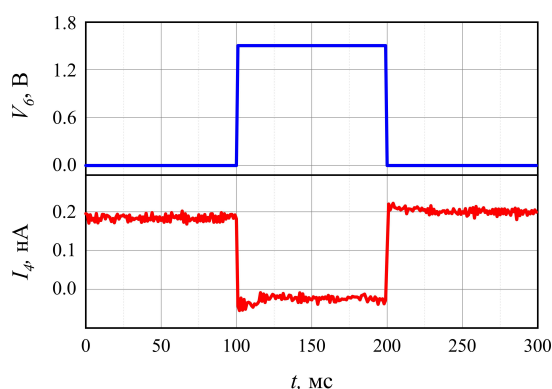


Рис. 8. Функциональный элемент одноэлектронной резервуарной сети образца 2 «инвертор»: синяя кривая — входной прямоугольный импульс, красная кривая — выходной сигнал; $V_{1-4} = 1$ В, $V_2 = -0.7$ В, $V_3 = 0.2$ В, $V_5 = 0$ В, $V_7 = 0$ В, $V_8 = 1.3$ В, температура $T = 2.4$ К

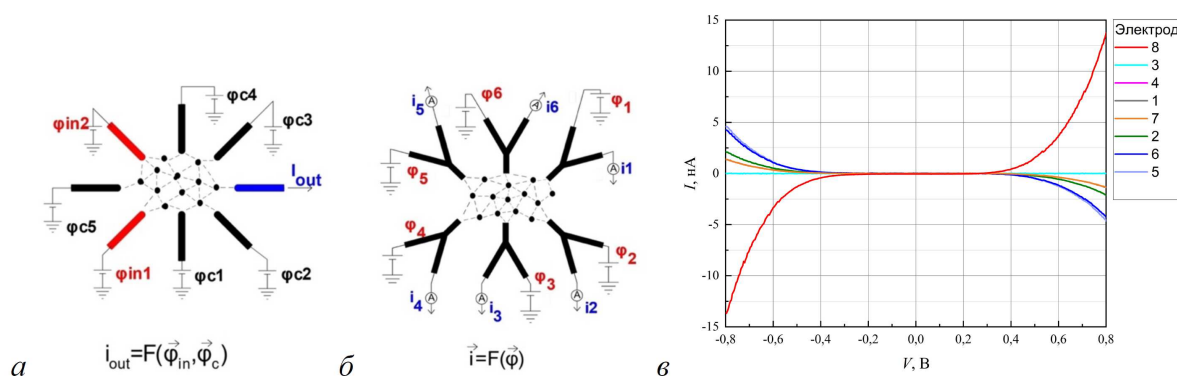


Рис. 9. Схематичное изображение структуры резервуарной сети и типов регистрации: *a* — скалярного, *б* — векторного; *в* — типовые ВАХ системы туннельных электродов образца 3, полученные векторным методом измерений при температуре $T = 2.4$ К

электродах: $V_3 = 0$ В, $V_4 = 54$ мВ, $V_6 = -270$ мВ, $V_7 = 0$ В, $V_8 = 0$ В. В той же структуре многоэлектродной резервуарной одноэлектронной сети образца 5 продемонстрирована работа функционального элемента «И» (рис. 10, б). Логический элемент продемонстрирован при выборе электродов 4 и 7 в качестве выходных терминалов, а электрода 2 в качестве выходного. Значения управляющих напря-

жений на электродах: $V_1 = 15$ мВ, $V_3 = -70$ мВ, $V_5 = 0$ В, $V_6 = 0$ В, $V_8 = 50$ мВ. Таким образом, показано, что одна и та же структура, в зависимости от ее настройки путем подбора значений напряжений на управляющих электродах, может демонстрировать работу разных (выбранные заранее) функциональных элементов.

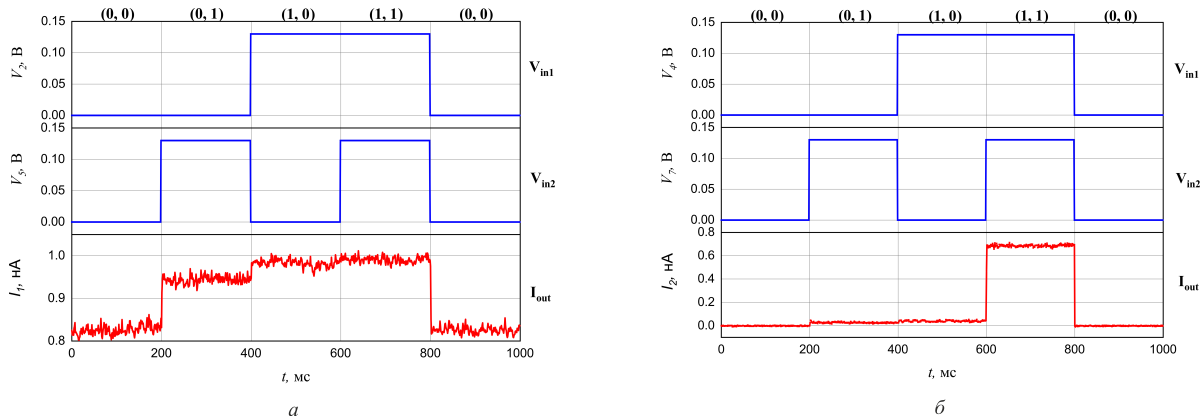


Рис. 10. Функциональный элемент резервуарной сети образца 5 при температуре $T = 20$ мК: *a* — «ИЛИ» (1 — выход, 2, 5 — входы, $V_3 = 0$ В, $V_4 = 54$ мВ, $V_6 = -270$ мВ, $V_7 = 0$ В, $V_8 = 0$ В), *б* — «И» (2 — выход, 4, 7 — входы, $V_1 = 15$ мВ, $V_3 = -70$ мВ, $V_5 = 0$ В, $V_6 = 0$ В, $V_8 = 50$ мВ)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования был разработан оригинальный метод формирования наноструктуры настраиваемой одноэлектронной резервуарной сети, ключевой особенностью которого является использование неравномерного по глубине профиля распределения концентраций примесных атомов в твердотельной матрице. Предложенный подход совместим с кремниевой технологией и демонстрирует возможность формирования реальных функциональных элементов на основе массива разупорядоченных и случайно распределенных примесных атомов в твердотельной матрице.

Исследование транспортных характеристик наноструктур резервуарных сетей показало, что зарядовый транспорт имеет одноэлектронную природу. Значения величин кулоновской блокады между парой транспортных электродов в различных образцах находились в диапазоне от 0.1 мВ до 320 мВ в зависимости от концентраций примесей и взаимного расположения электродов. Величина асимптотического сопротивления варьировалась от 27 кОм до 100 МОм. Величина кулоновской блокады между парой транспортных электродов зависела от напряжений на управляющих электродах.

Использование сильной внутренней нелинейности и огромного пространства состояний в резервуарной сети на основе разупорядоченного массива

примесных зарядовых центров с туннельной связью позволяет с применением векторного метода настройки найти и продемонстрировать функциональные и реконфигурируемые логические элементы «И», «ИЛИ», «НЕ». Подобное формирование функциональности из беспорядка является инновационным подходом, в котором случайность распределения и дискретность примесей, создающие проблемы для традиционной кремниевой электроники, в резервуарных сетях используются в полной мере. Реализация функциональных и логических элементов путем задания потенциалов на управляющих электродах резервуарной сети, которые существенно изменяют конфигурацию ее проводящих каналов, подтверждает высокий потенциал системы и указывает на возможность создания на ее основе оригинальных функциональных и вычислительных структур и систем сверхвысокой плотности и высокой энергоэффективности. Высокая чувствительность к изменениям состояний зарядовых центров делает систему пригодной для применения в качестве высокочувствительных полевых сенсоров при решении сложных задач исследования полевой/зарядовой динамики в структурах микро- и нанобъектов и их классификации.

В работе использовалось оборудование Учебно-методического центра литографии и микроскопии МГУ им. М.В. Ломоносова.

- [1] <https://research.ibm.com/blog/2-nm-chip> [Electronic resource].
- [2] <https://semiconductor.samsung.com/news-events/news/samsung-electronics-holds-commemorative-ceremony-for-the-first-3nm-mass-production-shipment> [Electronic resource].
- [3] <https://www.tomshardware.com/news/tsmc-kicks-off-3nm-production> [Electronic resource].
- [4] *Fulton T.A., Dolan G.J.* // *Phys. Rev. Lett.* **59**, N 1. 109 (1987).
- [5] *Likharev K.K.* // *Proceedings of the IEEE.* **87**, N 4. 606 (1999).
- [6] *Tan K.Y., Chan K.W., Möttönen M.* et al. // *Nano Lett.* **10**, N 1. 11 (2010).
- [7] *Fuechsle M., Miwa J.A., Mahapatra S.* et al. // *Nat. Nanotechnol.* Nature Publishing Group. **7**, N 4. 242 (2012).
- [8] *Shorokhov V.V., Presnov D.E., Amitonov S.V.* et al. // *Nanoscale.* Royal Society of Chemistry. **9**, № 2. 613

- (2017).
- [9] Преснов Д.Е., Дagesян С.А., Божьев И.В. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. № 2. 64 (2019). (Presnov D.E., Dagesyan S.A., Bozhev I. et al. // Moscow Univ. Phys. Bull. 74, N 2. 165 (2019)).
- [10] Dagesyan S. A., Shorokhov V.V., Presnov D.E. et al. // Nanotechnology. 28, N 22. 225304 (2017). DOI 10.1088/1361-6528/aa6dea.
- [11] Koenraad P.M., Flatte M.E. // Nature Materials. Nature Publishing Group. 10, N 2. 91 (2011).
- [12] Sinthiptharakoon K., Schofield S.R., Studer et al. // Journal of Physics Condensed Matter. 26, N 1. 012001 (2014).
- [13] Ochoa M.A., Liu K., Zielinski M., Bryant G. // Phys. Rev. 109. 205412 (2024).
- [14] van Donkelaar J., Yang C., Alves A.D.C. et al. // Journal of Physics: Condensed Matter. 27, N 15. 154204 (2015).
- [15] Pacheco J.L., Singh M., Perry D.L. et al. // Review of Scientific Instruments. 88, N 12. 123301 (2017).
- [16] Markevich A., Hudak B.M., Madsen J. et al. // Journal of Physical Chemistry C. American Chemical Society. 125, N 29. 16041 (2021).
- [17] Ivie J.A., Campbell Q., Koepke J.C. et al. // Phys. Rev. Appl. American Physical Society. 16, N 5. 054037 (2021).
- [18] Maass W., Natschldger T., Markram H. // Neural Comput. 14, N 11. 2531 (2002).
- [19] Jaeger H. // The «echo state» approach to analyzing and training recurrent neural networks-with an erratum note. 2001. <https://www.semanticscholar.org/paper/The%27%27echo-state%27%27approach-to-analysing-and-training-Jaeger/8430c0b9afa478ae660398704b11dca1221ccf22>
- [20] Tour J.M., van Zandt V.L., Husband C.P. et al. // IEEE Trans Nanotechnol. 1, N 2. 100 (2002).
- [21] Bose S.K. Lawrence C.P., Liu Z. et al. // Nat. Nanotechnol. 10, N 12. 1048 (2015).
- [22] Chen T., van Gelder J., van de Ven B. et al. // Nature. Nature Research. 577, N 7790. 341 (2020).
- [23] Дagesян С.А., Рыженкова С.Ю., Сапков И.В. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. № 4. 36 (2020). (Dagesyan S.A., Ryzhenkova S.Yu., Sapkov I.V. et al. // Moscow Univ. Phys. Bull. 75, N 4. 331 (2020)).
- [24] Tertilt H., Bakker J., Becker M. et al. // Mechanism for reconfigurable logic in disordered dopant networks. (2021).

Reservoir network based on single impurity atoms in silicon

A.S. Andreeva^a, A.S. Trifonov, V.V. Shorokhov, D.E. Presnov, O.V. Snigirev, V.A. Krupenin^b

Department of Semiconductor Physics and Cryoelectronics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University Moscow 119991, Russia

E-mail: ^a andreeva.as18@physics.msu.ru, ^b krupenin@physics.msu.ru

This work is aimed at solving the problem of experimental implementation and study of single-electron reservoir networks with As impurity atoms in a quasi-two-dimensional near-surface layer of a solid-state matrix based on silicon-on-insulator (SOI) material. The study of electron transport in the fabricated experimental structures showed the presence of horizontal sections of the Coulomb blockade on the current-voltage characteristics (CVC), typical of single-electron transport. The shape of the recorded CVC between a pair of selected control electrodes of the reservoir network significantly depended on the potentials of the remaining surrounding electrodes, which changed the structure of the conducting channels passing through the impurity centers. Restructuring the control voltages, using the internal nonlinearity of the system of disordered single As impurity atoms, which has a colossal state space, made it possible to demonstrate the possibility of implementing a tunable nanoscale current switch and the logical functions «NOT», «AND», «OR» in a single-electron reservoir network. To find the configuration of the reservoir network necessary for the implementation of functional elements, a vector tuning method was used.

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

Keywords: reservoir network, single-electron transport, tunneling, single-atom structures, impurity atoms, solid-state matrix, nanostructures, electron-beam lithography.

Received 04 October 2024.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2025. 80, No. 2. Pp. .

Сведения об авторах

1. Андреева Анна Сергеевна — аспирант; тел.: (495) 939-59-35, e-mail: andreeva.as18@physics.msu.ru.
2. Трифонов Артем Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-14, e-mail: trifonov.artem@physics.msu.ru.
3. Шорохов Владислав Владимирович — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-30-14, e-mail: shorokhov@phys.msu.ru.
4. Преснов Денис Евгеньевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-14, e-mail: denis.presnov@physics.msu.ru.
5. Снигирев Олег Васильевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-59-34, e-mail: snigirev.oleg@physics.msu.ru.
6. Крупенин Владимир Александрович — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-14, e-mail: krupenin@physics.msu.ru.