

Классификация приборных структур одноэлектроники

© И.И. Абрамов[†], Е.Г. Новик

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
220027 Минск, Белоруссия

(Получена 30 декабря 1998 г. Принята к печати 25 марта 1999 г.)

Предложена классификация одноэлектронных приборных структур, в основу которой положены выделенные в работе принципы. Большое количество известных в настоящее время нанозлектронных приборов рассмотренного типа может быть описано в рамках данной классификации. На ее основе могут быть также предложены новые приборы одноэлектроники.

1. Введение

Структуры на основе эффекта одноэлектронного туннелирования (кулоновской блокады) [1] являются перспективными для создания широкого спектра твердотельных приборов [2–4], в том числе интегральных схем нового поколения сверхвысокой степени интеграции. Известно большое количество структур рассматриваемого типа различной конфигурации и назначения, и число публикаций в данном направлении продолжает возрастать. Становится достаточно сложно ориентироваться в этой области, так как в настоящее время полная классификация приборов одноэлектроники отсутствует. В связи с этим целью данной работы является классификация приборных структур одного типа (одноэлектронных), доминирующим для функционирования которых оказывается отмеченный выше эффект. Достоинством классификации является то, что известные в настоящее время структуры рассматриваемого типа могут быть описаны с ее использованием, а также то, что на ее основе могут быть предложены новые приборы одноэлектроники.

2. Принципы классификации

В основе предложенной классификации лежат следующие принципы.

I. На основе выделения характерных активных областей приборов различаются следующие **классы** одноэлектронных структур.

1) Однотуннельные приборы. Такие структуры содержат только один туннельный переход. Примером может служить одноэлектронный диод [5], содержащий $p-n$ -переход с вырожденным газом носителей заряда, или одноэлектронный бокс [6], в котором туннельный переход подсоединен к источнику напряжения через конденсатор.

2) Цепочки туннельных переходов. К этому классу относятся структуры, содержащие два и более туннельных переходов в активной области, соединенные последовательно. Один из наиболее изученных приборов, относящихся к этому классу, — одноэлектронный транзистор [7–9]. Он содержит два туннельных перехода, отделяющих очень малый "островок" полупроводника от

областей истока и стока. Большинство других известных в настоящее время одноэлектронных приборов относится к этому классу: "насос" [10,11], модулятор [11,12], одноэлектронная память [13] и др.

3) Матрицы туннельных переходов. Структуры этого класса содержат в активной области последовательное и параллельное соединение туннельных переходов в плоскости. Примером такой структуры может быть гранулированная микроперемычка [14].

4) Массивы туннельных переходов. Такие структуры содержат последовательное и параллельное соединение туннельных переходов в различных измерениях.

Каждому из отмеченных классов может быть поставлена в соответствие определенная размерность, а именно: однотуннельным приборам — нульмерный элемент ($0D$); цепочкам туннельных переходов — одномерный массив ($1D$); матрицам — двумерный ($2D$) и массивам туннельных переходов — трехмерный массив элементов ($3D$).

II. Каждый из отмеченных классов структур (соответствующей размерности) может быть представлен определенным видом **принципиальной структурной схемы**. Приведем структурные схемы приборов, относящихся к перечисленным классам.

1) Бокс (однотуннельный прибор). Структурная схема этого прибора соответствует нульмерной размерности $0D$ (рис. 1). В качестве островка выступает промежуточный электрод между туннельным переходом и конденсатором затвора.

2) Транзистор (цепочка туннельных переходов) содержит два туннельных перехода, соединенные последовательно, и островок между ними. Управление током через структуру осуществляется посредством затвора. На рис. 1 представлен один из вариантов принципиальных структурных схем этого прибора. Соответствующая размерность схемы — $1D$. Существуют и другие варианты принципиальных структурных схем одноэлектронного транзистора [15]. Эти схемы отличаются расположением островка и затвора относительно истока и стока, а также конфигурацией затвора. Островок может находиться как в плоскости истока и стока, так и выше либо ниже этой плоскости. Конфигурация затвора может быть различной. Одна из конфигураций, часто используемая в одноэлектронных структурах, — расщепленный затвор [11]. Затвор может располагаться как в плоскости

[†] E-mail: device@micro.rei.minsk.by

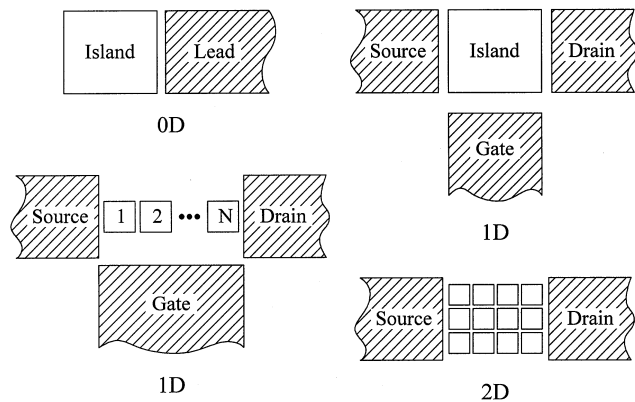


Рис. 1. Принципиальные структурные схемы некоторых одноэлектронных структур.

островка (сбоку от него), так и сверху (снизу) островка, непосредственно над (под) ним или сбоку от него. В реальном транзисторе количество затворов может быть различным, причем в одном приборе могут использоваться затворы разной конфигурации и с различным расположением относительно островка.

3) Принципиальная структурная схема для "много-островковой" цепочки туннельных переходов отличается от схемы транзистора количеством островков (рис. 1). Так же как и для транзистора, расположение островков относительно истока и стока, а также конфигурация, количество и расположение затворов могут быть различными [15].

4) Микроперемычка (матрица туннельных переходов) — принципиальная структурная схема этого прибора приведена на рис. 1 и соответствует размерности 2D. Схема содержит двумерный массив островков. Управление током через структуру осуществляется затвором, расположенным над островками (на схеме он не показан).

III. Условно (так как обычно одноэлектронные структуры состоят из различных материалов) выделим следующие **виды** одноэлектронных структур по материалам островка (островков).

1) Металлические. К этому виду относятся пленочные структуры, в которых металлические островки разделены туннельными барьерами в виде диэлектрических слоев [16–18], или структуры на основе гранулированных пленок [14,19], или на основе металлических коллоидных частиц [20] и т.д. В таких структурах имеет место ограничение трехмерного электронного газа в островках.

2) Полупроводниковые. Примером таких структур могут быть, например, приборы на основе следующих гетероструктур: GaAs/AlGaAs [21–24], GaAs с δ -легированным слоем [10,13], AlGaAs/InGaAs/GaAs [24] и др. В этих структурах осуществляется ограничение двумерного электронного газа (ДЭГ) в малые лужицы (островки) различными методами: в результате прикладывания определенных смещений к затворам [21,22],

путем использования электронно-лучевой литографии и травления структуры [23], при использовании ионно-лучевой имплантации Ga [24] и т.д. К этому виду также относятся кремниевые одноэлектронные структуры: на основе МОП полевого транзистора [8,25]; структуры, полученные методом осаждения наноразмерных кремниевых кристаллов [26]; структуры, выполненные на подложке кремний-на-изоляторе [9,27]; структуры на основе δ -легированного SiGe [28] и др.

3) Диэлектрические. В этом случае диэлектрические островки должны быть разделены слоями с меньшей проницаемостью по сравнению с материалом островков. В настоящее время примеров изготовления приборов, относящихся к этому виду, нет.

4) Органические. Примером такой структуры может служить, например, транзистор на основе пленки из смеси стеариновой кислоты и карбонатных кластеров [29]. Последние выступают в качестве островков.

5) Композиционные. В этом случае островки изготовлены из композиционного материала или из различных материалов. К этому виду можно отнести структуры, которые не подходят ни к одному из ранее выделенных видов одноэлектронных структур.

IV. По технологическим методам изготовления, материалам, формирующим различные области, управляющим электродам и другим принципам можно выделить **разновидности** одноэлектронных структур. Приведем некоторые из них.

Так, например, металлические одноэлектронные структуры могут различаться по технологическому процессу изготовления. В настоящее время известны следующие методы получения таких структур: 1) электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ) и напыления [16,17]; 2) линейного самосовмещения [30]; 3) окисления с использованием сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) [18]; 4) SECO (step edge cut-off — ступенчатого торцевого среза) [31]; 5) анодирования переходов, изготовленных методом ЭЛЛ и напыления [32], и др.

Полупроводниковые структуры имеют следующие разновидности.

По материалам, формирующим активную область, различают кремниевые, на основе полупроводников типа $A^{III} B^V$ (например, GaAs-структуры и др.). По способу формирования активных областей среди кремниевых структур в свою очередь различают: 1) структуры, полученные в инверсионном слое кремниевого МОП полевого транзистора с двойным затвором [8,33]; 2) структуры, сформированные на подложке кремний-на-изоляторе с использованием ЭЛЛ и реактивного ионного травления [9,27,34,35]; 3) структуры на основе наноразмерных кремниевых кристаллов, полученных методом обработки в СВЧ плазме и используемых в качестве островков [26], и др.

Как и для кремниевых, так и для одноэлектронных структур на основе GaAs существуют различные технологические методы их получения. Основным отличием этих методов является способ ограничения

ДЭГ в структурах, малые "лужицы" которого используются в качестве островков. В настоящее время известны следующие способы такого ограничения (или формирования одноэлектронных структур на основе GaAs): 1) ограничение расщепленными затворами Шоттки двумерного электронного газа формируемого в гетероструктуре GaAs/AlGaAs [11,21]; 2) ЭЛЛ и реактивное ионное травление гетероструктуры GaAs/AlGaAs для формирования областей истока, стока, канала и затворов [23]; 3) ЭЛЛ и вытравливание меза-структур в GaAs/AlGaAs и формирование затворов Шоттки [36,37]; 4) ограничение боковым затвором ДЭГ в δ -легированном GaAs (контуры структуры очерчены ЭЛЛ и травлением) [13,38]; 5) ионно-лучевая имплантация Ga в селективно-легированные гетероструктуры GaAs/AlGaAs или AlGaAs/InGaAs/GaAs [24,39], и т.д.

Таким образом, известные в настоящее время одноэлектронные приборные структуры можно отнести к определенному классу, виду и разновидности. При этом они характеризуются определенным видом принципиальных структурных схем (рис. 1). Проиллюстрируем сказанное на примере конкретных нанoeлектронных приборов.

3. Приборные структуры одноэлектроники

3.1. Металлические структуры

Рассмотрим ряд одноэлектронных структур, которые относятся к виду металлических. Наиболее изученным прибором, принадлежащим к типу одноэлектронных структур, в настоящее время является одноэлектронный транзистор. Как было отмечено ранее, он относится к классу цепочек туннельных переходов и соответствует размерности $1D$ (рис. 1). Металлические одноэлектронные транзисторы (один из видов одноэлектронных транзисторов) могут отличаться методом изготовления и некоторыми другими признаками, которые будут описаны далее.

Так, в работе [16] были предложены структуры одноэлектронных транзисторов на основе Al/AlO_x/Al- (туннельных переходов), изготовленных методом ЭЛЛ и напыления. Причем конфигурация затвора у этих приборов различная: один из них имеет встречно-гребенчатую конфигурацию конденсатора затвора, другой — с параллельными плоскостями затвора и островка. Рабочая температура таких структур около 0.1 К. Другой известный метод изготовления транзисторов на основе туннельных переходов Al/AlO_x/Al — метод линейного самосовмещения [30]. Основная идея метода заключается в следующем: туннельные переходы формируются по краям базового электрода (островка), ограничивая один из размеров переходов его толщиной. Формируя очень узкую полосу базового электрода распылением и взрывной литографией, второй из размеров туннельных

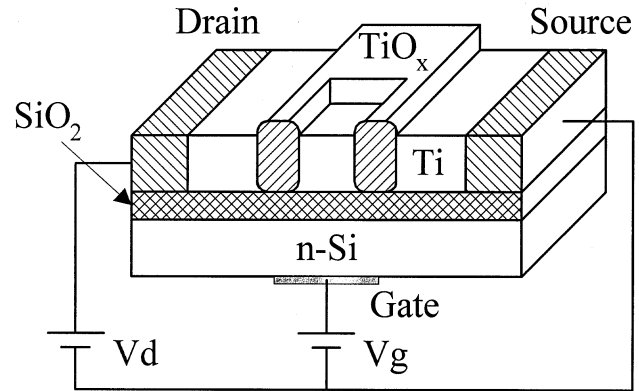


Рис. 2. Транзистор, изготовленный методом окисления с использованием сканирующего туннельного микроскопа.

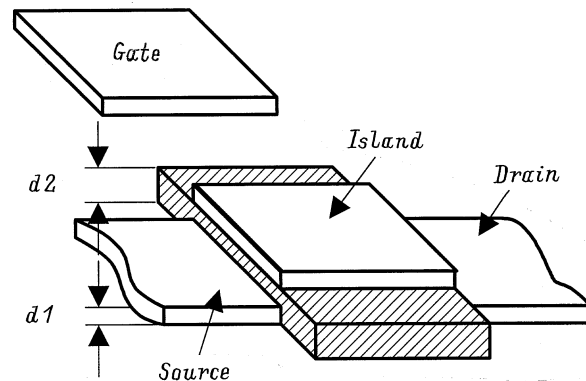


Рис. 3. Транзистор, изготовленный методом ступенчатого торцевого среза.

переходов получают также малым. Исток и сток формируются при вторичном осаждении металлического слоя. Рабочая температура прибора — до 1 К.

Известны металлические одноэлектронные транзисторы на основе других материалов. На рис. 2 представлен транзистор на основе туннельных переходов Ti/TiO_x/Ti. Он получен методом окисления с использованием СТМ [18]. После нанесения пленки металла (Ti) ее поверхность окисляется анодированием с использованием острия СТМ в качестве катода. Такой транзистор может работать при комнатной температуре. Структура на рис. 3 — транзистор на основе туннельных переходов Cr/Cr₂O₃/Cr, изготовленный методом ступенчатого торцевого среза [31]. Основная идея метода: пленка проводника толщиной d_1 напыляется на предварительно изготовленную ступеньку диэлектрического материала толщиной d_2 . При $d_1 < d_2$ электроды не имеют контакта на торцах ступеньки, а ток через структуру течет за счет туннелирования. Рабочая температура прибора — около 15 К. Все описанные выше транзисторные структуры можно также отнести к разновидности пленочных структур.

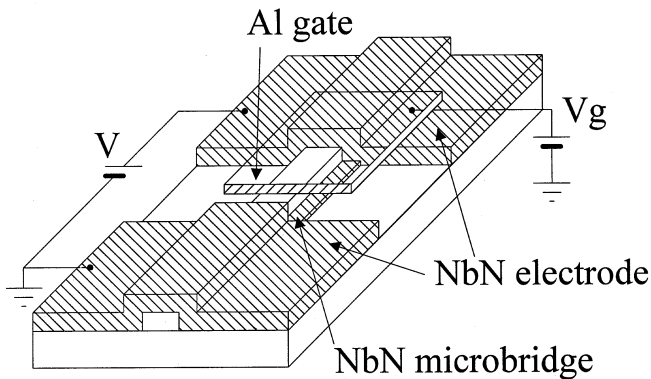


Рис. 4. Микроперемычка на основе гранулированной пленки NbN.

К классу цепочек туннельных переходов, кроме транзисторов, относятся многоостровковые цепочки. Одной из разновидностей таких структур являются приборы на основе гранулированных пленок. Примером может служить структура на основе гранулированной пленки Au/Al₂O₃ [19], полученной совместным распылением Au и Al₂O₃ на Au-подложку. Над этой пленкой располагалась игла СТМ. Для такой структуры были измерены электрические характеристики, которые хорошо согласовывались с теоретическими рассчитанными характеристиками для цепочки туннельных переходов. Эффект одноэлектронного тунnelирования в структуре в большой степени зависит от содержания Au в пленке и положения иглы СТМ. Рабочая температура структуры — до 77 К. Другой пример прибора, относящегося к разновидности гранулированных структур, — микроперемычка на основе гранулированной пленки NbN (рис. 4). Размеры пленки выбираются меньше эффективного размера зарядового солитона, что приводит к квазиуменьшенности свойств электронной проводимости структуры. Прибор изготовлен «методом, зависящим от края» (edge-defined process) [14]. Управление током через структуру осуществляется посредством затвора, расположенного над островками. Рабочая температура микроперемычки около 4.2 К. В отличие от ранее приведенных структур данный прибор относится к классу матриц туннельных переходов. Его принципиальная структурная схема имеет размерность 2D (рис. 1).

Другая разновидность металлических одноэлектронных структур — приборы на основе цепочек коллоидных частиц золота с молекулярными связями [20]. Эти частицы Au являются островками, а органические молекулы, их связывающие, — туннельными барьерами. Частицы Au осаждаются с использованием аminosиланового адгезионного средства на подложку с предварительно изготовленными металлическими (Au) электродами истока, стока и затвора. В результате соответствующей обработки образуются органические молекулы, связывающие осаждаемые коллоидные частицы и электроды истока и стока. Электронный транспорт в такой структуре осу-

ществляется за счет тунnelирования электронов через цепочку коллоидных частиц. Таким образом, данный прибор представляет собой многоостровковую цепочку и может быть описан принципиальной структурной схемой размерности 1D (рис. 1). Рабочая температура прибора около 4.2 К, хотя при 77 К нелинейность вольт-амперной характеристики (ВАХ) сохраняется.

Интересный способ изготовления металлических одноэлектронных структур был предложен в работе [40]. На подложку со слоем Sb на поверхности осаждалась пленка Ag. Из-за отсутствия смачивания этой пленки на поверхности подложки образовывались малые капли Ag (островки). С использованием СТМ, игла которого размещалась над одним из таких островков, была получена структура: (игла СТМ)–островок–подложка. Данная структура является двойным туннельным переходом (частный случай многоостровковой цепочки). ВАХ структуры чувствительна к горизонтальной позиции иглы СТМ. Эффект одноэлектронного тунnelирования в структуре наблюдался при комнатной температуре.

3.2. Полупроводниковые структуры

Рассмотрим ряд разновидностей полупроводниковых структур по методу их изготовления.

Кремниевый одноэлектронный транзистор (представитель класса цепочек туннельных переходов) — это прибор, исследованию которого уделяется в настоящее время большое внимание. Поэтому остановимся на описании разновидностей этой структуры. На рис. 5 представлен кремниевый одноэлектронный транзистор, сформированный в инверсионном слое МОП полевого транзистора с двойным затвором [8]. Нижний и верхний затворы получены методом ЭЛЛ и сухого химического

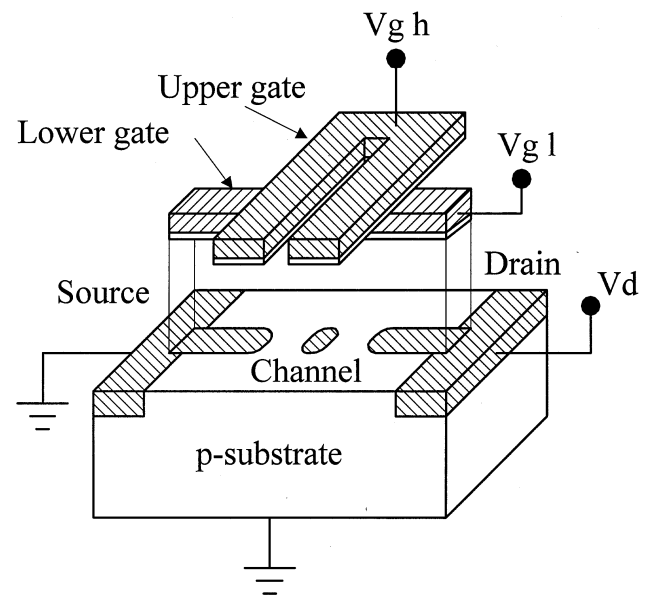


Рис. 5. Одноэлектронный транзистор, сформированный в инверсионном слое МОП полевого транзистора с двойным затвором.

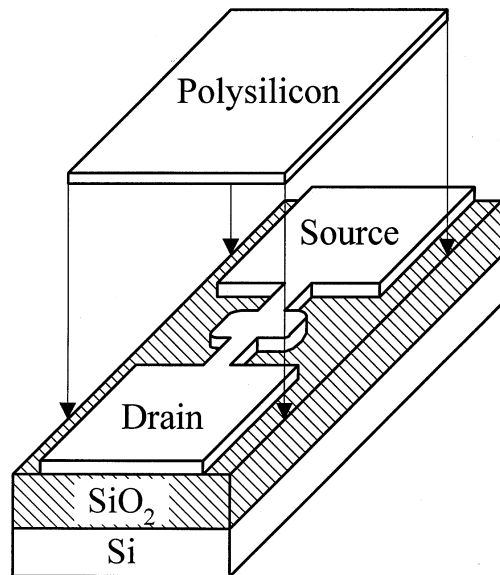


Рис. 6. Квантово-точечный транзистор с поликремниевым затвором.

травления. Нижний затвор (положительно смещенный) формирует инверсионный канал, верхний затвор (отрицательно смещенный) — потенциальные барьеры. Рабочая температура прибора около 4.2 К.

К другой разновидности относится квантово-точечный транзистор (рис. 6) [9]. Он изготовлен на основе структуры кремний-на-изоляторе с использованием ЭЛЛ и реактивного ионного травления. Канал с островком сформированы в верхнем кремниевом слое подложки. В отличие от предыдущего прибора данный транзистор имеет только один поликремниевый затвор, расположенный над каналом. В режиме туннелирования в структуре наблюдаются осцилляции тока в зависимости от напряжения на затворе по причине двух эффектов: квантового ограничения и одноэлектронного туннелирования. Причем были изготовлены квантово-точечные транзисторы с каналом *n*- и *p*-типа проводимости. Рабочая температура *n*-канального транзистора — до 100 К, *p*-канального — до 81 К [41]. Реализация таких структур открывает новые возможности для создания и использования комплементарных пар квантово-точечных транзисторов. К этой же разновидности по методу изготовления относятся другие приборы, например одноэлектронная память [27,42]. Структура этого прибора подобна структуре квантово-точечного транзистора (рис. 6), поэтому также относится к классу цепочек туннельных переходов. Ее отличие от транзистора состоит в том, что в качестве островка выступает квантово-точечный плавающий поликремниевый затвор. Хранение электрона на плавающем затворе приводит к экранированию канала от потенциала на управляющем затворе и сдвигу порогового напряжения. Известны различные методы получения плавающего затвора: осаждение и второй этап ЭЛЛ и реактивного ионного травления [27], метод самосовмещения [42]. Этот

прибор может работать при комнатной температуре. Другой пример такой же разновидности — многоостровковая цепочка на основе квантового провода с двойным боковым затвором [34]. Туннельные переходы формируются в результате образования обедненных областей в квантовом проводе при подаче напряжений на боковые затворы. Рабочая температура прибора около 2 К, хотя нелинейность в ВАХ наблюдается до 46 К.

Как одну из разновидностей кремниевых приборов по методу изготовления можно рассматривать структуры на основе наноразмерных кремниевых кристаллов, используемых в качестве островков [26]. Наноразмерные кристаллы были получены обработкой в СВЧ плазме и покрыты слоем оксида. После этого они были осаждены на структуру с предварительно изготовленными электродами. Структура является квазиодномерной цепочкой туннельных переходов, так как ток течет через путь с наименьшим сопротивлением. Эффект одноэлектронного туннелирования наблюдается в структуре при комнатной температуре.

Интенсивно разрабатываются и одноэлектронные полупроводниковые структуры на основе GaAs. В таких структурах осуществляется ограничение ДЭГ в островки различными методами. По способу такого ограничения можно выделить ряд разновидностей структур. Рассмотрим их на примере конкретных приборов.

На рис. 7 показан прибор, который представляет собой двойной туннельный переход на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs [21]. В этом приборе ограничение ДЭГ в островки осуществляется посредством прикладывания напряжения к металлическим расщепленным затворам Шоттки, расположенным на поверхности структуры. ДЭГ формируется на границе раздела слоев GaAs и AlGaAs, его плотность контролируется напряжением, приложенным к проводящей подложке. При подаче отрицательных напряжений на расщепленные затворы происходит обеднение ДЭГ под ними. В результате в ДЭГ формируется канал с малыми сегментами (островками) между обедненными участками (барьерами) [43,44]. Рабочая температура прибора около 0.5 К.

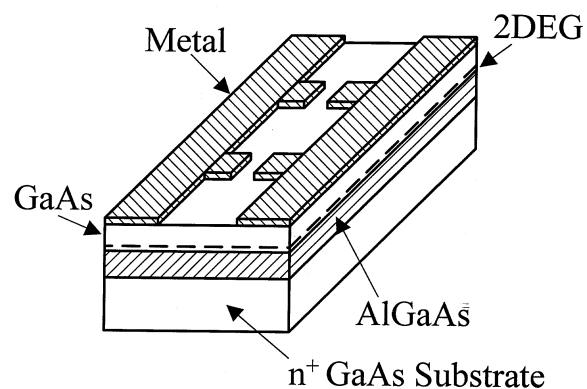


Рис. 7. Структура на основе GaAs/AlGaAs с расщепленным затвором Шоттки.

Другая разновидность может быть представлена транзистором на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs, в котором области затворов, истока, стока, островка и канала получены путем ЭЛЛ и реактивного ионного травления канавок в исходной пластине [23]. В результате такого технологического процесса происходит ограничение ДЭГ в этих областях. В отличие от прибора, приведенного на рис. 7, в такой структуре затворы лежат в одной плоскости с областями истока, стока и островка (планарные затворы). Рабочая температура прибора около 22 мК.

Как одну из разновидностей отмеченных структур можно рассматривать транзистор на основе GaAs/AlGaAs, изготовленный методом ЭЛЛ и жидкостного химического вытравливания меза-структуры и формирования затворов Шоттки [36]. ДЭГ формируется на границе раздела слоев GaAs и AlGaAs. На боковых стенках полученного при травлении канала с ДЭГ сформированы планарные затворы Шоттки электрохимическим способом. Напряжение, подаваемое на эти затворы, обеспечивает ограничение ДЭГ в островки. Если в структуре с расщепленным затвором (рис. 7) электрическое поле приложено перпендикулярно ДЭГ, то горизонтальное электрическое поле, вызванное напряжением на планарном затворе Шоттки, действует на электроны в направлении, параллельном ДЭГ, вызывая его сильное ограничение. Рабочая температура прибора — до 20 К.

Существует ряд одноэлектронных структур с ДЭГ в δ -легированной пластине GaAs [13,38]. В таких структурах ДЭГ лежит выше δ -легированного слоя. Контуры структур (исток, сток, затворы и канал) очерчены методами ЭЛЛ и травления меза-структуры в пластине GaAs с δ -легированным слоем. В результате прикладывания напряжения к боковым затворам, а также ввиду наличия примесей и шероховатостей границ в структуре происходит разделение канала с ДЭГ на ряд островков. Такие структуры относятся к классу цепочек туннельных переходов и могут использоваться при создании одноэлектронной памяти. Рабочая температура структур с ДЭГ в δ -легированной структуре GaAs около 4.2 К.

3.3. Органические структуры

Примером органической структуры может быть, например, транзистор на основе пленки из смеси стеариновой кислоты и карбонатных кластеров, которые являются островками [29]. Прибор был изготовлен следующим образом. На атомарно гладкую поверхность графита с предварительно сформированным электродом управления осаждалась смешанная пленка стеариновой кислоты с включенными в нее карбонатными кластерами. Электрод из тонких двухслойных полосок (слой Au на Al₂O₃) формировался методом электронной нанолитографии. Характеристики такой структуры исследовались с использованием СТМ, игла которого размещалась над кластерами. Эффект одноэлектронного туннелирования наблюдается в приборе при комнатной температуре.

4. Заключение

Ряд одноэлектронных структур не рассмотрен в статье в виду их большого разнообразия [45,46] и ограниченности объема статьи. Некоторые из них функционируют на основе не только эффекта одноэлектронного туннелирования, но и других механизмов транспорта [47–49] (приборные структуры смешанного типа), в том числе на явлении квантовой интерференции [50], например квантовые интерферометры на основе расщепленных колец Ааронова–Бома с квантовой точкой в одном из плеч [51,52]. В последнее время появились также структуры, которые можно отнести к функционально-интегрированным элементам или простейшим интегральным схемам [53,54], однако и они могут быть классифицированы согласно приведенным в статье принципам.

Таким образом, предложена классификация приборных структур нанoeлектроники одного типа, в основу которой положены выделенные в работе принципы. Большое количество известных в настоящее время нанoeлектронных приборов рассмотренного типа может быть описано в рамках данной классификации. На ее основе могут быть также предложены новые приборы одноэлектроники.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Республиканских научно-технических программ Белоруссии: "Информатика", "Низкоразмерные системы" и "Нанoeлектроника".

Список литературы

- [1] Д.В. Аверин, К.К. Лихарев. ЖЭТФ, **90**, 733 (1986).
- [2] *Single Charge Tunneling: Coulomb Blockade Phenomena in Nanostructures*, ed. by H. Grabert and M.H. Devoret. NATO ASI Series B: Physics (Plenum, N. Y., 1992) v. 294.
- [3] *Special Issue on Single Charge Tunneling*, ed. by H. Grabert. Z. Physik B, **85**, № 3 (1991).
- [4] Ж.И. Алфёров. ФТП, **32**, 3 (1998).
- [5] W.H. Richardson. Appl. Phys. Lett., **71**, 1113 (1997).
- [6] P. Lafarge, H. Pothier, E.R. Williams, D. Esteve, C. Urbina, M.H. Devoret. Z. Phys., B, **85**, 327 (1991).
- [7] K.K. Likharev. IEEE Trans. Magn., **23**, 1142 (1987).
- [8] H. Matsuoka, S. Kimura. Appl. Phys. Lett., **66**, 613 (1995).
- [9] E. Leobandung, L. Guo, Y. Wang, S.Y. Chou. Appl. Phys. Lett., **67**, 938 (1995).
- [10] K. Tsukagoshi, K. Nakazato. Appl. Phys. Lett., **71**, 3138 (1997).
- [11] L.P. Kouwenhoven, A.T. Johnson, N.C. van der Vaart, A. van der Enden, C.J.P.M. Harmans, C.T. Foxon. Z. Phys. B, **85**, 381 (1991).
- [12] L.J. Geerligs, V.F. Anderegg, P.A.M. Holweg, J.E. Mooij, H. Pothier, D. Esteve, C. Urbina, M.H. Devoret. Phys. Rev. Lett., **64**, 2691 (1990).
- [13] K. Nakazato, R.J. Blaikie, H. Ahmed. J. Appl. Phys., **75**, 5123 (1994).
- [14] N. Miura, N. Yoshikawa, M. Sugahara. Appl. Phys. Lett., **67**, 3969 (1995).

- [15] И.И. Абрамов, Е.Г. Новик. Изв. Белорус. инж. академии, № 2 (6)/2, 4 (1998).
- [16] G. Zimmerli, R.L. Kautz, J.M. Martinis. Appl. Phys. Lett., **61**, 2616 (1992).
- [17] T.A. Fulton, G.J. Dolan. Phys. Rev. Lett., **59**, 109 (1987).
- [18] K. Matsumoto, M. Ishii, K. Segawa, Y. Oka, B.J. Vartanian, J.S. Harris. Appl. Phys. Lett., **68**, 34 (1996).
- [19] E. Bar-Sadeh, Y. Goldstein, C. Zhang, H. Deng, B. Abeles, O. Millo. Phys. Rev. B, **50**, 8961 (1994).
- [20] T. Sato, H. Ahmed, D. Brown, B.F.G. Johnson. J. Appl. Phys., **82**, 696 (1997).
- [21] U. Meirav, M.A. Kastner, S.J. Wind. Phys. Rev. Lett., **65**, 771 (1990).
- [22] Y. Wang, S.Y. Chou. Appl. Phys. Lett., **63**, 2257 (1993).
- [23] H. Pothier, J. Weis, R.J. Haug, K. v. Klitzing. Appl. Phys. Lett., **62**, 3174 (1993).
- [24] T. Fujisawa, S. Tarucha. Appl. Phys. Lett., **68**, 526 (1996).
- [25] A. Ohata, A. Toriumi, K. Uchida. Jpn. J. Appl. Phys., **36**, 1686 (1997).
- [26] A. Dutta, M. Kimura, Y. Honda, M. Otobe, A. Itoh, S. Oda. Jpn. J. Appl. Phys., **36**, 4038 (1997).
- [27] L. Guo, E. Leobandung, S.Y. Chou. Appl. Phys. Lett., **70**, 850 (1997).
- [28] D.J. Paul, J.R.A. Cleaver, H. Ahmed, T.E. Whall. Appl. Phys. Lett., **63**, 631 (1993).
- [29] Е.С. Солдагов, В.В. Ханин, А.С. Трифонов, С.П. Губин, В.В. Колесов, Д.Е. Преснов, С.А. Яковенко, Г.Б. Хомутов. Письма ЖЭТФ, **64**, вып. 7, 510 (1996).
- [30] M. Götz, K. Blüthner, W. Krech, A. Nowack, H.-J. Fuchs, E.-B. Kley, P. Thieme, Th. Wagner, G. Eska, K. Hecker, H. Hegger. J. Appl. Phys., **78**, 5499 (1995).
- [31] S. Altmeyer, B. Spangenberg, H. Kurz. Appl. Phys. Lett., **67**, 569 (1995).
- [32] Y. Nakamura, D.L. Klein, J.S. Tsai. Appl. Phys. Lett., **68**, 275 (1996).
- [33] H. Matsuoka, T. Ichiguchi, T. Yoshimura, E. Takeda. Appl. Phys. Lett., **64**, 586 (1994).
- [34] R.A. Smith, H. Ahmed. J. Appl. Phys., **81**, 2699 (1997).
- [35] D. Ali, H. Ahmed. Appl. Phys. Lett., **64**, 2119 (1994).
- [36] K. Jinushi, H. Okada, T. Hashizume, H. Hasegawa. Jpn. J. Appl. Phys., **35**, 1132 (1996).
- [37] Y. Nagamune, H. Sakaki, L.P. Kouwenhoven, L.C. Mur, C.J.P.M. Harmans, J. Motohisa, H. Noge. Appl. Phys. Lett., **64**, 2379 (1994).
- [38] K. Nakazato, T.J. Thornton, J. White, H. Ahmed. Appl. Phys. Lett., **61**, 3145 (1992).
- [39] T. Fujisawa, Y. Hirayama, S. Tarucha. Appl. Phys. Lett., **64**, 2250 (1994).
- [40] K.-H. Park, J.S. Ha, W.S. Yun, M. Shin, K.-W. Park, E.-H. Lee. Appl. Phys. Lett., **71**, 1469 (1997).
- [41] E. Leobandung, L. Guo, S.Y. Chou. Appl. Phys. Lett., **67**, 2338 (1995).
- [42] A. Nakajima, T. Futatsugi, K. Kosemura, T. Fukano, N. Yokoyama. Appl. Phys. Lett., **70**, 1742 (1997).
- [43] C.H. Crouch, C. Livermore, R.M. Westervelt, K.L. Campman, A.C. Gossard. Appl. Phys. Lett., **71**, 817 (1997).
- [44] R.H. Blick, R.J. Haug, J. Weis, D. Pfannkuche, K. v. Klitzing, K. Eberl. Phys. Rev. B, **53**, 7899 (1996).
- [45] *Special Issue. Scanning Tunneling Microscopy*, ed. by S. Hosok et al. Jpn. J. Appl. Phys., **36**, Part 1, No 6B (1997).
- [46] U. Meirav, E.B. Foxman. Semicond. Sci. Technol., **10**, 255 (1995).
- [47] D.V. Averin, A.N. Korotkov, K.K. Likharev. Phys. Rev. B, **44**, 6199 (1991).
- [48] T. Hiramoto, H. Ishikuro, T. Fujii, G. Hashiguchi, T. Ikoma. Jpn. J. Appl. Phys., **36**, 4139 (1997).
- [49] K. Yano, T. Ishii, T. Hashimoto, T. Kobayashi, F. Murai, K. Seki. Appl. Phys. Lett., **67**, 828 (1995).
- [50] T.J. Thornton. Rep. Progr. Phys., **57**, 311 (1994).
- [51] A. Yacoby, M. Heiblum, D. Mahalu, H. Shtrikman. Phys. Rev. Lett., **74**, 4047 (1995).
- [52] E. Buks, R. Schuster, M. Heiblum, D. Mahalu, V. Umansky, H. Shtrikman. Phys. Rev. Lett., **77**, 4664 (1996).
- [53] A. Fujwara, Y. Takahashi, K. Murase, M. Tabe. Appl. Phys. Lett., **67**, 2957 (1995).
- [54] F. Hofman, T. Heinzel, D.A. Wharam, J.P. Kotthaus, G. Böhm, W. Klein, G. Tränkle, G. Weimann. Phys. Rev. B, **51**, 13 872 (1995).

Редактор Т.А. Полянская

Classification of single-electron devices

I.I. Abramov, E.G. Novik

Belarusian State University of Informatics
and Radioelectronics,
220027 Minsk, Belarus

Abstract The principles of single-electron device classification are presented in the paper. The proposed classification includes many of nanostructures of this type. New single-electron devices can be developed on the basis of such a classification.