

ТУННЕЛЬНЫЙ ПРИБОР И СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТУННЕЛЬНОГО ПРИБОРА

Область техники

Изобретение относится к способам изготовления функциональных элементов нанoeлектроники и вычислительной техники, а именно к туннельным приборам, и может быть
5 использовано для изготовления одноэлектронных логических схем, схем одноэлектронной памяти и сенсоров, работающих при комнатной температуре.

10 Предшествующий уровень техники

Основы современной теории коррелированного электронного туннелирования были разработаны уже несколько лет назад. Интерес в мире к этой новой области физики и техники связан с широкими перспективами, которые открываются при дальнейшем исследовании
15 одноэлектронных явлений и создании на их основе новых перспективных технологий.

С физической точки зрения смысл явления состоит в электронных корреляциях, вызванных кулоновским взаимодействием электронов в различных структурах микро - и наномасштабов. С
20 другой стороны одноэлектроника - это путь к реализации электронных устройств, принцип действия которых основан на кодировании информации одиночными электронами.

Известно трехвыводное (трехэлектродное) полупроводниковое устройство -(US, № 4 286 275, 357/12, 1981г.) состоящим из
25 комбинации области базы с физическим размером порядка длины свободного пробега основного носителя, области эмиттера, образующей первый барьер относительно области базы и имеющим ширину барьера, позволяющую квантово-механическое туннелирование; область коллектора, образующая барьер

относительно области базы, более низкий, чем первый барьер и имеющий ширину барьера, достаточную, чтобы подавлять квантово-механическое туннелирование и омический контакт с каждой из областей эмиттера, базы и коллектора.

- 5 Трехвыводное (трехэлектродное) полупроводниковое устройство, характеризующееся временем переключения $\sim 10^{-12}$ сек и проявляющее динамическое негативное сопротивление, создано из тонкой барьерной области в эмиттерной секции, имеющей барьерную высоту, которая выше, чем у более широкой барьерной области в коллекторной секции, отделенной областью базы, имеющей ширину, сравнимую с длиной свободного пробега основного носителя. В основе работы устройства лежит квантово-механическое туннелирование, как основной механизм проводимости от эмиттерной области к области базы и перенос горячих основных носителей как основной механизм проводимости
- 10 области в коллекторной секции, отделенной областью базы, имеющей ширину, сравнимую с длиной свободного пробега основного носителя. В основе работы устройства лежит квантово-механическое туннелирование, как основной механизм проводимости от эмиттерной области к области базы и перенос горячих основных носителей как основной механизм проводимости
- 15 горячих основных носителей как основной механизм проводимости через область базы к области коллектора.

Область применения: для усиления, переключения, создания динамического сопротивления.

- Особенности: ширина коллекторного барьера такова, что туннельный ток через него незначителен. Переход эмиттер - база: основная проводимость - квантово-механическое туннелирование.
- Размеры : база 100 Å;

 ширина барьера эмиттера 80 Å;

 ширина барьера коллектора 120- 150 Å;

- 25 Это устройство, основанное на квантово-механическом туннелировании как основном механизме проводимости от эмиттерной области к области базы и переносе горячих основных носителей через область базы к области коллектора.

- Известно трехвыводное (трехэлектродное) устройство на основе квантовых ям (US, № 4 912 531, 357/12, 1990г.) функционирует подобно МОП - транзистору. Это означает, что 3 вывода прибора могут в общем смысле рассматриваться как источник, проход и сток. Выходной контакт сообщается путем
- 30

туннелирования с рядом параллельных цепей квантовых ям, каждая яма достаточно мала для того, чтобы энергетические уровни в яме квантовались дискретно. В каждой из таких цепочек ям вторая яма сопряжена с общим вторым проводником, а первая яма электронно
5 сопряжена с общим первым проводником.

Способ создания электрических элементов наноэлектроники и вычислительной техники на основе Арсенида-Галлия (GaAs) с изолирующим молекулярным слоем Ленгмюра-Блоджетт (US № 5
10 079 179, 37-141, 1992г.), заключающийся в формировании между подложкой, выполненной из GaAs, и проводящим контактом изолирующего слоя в виде пленки Ленгмюра-Блоджетт /ЛБ/.

Толщина слоя регулируется, чтобы задавать функциональные характеристики прибора. Головная полярная группа молекулы ЛБ
15 пленки выбрана так, что она пассивирует поверхностные состояния используемого в качестве подложки именно GaAs. Обнаружены определенные предпочтительные кислотные и аминокислотные группы для полярной головы молекул. Было установлено, что ЛБ слой увеличивает высоту управляющего барьера для полевого транзистора
20 и пассивирует разорванные связи и поверхностные дефекты в подложке из GaAs, что дает возможность работать в инверсной моде (inversion mode operation). Этот способ может быть использован только при изготовлении макроскопических приборов - полевых транзисторов и диодов.

25 Из всех способов изготовления функциональных элементов наноэлектроники одним из наиболее перспективных является способ изготовления электронного прибора с органическими материалами (ЕП № 0 469 243 H01L^{29/28}, 1992г.), который обеспечивает формирование электронных приборов, в которых электронный ток
30 протекает через электропроводящую мономолекулярную или мульти-мономолекулярную пленку.

Этот способ изготовления электронного прибора с органическими материалами заключается в формировании на

подложке, имеющей на своей поверхности изолирующую пленку, первого и второго электродов; вытравливания изолирующей пленки с использованием первого и второго электродов в качестве маски; формирования мономолекулярной или мульти-мономолекулярной
5 пленки, содержащей электролитически полимеризуемые группы прямо или не прямо на поверхности подложки, которая функционирует как третий электрод; приложения напряжения между первым и вторым электродами для полимеризации электролитически полимеризуемых групп, и отведения третьего электрода от подложки.

10 В этом способе изготовления органического электронного прибора можно осуществлять формирование мономолекулярной или мульти-мономолекулярной пленки, содержащей электролитически полимеризуемые группы, методом Ленгмюра-Блоджетт. Кроме того, имеется возможность создания электронного прибора с
15 органическим материалом, когда формирование мономолекулярной или мульти-мономолекулярной пленки, содержащей полимеризуемые группы, включает процедуру формирования по крайней мере одного слоя мономолекулярной пленки путем химической адсорбции поверхностно-активного вещества на основе
20 силана, содержащего полимеризуемые ненасыщенные группы, из неводного органического растворителя на поверхность подложки, и последующую полимеризацию пленки.

При этом этот способ создания электронного прибора включает в себя также после формирования на поверхности
25 подложки по крайней мере одного слоя мономолекулярной пленки, содержащей электролитически полимеризуемые ненасыщенные группы, электролитическую полимеризацию этих ненасыщенных групп путем приложения электрического напряжения между первым электродом и вторым электродом для осуществления соединения
30 первого и второго электродов через электропроводящие сопряженные группы, причем поверхностно-активное вещество на основе силана является химическим материалом, содержащим хлоросилильную (chlorosilyl) группу на конце.

При этом в способе обязательным условием его осуществления является требование, чтобы мономолекулярные или мульти-мономолекулярные пленки содержали электропроводящие сопряженные группы, такие как политиениленовая (polythienylene) группа - чтобы связь (соединение) между первым и вторым электродами осуществлялась политиениленовыми группами.

Известный способ изготовления органического прибора характеризуется формированием на твердотельной подложке первого и второго электродов, электролитически полимеризованным мономолекулярным или мульти-мономолекулярным слоем между вышеупомянутыми электродами; а также формированием третьего управляющего электрода, соединенного прямо или косвенно с мономолекулярным или мульти-мономолекулярным слоем так же как с первым и вторым электродами. Приложение напряжения между третьим электродом и вторым электродом обеспечивает управление электрическим током, протекающим между первым электродом и вторым электродом, зависящим от изменения приложенного напряжения.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что известным способом можно создавать электронные приборы с органическими материалами, использующие ток электронов, протекающий через электропроводящую мономолекулярную или мульти-мономолекулярную органическую пленку.

Область, через которую течет электрический ток, сформирована сопряженными связями в органическом материале, конкретно в органической мономолекулярной или мульти-мономолекулярной пленке, образованными в ней электролитической полимеризацией пленки, посредством этого достигается высокая функциональность и уменьшение размеров прибора.

Используя способ химической адсорбции или ЛБ-способ вместе с электролитической полимеризацией, могут быть высокоэффективно созданы на принципах самоорганизации полимеры, имеющие электропроводящие сопряженные связи, для

электрического соединения двух электродов, так что в результате могут быть реализованы высокосоввершенные органические устройства.

5

Раскрытие изобретения

Задача изобретения: создать электронный прибор, в котором реализован режим одноэлектронного туннелирования при достаточно высокой (комнатной) температуре.

Известно, что в туннельном переходе взаимная емкость электродов мала (много меньше, чем емкость туннельного перехода). После туннелирования одного электрона разность потенциалов изменится на величину e / C ($e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Ф, C - емкость перехода). Соответственно, характерный масштаб изменения электростатической энергии системы после туннелирования одного электрона $e^2 / 2C$.

Электростатическая энергия такой системы :

$$E = Q^2 / 2C; Q = Q_0 + ne \ (e > 0), \quad (1.1)$$

где Q_0 - константа, зависящая от разности работ выхода электродов φ_1 ,

$$Q_0 = C(\varphi_1 - \varphi_2) / e, \quad (1.2)$$

n - число электронов, прошедших через переход.

Для наблюдения эффекта туннелирования отдельных электронов необходимо выполнение двух основных условий :

1. Условие малости тепловых флуктуаций по отношению к электростатической энергии перехода :

$$e^2 / 2C \gg kT, \quad (1.3)$$

k - постоянная Больцмана, T - температура.

2. Условие почти полной изолированности объекта от внешнего мира. Слабый обмен электронами в этом случае возможен через туннельный барьер. Условие изолированности имеет простой количественный смысл : туннельное сопротивление

получающихся переходов должно быть много больше так называемого квантового сопротивления:

$$R_Q = h / 4e^2 \approx 6,5 \text{ кОм}, \quad (1.4)$$

h - постоянная Планка.

Выполнение условия (1.4) обеспечивает слабое влияние (подавление) квантового шума, проявляющегося в хаотическом движении электронов через переход даже при нулевой температуре, когда полностью подавлен тепловой шум. При этом электроны будут локализованы на объекте и, соответственно, его заряд будет однозначно определен.

Таким образом наблюдение эффекта туннелирования одиночного электрона возможно, если тепловые (1.3) и квантовые (1.4). флуктуации заряда малы по сравнению с энергией перезарядки системы при туннелировании.

Можно показать, что если электрический заряд перехода Q находится в диапазоне $-e / 2 < Q < e / 2$, то туннелирование невыгодно для системы, так как при этом увеличивается ее свободная энергия. Таким образом, если к переходу не приложена разность потенциалов или она мала, акта туннелирования не происходит. Этот эффект носит название кулоновской блокады.

Пусть теперь Q меняется, например под действием какого-либо источника тока, подсоединенного к переходу: $Q = I(t)$. Пусть Q выходит за один из краев диапазона блокады, например становится чуть больше $e / 2$. Тогда оказывается энергетически выгодным акт туннелирования электрона, в результате которого заряд на переходе меняется и становится чуть больше $-e / 2$, т. е. снова попадает в диапазон блокады. Поэтому туннелирование следующего электрона оказывается невыгодным до тех пор, пока внешняя перезарядка перехода не создаст вновь условия энергетической выгоды для нового акта туннелирования, т. е. до момента увеличения полного заряда перехода на e . Таким образом будут происходить одноэлектронные колебания заряда Q на переходе

и напряжения на нем $V = Q / C$ с частотой $f = \bar{I} / e$, где $\bar{I}$ - средний ток через переход. При этом туннелирование электронов в одиночном туннельном переходе коррелировано во времени.

В более сложных системах, содержащих несколько переходов, возможна строгая пространственная корреляция актов туннелирования в различных переходах. Если мы имеем два последовательно соединенных перехода, туннелирование электрона через один из них увеличивает напряжение, а следовательно и вероятность туннелирования через другой. Такая пространственная корреляция наиболее сильно выражена, если велико различие сопротивлений двух переходов, и, соответственно, времена туннелирования в них [1]. Средний туннельный ток через систему будет определяться переходом с меньшим сопротивлением. Изменяя извне, например индуцированием (или "впрыскиванием" через большое (больше квантового) сопротивление), заряд на центральном электроде, можно менять условия для туннелирования электронов в обоих переходах, т. е. мы получаем одноэлектронный транзистор. Зависимость тока I_t от управляющего напряжения V_g при фиксированном значении V называется сигнальной характеристикой системы. Эта зависимость оказывается периодической, с периодом, равным элементарному заряду: $I(Q+e) = I(Q)$.

Теория коррелированного одноэлектронного туннелирования справедлива для переходов с электродами не слишком малых размеров, энергетический спектр которых, в частности, можно считать непрерывным. Весьма интересен вопрос о том, как изменяются характеристики туннельных переходов при уменьшении их размеров до величин, при которых становится существенным пространственное квантование энергетического спектра. Строгой теории, описывающей влияние дискретности энергетического спектра на процесс коррелированного одноэлектронного туннелирования через очень малый металлический объект (например, через металлическую гранулу) или через молекулу (кластер) пока нет. Однако, сделанные оценки [4] показывают, что в

случае достаточно большого количества электронов на объекте влияние дискретности энергетического спектра сводится лишь к тому, что на ВАХ, помимо одноэлектронных особенностей, при определённых условиях возможно наличие микроструктуры, обусловленное размерным эффектом при пространственном квантовании энергии электрона.

В основе заявляемого изобретения лежит использование явления коррелированного туннелирования электронов.

Благодаря разработанному способу может быть создан уникальный электронный прибор, реализующий одноэлектронный режим туннелирования при комнатной температуре в искусственно созданной стабильной молекулярной структуре.

Краткое описание фигур чертежей

На фиг. 1 схематически изображена структурная схема туннельного прибора, (фиг. 1А - вид сверху, фиг. 1Б - вид сбоку) изготовленного заявляемым способом, где

1 - подложка

2 - встроенные в моно- или мульти-мономолекулярную матрицу кластеры и молекулы

3 - входной электрод

4 - выходной электрод

5 - N управляющих электродов

Фиг. 2 - ВАХ туннельного прибора;

Фиг. 3 - Сигнальная (управляющая) характеристика туннельного прибора с одним управляющим электродом (молекулярный одноэлектронный транзистор) при температуре 300 К. Кластер находится вблизи управляющего электрода.

Сведения, подтверждающие возможность осуществления изобретения.

В заявляемом способе создания туннельного прибора в системе планарных металлических (или полупроводниковых) электродов на подложке формируется упорядоченная молекулярная

структура путем фиксации специальных молекул и кластеров, обеспечивающих формирование туннельных переходов и одноэлектронное коррелированное туннелирование электронов в приборе, а не просто монослой инертных молекул, формирующий
5 диэлектрическую прослойку - туннельный барьер.

Соответственно, в случае фиксации таких молекул и кластеров с помощью известной ленгмюровской технологии, на поверхности воды создают мультикомпонентный смешанный мономолекулярный слой, образованный инертными амфифильными молекулами или
10 кластерами, образующими одноэлектронные туннельные переходы, после чего переносят сформированный мультикомпонентный мономолекулярный слой с поверхности воды на поверхность подложки.

Способ создания молекулярной упорядоченной структуры, удовлетворяющей условиям одноэлектронного коррелированного туннелирования заключается в следующем : на подложку 1 с подготовленными металлическими электродами 3,4,5 наносится методом химической адсорбции или методом Ленгмюра-Блоджетт смешанный слой молекул и кластеров 2.

20 Металлоорганические кластеры обладают набором свойств, уникальных для создания молекулярных одноэлектронных цепей коррелированного туннельного транспорта : ядро кластера, состоящее всего из нескольких атомов металла, обладает электронной структурой, допускающей наличие переменного числа
25 дополнительных электронов, при этом не искажающих атомную структуру кластера. Для ядра кластера характерно наличие близлежащих свободных электронных уровней, что позволяет туннельному электрону при относительно высокой температуре быстро переходить с уровня на уровень (за время, меньшее среднего
30 времени туннелирования электрона на ядро кластера). В результате отсутствуют квантовые ограничения на размещение следующего туннельного электрона. Это принципиально отличает данную ситуацию от резонансного туннелирования и свойственно именно

системам, рассматриваемым в теории одноэлектронного туннелирования. Необходимо подчеркнуть, что в кластерах уже с несколькими атомами металла в ядре температура, при которой становятся существенны эффекты квантования электронов по уровням электронной структуры ядра, существенно ниже рабочей температуры одноэлектронного устройства.

Органическая оболочка кластера представляет собой фиксированный туннельный барьер, свойства которого не зависят от присутствия туннельного электрона. Характерный размер оболочки кластера обеспечивает высокую туннельную проницаемость и, соответственно, малые времена туннелирования. При этом туннельное сопротивление барьера существенно больше квантового (~ 6.5 кОм), что является принципиальным требованием теории одноэлектронного коррелированного туннелирования.

Существует большой выбор видов металлоорганических кластеров с различными комбинациями типов оболочки и ядра. Это позволяет варьировать как параметры туннельной структуры (эффективная емкость и проводимость), так и чисто химические свойства оболочки кластера, важные для его физико-химического закрепления в конкретной системе-устройстве. При этом реализация режима одноэлектронного коррелированного туннелирования возможна также в системе других активных молекул и кластеров (не только металлоорганических), обладающих соответствующими физико-химическими свойствами (например карборан, фуллерен и т.д.), которые также могут использоваться для создания прибора.

При создании прибора с одноэлектронным туннелированием необходимо решить две основные задачи :

- Выбрать достаточно устойчивые активные молекулы или кластеры, обладающие свойствами, обеспечивающими одноэлектронный транспорт электронов.
- Сформировать на подложке упорядоченную структуру из таких молекул и кластеров.

Из всего многообразия известных в настоящее время кластеров нами был выбран карборановый кластер в основном из - за его стабильности. Карборановый кластер имеет характерный размер около 15 Å, следовательно подложка, на которой он будет находиться
5 должна иметь характерную неровность поверхности много меньше 15 Å. Необходимо, чтобы кластер устойчиво держался на подложке. Кроме этого, подложка должна быть проводящей. Этим требованиям удовлетворяют подложки из высокоориентированного
10 пиролитического графита. Они имеют достаточно большую проводимость и имеют характерную неровность поверхности ≈ 1 Å (период графитовой решетки - 2.46 Å).

Для надежного закрепления молекул на подложке использовалась технология Ленгмюра - Блоджетт. Пленки Ленгмюра - Блоджетт - это одно - или многослойные покрытия из
15 амфифильных молекул на твердой подложке, получающиеся путем переноса одного строго мономолекулярного слоя молекул за другим при прохождении подложки сквозь покрытую монослоем поверхность водной фазы.

Строение молекулярного компонента прибора было
20 следующим : на атомарно гладкую поверхность пиролитического графита методом ЛБ была нанесена смешанная пленка стеариновой кислоты с включенными в нее карборановыми кластерами, в которой матрица стеариновой кислоты фиксировала молекулы кластеров на подложке.

25 С точки зрения использования эффекта коррелированного туннелирования электронов для построения схем нанoeлектроники очень важен вопрос о возможности управления туннельным током в такой двухпереходной структуре с помощью независимого сигнала.

Для реализации одноэлектронного транзистора была выбрана
30 следующая схема : кластер на подложке располагается вблизи от изолированного от подложки управляющего электрода, который полевым образом создает на кластере заряд. Численные оценки взаимной емкости такого электрода и кластера показывают, что

необходимое для реализации "одноэлектронного транзистора" значение может быть достигнуто, если расстояние между электродом и кластером будет не более 100 нм. При этом на электрод должно подаваться напряжение порядка нескольких вольт.

5 Реально такая структура представляет собой двухслойную (диэлектрик - проводник) систему тонких полосок, напыляемую на подложку. В качестве подложки использовались подложки из высокоориентированного пиролитического графита, гладкость поверхности у которого на масштабах порядка сотни нм равна
10 размеру одной ячейки кристалла графита (2.46 Å). В качестве диэлектрика выбран Al_2O_3 , проводника - Au.

Система таких электродов изготавливалась с использованием методов современной нанолитографии. Конфигурация электродов выбрана в форме "гребенки" из нескольких (порядка сотни)
15 длинных, узких полосок. Расстояние между полосками должно быть достаточно малым, чтобы вероятность кластера оказаться вблизи полоски была велика. С другой стороны, расстояние между полосками должно быть достаточно велико (порядка нескольких сотен нм), чтобы игла СТМ могла сканировать поверхность. В
20 результате компромисса между этими и рядом технологических условий удалось реализовать расстояние между соседними электродами ≈ 400 нм при такой же ширине электрода.

В предлагаемом способе создания одноэлектронного туннельного прибора используется разработанная технология
25 надежной фиксации кластеров и молекул на поверхности твердотельной подложки. Суть технологии состоит во включении туннельно-активных кластеров и молекул в матрицу ленгмюровской пленки на основе амфифильных веществ (например, стеариновой кислоты). Предлагаемая технология обеспечивает получение
30 монослойной структуры кластерных молекул. Технология основана на проведенных исследованиях физико-химических свойств многокомпонентных ленгмюровских пленок, содержащих наночастицы. Матрица ленгмюровского монослоя из

полимеризованного амфифильного вещества надежно фиксирует активные кластеры и молекулы, что исключает их движение под действием электрического поля электродов. Для надежной фиксации активных кластеров и молекул необходимо их смешивать с амфифильными веществами, например, стеариновой кислотой в такой пропорции, чтобы каждый кластер и молекула были полностью окружены молекулами стеариновой кислоты.

В настоящее время практически единственным методом регистрации электрических характеристик одиночных структур столь малых размеров является использование метода сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии, который позволяет вести наблюдение и исследование объектов с атомарным разрешением.

Для демонстрации возможностей функционирования заявляемого туннельного прибора использовался метод сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии (СТС). Использование техники сканирующего туннельного микроскопа позволяет измерять характеристики одноэлектронных систем с произвольно малыми (вплоть до атомных) размерами.

Устройство сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) позволяет получать трехмерную картину, отражающую рельеф поверхности, а также включать в цепь игла - подложка интересные объекты.

Для измерений использовался режим постоянного тока. В этом режиме поддерживается постоянный туннельный ток, а соответствующее ему положение иглы над поверхностью поддерживается и фиксируется с помощью контура обратной связи.

Для реализации туннельного прибора были выбраны металлосодержащие карборановые кластеры, размером порядка 20 Å. Использование кластеров в качестве активного элемента позволяет наблюдать в такой системе одноэлектронные явления при азотной (≈ 77 K) и комнатной температуре $T \approx 300$ K (фиг. 2.).

Туннельными переходами в реализованном одноэлектронном транзисторе на основе СТМ являются переходы "игла - ядро

кластера", и "ядро кластера - подложка". Заряд Q_0 , наведенный на кластер полевым образом при подаче напряжения на управляющий электрод 3 (фиг. 1.), меняет условия протекания тока по системе и играет роль управления.

- 5 Кластеры и кластерные молекулы отличаются от других органических и неорганических молекул тем, что они состоят из компактного тяжелого ядра с, как правило, близкой к сферической симметрией, окруженного лигандной оболочкой из легких атомов или простейших молекул. Особенности электронного строения
- 10 кластерных молекул - наличие густой сети близко расположенных верхних заполненных молекулярных орбиталей и соответствующих им нижних вакантных молекулярных орбиталей (и те и другие как правило слабо связывающие) обуславливает с одной стороны появление в кластерах множественных одноэлектронных обратимых
- 15 переходов и, с другой стороны, обеспечивает достаточную устойчивость остова кластерных молекул после добавления или удаления электрона.

- Настоящее изобретение предлагает использование в качестве активных элементов туннельного прибора, формирующих в нем
- 20 туннельные барьеры и межбарьерное пространство (области, где локализуются туннелирующие электроны), соответствующих молекул и кластеров (в частности, молекулярных металлосодержащих кластеров), имеющих требуемые характерные размеры (менее 100 Å) и обеспечивающих проявление эффекта кулоновской блокады
- 25 туннелирования электронов в упорядоченной структуре из таких молекул и кластеров (при этом не накладываются какие - либо определенные ограничения на структуру энергетического спектра электронов на таких молекулах и кластерах. Эти активные молекулы и кластеры (в частном случае, и одна молекула), на которых
- 30 локализуются туннелирующие электроны, расположены соответствующим упорядоченным образом в пространстве между металлическими (или полупроводниковыми) входными, выходными и управляющими электродами (фиг. 1.). При этом туннельный ток

протекает по входному 1 и выходному 2 электродам, а управляющие электроды 3 обеспечивают эффективное управление туннельным током электронов (фиг. 3.) : при монотонном изменении напряжения на управляющем электроде 3 регистрируется
5 немонотонное, периодическое изменение туннельного тока. При использовании данного прибора для создания различных сенсоров туннельный ток изменяется под действием внешних воздействий (электромагнитные поля, взаимодействие компонентов внешней среды с активной областью прибора (одноэлектронными
10 туннельными переходами). Пространственная упорядоченная стабилизация активных молекул, на которых локализуются туннелирующие электроны, обеспечивается их упорядоченным расположением в матрице инертного вещества или химическими связями с компонентами прибора.

15 Заявляемый способ реализовался следующим образом :

Для получения мономолекулярного слоя одиночных кластеров, фиксированных в инертной молекулярной матрице, была использована технология Ленгмюра-Блоджетт. Технология Ленгмюра-Блоджетт позволяет создавать на поверхности жидкой
20 фазы мономолекулярные пленки определенного класса веществ и затем переносить их на твердую подложку.

Для получения смешанных ленгмюровских монослоев, содержащих карборановые кластеры и стеариновую кислоту, были приготовлены растворы кластера и стеариновой кислоты
25 концентрации 10^{-3} М в тетрагидрофуране. Из этих двух растворов приготавливались растворы, содержащие стеариновую кислоту и карборановые кластеры в следующих пропорциях : 1 : 32, 1 : 20, 1 : 16, 1 : 12, 1 : 8, 1 : 4, 1 : 1, 2 : 1, 4 : 1, 8 : 1, 12 : 1, 16 : 1, 20 : 1, 32 : 1 (соответственно). Для формирования монослоя на поверхность
30 водной субфазы (рН = 5.6) наносился раствор стеариновой кислоты и/или карборанового кластера в тетрагидрофуране концентрации $4 \cdot 10^{-4}$ М (из расчета на суммарное количество молекул стеариновой кислоты и кластеров). Через 5 минут, необходимых для испарения

растворителя, для получения Р-А-изотерм монослой поджимался со скоростью $3 \text{ \AA}^2 / \text{молекулу}$ в минуту. Перед перенесением монослоя с поверхности воды на графитовую подложку монослой поджимался подвижным барьером до давления $25 \text{ мН} / \text{см}$ и переносился на
5 поверхность свежеприготовленного скола графита со скоростью $0.5 \text{ мм} / \text{минуту}$ методом Шеффера. Поверхностное давление 25 мН/м поддерживалось постоянным при перенесении монослоя на подложку. Для получения монослоя, ориентированного гидрофобными хвостами наружу, подложка погружалась в воду до
10 нанесения на поверхность воды монослоя. Процесс нанесения монослоя, ориентированного гидрофильными фрагментами наружу, проходил по другой схеме. После полного погружения подложки в воду монослой максимально поджимался до коллапса с последующим отсасыванием монослоя водяным насосом и
15 увеличением площади ванны до максимальной, после чего подложка извлекалась из воды.

Для выяснения возможностей и особенностей встраивания карборановых кластеров в ленгмюровский монослой стеариновой кислоты нами исследовались изотермы сжатия смешанных
20 монослоев стеариновая кислота + карборановые кластеры на поверхности деионизированной воды (рН 5,6).

Карборановые кластеры без добавления к ним молекул стеариновой кислоты не образуют стабильных ленгмюровских монослоев на поверхности воды : поверхностное давление не
25 поднимается выше 3 мН/м при поджатии карборанового "монослоя". При добавлении же к карборановым кластерам молекул стеариновой кислоты (соотношение $k = \text{стеариновая кислота} / \text{кластер}$ в пределах
 $0,6 < k < 12$) получают стабильные амфифильные монослои с
30 ярковыраженными кооперативными свойствами : значение поверхностного давления P_{max} в коллапсе 70 мН/м , в то время как P_{max} для стеариновой кислоты и карборановых кластеров по отдельности равно $55 \text{ мН} / \text{м}$ и 3 мН/м , соответственно.

Итак, были получены стабильные смешанные ленгмюровские монослои ярко выраженного кооперативного характера путем включения неамфифильных молекул - карборановых кластеров - в классические ленгмюровские монослои стеариновой кислоты.

5 При этом сами активные молекулы и кластеры могут и не образовывать ЛБ пленки. Поэтому использовались смешанные ЛБ пленки хорошо изученных и удобных для нанесения жирных кислот с встроенными в них кластерными молекулами. Это позволило разделить и решить проблему выбора вида кластеров для
10 целей одноэлектроники и проблему закрепления выбранных кластеров на подложке. В данном случае новым является приготовление смешанной пленки жирной кислоты и кластеров на поверхности воды с последующим переносом на подложку. При определенной концентрации кластерных молекул в ЛБ пленке они
15 образуют собственную упорядоченную структуру.

При измерении ВАХ и спектра (аналоговая производная ВАХ по напряжению) мономолекулярного слоя стеариновой кислоты с включенными в него кластерами с помощью СТМ при температуре 300 К обнаружены особенности на ВАХ, которые согласуются с
20 выводами существующей теории одноэлектронного туннелирования. Тем самым получено экспериментальное свидетельство устойчивой, воспроизводимой реализации одноэлектронного режима туннелирования при комнатной температуре в искусственно созданной стабильной молекулярной структуре.

25 Измерения, проведенные при комнатной температуре показали, что ток через изучаемую транзисторную молекулярную туннельную структуру "игла СТМ - кластер - подложка" в фиксированной рабочей точке немонотонно, более того - периодически, зависит от монотонного изменения напряжения на
30 управляющем электроде. Таким образом, зарегистрировано соответствие экспериментальной зависимости туннельного тока от напряжения управления, т.е. сигнальной характеристики молекулярного одноэлектронного транзистора теоретической

зависимости, полученной на базе теории одноэлектроники Каждый период на сигнальной характеристике объясняется в соответствии с "ортодоксальной" теорией одноэлектроники изменением заряда кластера на один электрон.

5 Симметричность сигнальной характеристики с одной стороны, и наличие ступенек на ВАХ с другой объясняется тем, что в двухпереходной системе "игла СТМ - кластер - подложка" переходы "игла СТМ - кластер" и "кластер - подложка" имеют приблизительно одинаковые емкости, но существенно разные
10 сопротивления.

В способе создания туннельного прибора в системе планарных металлических (или полупроводниковых) электродов на подложке формируется упорядоченная молекулярная структура путем фиксации активных молекул и кластеров, обеспечивающих
15 формирование туннельных переходов и одноэлектронное коррелированное туннелирование электронов в приборе, а не просто монослой инертных молекул, формирующий диэлектрическую прослойку - туннельный барьер.

Соответственно, в случае фиксации таких молекул и кластеров с помощью известной ленгмюровской технологии на поверхности
20 воды создают мультикомпонентный смешанный мономолекулярный слой, образованный инертными амфифильными молекулами и активными молекулами и кластерами, образующими одноэлектронные туннельные переходы, после чего переносят
25 сформированный мультикомпонентный мономолекулярный слой с поверхности воды на поверхность сформированной подложки.

В случае использования для формирования системы одноэлектронных туннельных переходов метода химической адсорбции молекул на поверхность подложки, активные молекулы и
30 кластеры должны содержать соответствующие химические группы, обеспечивающие их связывание с поверхностью подложки. Далее проводится химическая реакция связывания соответствующих молекул и кластеров с подложкой. Возможно также встраивание

активных молекул и кластеров в уже сформированный молекулярный слой инертных молекул.

После формирования моно- или мультислойных молекулярных структур с помощью метода Ленгмюра-Блоджетт или метода химической адсорбции проводят полимеризацию полученных
5 молекулярных структур с целью существенного повышения их стабильности и устойчивости к внешним воздействиям.

Использование в качестве молекул, образующих упорядоченную молекулярную структуру на поверхности
10 твердотельной подложки в системе планарных электродов, активных молекул и кластеров, формирующих одноэлектронные туннельные переходы, позволяет обеспечить новое полезное свойство изготавливаемого прибора - его функционирование на основе одноэлектронного коррелированного туннелирования электронов.

Преимуществами предлагаемого туннельного прибора является
15 следующее : активные элементы предлагаемого нами прибора (молекулы и кластеры) имеют строго фиксированные и одинаковые строение (атомарный состав), структуру и, соответственно, размеры. Этим обеспечивается одинаковость активных элементов приборов и,
20 соответственно, воспроизводимость их функциональных параметров и одинаковость отклика на определенное воздействие.

Промышленная применимость

Предлагаемый туннельный прибор обеспечивает создание
25 цифровых и аналоговых устройств, основанных как на традиционных принципах построения схем, так и на совершенно новых принципах кодирования информации, где носителем информации являются отдельные электроны.

Активные элементы прибора (активные молекулы и кластеры)
30 характеризуются чрезвычайно малыми размерами (например, ≈ 20 Å для молекулы карборанового кластера), что обеспечивает возможности существенной миниатюризации создаваемых с их использованием одноэлектронных устройств.

- Благодаря использованию в качестве активных элементов прибора молекул и кластеров, обладающих нанометровыми размерами, характерные размеры активных областей прибора (одноэлектронных туннельных переходов) становятся достаточно малыми для того, чтобы обеспечить управляемое одноэлектронное коррелированное туннелирование при относительно высоких (комнатных) температурах а также позволяют реализовать при этих температурах чрезвычайно высокую чувствительность к изменениям заряда на активных элементах прибора ($\sim 10^{-5} \text{ e/Гц}^{1/2}$).
- В отличие от известного туннельного прибора, функционирующего на основе резонансного туннелирования, в основе функционирования предлагаемого туннельного прибора лежит не резонансное туннелирование между квантово-механическими ямами с дискретными энергетическими уровнями, а управляемое одноэлектронное коррелированное туннелирование электронов в системе молекул или кластеров с произвольным энергетическим спектром электронов. Поэтому, в предлагаемом нами приборе не накладываются какие - либо определенные ограничения на структуру энергетического спектра электронов в молекулах и кластерах, формирующих в нем одноэлектронные туннельные переходы. Быстродействие предлагаемого прибора не хуже, чем у прототипа - прибора на эффекте резонансного туннелирования. Энерговыделение в процессе электронного туннелирования в приборе ниже, чем в известных туннельных приборах. В предлагаемом нами приборе регистрируется непосредственно туннельный ток (в отличие от прототипа, где нет прямой связи туннельных процессов и измеряемого тока в выходном электроде).

- В качестве активных элементов предлагаемого нами прибора используются молекулы или кластеры (в том числе металлосодержащие), а не островки полупроводника, как в прототипе.

Туннельный прибор функционирует на основе управляемого одноэлектронного коррелированного туннелирования электронов. Явление одноэлектронного коррелированного туннелирования электронов было теоретически предсказано и описано, а затем и экспериментально продемонстрировано. Возможность реализации управления таким туннельным током открывает возможности построения различных электронных схем на основе одноэлектронных туннельных переходов и, таким образом, создания одноэлектронных аналоговых и цифровых устройств. Создание таких устройств является весьма перспективным и важным для развития микроэлектронной техники, поскольку в таких устройствах реализуется новый принцип кодирования информации - носителем информации являются отдельные электроны. Такие устройства характеризуются довольно большим быстродействием. Теоретические оценки, соответствующие размерным параметрам предлагаемого прибора, дают величину $\sim 3 \cdot 10^{-14}$ сек, а также величину энергоснабжения в процессе одноэлектронного переноса $\sim 10^{-24}$ Дж. Основные принципы построения схем аналоговых и цифровых устройств на основе управляемого одноэлектронного туннелирования в настоящее время разработаны теоретически, однако практически создаваемые в рамках традиционной твердотельной планарной технологии одноэлектронные устройства реализованы лишь при сверхнизких температурах < 1 К. Из теории следует, что для того, чтобы одноэлектронное устройство функционировало при комнатных температурах, необходимо уменьшить характерные размеры его активных областей (одноэлектронного туннельного перехода) ниже 100 Å. Известные твердотельные микроэлектронные технологии в настоящее время (и, возможно, в обозримом будущем) не в состоянии воспроизводимо реализовать такие устройства.

Способ изготовления туннельных приборов, имеющих размер активной области менее 100 нм, положил начало созданию приборов нового класса - класса нанoeлектроники.

Реализуемый в туннельном приборе эффект дискретного туннелирования одиночных носителей тока сквозь туннельные барьеры при комнатной температуре может быть использован как в одноэлектронном транзисторе, так и использован для построения
5 одноэлектронных логических схем, в которых логические "1" и "0" отождествляются с отсутствием или присутствием одного электрона.

Эффект дискретного одноэлектронного туннелирования, реализуемый в туннельных приборах, изготавливаемых заявляемым способом позволяет создать целый ряд аналоговых и цифровых
10 устройств разной степени интеграции с очень высокими характеристиками.

Особенно большие перспективы открываются в области создания сверх-БИС, где эти устройства могут обеспечивать сочетание исключительно малого рассеяния энергии и очень малого
15 размера самих элементов при высоком быстродействии, а также в области создания новых высокочувствительных сенсоров.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

п. 1. Туннельный прибор, содержащий входной, выходной и управляющий электроды, разделенные туннельными барьерами, отличающийся тем, что в него введены N управляющих электродов, туннельные барьеры и межбарьерное пространство в нем выполнены в виде упорядоченной структуры из молекул и кластеров, формирующих туннельные переходы, обеспечивающие одноэлектронное коррелированное туннелирование электронов в приборе, причем каждый управляющий электрод расположен в области упорядоченной структуры из молекул и кластеров.

10 п. 2. Туннельный прибор по п.1, отличающийся тем, что входной, выходной и управляющий электроды расположены на поверхности твердотельной подложки.

п. 3. Туннельный прибор по п.1, отличающийся тем, что входной и K управляющих электродов, где $K < N$, расположены на поверхности твердотельной подложки, а $N - K$ управляющих электродов и выходной электрод расположены в области упорядоченной структуры из молекул и кластеров вне поверхности твердотельной подложки.

20 п. 4. Туннельный прибор по п. 1,2 отличающийся тем, что подложка выполнена из графита.

п. 5. Туннельный прибор по пункту 1,2, отличающийся тем, что входной, выходной и управляющий электроды изготавливают из золота

25 п. 6. Способ изготовления туннельного прибора, заключающийся в формировании на поверхности атомарно гладкой твердотельной подложки входного, выходного и управляющего электродов с последующим формированием мономолекулярной или мульти-мономолекулярной пленки, отличающийся тем, что мономолекулярную или мульти-мономолекулярную пленку 30 изготавливают в виде инертной диэлектрической молекулярной матрицы с фиксировано встроенными в нее активными молекулами



и кластерами, являющимися центрами локализации туннелирующих электронов и формирующих одноэлектронные туннельные переходы, при этом на поверхности атомарно гладкой твердотельной подложки дополнительно формируют N-1 управляющих электродов.

- 5 п. 7. Способ изготовления туннельного прибора по п. 6; отличающийся тем, что инертную диэлектрическую молекулярную матрицу с встроенными в нее активными молекулами и кластерами формируют способом Ленгмюра-Блоджетт.

- 10 п. 8. Способ изготовления туннельного прибора по п.п. 6, 7, отличающийся тем, что для формирования инертной диэлектрической молекулярной матрицы используют молекулы, содержащие полимеризуемые химические группы.

- 15 п. 9. Способ изготовления туннельного прибора по п.п. 6, 7, 8, отличающийся тем, что после формирования инертной диэлектрической молекулярной матрицы с фиксировано
встроенными в нее активными молекулами и кластерами, являющимися центрами локализации туннелирующих электронов и формирующих одноэлектронные туннельные переходы, дополнительно осуществляют полимеризацию молекулярной
20 структуры.

- п. 10. Способ изготовления туннельного прибора по п. 6, отличающийся тем, что инертную диэлектрическую молекулярную матрицу с встроенными в нее активными молекулами и кластерами формируют способом химической адсорбции.

- 25 п. 11. Способ изготовления туннельного прибора по п.п. 6, 10, отличающийся тем, что для формирования инертной диэлектрической молекулярной матрицы используют молекулы, содержащие полимеризуемые химические группы.

- 30 п. 12. Способ изготовления туннельного прибора по п.п. 6, 10, 11, отличающийся тем, что после формирования инертной диэлектрической молекулярной матрицы с фиксировано
встроенными в нее активными молекулами и кластерами, являющимися центрами локализации туннелирующих электронов и

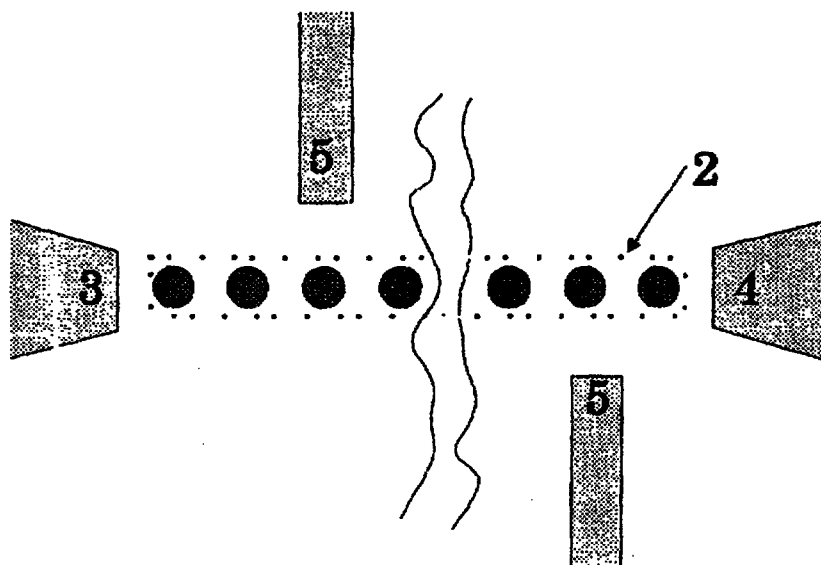


формирующих одноэлектронные туннельные переходы,
дополнительно осуществляют полимеризацию молекулярной
структуры.

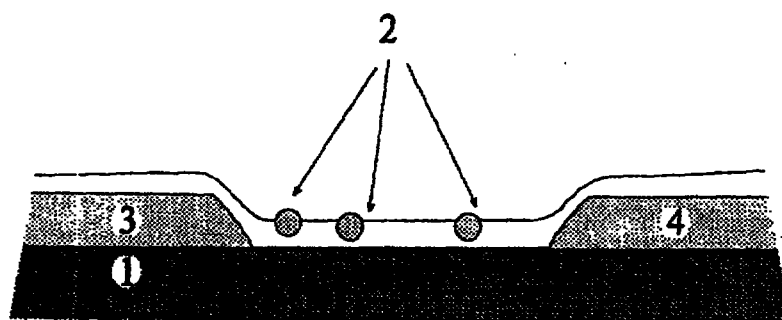


* C L M S *

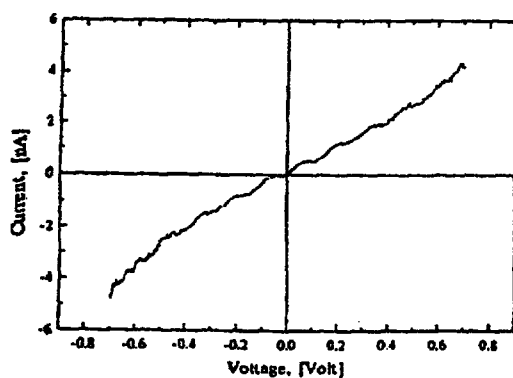
1/1



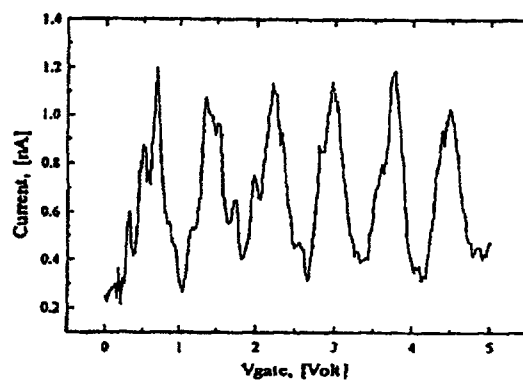
Фиг. 1a



Фиг. 1б



Фиг. 2



Фиг. 3

TUNNEL-EFFECT DEVICE AND A METHOD FOR PREPARATION SAME

Technical Field

The present invention relates in general to methods for producing functional elements of nanoelectronics and computer facilities, more specifically it concerns tunnel-effect devices and can find application for producing single-electron logic gates, single-electron memory circuits and sensors operable at room temperature.

Background Art

Fundamentals of modern theory of correlated electronic tunneling have been elaborated as early as several years ago. A worldwide interest displayed in this new domain of physics and technology is concerned with the broadest potentialities and prospects offered by further research in single-electron phenomena and development of new promising technologies based there on.

From the standpoint of physics the meaning of that phenomenon resides in electronic correlations due to Coulomb electrostatic interaction of electrons in diverse micro- and nano-scale structures. On the other hand, single-electronics is a route towards development of such electronic device that the operating concept of which is based on information coding by one electrons.

One state-of-the-art three-lead (three-electrode) semiconductor device (US Patent # 4,286,275, NPC 357/12, 1981) is known to comprise a combination of the base region having a physical size of the order of the length of a free path of the majority carrier, the emitter region which establishes a first barrier relative to the base region and featuring the barrier width sufficient for quantum-mechanical tunneling, and the collector base forming a lower barrier with respect to the base region than the first barrier and featuring the barrier width high enough to inhibit quantum-mechanical tunneling and ohmic contact with each of the emitter, base, and collector regions.

The three-lead (three-electrode) semiconductor device under discussion featuring a changeover time of about 10^{-12} s and offering a negative dynamic resistance, is created from a thin barrier region in the emitter section having a barrier height exceeding that in a wider barrier region of the collector section which separated by the base section having a width comparable with the length of the free path of the majority carrier. The operation of the device is based on quantum-mechanical tunneling as the principal mechanism of electrical conduction through the base region to the collector region.

Field of application: amplification, changing-over, and establishing dynamic resistance.

Specific features: the collector barrier has such a width that tunneling current flowing therethrough is but negligible. Emitter-base junction: main conductance due to quantum-mechanical tunneling.

Dimensions: base - 100 Å;

width of emitter barrier - 80 Å;

width of collector barrier - 120 to 150 Å.

The device discussed before is based on quantum-mechanical tunneling as the principal mechanism of electrical conduction from the emitter region to the base region, and of transferring hot major carriers through the base region to the collector region.

One more state-of-the-art three-lead (three-electrode) semiconductor device based on quantum wells (US Patent # 4,912,531, NPC 357/12, 1990) is known to function as a MOS transistor. This means that in a general sense the three leads of the device may be considered as a source, a pass, and a drain. The output terminal communicates, by virtue of the tunneling effect, with a number of parallel circuits of quantum wells, each of which is adequately small for the energy levels therein to quantize discretely. In each of such pit circuits the second pit is connected to a second common conductor, while the first pit is electronically connected to a first common conductor.

A method for making GaAs-based electric elements of nanoelectronics and computer facilities with an insulating molecular Langmuir-Blodgett layer

(US Patent # 5,079,179, NPC 37/141, 1992) is known to comprise formation of an insulating layer appearing as Langmuir-Blodgett (LB) film interposed between a GaAs substrate and the conducting terminal.

The thickness of said layer is variable so as to set the functional characteristics of the device. The polar head group of a molecule of LB-film is so selected as to passivate the surface state of GaAs used as the substrate. there are found some preferable acid- and amino-groups for the polar head of molecules. It has been established that the LB-layer increases the height of the control barrier for a field-effect transistor and passivates broken bonds and surface flaws in the GaAs substrate, which makes possible inversion-mode operation. The method is applicable only for preparing macroscopic devices, i.e., field-effect transistor and diodes.

One of the most promising methods for making functional elements of nanoelectronics is a method for making an electronic device involving organic materials (EP # 0469243 H01L 29/28, 1992), which provides for establishing of electronic devices, wherein electron currents flows through an electrically conducting monomolecular or multi-monomolecular film.

Said method for making an electronic device involving organic material consists in establishing a first and a second electrodes on a substrate provided with an insulating film on its surface; etching out the insulating film using the first and second electrodes as a mask, forming a monomolecular or multi- monomolecular film, containing electrolytically polymerizable groups directly or indirectly on the substrate surface which functions as a third electrode, applying a voltage across the first and the second electrodes for the electrolytically polymerizable groups to polymerize, and withdrawing the third electrode from the substrate.

The aforesaid method for making an organic electronic device is instrumental in forming a monomolecular or a multi- monomolecular film comprising electrolytically polymerizable groups, using the Langmuir-Blodgett technique. In addition, a possibility is provided for developing an electronic device involving an organic material, wherein formation of a monomolecular or a multi-monomolecular film containing polymerizable groups, involves the procedure of forming at least one layer of a monomolecular film by chemical

adsorption of a silane-base surfactant, containing polymerizable unsaturated groups, from a nonaqueous organic solvent onto the substrate surface, followed by polymerization of the resultant film.

Furthermore, according to said method for making an electronic device, formation on the substrate surface of at least one layer of a monomolecular film containing electrolytically polymerizable unsaturated groups is followed by electrolytic polymerization of said unsaturated groups by applying an electric voltage across the first electrode and the second electrode in order to establish connection between the first and second electrodes through electrically conducting conjugated groups, while said silane-based surfactant is in fact a chemical substance containing a chlorosilyl group at its end.

An indispensable prerequisite for carrying said method into effect is that the monomolecular or multi-monomolecular films should contain electrically conducting conjugated groups, such as a polythienylene group, so that bonding between the first and second electrodes be effected by said polythienylene groups.

The known method for making an organic electronic device is featured by forming said first and second electrodes on a solid-state substrate, by an electrolytically polymerized monomolecular or multi-monomolecular layer interposed between said electrodes, and by establishing a third control electrode connected directly or indirectly to said monomolecular or multi-monomolecular layer, as well as to the first and second electrodes. Applying a voltage between the third and second electrodes allows of control over the electric current flowing between the first and second electrodes and depending on a change in the applied voltage.

In view of the foregoing, an inference can be made that the known method is instrumental in making electronic devices involving organic materials and utilizing the electron current flowing through an electrically conducting monomolecular or multi-monomolecular organic film.

The region through which electric current flows is established by conjugated links present in an organic material, specifically in said organic monomolecular or multi-monomolecular organic film, said links resulting from

electrolytic polymerization of said film, whereby high functional capabilities and reduced overall dimensions of the device are attained.

It is due to the use of the chemical adsorption or LB- technique along with electrolytic polymerization that polymers having electrically conducting conjugated bonds may very efficiently be made on the concepts of self-organization, for electrically connecting two electrodes, with the result that highly perfect electronic organic devices may be obtained.

Disclosure of the Invention

Therefore the principal object of the present invention is to provide an electronic device operating on the principle of a single-electron tunneling at a rather high (room) temperature.

It is common knowledge that mutual conductance of electrodes in a tunneling junction is rather low, i.e., much lower than the conductance of the tunneling junction itself. After tunneling of one electron the potential difference changes by the value e/C (where $e = 1.6 \times 10^{-19}$ of Coulomb, C being the capacitance of the junction). Accordingly, a characteristic scale of change in the electrostatic energy of the system after tunneling of one electron is $e^2/2C$.

Electrostatic energy of such a system is as follows:

$$E = Q^2/2C; Q = Q_0 + ne \ (e > 0), \quad (1.1)$$

where Q_0 is a constant dependent upon the difference ϕ_i .

between work function of the electrodes,

$$Q_0 = C(\phi_1 - \phi_2)/e, \quad (1.2)$$

n is the number of electrons that passed through the junction.

The following two principal conditions should be met for attaining the tunneling effect of lone electrons:

1. The condition of a lowest value of thermal fluctuations with respect to electrostatic energy of the junction:

$$e^2/2C \gg kT, \quad (1.3)$$

where k is the Boltzmann constant;

T is temperature.

2. The condition of almost complete isolation of the object from the outside world. In this case a weak electron interchange is possible through the tunneling barrier. The condition of such an isolation has a simple quantitative sense, i.e., the value of tunneling resistance of the resultant junctions should be much higher than the so-called quantum resistance:

$$Rq = h/4e^2 \sim 6.5 \text{ kOhm}, \quad (1.4)$$

where h is the Planck constant.

Meeting the conditions of the Eqn. 1.4 provides for an inhibitory effect on quantum noise which manifests itself in random motion of electrons through the junction even at zero temperature when thermal noise is inhibited completely. In this case electrons will be located on the object so that its charge will be determined, accordingly.

Thus, the effect of a lone electron tunneling can be observed when thermal (1.3) and quantum (1.4) charge fluctuations are relatively low compared with the energy of system recharging during tunneling.

It is demonstrable that when the junction electric charge Q is in the range of $-e/2 < Q < e/2$, tunneling is disadvantageous for the system since its free energy increases in this case. Thus, when no potential difference is applied to the junction or such a difference is too low, no tunneling effect occurs. The phenomenon is called Coulomb blocking.

Now let Q change under, e.g., any source of current connected to the junction, i.e., $Q = I(t)$, so as to extend beyond one of the limits of the Coulomb blocking range and get somewhat in excess of $e/2$. As a result, the electron tunneling effect proves to energetically advantageous, whereby the function charge changes to get a little higher than $-e/2$, that is, it falls again into the range of Coulomb blocking. That is why tunneling a next electron proves to be disadvantageous until an external recharging of the function establishes the conditions of energetic advantage of a new tunneling action, i.e., till an increase in a complete junction charge on e . Thus, single-electron variations of the charge Q at the junction and those of the voltage $V = Q/C$ thereon will occur at a frequency $f = I/e$, where I denotes an average current passing through the junction. In this case electron tunneling in single-electron tunneling junction is time-correlated.

In more complicated systems comprising a number of junctions, a strict space correlation of tunneling action in various junctions is possible. In case of two series-connected junctions, electron tunneling through one of these adds to the voltage and hence probability of tunneling through the other junction. Such a space correlation is most markedly pronounced when both of the junctions differ in resistance and hence in tunneling time most widely [1]. Thus, an average tunneling current flowing through the system is determined by the lower-resistance junction. The conditions for electron tunneling in both junctions can be varied by changing the charge on the central electrode externally, e.g., by inducing (or "injecting" through a high resistance (exceeding the quantum one) with the result that a single-electron transistor is obtained. A relation between current I and control voltage V_g with a fixed value of V is called the signal characteristic of a system. Said relation is essentially a periodic one having a period equal to an elementary charge: $I/(Q + e) = I(Q)$.

The theory of correlated single-electron tunneling holds true for junctions having adequately large electrodes whose energy spectrum may particularly be assumed as continuous. Of much interest is the point how characteristics of tunneling junctions change when the dimensions of said junctions are so reduced that space quantizations of energy spectrum becomes substantial. No rigorous theory describing the effect of discreteness of energy spectrum on correlation process of single-electron tunneling through a very small metallic object (e.g., through a metal granule) or through molecule (cluster) has so far been developed.

However, the assessments made [4] demonstrate that when an adequately high quantity of electrons are present on the object, the effect of discreteness of energy spectrum boils down to that under certain conditions the voltage-current characteristic may exhibit, apart from single-electron features, also the presence of a microstructure accounted for by a dimensional effect in space quantization of electron energy.

It is due to the method that a unique electronic device may be provided, operating on the single-electron tunneling mode at room temperature in an artificially created stable molecular structure.

Brief Description of the Drawings

FIG.1a is a plan view of a functional diagram of the tunnel-effect device, according to the method of the invention;

FIG-1b is a side view of FIG.1a, wherein:

- 1 - substrate;
- 2 - clusters and molecules built into a mono- or multi-monomolecular matrix;
- 3 - input electrode;
- 4 - output electrode;
- 5 - N control electrodes;

FIG.2 shows a voltage-current characteristic of the tunnel-effect device; and

FIG.3 presents a signal (control) characteristics of tunnel-effect device with one control electrode (molecular single-electron transistor) at a temperature of 300 K showing the cluster located close to the control electrode.

Best Method of Carrying Out the Invention

According to the proposed method for producing a tunnel-effect device, an ordered molecular structure is formed in a system of planar metal (or semiconductor) electrodes on a substrate, by fixing special molecules and clusters which provide formation of tunneling junctions and single-electron correlated electron tunneling in the device rather than a simple monolayer of inert molecules which forms a dielectric interlayer, i.e., a tunneling barrier.

Accordingly, when such molecules and clusters are fixed using the known Langmuir technique, a combined multicomponent layer is established on a water surface, said layer being constituted by amphiphilic molecules or clusters establishing single-electron tunneling junctions, whereupon the resultant multicomponent monomolecular layer is transferred from the water surface onto the substrate surface.

A method for establishing an ordered molecular structure satisfying the conditions of a single-electron correlated tunneling consists in the following: a

combined layer of molecules and clusters 2 is deposited on a substrate 1 with prepared metal electrodes 3, 4, and 5, using a chemical adsorption or Langmuir-Blodgett technique.

Organo-metallic clusters possess a set of properties unique for establishing molecular single-electron circuits for correlated tunnel transport, that is, the cluster nucleus consisting of but a few metal atoms has an electronic structure allowing of the presence of a variable number of additional electrons which, however, do not affect the atomic structure of the cluster. Typical of the nucleus is the presence of closely positioned free electron levels, whereby a tunneling electron is enabled to rapidly pass, at a high temperature, from one level to another for a time shorter than an average time of electron tunneling onto the cluster nucleus. As a result, there is no quantum limitations of arrangement of a next tunneling electron, a feature that basically distinguishes the situation from resonance tunneling and is inherent just in systems considered in the theory of single-electron tunneling. It is worth emphasizing that the temperature in clusters having but a few metal electrons in their nucleus, at which the effects of electron quantizing as to the levels of electron structure of the nucleus become substantial, is much lower than the working temperature of a single-electron device.

An organic shell of a cluster is in fact a fixed tunneling barrier whose properties are independent of the presence of a tunneling electron. Characteristic dimensions of the cluster shell provide high tunneling penetrability and hence short tunneling time. In addition, tunneling resistance of a barrier is substantially higher than the quantum one ($\sim 6.5 \text{ k}\Omega$), which is a fundamental requirement imposed by the theory of single-electron correlated tunneling.

There exists a wide selection of types of organo-metallic clusters featuring diverse combinations of types of the shell and nucleus, which makes it possible to vary both the parameters of the tunneling structure (i.e., effective capacitance and conductance) and merely chemical properties of cluster shell which are important for its physicochemical fixing in a specific system, that is, the tunnel-effect device. Besides, operation in the mode of

single-electron correlated tunneling is also possible in a system of other active molecules and clusters (other than organo-metallic) possessing the appreciate physicochemical properties, e.g., carboran, fulleren, etc. which can also be used for making the device.

Two principal problems are to be solved when producing a single-electron tunnel-effect device:

- Selecting adequately sizable active-molecules or cluster possessing such properties that provide a single-electron transport of electrons;
- Forming on a substrate an ordered structure from such molecules and clusters.

It is mainly due to its stability that a carboran cluster has been selected among a wide variety of the heretofore-known clusters. The carboran cluster having a characteristic size of about 15 Å, hence a substrate whereon said cluster is to be arranged should feature a characteristic surface irregularity much less than 15 Å. It is necessary that the cluster is held to the substrate stably; besides, the substrate should be electrically conducting. The aforementioned requirements are met by substrates made of highly oriented pyrolytic graphite due to their having adequately high conductance and a characteristic surface irregularity of about 1 Å, with the graphite lattice spacing equal to 2.46 Å.

To attain a reliable holding of molecules to the substrate use is made of the Langmuir-Blodgett technique. The Langmuir-Blodgett films are in effects single- or multilayer coatings constituted by amphiphilic molecules on a solid substrate, prepared by transferring one strictly monomolecular layer of molecules after another when the substrate passes through the surface of a water phase coated with a monolayer.

The structure of the molecular component of the present device is as follows: a combined film of stearic acid with carboran clusters incorporated therein is applied to an atomically smooth surface of pyrolytic graphite, using the LB technique, said film featuring the molecules of the clusters fixed on the substrate with the matrix of the stearic acid.

As far as the use of the effect of correlated electron tunneling for constructing nanoelectronics circuitry is concerned, of much importance is

the problem of a possibility of controlling the tunneling current in such a double-junction structure, using an independent signal.

The following pattern is selected for constructing a single-electron transistor: a substrate-supported cluster is positioned near a control electrode insulated from the substrate, said electrode establishing a charge on the cluster by virtue of the field effect. Numerical assessment of the mutual capacitance of such electrode and cluster demonstrates that its value necessary for constructing said single-electron transistor can be attained when the spacing between the electrode and the cluster is not in excess of 100 nm. A voltage of the order of a few volts should be applied to the electrode in this case.

Actually, such a structure appears as a double-layer (dielectric - conductor) system of fine stripes evaporation-deposited upon the substrate which is made of a highly oriented pyrolytic graphite having a surface finish in a scale of the order of one hundred nanometers equaling the size of one cell of the graphite crystal lattice (2.46 Å). Used as the dielectric is Al_2O_3 and as the conductor, Au.

The system of such electrodes is prepared with the aid of the techniques of modern nanolithography. The configuration at the electrodes appears as a "comb" of a number (of the order of a hundred) of long narrow stripes. The interstripe spacing should be small enough so that the probability of a cluster to be near a stripe be adequately high. On the other hand, said spacing should be so large (of the order of a few hundreds of nanometers) that the needle of a scanning tunnel microscope may scan the surface. As a result of a compromise between these and other technological conditions the spacing between the neighboring electrodes is selected to be about 400 nm, the electrode width measuring alike.

The herein-proposed method for preparing a single-electron tunnel-effect device uses the developed technology of reliable fixing the clusters and molecules on the surface of a solid-state substrate. The gist of the adopted technology consists in incorporating the tunnel-active clusters and molecules into the matrix of Langmuir's film based on amphiphilic substances (e.g., stearic acid). The proposed technology provides for obtaining a monolayer of

cluster molecules. The technology is based on research of the physicochemical properties multicomponent Langmuir's films containing nanoparticles. The matrix of the Langmuir's monolayer of a polymerized amphiphilic substance fixes reliably active clusters and molecules, thus preventing them from motion under the effect of an electric field of electrodes. For more reliable fixing of active clusters and molecules they are to be mixed with amphiphilic substances, e.g., stearic acid in such a ratio that each cluster and molecule be surrounded completely with the stearic acid molecules.

At present, it is the scanning tunnel microscopy and spectroscopy technique that proves to be the sole technique of registering the characteristics of lone structures having such minute dimensions, said technique making possible observation and studying the objects with atomic resolution.

For the purpose of demonstrating the functional capabilities of the proposed tunnel-effect device use is made of the scanning tunnel microscopy and spectroscopy (STS) technique. Use of a scanning tunnel microscope (STM) enables one to measure the characteristics of single-electron systems having arbitrarily small (down to the atom's) dimensions.

The construction of a scanning tunnel microscope is instrumental in obtaining a three-dimensional pattern representing the surface relief, and also make it possible to connect the desired objects to the needle-substrate circuit.

The direct-current mode is used for measurements. In said mode a direct tunneling current is maintained, while the respective position of the needle over the surface is maintained and fixed with the aid of a feedback circuit.

For constructing the proposed tunnel-effect device use is made of metal-containing carboran clusters measuring about 20 Å. Use of such clusters as an active element enables one to observe single-electron phenomena in such a system at a temperature of liquid nitrogen (about 77 K) and at room temperature (about 300 K) (FIG.2).

The "needle - cluster nucleus" and "cluster nucleus - substrate" junctions serve as the tunneling junctions in the single-electron STM-based transistor under construction. The charge Q_0 induced onto the cluster, using the field effect upon applying a voltage to the control electrode 3 (FIG.1), modifies the conditions for current flowing through the system and functions as the control.

Clusters and cluster molecules differ from other organic and inorganic molecules in that they consist of a dense heavy nucleus featuring a symmetry, as a rule, approximating the spherical one, and surrounded with a ligand shell of light atoms or elementary molecules. A specific feature of the electronic structure of cluster molecules, i.e., the presence of a dense network of closely spaced highest occupied molecular orbitals and the respective lowest unoccupied molecular orbitals (both of them being as a rule weakly bonding), is responsible, on the one hand, for appearance in clusters multiple single-electron reversible junctions and, on the other hand, it imparts an adequate stability to the core of cluster molecules after adding or removing an electron.

According to the present invention, used as the active elements of proposed tunnel-effect device which establish therein tunneling barriers and interbarrier space (the regions where tunneling electrons are localized) are the appropriate molecules and clusters (in particular, metal-containing molecular clusters) having the required characteristic dimensions (below 100 Å) and capable of exhibiting the effect of Coulomb blocking of electron tunneling on an ordered structure of such molecules and clusters, without imposing any definite limitations upon the structure of the energy spectrum of electrons in such molecules and clusters. These molecules and clusters (a single molecule as a particular case), on which tunneling electrons are localized, are arranged in appropriately ordered manner in the space confined between the metal (or semiconductor) input, output, and control electrodes FIG.1). In this case tunnel current flows on the input electrode 1 and the output electrode 2, while the control electrodes 3 provide for an efficient control over the tunnel current of electrons (FIG.3), with the result that when the voltage on the control electrode 3 changes steadily, a periodic

unsteady change in tunneling current is noticed. When the proposed device is used for preparing diverse sensors, tunneling current varies under some external effects, such as electromagnetic fields, interaction between the environmental components and the active region of the device (i.e., single-electron tunneling junctions). Spatial ordered stabilization of active molecules on which tunneling electrons are localized, is provided due to an ordered arrangement of said molecules in the matrix of chemically inert substance, or by virtue of chemical bonds with the components of the device.

The proposed method is carried into effect as follows.

Use is made of the Langmuir-Blodgett technique for preparing a monomolecular layer of lone clusters fixed in an inert molecular matrix. The aforementioned technique is instrumental in establishing on the liquid phase surface monomolecular films of substance of a definite class, and in transferring said films onto a solid substrate.

In order to produce combined Langmuir's monolayers containing carboran clusters and stearic acid, there are prepared solutions of the cluster and of stearic acid in tetrahydrofuran, having a concentration of 10^{-3} M. Then both of the solutions are used for preparing therefrom solutions, containing stearic acid and carboran clusters in the following ratios: 1:32; 1:20; 1:16; 1:12; 1:8; 1:4, 1:1, 2:1; 4:1; 8:1; 12:1, 16:1; 20:1; 32:1, respectively. To establish a monolayer, a solution of stearic acid and/or carboran cluster in tetrahydrofuran is applied to the surface of a water subphase (pH = 5.6), the concentration of said solution being 4×10^{-4} M (in terms of a total number of the stearic acid molecules and of clusters). In 5 minutes required for the solvent to evaporate the monolayer is compressed at a rate of $3 \text{ \AA}^2$ per molecule per minute. Before transferring the monolayer from the water surface onto the graphite substrate the monolayer is compressed with a movable barrier till a pressure of 25 mN/cm, whereupon said monolayer is transferred onto a freshly prepared spalled graphite surface at a rate of 0.5 mm/min, using the Scheffer technique, when transferring the monolayer onto the substrate a surface pressure of 25 mN/cm is maintained constant. In order to prepare a monolayer oriented with the hydrophobic tails outwards, the substrate is submerged in water before applying the monolayer to the

water surface. When preparing a monolayer oriented with the hydrophilic tails outwards, once the substrate has been submerged in water completely, the monolayer is compressed to a maximum degree until a collapse occurs, whereupon the monolayer is sucked out with a water pump, and the bath area is increased to a maximum extent, after which the substrate is withdrawn from water.

With a view to elucidating the possibilities and specific feature of building carboran clusters into a Langmuir monolayer based on stearic acid, there have been studied the isotherms of compression of combined monolayers made of stearic acid and carboran clusters on the surface of deionized water ($\text{pH} = 5.6$). Carboran clusters free from stearic acid molecules do not form stable Langmuir monolayers on water surface, and the surface pressure is not in excess of 3 mN/m in response to compression of the carboran "monolayer". When doped with stearic acid molecules (with stearic acid/cluster ratio k being within 0.6 and 12) carboran clusters establish stable amphiphilic monolayers displaying pronounced cooperative properties, i.e., the value P_{max} of surface pressure equals 70 mN/m, whereas that of P_{max} for stearic acid and carboran clusters *per se* equals 55 mN/m and 3 mN/m, respectively.

Thus, stable combined Langmuir monolayers of a pronounced cooperative nature have been prepared by incorporating nonamphiphilic molecules, i.e., carboran clusters into classic Langmuir monolayers of stearic acid.

In this case the active molecules and clusters themselves might not form LB films altogether. That is why use is made of combined LB films of fatty acids with cluster molecules built thereinto, since said acids are well studied and are convenient for application. Thus, the problem of selecting the type of clusters usable in single-electron electronics has been separated from that of fixing the selected clusters on substrate, and both of the problems have been solved. The novelty of the proposed invention resides in that a combined film of a fatty acid and clusters is prepared on water surface, whereupon said film is transferred onto a substrate. With a definite

concentration of cluster molecules in LB film they form their own ordered structure.

When measuring voltage-current characteristics and spectrum (i.e., the analog derivative of voltage-current characteristic with respect to voltage) of a monomolecular layer of stearic acid with clusters incorporated therein, using STM at a temperature of 300 K, some peculiarities of voltage-current characteristics have been found, which agree well with the data of the existing theory of single-electron tunneling. Thereby an experimental evidence has been obtained of a stable reproducible realization of a single-electron tunneling at room temperature in an artificially established stable molecular structure.

Measurements taken at room temperature demonstrate that current flowing through the transistor molecular tunneling structure "STM needle - cluster - substrate" at a fixed working point, depends unsteadily, and moreover, periodically on a steady voltage variation on the control electrode. Thus, there is found compliance of an experimental relationship between tunnel current and control voltage, that is, signal characteristic of a molecular single-electronic transistor, with a theoretical relationship derived from the theory of single-electron electronics. Each period on signal characteristic is explained, in accordance with the "orthodox" theory of single-electron electronics, by a change of the cluster charge by one electron.

Symmetry of the signal characteristic, on the one hand, and the presence of steps in the voltage-current characteristic, on the other hand is explained by the fact that in the double-junction system "STM needle - cluster - substrate" the junctions "STM needle - cluster" and "cluster - substrate" have approximately the same capacitance values but differ widely in the values of their resistance.

According to the method for preparing a tunnel-effect device, an ordered molecular structure is established on a substrate in a system of planar metal (or semiconductor) electrodes, by fixing active molecules and clusters which provide for formation of tunneling junctions and a single-electron correlated electron tunneling in the device rather than a mere

monolayer of inert molecules forming a dielectric interlayer, i.e., tunneling barrier.

Accordingly, when fixing such molecules and clusters, using the known Langmuir technique, a multicomponent combined monomolecular layer is established on water surface, said layer being constituted by inert amphiphilic molecules and active molecules and clusters forming single-electron tunneling junctions, whereupon the thus-formed multicomponent monomolecular layer from water surface onto the surface of the formed substrate.

When using chemical adsorption of molecules on the substrate surface for forming a system of single-electron tunneling junctions, active molecules and clusters should contain the corresponding chemical groups which bond said molecules and clusters with the substrate surface. Further on a chemical reaction of bonding the corresponding molecules and clusters with the substrate. Building of active molecules and clusters into the preformed molecular layer of inert molecules is also possible.

Once the mono- or multilayer molecular structures have been established, using the Langmuir-Blodgett technique or chemical adsorption procedure, the resultant molecular structures are made to polymerize with a view to increasing their stability and resistance to external effects.

Use of active molecules and clusters forming single-electron tunneling junctions, as the molecules establishing an ordered molecular structure on the surface of a solid-state substrate in a system of planar electrodes makes it possible to provide a novel useful property of the proposed device, that is, its functioning on the base of an single-electron correlated electron tunneling.

The herein-proposed tunnel-effect device is distinguished for the following advantages: the active elements of the device (molecules and clusters) have strictly fixed and identical structure (atomic composition) and hence dimensions. This provides for identity of the active elements of the device and accordingly, reproducibility of their functional parameters and the same response to a definite external effect.

Industrial Applicability

The proposed tunnel-effect device is instrumental in developing digital and analog devices based on both the traditional concepts of circuitry construction and the quite new concepts of information coding, wherein individual electrons function as information carrying medium.

Active elements of the device (active molecules and clusters) are featured by extremely small dimensions (e.g., the molecule of a carboran cluster measures about 20 Å), which opens prospects for substantial miniaturization of single-electron devices developed with the use of said elements.

It is due to the use of molecules and clusters having nanometer dimensions as the active elements of the device that the characteristic dimensions of the active regions (single-electron tunneling junctions) of the device become small enough to provide a controlled single-electron correlated tunneling at relatively high (room) temperatures, and that an extremely high sensitivity of the device is attained at those temperatures towards changes in the charge on the active elements of the device ($\sim 10^{-5} e/\text{Hz}^{1/2}$).

As distinct from the known tunnel-effect device functioning on the base of resonance tunneling, the proposed tunnel-effect device operates on the base of controlled single-electron correlated electron tunneling in a system of molecules or clusters having an arbitrary energy spectrum of electrons rather than resonance tunneling between quantum-mechanical wells with discrete energy levels. That is why no definite restrictions are imposed in the proposed device upon the structure of energy spectrum of electrons in molecules and clusters which establish single-electron tunnel junctions therein. As to the speed of response the proposed device is not inferior to the prototype, i.e., the device functioning on the effect of resonance tunneling. Energy release during electron tunneling in the proposed device is lower than in the known tunnel-effect devices. As distinct from the prototype, wherein no direct association is provided between the tunneling processes and the current measured on the outputs electrode, the tunneling current is directly registered in the proposed device.

Used as active elements in the proposed device are molecules or clusters (metal-containing ones inclusive) rather than semiconductor islands as in the prototype.

The herein-proposed tunnel-effect device functions on the base of controlled single-electron correlated electron tunneling. The phenomenon of single-electron correlated electron tunneling was theoretically predicted and described, and afterwards demonstrated experimentally. Possibility of controlling such tunneling current opens the way to constructing various electronic circuits on the base of single-electron tunneling junctions and hence to preparing single-electron analog and digital devices. Preparing such devices is very promising and important for further development of microelectronics engineering, since they operate on a new principle of information coding, consisting in that individual, electrons perform the function of information carriers. Thus, such devices are featured by rather high speed characteristics. Theoretical assessment of the speed response corresponding to the dimensional parameters of the proposed device gives the value of $\sim 3 \times 10^{-14}$ s, as well as the value of energy release during the process of a single-electron transfer equal to $\sim 10^{-24}$ J. The principal concepts of constructing the circuitry analog and digital devices on the basis of controlled single-electron tunneling are at present developed theoretically, though single-electron devices developed on the principle of the traditional solid-state planar technology are operable only at extremely low temperatures (< 1 K). It follows from theory that in order that a single-electron device functions at room temperature, the characteristic dimensions of its active regions (that is, single-electron tunneling junction) should be below 100 Å. However, the heretofore-known solid-state microelectronics technologies cannot at present (and probably in the nearest future) develop such devices reproducibly.

The method for making tunnel-effect devices having its active region measuring below 100 Å initiated the development of devices of a new class, i.e., nanoelectronics. The effect of discrete tunneling of individual current carriers through tunneling barriers at room temperature used in the tunnel-effect device may also be applied in a single-electron transistor and used for

constructing single-electron gate circuits, wherein logical "1" and "0" are identified with the presence or absence of an electron.

The effect of discrete single-electron tunneling used in tunnel-effect devices prepared by the proposed method allows of creating a quite number of analog and digital devices featuring different degrees of integration and very high performance characteristics.

The greatest prospects are offered in the development of very large-scale integrated circuits, wherein said devices can provide a combination of extremely low energy dissipation, very low dimensions of the devices themselves, and high speed characteristics, as well as in the development of new high-sensitivity sensors.

CLAIMS

1. A tunnel-effect device, comprising an input, an output, and a control electrode separated with tunnel barriers, CHARACTERIZED in that N control electrodes are therein incorporated, the tunnel barriers and the interbarrier space appear as an ordered structure of molecules and clusters forming tunneling junctions which provide for single-electron correlated electron tunneling in the device, each of the control electrodes being located in the region of the ordered structure of molecules and clusters.

2. A tunnel-effect device as set forth in claim 1, CHARACTERIZED in that the input, output, and control electrodes are located on the surface of a solid-state substrate.

3. A tunnel-effect device as set forth in claim 1, CHARACTERIZED in that the input electrode and K control electrodes, where $K < N$, are located on the surface of the solid-state substrate, and $N - K$ control electrodes and the output electrode are situated in the region of the ordered structure of molecules and clusters off the surface of the solid-state substrate.

4. A tunnel-effect device as set forth in claims 1, 2, CHARACTERIZED in that the substrate is made of graphite.

5. A tunnel-effect device as set forth in claims 1, 2, CHARACTERIZED in that the input, output, and control electrodes are made of gold.

constructing single-electron gate circuits, wherein logical "1" and "0" are identified with the presence or absence of an electron.

The effect of discrete single-electron tunneling used in tunnel-effect devices prepared by the proposed method allows of creating a quite number of analog and digital devices featuring different degrees of integration and very high performance characteristics.

The greatest prospects are offered in the development of very large-scale integrated circuits, wherein said devices can provide a combination of extremely low energy dissipation, very low dimensions of the devices themselves, and high speed characteristics, as well as in the development of new high-sensitivity sensors.

CLAIMS

1. A tunnel-effect device, comprising an input, an output, and a control electrode separated with tunnel barriers, CHARACTERIZED in that N control electrodes are therein incorporated, the tunnel barriers and the interbarrier space appear as an ordered structure of molecules and clusters forming tunneling junctions which provide for single-electron correlated electron tunneling in the device, each of the control electrodes being located in the region of the ordered structure of molecules and clusters.

2. A tunnel-effect device as set forth in claim 1, CHARACTERIZED in that the input, output, and control electrodes are located on the surface of a solid-state substrate.

3. A tunnel-effect device as set forth in claim 1, CHARACTERIZED in that the input electrode and K control electrodes, where $K < N$, are located on the surface of the solid-state substrate, and $N - K$ control electrodes and the output electrode are situated in the region of the ordered structure of molecules and clusters off the surface of the solid-state substrate.

4. A tunnel-effect device as set forth in claims 1, 2, CHARACTERIZED in that the substrate is made of graphite.

5. A tunnel-effect device as set forth in claims 1, 2, CHARACTERIZED in that the input, output, and control electrodes are made of gold.



6. A method for preparing the tunnel-effect device as set forth in claims 1 through 5, consisting in establishing an input, an output, and a control electrode on the surface of atomically smooth solid-state substrate, followed by formation of a monomolecular or multi-monomolecular film, CHARACTERIZED in that the monomolecular or multi-monomolecular film appears as an inert dielectric molecular matrix with fixedly built-in active molecules and clusters which are the localization centers of the tunneling electrons and establish single-electron tunneling junctions, $N-1$ control electrodes being additionally formed on the surface of the atomically smooth solid-state substrate.

7. A method for preparing the tunnel-effect device as set forth in claim 6, CHARACTERIZED in that the inert dielectric molecular matrix with the active molecules and clusters built therein is established using the Langmuir-Blodgett technique.

8. A method for preparing the tunnel-effect device as set forth in claims 6, 7, CHARACTERIZED in that used for establishing inert dielectric molecular matrix are molecules containing polymerizable chemical groups.

9. A method for preparing the tunnel-effect device as set forth in claim 6, 7, 8, CHARACTERIZED in that formation of the inert dielectric molecular matrix with fixedly built-in active molecules and clusters which are the localization centers of the tunneling electrons and establish single-electron tunneling junctions is followed by additional polymerization of the molecular structure.

10. A method for preparing the tunnel-effect device as set forth in claim 6, CHARACTERIZED in that the inert dielectric molecular matrix with fixedly built-in active molecules and clusters is established by the chemical adsorption technique.

11. A method for preparing the tunnel-effect device as set forth in claim 6, 10, CHARACTERIZED in that used for establishing the inert dielectric molecular matrix are molecules containing polymerizable chemical groups.

12. A method for preparing the tunnel-effect device as set forth in claim 6, 10, 11, CHARACTERIZED in that formation of the inert dielectric



molecular matrix with fixedly built-in active molecules and clusters which are the localization centers of the tunneling electrons and establish single-electron tunneling junctions is followed by additional polymerization of the molecular structure.

TUNNEL-EFFECT DEVICE AND A METHOD FOR PREPARING SAME

Abstract

The tunnel-effect device comprises an input electrode 3, an output electrode 4, and N control electrodes 5 separated with tunneling barriers, the latter barriers and the interbarrier space therein appear as an ordered structure of molecules and clusters establishing tunneling junctions; each control electrode 5 is located in the region of the ordered structure of molecules and cluster 2. The dimensions and properties of the molecules and clusters provide for single-electron correlated electron tunneling at a relatively high (room) temperature.

The tunnel-effect device functions on the base of controlled correlated electron tunneling. Possibility of controlling the tunneling current opens the way to constructing various electronic gate circuits on the base of single-electron tunneling junctions and hence to preparing single-electron analog and digital devices, in particular, high-sensitivity sensors.

The method for preparing the tunnel-effect device consist in establishing on the surface of a solid-state substrate an input electrode, an output electrode, and control electrodes, followed by formation of an inert dielectric molecular matrix with orderly built-in active molecules and clusters which are the localization centers of the tunneling electrons and thus establish single-electron tunneling junctions.

The effect of discrete tunneling of individual current carriers through tunneling barriers at room temperature used in the tunnel-effect device may also be applied in a single-electron transistor and used for constructing single-electron gate circuits, wherein logical "1" and "0" are identified with the presence or absence of an electron.



molecular matrix with fixedly built-in active molecules and clusters which are the localization centers of the tunneling electrons and establish single-electron tunneling junctions is followed by additional polymerization of the molecular structure.

TUNNEL-EFFECT DEVICE AND A METHOD FOR PREPARING SAME

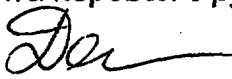
Abstract

The tunnel-effect device comprises an input electrode 3, an output electrode 4, and N control electrodes 5 separated with tunneling barriers, the latter barriers and the interbarrier space therein appear as an ordered structure of molecules and clusters establishing tunneling junctions; each control electrode 5 is located in the region of the ordered structure of molecules and cluster 2. The dimensions and properties of the molecules and clusters provide for single-electron correlated electron tunneling at a relatively high (room) temperature.

The tunnel-effect device functions on the base of controlled correlated electron tunneling. Possibility of controlling the tunneling current opens the way to constructing various electronic gate circuits on the base of single-electron tunneling junctions and hence to preparing single-electron analog and digital devices, in particular, high-sensitivity sensors.

The method for preparing the tunnel-effect device consist in establishing on the surface of a solid-state substrate an input electrode, an output electrode, and control electrodes, followed by formation of an inert dielectric molecular matrix with orderly built-in active molecules and clusters which are the localization centers of the tunneling electrons and thus establish single-electron tunneling junctions.

The effect of discrete tunneling of individual current carriers through tunneling barriers at room temperature used in the tunnel-effect device may also be applied in a single-electron transistor and used for constructing single-electron gate circuits, wherein logical "1" and "0" are identified with the presence or absence of an electron.

Текст данного документа перевел с русского языка на английский язык
переводчик  Денисова Галина Станиславовна.

город Москва, восьмого января тысяча девятьсот девяносто восьмого года
Я, Корнеева Наталья Васильевна, нотариус города Москвы, свидетельствую
подлинность подписи, сделанной лично мне известным переводчиком Денисовой
Галиной Станиславовной.

Зарегистрировано в реестре под № *5-98*

Взыскано по тарифу *30,00* руб.

Нотариус Н.В. Корнеева.



PCT

ВСЕМИРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
Международное бюро

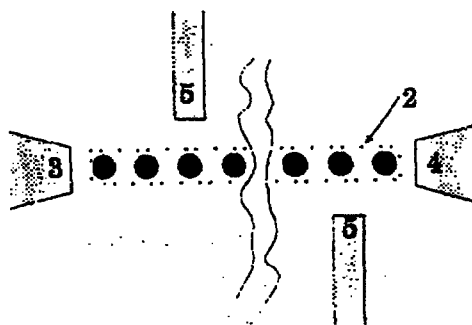


МЕЖДУНАРОДНАЯ ЗАЯВКА, ОПУБЛИКОВАННАЯ В СООТВЕТСТВИИ
С ДОГОВОРом О ПАТЕНТНОЙ КООПЕРАЦИИ (РСТ)

(51) Международная классификация изобретения: H01L 29/86	A1	(11) Номер международной публикации: WO 97/36333 (43) Дата международной публикации: 2 октября 1997 (02.10.97)
(21) Номер международной заявки: PCT/RU97/00082 (22) Дата международной подачи: 25 марта 1997 (25.03.97) (30) Данные о приоритете: 96105544 26 марта 1996 (26.03.96) RU 96112308 21 июня 1996 (21.06.96) RU (71) Заявитель (для всех указанных государств, кроме US): САМСУНГ ЭЛЕКТРОНИКС КО. ЛТД. (KR/KR); 416, Maetan-3 dong, Paldal-ku, Suwon City, Gyungki-do [SAMSUNG ELECTRONICS CO., LTD, Gyungki-do (KR)]. (71)(72) Заявители и изобретатели: ГУБИН Сергей Павлович [RU/RU]; 117071 Москва, Ленинский пр., д. 13, кв. 145 (RU) [GUBIN, Sergei Pavlovich, Moscow (RU)]. КОЛЕСОВ Владимир Владимирович [RU/RU]; 117334 Москва, Ленинский пр., д. 32, кв. 296 (RU) [KOLESOV, Vladimir Vladimirovich, Moscow (RU)]. СОЛДАТОВ Евгений Сергеевич [RU/RU]; 117593 Москва, Соловьиный пр., д. 4, корп. 1, кв. 136 (RU) [SOLDATOV, Evgeny Sergeevich, Moscow (RU)]. ТРИФОНОВ Артём Сергеевич [RU/RU]; 121309 Москва, В.Филёвская ул., д. 27, корп. 1, кв. 2 (RU) [TRIFONOV, Artem Sergeevich, Moscow (RU)]. ХАНИН Владимир Викторович [RU/RU]; 242142 Московская обл., г. Пушкино, микрорайон АБ, д. 21,		кв. 7 (RU) [KHANIN, Vladimir Viktorovich, Puschino (RU)]. ХОМУТОВ Геннадий Борисович [RU/RU]; 117393 Москва, ул. Пилогина, д. 12, корп. 1, кв. 251 (RU) [KHOMUTOV, Gennady Borisovich, Moscow (RU)]. ЯКОВЕНКО Сергей Александрович [RU/RU]; 115446 Москва, ул. Академика Миллионщикова, д. 16, кв. 149 (RU) [YAKOVENKO, Sergei Alexandrovich, Moscow (RU)]. (74) Агент: АНДРУЩАК Галина Николаевна; 125167 Москва, Ленинградский пр., д. 37/9, Отель «Аэростар», офис 211 (RU) [ANDRUSCHAK, Galina Nikolaevna, Moscow (RU)]. (81) Указанные государства: AL, AT, AU, BA, BB, BG, BR, CA, CH, CN, CU, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, GB, GE, HU, IL, IS, JP, KP, KR, LC, LK, LR, LT, LU, LV, MG, MK, MN, MX, NO, NZ, PL, PT, RO, SE, SG, SI, SK, TR, TT, UA, US, UZ, VN, евразийский патент (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), европейский патент (AT, BE, CH, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE), патент АРИПО (KE, LS, MW, SD, SZ, UG), патент ОАПИ (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, ML, MR, NE, SN, TD, TG). Опубликована С отчетом о международном поиске. До истечения срока для изменения формулы изобретения и с повторной публикацией в случае получения изменений.

(54) Title: TUNNELLING DEVICE AND METHOD OF PRODUCING A TUNNELLING DEVICE

(54) Название изобретения: ТУННЕЛЬНЫЙ ПРИБОР И СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТУННЕЛЬНОГО ПРИБОРА



(57) Abstract

The tunnelling device comprises input (3), output (4) and control (N) electrodes separated by tunnel barriers; the tunnel barriers and inter-barrier spaces take the form of a sequenced structure of molecules and clusters forming tunnel junctions, and each control electrode (5) is disposed in the region of the sequenced structure of molecules and clusters (2). The dimensions and characteristics of these molecules and clusters ensure single-electron correlated tunnelling of electrons in the device at relatively high (room) temperatures. The tunnelling device is based on the principle of controllable correlated electron tunnelling. The ability to control tunnel current opens up the possibility of constructing different electronic logical circuits based on single-electron tunnelling junctions and creating single-electron analogue and digital devices, in particular highly sensitive sensors. The method for manufacturing the tunnelling device is as follows: input, output and control electrodes are formed on the surface of a solid-state substrate, an inert dielectric molecular matrix is then formed incorporating sequences of active molecules and clusters which act as localisation centres for tunnelling electrons and thus form single-electron tunnel junctions. The discrete tunnelling effect of single current carriers through the tunnel barriers at room temperature achieved in this tunnelling device can be used in a single-electron transistor and in the construction of single-electron logical circuits in which logical "1" and "0" is identified with the absence or presence of a single electron.

Туннельный прибор и способ изготовления туннельного прибора

Туннельный прибор содержит входной 3, выходной 4 и N управляющих электродов 5, разделенными туннельными барьерами, туннельные барьеры и межбарьерное пространство в нем выполнены в виде упорядоченной структуры из молекул и кластеров, формирующих туннельные переходы, причем каждый управляющий электрод 5 расположен в области упорядоченной структуры из молекул и кластеров 2. Размеры и свойства указанных молекул и кластеров обеспечивают одноэлектронное коррелированное туннелирование электронов в приборе при относительно высоких (комнатных) температурах.

Туннельный прибор функционирует на основе управляемого коррелированного туннелирования электронов. Возможность реализации управления туннельным током открывает возможности построения различных электронных логических схем на основе одноэлектронных туннельных переходов и создания одноэлектронных аналоговых и цифровых устройств, в частности, высокочувствительных сенсоров.

Способ изготовления туннельного прибора заключается в формировании на поверхности твердотельной подложки входного, выходного и управляющих электродов с последующим формированием инертной диэлектрической молекулярной матрицы с упорядоченно встроенными в нее активными молекулами и кластерами, являющимися центрами локализации туннелирующих электронов и, таким образом, формирующих одноэлектронные туннельные переходы.

Эффект дискретного туннелирования одиночных носителей тока сквозь туннельные барьеры при комнатной температуре, реализуемый в туннельном приборе, может быть использован как в одноэлектронном транзисторе, так и для построения одноэлектронных логических схем, в которых логические "1" и "0" отождествляются с отсутствием или присутствием одного электрона.

ИСКЛЮЧИТЕЛЬНО ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИИ

Коды, используемые для обозначения стран-членов РСТ на титульных листах брошюр, в которых публикуются международные заявки в соответствии с РСТ.

AT	Австрия	FI	Финляндия	MR	Мавритания
AU	Австралия	FR	Франция	MW	Малави
BB	Барбадос	GA	Габон	NE	Нигер
BE	Бельгия	GB	Великобритания	NL	Нидерланды
BF	Буркина Фасо	GN	Гвинея	NO	Норвегия
BG	Болгария	GR	Греция	NZ	Новая Зеландия
BJ	Бенин	HU	Венгрия	PL	Польша
BR	Бразилия	IE	Ирландия	PT	Португалия
CA	Канада	IT	Италия	RO	Румыния
CF	Центральноафриканская Республика	JP	Япония	RU	Российская Федерация
BY	Беларусь	KR	Корейская Народно-Демократическая Республика	SD	Судан
CG	Конго	KZ	Корейская Республика	SE	Швеция
CH	Швейцария	LI	Лихтенштейн	SI	Словения
CI	Кот д'Ивуар	LK	Шри-Ланка	SK	Словакия
CM	Камерун	LU	Люксембург	SN	Сенегал
CN	Китай	LV	Латвия	TD	Чад
CS	Чехословакия	MC	Монако	TG	Того
CZ	Чешская Республика	MG	Малагаскар	UA	Украина
DE	Германия	ML	Мали	US	Соединенные Штаты Америки
DK	Дания	MN	Монголия	UZ	Узбекистан
ES	Испания			VN	Вьетнам