

Квантовые электронные компоненты

Часть 2. Квантовые транзисторы

Виктор Алексеев

Несмотря на то что теория одноэлектронных транзисторов (SET) и их первые лабораторные образцы появились в конце 1990-х, только спустя 20 лет технологии производства позволили выпускать небольшие партии SET, предназначенные для использования в приборах и оборудовании прикладного назначения. Технологий для массового производства SET-транзисторов, позволяющих выпускать конкурентоспособную по цене и качеству продукцию, сравнимую с классическими электронными компонентами, в настоящее время не существует. Поэтому основное применение одноэлектронные транзисторы нашли в областях научного, медицинского и метрологического оборудования.

Принцип действия одноэлектронного транзистора

В первой части статьи были рассмотрены так называемые квантовые точки (quantum dot – QD). В самом общем случае под этим термином понимают фрагменты полупроводника с размерами порядка нескольких нанометров, в котором электроны не могут перемещаться по определённым направлениям. Например, в обычном полупроводнике электроны двигаются по всем трём направлениям, а в двухмерном однослойном нанолите (2D – nanosheets), состоящем из одного слоя атомов, электроны могут перемещаться исключительно в горизонтальной плоскости. В качестве другого интересного примера можно привести нанопроволоки, в которых наряду с квазиклассическим движением электронов вдоль проволоки было обнаружено квантова-

ние движения электронов в поперечном направлении [1].

Одной из уникальных особенностей полупроводниковых квантовых точек (QD) является кулоновская блокада (Coulomb blockade – CB). Было обнаружено, что на полупроводниковой квантовой точке размером в несколько нанометров, имеющей туннельный переход с двумя контактами, прохождение электронов между этими контактами может быть заблокировано за счёт кулоновского потенциального барьера. Это объясняется тем, что электрон, находящийся на квантовой точке, создаёт электростатическое поле, препятствующее проникновению на QD другого электрона. Благодаря кулоновской блокаде очередной электрон сможет пройти через туннельный барьер квантовой точки только тогда, когда предыдущий электрон покинет пространство перехода. Основным условием возникновения эффекта CB является заметное превышение кулоновской энергии над значениями тепловой энергии электронов ($e^2/2C \gg kT$). Это неравенство, безусловно, справедливо при криогенных температурах в несколько сотен мК. Для того чтобы кулоновская энергия была больше тепловой энергии при комнатной температуре, используются специальные методы снижения ёмкости квантовой точки, разработанные в последнее время [2].

Эти процессы положены в основу работы одноэлектронного транзистора – ОЭТ (single-electron transistor – SET). Вообще, SET работает аналогично обычному транзистору. Основное отличие заключается в том, что в про-

цессе усиления напряжения SET участвует только один электрон.

Таким образом, SET-транзистор даёт возможность получения заметных изменений напряжения при манипуляции с отдельными электронами.

Пионерские работы с одноэлектронными транзисторами были проведены в начале 1990-х годов в Московском государственном университете. Российские ученые Д.В. Аверин, А.Н. Коротков и К.К. Лихарев опубликовали в 1991 году статью, в которой было продемонстрировано взаимодействие между зарядкой одного электрона и эффектами квантования энергии в процессах с полупроводниковыми гетероструктурами и металлическими туннельными переходами малой площади. Можно сказать, в этой статье был обоснован принцип работы одноэлектронного транзистора [3].

Гипотетическая схема логического элемента «НЕ-И», собранного на основе одноэлектронных кластерных транзисторов, была предложена С. Вышенским, К. Лихаревым, С. Полонским. В 1996 году российские физики С.П. Губин, В.В. Колесов, Е.С. Солдатов, А.С. Трифонов, В.В. Ханин, Г.Б. Хомутов, С.А. Яковенко создали лабораторную модель одноэлектронного нанокластерного транзистора, работающего при комнатной температуре [4].

Упрощённая классическая схема работы одноэлектронного транзистора показана на рис. 1.

Подобно МОП-транзистору, одноэлектронный туннельный SET-транзистор имеет три электрода: исток, сток и затвор, а также два туннельных перехода, которые образуют изолированный проводящий электрод с малой ёмкостью, получивший название «island». В русскоязычной литературе этот электрод, который фактически является квантовой точкой (QD), называют либо «изолированный участок одноэлектронного транзистора», либо «островок одноэлектронного транзистора ООТ». Другими словами, ООТ представляет собой небольшой проводящий островок, содержащий регулируемое количество электронов, занимающих дискретные орбитали.

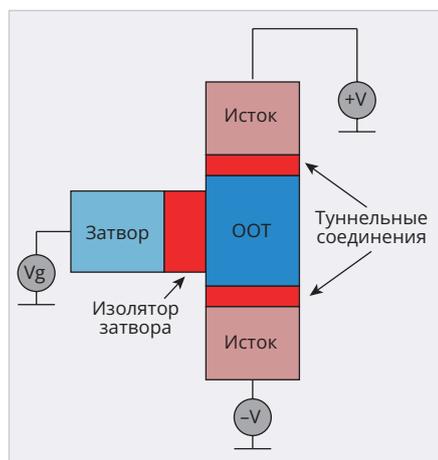


Рис. 1. Упрощённая классическая схема работы одноэлектронного транзистора [5]

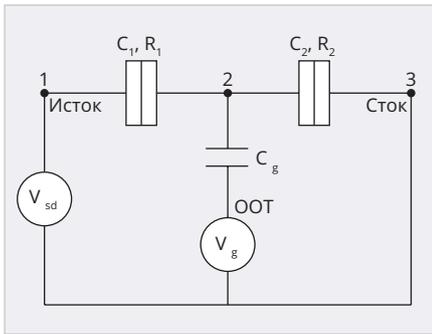


Рис. 2. Эквивалентная схема одноэлектронного транзистора

Эквивалентную схему одноэлектронного транзистора, показанную на рис. 2, можно представить в виде последовательного соединения двух туннельных переходов, к точке соединения которых добавлен ещё один управляющий электрод (затвор), который соединён с ООТ через ёмкость управления.

Эквивалентную схему одноэлектронного транзистора, показанную на рис. 2, можно представить в виде последовательного соединения двух туннельных переходов ($C1R1$, $C2R2$), к точке соединения которых добавлен ещё один управляющий электрод (затвор), соединённый с ООТ через ёмкость управления C_g .

Напряжение затвора V_g используется для управления открытием и закрытием SET, или, другими словами, оно управляет последовательным переносом электронов. На рис. 2 узел 1 представляет электрод истока (source), узел 2 – ООТ (island), а узел 3 – электрод стока (drain). Туннельные переходы, расположенные между этими узлами, характеризуются туннельными ёмкостями ($C1$, $C2$) и туннельными сопротивлениями ($R1$, $R2$).

При определённых условиях через ООТ, который изолирован от других электродов диэлектрическими прослойками, может протекать ток.

Необходимо подчеркнуть, что заряд проходит через ООТ в квантованных единицах. Из-за дискретной природы заряда ток, протекающий через туннельный переход, представляет собой последовательность событий, в которых только один электрон проходит через туннельный переход.

Когда электрон туннелирует через переход, туннельная ёмкость $C1$ заряжается элементарным зарядом, создавая напряжение, которое может быть представлено как $V = e/C$. Это напряжение противодействует проникнове-

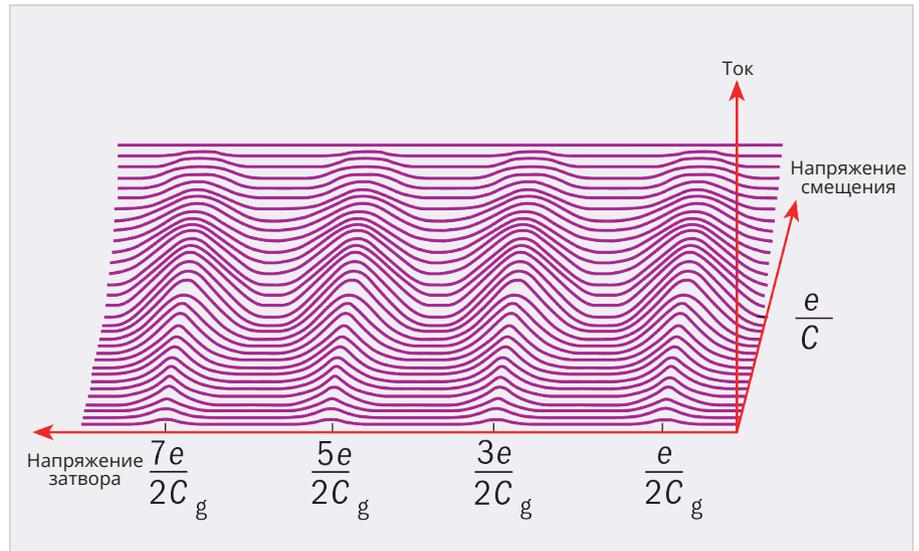


Рис. 3. Ток в SET-транзисторе, модулированный напряжением на затворе

нию другого электрона в туннельный переход (СВ).

В принципе, кулоновскую блокаду можно представить себе в терминах курса школьной физики как избыточное сопротивление туннельного перехода, возникающее при очень низких напряжениях смещения.

Если пренебречь квантовыми эффектами, то в очень грубом приближении туннельный ток первого порядка будет пропорционален приложенному напряжению смещения. Иными словами, туннельный переход, состоящий из двух проводников, разделённых изолирующим слоем, ведёт себя как ползунковый переменный резистор, сопротивление которого определяется толщиной барьера. С другой стороны туннельного перехода изолирующий слой работает как диэлектрическая среда, определяющая свойства туннельного перехода в качестве конденсатора. Кроме того, уровень электрического потенциала квантовой точки зависит также от величины ёмкостной связи C_g .

Электрон сможет преодолеть кулоновскую блокаду, если выполняются следующие условия: напряжение смещения меньше напряжения кулоновского промежутка ($V_{bias} < e/C$); тепловая энергия ниже энергии заряда ($kT < e^2/C$); туннельное сопротивление согласуется с принципом неопределённости Гейзенберга $RT > h/2\pi e^2$.

При повышении напряжения до порогового значения возникает туннелирование слева направо, а при повышении обратного напряжения выше порогового – справа налево.

В SET-транзисторе электроны, преодолевая два туннельных перехода, проходят через квантовую точку, постоянно заряжая и разряжая её. При этом заряд затвора регулирует перемещение электронов между истоком и стоком таким образом, что заряд QD будет кратен заряду электрона.

Из-за высокого значения сопротивления второго туннельного перехода электрон сначала дрейфует через первый туннельный переход и удерживается на ООТ. Затем, спустя некоторый промежуток времени, электрон начинает дрейфовать через второй переход. При этом второй электрон проникает на ООТ сквозь первый переход. Поэтому в процессе дрейфа электронов через оба туннельных перехода ООТ остаётся всегда в заряженном состоянии. Последовательный вход и выход электрона из одного соединения в другое получил название «коррелированное туннелирование электронов».

Экспериментально кулоновская блокада проявляется как пикообразная зависимость проводимости квантовой точки от её потенциала.

Когда электрон туннелирует в квантовую точку, поле в конденсаторе затвора возвращается к его начальному значению. Этот эффект показан на рис. 3 [6]. Ток, протекающий в одноэлектронном транзисторе, увеличивается с увеличением напряжения смещения между истоком и стоком и периодически изменяется в соответствии с напряжением на затворе.

Каждый раз, когда электрон туннелирует в ООТ, поле в конденсаторе затвора возвращается к его начальному значению.

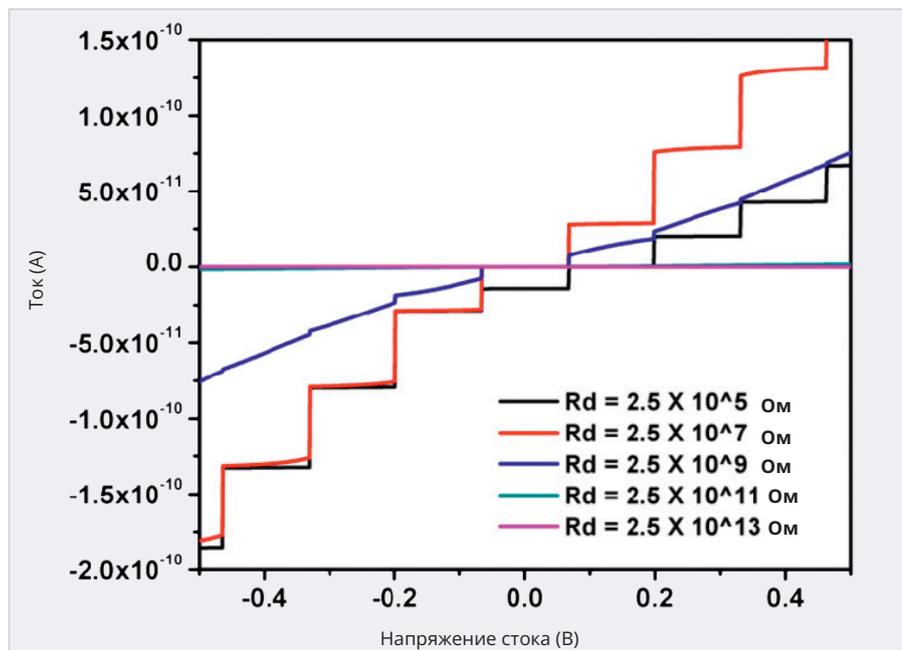


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики SET-транзистора для различных значений стокового сопротивления туннельного перехода [7]

Пики максимумов проводимости наблюдаются для значений, кратных половине заряда электрона. Минимумы проводимости видны при целых значениях, кратных заряду электрона. При напряжениях смещения, превышающих e/C , кулоновская блокировка нарушается, и проводимость не зависит от напряжения на затворе. При дальнейшем увеличении напряжения на затворе конденсатор затвора заряжается на величину заряда электрона, и ООТ возвращается в стабильное состояние.

Кулоновская блокада снова устанавливается, однако ООТ содержит один лишний электрон. Проводимость SET-транзистора изменяется в промежутке между минимумами для зарядов затвора, кратных заряду электрона, и максимумами для значений, кратных половине этой величины.

На рис. 4 показаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) SET-транзистора для различных значений стокового сопротивления туннельного перехода R_d при постоянном значении $R_s = 2,5 \times 10^{13}$ Ом.

В случае кулоновской блокады, когда в условиях низкого смещения сопротивление стока меньше сопротивления истока ($R_s < R_d$), ток будет равен нулю.

Когда приложенное извне напряжение перехода V превысит пороговое значение, и сопротивление стока станет больше сопротивления истока $R_s > R_d$, начнётся туннельный дрейф электронов.

При этом электроны попадают на ООТ через первый переход (source), а затем очень быстро перемещаются во второй переход (drain). Это быстрое перемещение избыточных электронов от одного контакта к другому увеличивает общий заряд ООТ, обеспечивая резкое нарастание тока (вертикаль ступеньки на рис. 4). Дальнейшее увеличение напряжения не приводит к возрастанию тока до тех пор, пока на ООТ не окажутся два электрона (горизонтальная часть ступеньки на рис. 4).

После того как напряжение достигнет значения, при котором можно преодолеть кулоновскую энергию двух электронов, ток снова начинает быстро возрастать.

Это приводит к ступенчатому увеличению характеристики. Поэтому ВАХ SET-транзистора получила название «Coulomb Staircase» (кулоновская лестница).

Таким образом, ток в цепи SET-транзистора будет протекать порциями, что соответствует движению единичных электронов. Управляя потенциалом на затворе, можно пропускать через кулоновские барьеры одиночные электроны. Это свойство открывает широкие перспективы для использования SET-транзисторов в качестве ключевого эквивалента МОП-транзисторов и элементов памяти в чипах следующих поколений.

Нанотрубки всё чаще стали применяться в качестве основы квантовых точек в конструкциях одноэлектрон-

ных транзисторов благодаря тому, что их проще изготавливать одного размера. Одно из очень ценных с точки зрения производства свойство SET-транзисторов на основе нанотрубок (NT) заключается в возможности размещения нескольких квантовых точек ООТ в одном транзисторе.

В работе [8] описан метод изготовления SET-транзистора с двойными квантовыми точками. Структурная схема такого составного транзистора показана на рис. 5а. Исходная заготовка в виде кремниевого нанопрофиля имеет в центре небольшое углубление шириной в несколько нанометров. Процесс окисления проводится так, что на краях канавки образуются два ООТ из тонкого слоя кремния (Si). Остальная часть тонкой кремниевой заготовки превращается в изолятор из диоксида кремния (SiO₂). Таким образом, были получены сформировавшиеся структуры основы транзистора с двумя ООТ, размещёнными на изоляторе (SiO₂). На следующем этапе на них наносились электроды и туннельный барьер.

Эквивалентная схема устройства такого транзистора показана на рис. 5б. На эквивалентной схеме W, L, d означают расчётные длину, ширину заготовки и глубину канавки соответственно.

На рис. 5б показана упрощённая эквивалентная схема с двумя кремниевыми областями, которая состоит из двух одноэлектронных транзисторов (T_s и T_d), связанных между собой параллельно через ёмкости туннельного перехода $C_{s1}, C_{s2}, C_{d1}, C_{d2}$. Верхний электрод представляет собой общий затвор, который управляет одновременно обеими областями.

Поскольку область в левом плече T_s не имеет над собой тонкого затвора, электростатический потенциал области управляется только верхним затвором. Поскольку нижний тонкий затвор здесь не полностью экранирует область проводимости, потенциал области в плече T_d управляется как нижним (G_2), так и верхним (G_1) затворами.

В этой работе была реализована ёмкостная связь между двумя ООТ, что является необходимым условием построения универсальных одноэлектронных устройств различной конфигурации.

Предложенный в данной статье подход к конструкции одноэлектронного транзистора является перспективным, так как позволяет обеспечить высокую степень интеграции и сверхмалое

общее потребление микросхем, разработанных на основе SET-устройств.

В целом, среди основных привлекательных особенностей SET-транзисторов можно отметить: низкое энергопотребление, высокую чувствительность, минимальные размеры, высокую скорость работы, простую схему подключения, возможность совместной работы с CMOS-транзисторами.

Базовые технологии изготовления SET-транзисторов

На раннем этапе развития SET-транзисторов для их изготовления использовались методы электронной литографии, позволившие изготовить образцы с металлическими туннельными переходами субмикронных размеров и продемонстрировать общие принципы работы одноэлектронных транзисторов [9].

Дальнейшее развитие технологий продвигалось по двум основным направлениям: физическому и химическому.

Физические методы по большей части базировались на различных комбинациях тонкоплёночных и литографических технологий.

Химические методы в основном были направлены на синтез квантовых точек. Наибольшего успеха в этой области удалось добиться в области технологий коллоидного синтеза. Более подробно об этом было сказано в первой части статьи.

В настоящее время существует достаточно много различных способов, позволяющих изготовить образцы SET-транзисторов в лабораторных условиях, таких, например, как:

- сканирующая туннельная микроскопия (scanning tunneling microscopy – STM) [10];
- атомно-силовая микроскопия (atomic force microscopy – AFM) [11];
- электронно-лучевая литография (electron beam lithography – EBL) [12];
- сфокусированный ионный пучок (focused ionbeam – FIB) [13];
- метод использования углеродных нанотрубок (carbon nano tube – CNT) [14];
- литография с точечными контактами и полисиликоновыми тонкими плёнками (polysilicon thin film and point-contact lithography – PCL) [15];
- автоэмиссионная сканирующая зондовая литография (field emission scanning probe lithography – FE-SPL) [16];

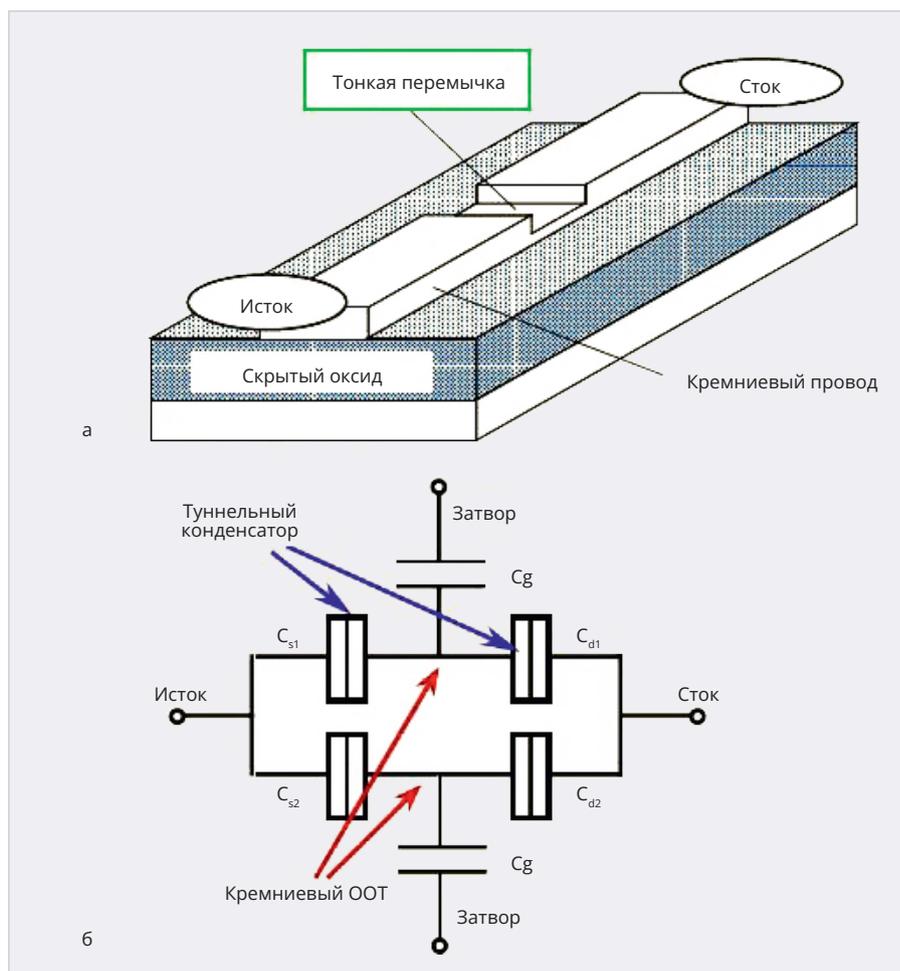


Рис. 5. Схема SET-транзистора с двумя OOT, размещёнными на одной нанотрубке [8]

- шаблонное окисление кремниевых наноструктур (pattern-dependent oxidation of silicon nanostructures – PADOX) [17];
- ультрафиолетовая наноимпринтная литография (nanoimprint lithography – UV NIL) [18];
- а также другие методы.

Перечисленные выше технологии и методы, за исключением FE-SPL, были разработаны в конце 1990-х и в начале 2000-х. Они достаточно подробно описаны в многочисленных научных публикациях.

Например, процесс изготовления SET-транзистора с использованием электронно-лучевой литографии (electron beam lithography) подробно описан в работе [19].

В этом объёмном отчёте также приведена детальная информация о процедуре изготовления туннельных переходов Al-AlOx-Al с помощью метода двойного напыления под разными углами [20].

Технология шаблонного окисления (pattern-dependent oxidation – PADOX) позволяет формировать на подложках типа «кремний-на-изоляторе» (silicon-

on-insulator – SOI) наноструктуры заданной конфигурации. Например, эта технология использовалась для изготовления SET-транзистора с двумя OOT, конструкция которого показана на рис. 5.

В технологии PADOX используется эффект возникновения деформаций в кремнии при окислительно-восстановительных реакциях.

Такие деформации возникают в переходных областях, в которых кремний превращается в диоксид кремния SiO₂. Напряжение сжатия, вызванное окислением, снижает вязкость диоксида на несколько порядков, что обуславливает округлые формы островков кремния после окончания процесса окисления.

В другой работе с помощью PADOX был изготовлен одноэлектронный транзистор с тремя точками OOT. Специально сконструированная одномерная кремниевая нанотрубка с небольшими сжатиями в середине окислялась по заданной программе с поддержкой определённых режимов на каждом этапе процесса. В результате на этой трубке образовались три

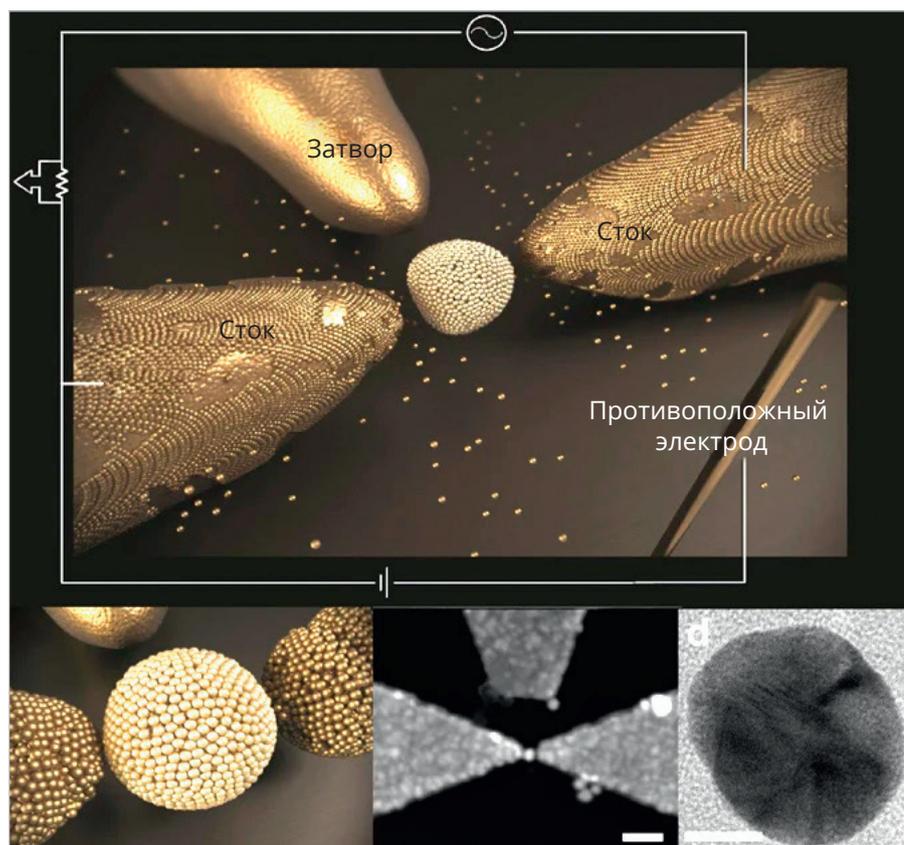


Рис. 6. Структура SET-транзистора с квантовой точкой, изготовленной из коллоидного золота

QD из кремния. Остальная часть нанотрубки окислилась до SiO_2 . Это связано с тем, что накопленное напряжение тормозило процесс окисления в местах сжатия. На формирование двух боковых квантовых точек оказала также влияние сложная краевая структура двумерного кремния. Примечательно, что островки Si образовались самостоятельно без дополнительного привлечения литографического метода [21].

В последнее время нанопроволоки и однослойные углеродные нанотрубки (SWNT) завоёвывают всё большую популярность в производстве SET-транзисторов. Изготовление SET-транзисторов с использованием SWNT зависит от метода нанесения туннельных барьеров. Одним из уникальных свойств SWNT является образование туннельного барьера нанометрового размера в местах перегиба углеродной квантовой трубки.

Подобная конструкция рассмотрена в статье [22]. Выгнутая в виде скобы углеродная нанотрубка (single walled carbon nanotubes – SWNT) размещалась на нижнем затворе из $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$. С двух концов эта нанотрубка подсоединялась к электродам истока и стока Pd, размещённым на подложке Si/SiO_2 .

Более крупные элементы транзистора, такие как контактные площадки, изготовлены с помощью фотолитографии и последующего термического напыления Cr толщиной 5 нм и Au толщиной 40 нм. Для массивов заготовок применялся метод электронно-лучевой литографии (EBL).

Готовые нанотрубки «CVD SWNT» производства «Cheaptubes» [23] размельчались с помощью ультразвука в растворе 1,2-дихлорэтана (DCE). Средняя длина нанотрубок после диспергирования составляет 2...5 мкм. С помощью центрифуги отбирались частички SWNT, которые проходили через затвор $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$. Контакты из Pd шириной 25 нм, соединяющие исток (S) и сток (D) с SWNT, были изготовлены с помощью EBL.

Метод изготовления одноэлектронных транзисторов из углеродных нанотрубок с использованием сфокусированного ионного пучка описан в работе [24]. В этой работе была применена установка FIB (Seiko Instruments Inc. SMI9200), позволяющая получить ускоряющее напряжение 30 кВ и минимальный диаметр 7 нм для пучка ионов Ga^+ .

В процессе изготовления на пластине с помощью фотолитографии были

сформированы контактные площадки Ti/Au (100/200 нм). Затем нанотрубки, синтезированные дуговым разрядом, были диспергированы на пластине. Положения нанотрубок были измерены с помощью сканирующей электронной микроскопии (scanning electron microscopy – SEM).

На следующем шаге изготовления с каждого конца нанотрубки с использованием FIB напылялись отрезки нанопроволоки. На последнем этапе в сформированные две канавки осаждались W-проводники.

Для изготовления одноэлектронных транзисторов (SET), работающих при комнатной температуре (RT), необходимы технологии, которые обеспечивают формирование наноструктур с высоким разрешением и точностью. Такие лабораторные методы существуют, но не могут быть использованы в серийном производстве, основное требование для которого определяется высокой производительностью и стоимостью конечного конкурентоспособного продукта.

Одним из таких методов является автоэмиссионная сканирующая зондовая литография (field emission scanning probe lithography – FE-SPL) с использованием криогенного реактивного ионного травления (cryogenic reactive ion etching – CRIE) [25].

Эта технология, позволяющая проводить пошаговый контроль качества элементов на отдельных этапах изготовления, даёт возможность изготавливать шаблоны размерами меньше 10 нм с очень высокой точностью.

В работе [26] автоэмиссионная сканирующая зондовая литография совместно с методом плазменного травления при криогенной температуре была использована для изготовления одноэлектронных транзисторов. Проведённые испытания показали, что полученные таким способом SET-транзисторы могут устойчиво работать при комнатной температуре, сохраняя базовые характеристики в течение длительного времени.

В работе [27] описаны технология производства и результаты тестирования контролируемых SET-транзисторов, изготовленных на базе металлических наночастиц. Процесс производства лабораторной партии представлял собой комбинированную методику, включающую нанолитографию (nanolithography), атомно-силовую микроскопию (atomic force microscope – AFM), наноманипуля-

ции (nanomanipulation) и электроосаждение (electrodeposition). На рис. 6 показана структура SET-транзистора с квантовой точкой, изготовленной из коллоидного золота.

Для изготовления электродов истока, стока и затвора из золота (Au) на подложке Si/SiO использовались методы фотолитографии и электронно-лучевой литографии (RAITH, ELPHU Quantum). Электроды разделены небольшим зазором около 10 нм, а электрод бокового затвора удалён на расстояние примерно 200 нм.

Использованные наночастицы представляли собой коллоиды золота диаметром 30 нм. Адсорбция отрицательной оболочки частиц на подложку реализовывалась за счёт электростатического взаимодействия с аминогруппами органического слоя. В качестве адгезивного слоя был выбран поли-L-лизин (P.L.L.). Затем 10 мкл раствора размещали на модифицированной подложке, на которой возникали 20–30 коллоидов золота на площади около 1 мкм².

Для размещения наночастицы в нужном месте использовалась установка AFM-наноманипуляции (NanoMan system in DI Veeco 3100 Scanning Probe Microscope).

Для того чтобы связать полученную квантовую точку с выводами, использовался процесс электроосаждения, который контролировался с помощью измерения тока через зарождающиеся перемычки. На заключительном этапе этого процесса нейтральные атомы золота, образовавшиеся на поверхности двух золотых электродов, закрывали зазор между выводами и точкой.

Полученная таким образом наночастица содержит набор кристаллографических граней, как видно из изображения, полученного с помощью просвечивающего электронного микроскопа (рис. 6д). Кроме того, эти устройства характеризуются многоканальной связью, которая образуется с помощью набора атомов, распределённых параллельно наночастицам золота. Одноэлектронные транзисторы, изготовленные и протестированные в этой работе, продемонстрировали уникальный режим, в котором обнаружены статистически значимые многопериодические колебания проводимости в зависимости от напряжения на затворе. При этом дополнительные гармоники являются следствием кулоновской блокады.

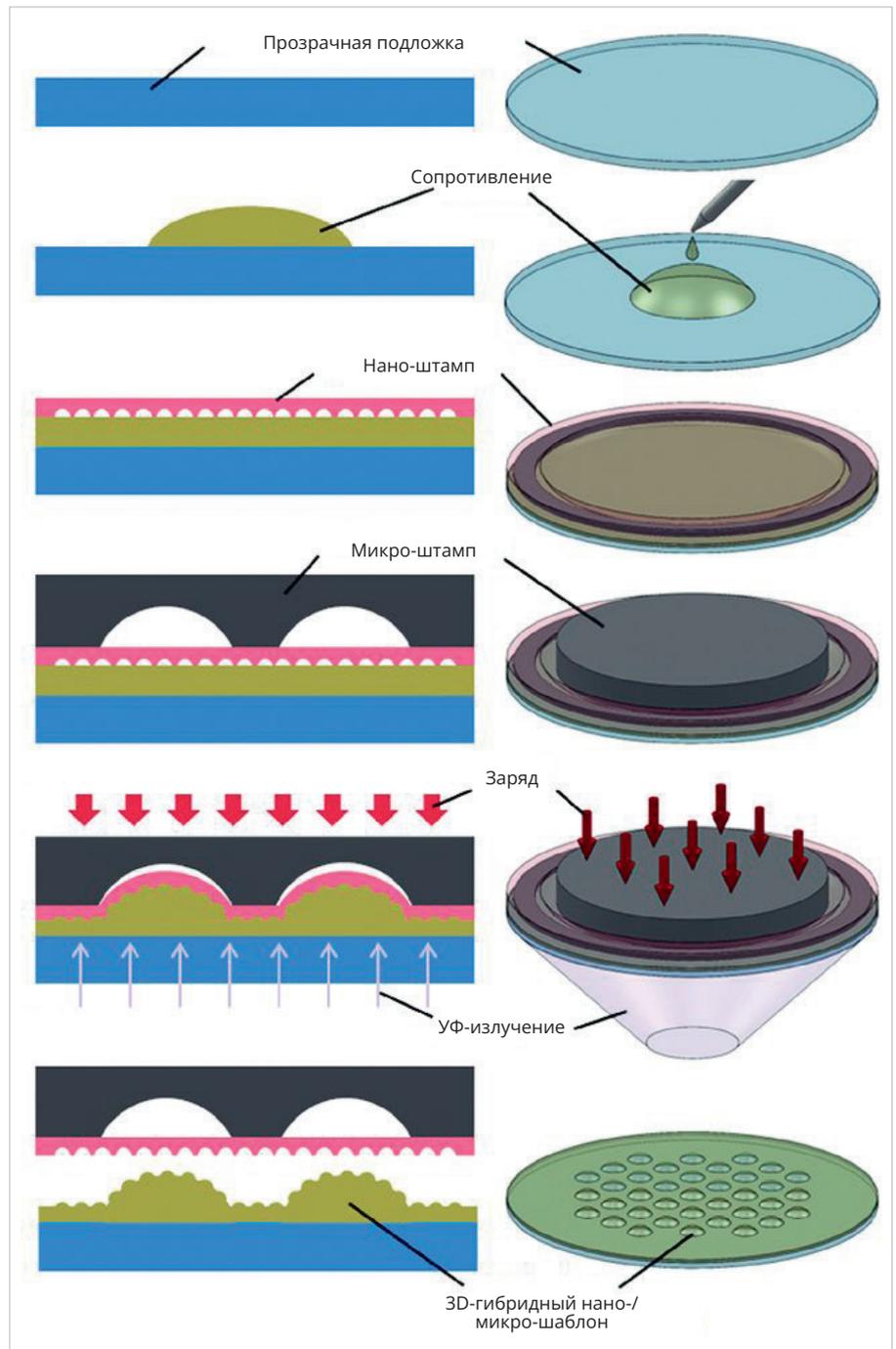


Рис. 7. Структурная схема UV-NIL процесса [29]

Недостатки технологий FE-SPL и CRIE, связанные с небольшой производительностью, можно компенсировать, объединив технологию FE-SPL с литографией наноимпринта NIL, которая позволяет воспроизводить элементы с высоким разрешением и обеспечивает высокую пропускную способность [28].

Из различных вариаций NIL-технологий можно выделить модифицированный метод пошаговой низкотемпературной, ультрафиолетовой наноимпринтной литографии (step and flash imprint lithography – UV-NIL).

Так же, как и в других литографических технологиях, в варианте UV-NIL

используется штамп, с помощью которого необходимый рельеф переносится на полупроводниковую заготовку. Однако, в отличие от других способов, в этой технологии не требуются сложные и дорогостоящие оптические или электронно-лучевые системы.

Структурная схема изготовления электронных наноэлементов с помощью низкотемпературной ультрафиолетовой наноимпринтной литографии показана на рис. 7.

Штамп из прозрачного для ультрафиолетового излучения материала изготавливается предварительно с помощью других сложных прецизи-

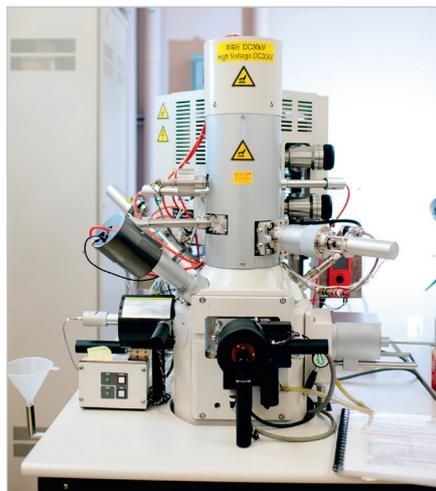


Рис. 8. Для нанесения вольфрамовых квантовых точек на поверхность образца использовалась серийная установка «Hitachi FB-2000A FIB» [32]

онных технологий. Процесс изготовления проводится без нагрева. Холодный штамп погружается в жидкий полимер, который затем затвердевает под действием ультрафиолетового облучения.

Главными преимуществами UV-NIL являются низкая стоимость, простота, высокая производительность и возможность производить изделия с размерами меньше 10 нм.

Вообще, технология NIL в различных опциях используется для разработок квантовых устройств уже более десяти лет. Например, в статье [30] описан модифицированный литографический метод «Step and Flash Imprint Lithography Reverse tone – SFIL-R™», в котором использовался сфокусированный ионный пучок (focused ion beam – FIB). Эта комплексная технология позволила получить одноэлектронные транзисторы, надёжно работающие при комнатных температурах (room temperature single electron transistors – RTSET).

Процесс SFIL, использующий технологию наноимпринта с низким давлением и низкой температурой на основе ультрафиолета (UV-NIL), был реализован с помощью стандартного оборудования производства Molecular Imprints Inc [31]. Образец шаблона был разработан с помощью программного пакета «Cadence IMPRIO 100». Изображение с шаблона передавалось на пластину при облучении электронным лучом электрочувствительного слоя на поверхности кристалла методом электронно-лучевой литографии (EBL). Технология SFIL-R фирмы Molecular Imprints® позволила получить именно положи-

тельное изображение на кварцевом кристалле. Нанесение образа шаблона на кварцевую пластину выполнялось с помощью системы JOEL 6000 EBL.

Для создания самоорганизующегося монослоя с низкой поверхностной энергией шаблон погружался в раствор фторированного силана, что обеспечивало селективный выход на границах травления.

Для подложки был выращен оксид кремния толщиной 300 нм.

На пластины методом центрифугирования наносили антиотражающее покрытие (brewer anti reflective coating – BARC) толщиной 80 нм. В процессе изготовления толщина BARC определялась с помощью измерителя толщины тонких плёнок «Woollam M-2000 DI».

В качестве резистивного слоя штампа (imprint resist) использовался «MI-1 IMPRIO 100» на основе акрилата с изоборнилакрилатом и диакрилатом этиленгликоля. Для того чтобы закрыть отпечатанные элементы, пластины покрывались слоем кремнийсодержащего полимера Silspin™.

Перенос рисунка на плёнку диоксида кремния был реализован с помощью процесса реактивного ионного травления (reactive ion etching – RIE). На первом этапе RIE смесь трифторметана (CHF₃) и кислорода использовалась для протравливания слоя Silspin. На следующем этапе образовывался диоксид кремния, и слой Silspin превращался в твёрдую маску.

На последнем этапе при удалении слоя защитного покрытия и антиотражающей пленки BARC проявлялась подложка. На этом перенос рисунка элементов SET на слой подложки завершился.

Затем с помощью электронно-лучевого испарителя (CHA e-beam evaporator) металлические части хрома и золота с размерами Cr – 10 нм и Au – 10 нм соответственно осаждались на рисунке пластины.

Для нанесения вольфрамовых квантовых точек на поверхность образца использовалась серийная установка «Hitachi FB-2000A FIB» (рис. 8). Газофазный исходный реагент гексакарбонил вольфрама, W(CO)₆, распылялся на поверхность образца. При этом падающий ионный пучок разлагает газ с образованием плёнки. Этот процесс ионно-индуцированного химического осаждения из паровой фазы (CVD) контролировался с помощью выбора параметров сканирования луча, что

позволило получить квантовые точки необходимого диаметра.

Толщина оксида определялась режимом химического окисления в растворе ледяной уксусной кислоты и перекиси водорода. Размер вольфрамовых квантовых точек регулировался временем процесса FIB. Описанная технология позволила получать квантовые точки диаметром 8,5 нм и высотой 3 нм.

Изготовленные таким образом RT-SET транзисторы тестировались с помощью полупроводникового параметрического анализатора (SPA) Keithley 4200-SCS.

Интеграция технологии SFIL-R с методом осаждения квантовых точек сфокусированным ионным пучком (focused ion beam – FIB) позволила получить монолитные массивы RT-SET-транзисторов. Особо следует отметить то, что использованная в данной работе установка для производства одноэлектронных транзисторов целиком собрана из стандартных законченных блоков, производимых известными мировыми производителями физико-химического оборудования [33].

Таким образом, эта технология может быть рассмотрена как один из возможных вариантов для мелкосерийного производства одноэлектронных устройств [34].

Более подробную информацию о технологиях производства наноструктур, разработанных в начале 2000-х, можно найти в обзоре [35], а также в детальной монографии [36].

Технологические вопросы массового производства SET-транзисторов

Кроме явных преимуществ SET-транзисторы имеют и ряд технологических проблем.

Для того чтобы одноэлектронный транзистор правильно функционировал, необходимо, чтобы тепловая энергия электронов была ниже кулоновской энергии устройства, которая обратно пропорциональна суммарной ёмкости квантовой точки. В конце 1990-х годов первые лабораторные образцы SET имели размеры порядка десятков нанометров и обладали малыми кулоновскими энергиями. Для того чтобы преодолеть тепловой порог, одноэлектронные транзисторы приходилось поддерживать при криогенных температурах в несколько сотен мК.

Для работы SET-транзистора при комнатной температуре ёмкость ООТ должна быть меньше 10–17 Ф. Следовательно, его размер должен быть меньше 10 нм.

В одной из первых удачных попыток реализации SET, работавшего при комнатной температуре, использовался одноэлектронный транзистор с кремниевой квантовой точкой внутри узкого проволочного канала. Диаметр кремниевой точки был примерно 12 нм. Расстояние между энергетическими уровнями составляло около 110 мэВ. Однако кулоновская энергия в районе сотни мэВ слишком мала, чтобы обеспечить стабильную работу одноэлектронного транзистора.

В начале 2000-х годов японским физикам из Токийского технологического института удалось изготовить квантовую точку, туннельные переходы которой были сопоставимы с размерами, близкими к атомарным. Согласно выводам этой работы, SET-транзистор обладал кулоновской энергией порядка 250 мэВ, что позволило преодолеть кулоновскую блокаду и реализовать устойчивый перенос отдельных электронов при комнатной температуре 100 К [37].

Основным недостатком изготовленных таким методом туннельных барьеров является их очень высокое сопротивление. Поэтому ток в SET-транзисторах подобного типа примерно в 100 раз меньше, чем в SET-транзисторах, работающих при криогенных температурах.

Современные технологии дают возможность производить одноэлектронные транзисторы, работающие при комнатных температурах (RT-SET) с квантовыми точками диаметром 5–7 нм и туннельными переходами меньше нанометра, что позволяет уменьшить суммарную ёмкость транзистора. Однако при этом возникает другая проблема, связанная с ёмкостями истока, стока и затвора, которые могут быть порядка аттофарад (десять в минус восемнадцатой фарад). Такие параметры ёмкостей приводят к субпикосекундным значениям собственной постоянной времени, даже если сопротивление туннельного перехода снизу ограничено квантом сопротивления, равным h/e^2 . От собственной ёмкости RT-SET-транзистора зависит его коэффициент усиления. Рассчитать эти величины с учётом возникающих квантовых эффектов достаточно слож-

но в рамках современной электродинамики и квантовой физики [38].

Ещё одна проблема RT-SET-транзисторов касается их собственных шумов. Так, например, для случая классической электроники шум характеризуется симметричной по частоте спектральной плотностью. С точки зрения квантовой механики нужно рассматривать две составляющие шума. Одна компонента шума передаёт энергию от измеряемой системы к электрометру, а другая – от электрометра к измеряемой системе. Существуют различные методы оценок квантового шума, у которых есть свои сторонники и свои противники. Тем не менее единого общепринятого мнения на этот счёт в настоящее время нет [39].

Ещё одна проблема из этой же серии касается фонового заряда RT-SET-транзисторов. Эти вопросы возникают из-за высокой чувствительности одноэлектронных транзисторов к заряду. Одной заряженной вакансии или внедрённого иона на квантовой точке может быть достаточно, чтобы переключить транзистор из проводящего режима в состояние кулоновской блокады. Одним из вариантов борьбы с этими нежелательными зарядами является использование гибридных схем с компенсирующими транзисторами.

Если RT-SET объединить с обычными FET-транзисторами, то, в принципе, можно получить гибридную схему, которая, с одной стороны, будет крайне чувствительна к заряду, а с другой – FET-транзистор обеспечит большой коэффициент усиления и низкий выходной импеданс. Один из вариантов такой схемы показан на рис. 9.

Результаты экспериментов по созданию таких гибридных устройств на базе SE-T и CMOS-транзисторов на одной подложке описаны в статье [40].

Для подключения к SET-транзистору были специально разработаны два типа усилителей напряжения КМОП/ПМОП с внешними резисторами истока и стока и инвертор КМОП, который обеспечивал усиление без внешних компонентов. Усилители подключались к SET-транзистору, расположенному на той же подложке, и тестировались при температуре около 1 К. В экспериментах с обоими типами усилителей наблюдались отчётливо выраженные ступеньки ВАХ, которые подтверждали наличие периодической кулоновской блокады при совмест-

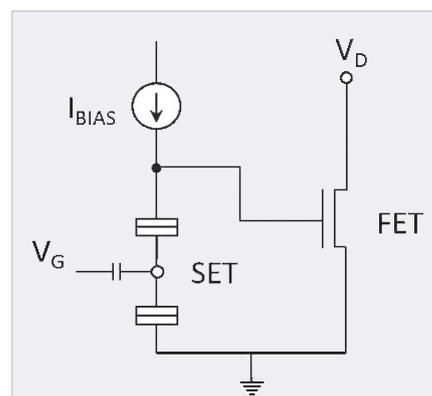


Рис. 9. Вариант гибридной схемы на базе SET- и CMOS-транзисторов на одной подложке

ном использовании CMOS- и SET-транзисторов. Это может позволить в будущем объединять транзисторы технологии CMOS с квантовыми точками в переключающих автоматах. Также CMOS-транзисторы могут быть задействованы в комплекте с другими новыми устройствами и логическими типами, использующими SET в качестве детектора одноэлектронных событий.

Основная задача любого массового производства электронных компонентов заключается в гарантиях идентичности всех параметров выпускаемой продукции, которые фиксируются в технической документации. Однако даже размеры квантовых точек в настоящее время не могут быть воспроизведены с большой точностью при массовом производстве.

Современные методы коллоидного синтеза позволяют получать полупроводниковые QD точки с размерами 5–6 нм. Однако далеко не все синтезируемые в одной партии QD имеют одинаковые свойства [41].

Существуют лабораторные методы сортировки, которые, в принципе, дают возможность отбирать одинаковые во всех отношениях единичные квантовые точки [42], но цена конечного продукта при таком выходном контроле будет крайне высокой.

Кроме того, на квантовых точках с размерами меньше 10 нм нужно разместить с большой точностью одинаковые туннельные переходы атомарных размеров и нанозлектроды вводов/выводов. Это добавляет ещё один вид погрешностей работы транзисторов.

В качестве одного из возможных путей решения проблемы абсолютной идентичности рассматриваются варианты «атомарного транзистора на одной молекуле». В этом устрой-

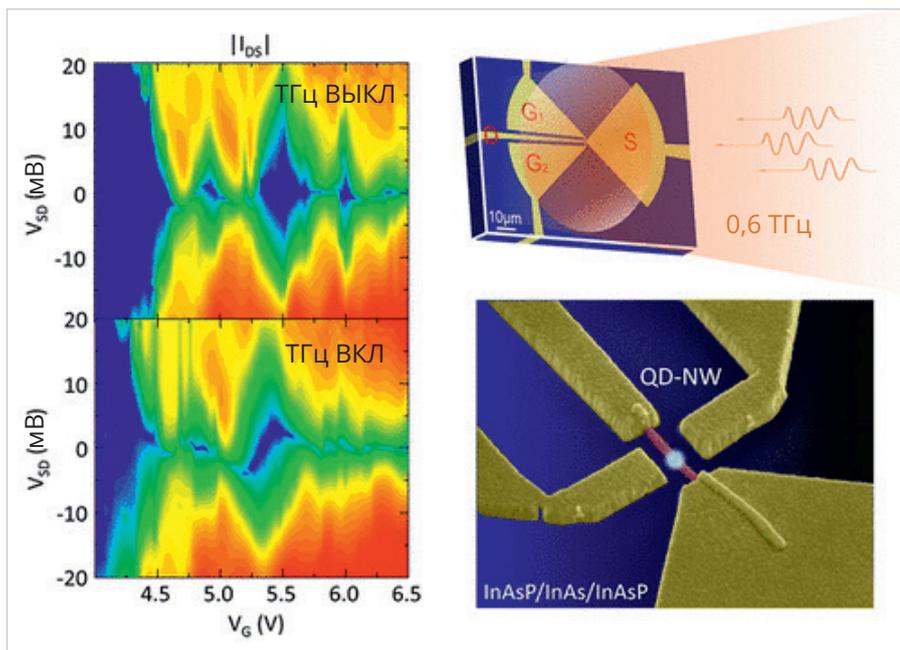


Рис. 10. Туннельные переходы SET-транзистора со встроенной нанопроволокой с QD на основе InAs/InAsP срабатывают при поглощении терагерцевого излучения [45]

стве роль «тела» транзистора играет молекула окислительно-восстановительного кластера, а в качестве носителей заряда выступают атомы.

Нужно также подчеркнуть, что технически сложно изготавливать в массовом количестве абсолютно одинаковые туннельные переходы атомарного размера, размещённые на квантовых точках с диаметром несколько нанометров. Рассмотренные выше методы изготовления SET пригодны для мелких партий RT-SET-транзисторов, предназначенных для уникального научного и медицинского оборудования. Но технологий и методов, пригодных для реального массового производства, сейчас нет.

Что касается проблемы интерфейсов SET-транзисторов, с помощью которых вводятся управляющие сигналы и выводятся текущие параметры, то в этой части исследования ведутся по нескольким направлениям.

Например, определённые успехи достигнуты в разработках бесконтактных систем вывода информации SET-транзисторов, аналогичных тем, которые используются в универсальных квантовых компьютерах. Например, используются детекторы электростатических и магнитных полей [43].

Оригинальное решение проблемы интерфейсов SET-транзисторов может быть найдено при использовании уникальных люминесцентных свойств квантовых точек. Так, в рабо-

те [44] в конструкции SET-транзистора нанопроволока с квантовыми точками на основе InAs/InAsP использовалась как в качестве ООТ, так и в качестве чувствительного элемента излучения субмиллиметрового диапазона (0,6 ТГц). Туннельные переходы SET-транзистора, размещённые на этой проволоке, срабатывали за счёт фототермоэлектрического эффекта (photothermoelectric – PTE), который проявлялся при поглощении терагерцевого излучения (рис. 10). Эти эксперименты показали, что если адаптировать энергию локализованных электронов в нужном частотном диапазоне, то квантовыми транзисторами можно будет управлять с помощью внешнего слабого излучения.

Примеры практического использования SET-транзисторов

В настоящее время теория и технологии изготовления SET-транзисторов развиты настолько, что позволяют выпускать небольшие партии, предназначенные для использования в приборах и оборудовании для научного, медицинского и метрологического применения.

Технологий, предназначенных для массового производства SET-транзисторов, позволяющих выпускать конкурентоспособную по цене и качеству продукцию, сравнимую с классическими электронными компонентами, пока ещё не существует.

Поэтому основное применение одноэлектронные транзисторы нашли в перечисленных выше областях.

Быстрое изменение проводимости делает одноэлектронный транзистор идеальным устройством для высокоточной электрометрии. В этом типе изделий SET имеет два электрода затвора, а напряжение смещения поддерживается близким к напряжению кулоновской блокады, чтобы повысить чувствительность тока к изменениям напряжения затвора [46].

Программируемые изменения напряжения на затворе SET-транзистора, вызывающие повторяющиеся эффекты кулоновской блокады, дают возможность модулировать ток, протекающий через область исток–сток. Такой подход стал отправной точкой для создания нового класса логических схем, использующих принцип управления с помощью единичных электронов. Например, одноэлектронные логические элементы на базе бинарных диаграмм (binary decision diagram – BDD), состоящие из нескольких джозефсоновских переходов, могут быть использованы в качестве одноэлектронных переключателей одного направления [47].

Попеременное прохождение через SET-транзистор тока, кратного количеству электронов, может быть использовано в качестве идеального эталона постоянного тока. Фазовая синхронизация может обеспечивать передачу определённого числа электронов за период внешнего радиочастотного сигнала [48].

Широкое применение одноэлектронные транзисторы нашли в различных приложениях квантовых компьютеров.

Несмотря на то что кремниевые спиновые кубиты считаются крайне перспективными в качестве масштабируемой платформы кубитов для отказоустойчивых квантовых вычислений, до конца не решённой остаётся проблема быстрого считывания с высокой точностью зарядовых и спиновых состояний. Устройства считывания должны точно срабатывать за периоды, которые меньше времени жизни когерентной квантовой системы.

Радиочастотные методы позволяют быстро считывать состояния спиновых кубитов GaAs. Однако большие ёмкости между накопительными вентилями и низкая двухмерная подвижность электронного газа вносят значительные ошибки в результаты измерений,

требующие соответствующей коррекции. Один из вариантов борьбы с этими нежелательными процессами описан в статье [49].

Устройство считывания на базе квантовой точки Si/SiGe с перекрывающимися затворами, являющееся, по существу, модернизацией SET, позволяет измерять синглетное и триплетное состояния двойной квантовой точки. При этом используются как обычная спиновая блокада Паули, так и механизм фиксации заряда. Точность считывания составляет для этих вариантов соответственно 82:9% и 99:0% за времена интегрирования 2,08 с и 1,6 с. Для однократного считывания односпиновых состояний с помощью спин-селективного туннелирования точность составляет около 99,9% за время интегрирования 300 нс.

Способ считывания состояния кубитов с использованием одноэлектронных SET-транзисторов на основе доноров в кремнии, которые были разработаны специально для измерения одиночных спинов со скоростями намного быстрее, чем время декогеренции спинов в изотопно-очищенном кремнии (270 мкс), приведён в публикации [50]. Разработанный SET-транзистор, имеющий большую ёмкостную связь между SET и целевым зарядом, обеспечивает однократное считывание полупроводниковых спиновых кубитов с точностью 97% за 1,5 мкс.

Несколько иной подход предлагает использовать резонаторы с высоким импедансом, тесно связанные с чувствительной точкой, в сочетании с параметрическим датчиком Джозефсона. С этой целью используется комбинированный SET, обеспечивающий быстрое высокоточное однократное считывание состояния спинов. Механизм преобразования состояния спина в заряд в этих схемах считывания использует блокаду спин-зависимого туннелирования.

Несмотря на то что описанное устройство требует меньшего количества электродов, чем обычные детекторы, точность считывания 99,2% достигается менее чем за 6 мкс [51].

Итальянские физики из института метрологии INRIM в Турине разработали оригинальное гибридное устройство нового типа, предназначенное для манипулирования одиночными зарядами, а также генерации импульсов квантованного тока [52].

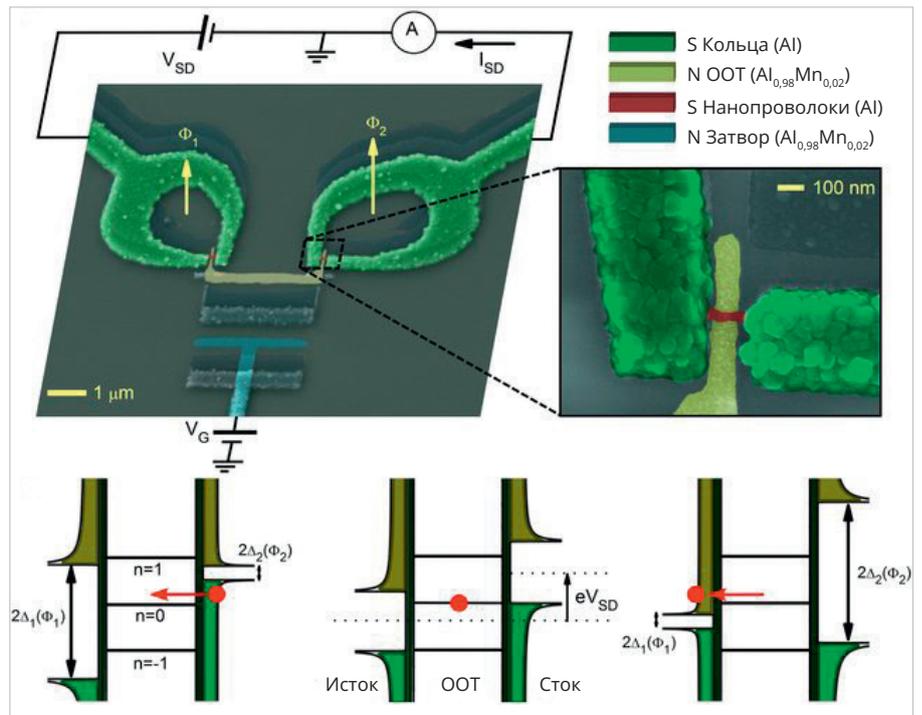


Рис. 11. Структурная схема гибридного SQUSET-транзистора [53]

По существу, предлагаемое в этой работе устройство представляет собой модификацию сверхпроводящего гибридного одноэлектронного транзистора, который авторы назвали «Superconducting Quantum Interference Single Electron Transistor» (SQUSET).

Структурная схема гибридного SQUSET-транзистора показана на рис. 11.

Короткая металлическая нанопроволока работает как слабая связь. Когда она прерывает сверхпроводящее (S) кольцо, плотность электронных состояний (DOS) сильно изменяется за счёт тесного контакта со сверхпроводником. Это даёт возможность управлять устройством через магнитный поток, пронизывающий петлю.

Данное свойство лежит в основе принципа действия сверхпроводящего бесконтактного транзистора с квантовой интерференцией (SQUIPT).

Квантовая интерференция, возникающая в сверхпроводящей нанопроволоке, может использоваться как инструмент управления, обеспечивающий регулируемый по фазе энергетический барьер. В свою очередь, использование этого регулируемого энергетического промежутка позволяет манипулировать зарядом в широком диапазоне функциональных возможностей.

Гибридный SQUIPT-транзистор предназначен для использования в квантовой метрологии, когерентной

калоритронике и квантовых информационных технологиях.

Следует отметить, что когерентная калоритроника является быстро развивающимся научным направлением, предлагающим разработки в таких приложениях, как, например, трёхмерные нанопроволоки, кремниевые нанопроволоки, наноструктуры, кольцевые резонаторы, наноструктуры, наноструктуры, наноструктуры и другие. Подобные исследования проводятся также и в РФ. Так, в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова и в «Московском физико-техническом институте» разрабатываются трёхмерные упорядоченные наноструктуры, кольцевые, а также петлевые подвешенные структуры на основе нанопроволок и другие актуальные направления [54].

Приведённый краткий обзор технологий изготовления SET-транзисторов и примеров их использования далеко не полностью исчерпывает эту тему. Вероятно, что от внимания автора могли ускользнуть некоторые новые публикации. Однако стоит обратить внимание на то, что за последнее время год от года наблюдается всё меньшее число публикаций о новых технологиях изготовления одноэлектронных транзисторов. При этом явно возрастает внимание к так называемым одномолекулярным одноэлектронным транзисторам (single-molecule single-electron transistor – SM-SET). Основная идея SM-SET заключается в том, что-

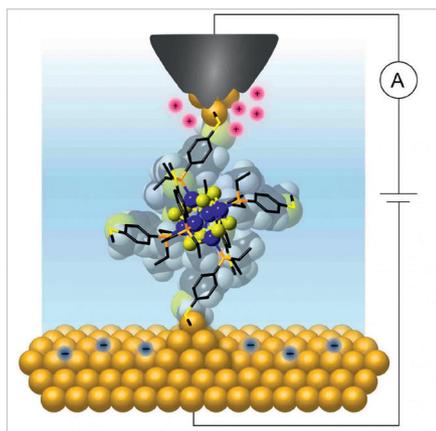


Рис. 12. Основная идея одномолекулярного SET заключается в том, чтобы использовать отдельные молекулы в качестве воспроизводимых электронных компонентов

бы использовать отдельные молекулы в качестве транзистора, в котором квантованный управляемый поток заряда может быть реализован при комнатной температуре. Первые экспериментальные образцы этих устройств учёные из Колумбийского университета (Columbia University in the City of New York) получили в 2017 году (рис. 12). В своей работе они продемонстрировали, что отдельные молекулы могут функционировать при комнатной температуре в качестве воспроизводимых электронных компонентов, таких, например, как транзисторы или диоды [55].

Не исключено, что SM-SET в ближайшем будущем будет рассматриваться либо как гибридное дополнение, либо как альтернатива RT-SET-транзисторам.

Более подробно об этих новых квантовых компонентах планируется рассказать в следующей статье.

Литература

1. URL: bit.ly/3Lwv1dr.

2. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/coulomb-blockade>.
3. URL: <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.44.6199>.
4. URL: <https://www.osp.ru/pcworld/2001/01/155936>.
5. URL: <https://physicsworld.com/a/single-electron-transistors/>.
6. URL: <https://physicsworld.com/a/single-electron-transistors/>.
7. URL: bit.ly/3TpCFYY.
8. URL: bit.ly/3YUow7j.
9. URL: <https://typeset.io/papers/observation-of-single-electron-charging-effects-in-small-1fqvneyl89>.
10. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/573745>.
11. URL: <https://avs.scitation.org/doi/abs/10.1116/1.582347>.
12. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/573745>.
13. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1638756>.
14. URL: bit.ly/3JnNFBs.
15. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1650918>.
16. URL: bit.ly/3TqQIgO.
17. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.40.L29/meta>.
18. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4617040>.
19. URL: bit.ly/3mZiyVf.
20. URL: <https://koreascience.kr/article/JAKO200916762901375.pdf>.
21. URL: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4936790>.
22. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0804/0804.0817.pdf>.
23. URL: <https://www.cheaptubes.com/>.
24. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.43.5669/pdf>.
25. URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5050773>.
26. URL: bit.ly/3Jwpu3V.
27. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-017-00442-6>.
28. URL: <https://avs.scitation.org/doi/abs/10.1116/1.5067269>.
29. URL: bit.ly/3FwN13D.
30. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167931708006564>.
31. URL: <http://www.molecularimprints.com/>.
32. URL: bit.ly/42ps04n.
33. URL: bit.ly/40fEwli.
34. URL: <https://www.nature.com/articles/micronano201775>.
35. URL: bit.ly/3liBf64.
36. URL: bit.ly/42jSCUJ.
37. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.36.L1257>.
38. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/16/8139>.
39. URL: <https://www.nature.com/articles/nphys1339>.
40. URL: <https://avs.scitation.org/doi/10.1116/1.3597833>.
41. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/52195>.
42. URL: <https://www.iasj.net/iasj/download/f7a1428d3d98a607>.
43. URL: <https://arxiv.org/pdf/1904.06560.pdf>.
44. URL: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.nanolett.1c02022>.
45. URL: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.nanolett.1c02022>.
46. URL: bit.ly/40gUjAj.
47. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6600827>.
48. URL: bit.ly/3YUtPUh.
49. URL: bit.ly/42pOi6b.
50. URL: <https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.9.041003>.
51. URL: <https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.13.011023>.
52. URL: <https://arxiv.org/pdf/1603.05585.pdf>.
53. URL: bit.ly/3LAqIOm.
54. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb19/14/text.pdf>.
55. URL: <https://www.engineering.columbia.edu/news/latha-venkataraman-single-molecule-transistor>.



НОВОСТИ МИРА

Сделано в Китае, но оборудование российское: Минпромторг объяснил критерии оценки

Минпромторг сообщил об обсуждении с телеком-отраслью новых правил, которые вступят в силу в сентябре 2023 года. Речь идёт о начислении компаниям баллов за выполнение требований по соответствию критериям «отечественности» телеком-оборудования.

К нему относятся коммутаторы, маршрутизаторы, радиолокационное оборудова-



ние, телеприставки и другие устройства. Баллы будут начислять за выполнение ба-

зовых и необходимых требований, в частности, необходимо владеть правами на конструкторскую документацию изделий и исходный код системного программного обеспечения, располагать сервисными центрами для обслуживания, собственной производственной площадкой и т.п.

Только в случае выполнения всех требований и начисления нужного количества баллов оборудование будет внесено в перечень отечественного.

ferra.ru



«СТА-ПРЕСС» МЕДИАПОРТАЛ

ТОВАРИЩ!
БИЗНЕС РОСТ ЗАМЕДЛИЛ?

РАНО ВПАДАТЬ В СТУПОР!

НУЖНО КРИЧАТЬ О СЕБЕ НЕМЕДЛЯ,

А МЫ

ОБЕСПЕЧИМ РУПОР!



Используй все возможности продвижения,
которые мы создали для тебя



Журналы

Уважаемые издания - качественная аудитория, готовая улышать вас!



YouTube-канал

Это ваша возможность интересно рассказать о себе



Сайты

Это ваши новости, оперативно доставленные по адресу



Конференции

Здесь нет случайных людей - вы заведёте новые контакты и расскажете о себе специалистам!



Дизайн-студия

Наши дизайнеры и верстальщики сделают для вас эффективную рекламу, баннер, ролик

СТА

СОВРЕМЕННАЯ
ЭЛЕКТРОНИКА

+7 (917) 517-46-18 / advert@soel.ru / cta.ru / soel.ru

Не стесняйся, присоединяйся!