

Одномолекулярные аналоги электронных компонентов

Часть 2. Одномолекулярные аналоги классических электронных компонентов

Виктор Алексеев

Экспериментальные и теоретические исследования, проведённые в ведущих научных центрах мира за последние десятилетия, показали, что механизм переноса зарядов через отдельные органические молекулы существенно отличается от транспорта электронов в традиционных кристаллических полупроводниках. Результаты этих работ показали, что модель прохождения заряда через единичную молекулу определяется многими параметрами, такими, например, как структура рабочей молекулы, конструкция одномолекулярного устройства, величины приложенного напряжения и напряжения смещения, температура, давление, влажность, внешнее электромагнитное поле. Полученные экспериментальные зависимости напоминали характеристики традиционных полупроводниковых компонентов. Поэтому авторы экспериментов называли свои конструкции по аналогии с классической электротехникой: то одноэлектронный транзистор, то одноэлектронный выпрямитель, то одноэлектронный диод и т.д. В настоящее время нет ни устоявшихся названий, ни каких-либо стандартов для этих устройств. Поэтому у специалистов могут возникнуть вопросы по поводу терминов, употребляемых в этой статье. Эти претензии вполне справедливы, и автор с ними согласен. Именно поэтому в статье вместо слов «single molecule transistor» и «single molecule rectifier» употребляется более общий термин «single molecule device» – SMD.

Одноэлектронные аналоги молекулярных резисторов и переключателей

Теоретические и лабораторные исследования возможностей использования проводимости органических молекул для создания одномолекулярных полупроводниковых устройств были начаты почти пятьдесят лет назад.

За прошедшие с тех пор годы были разработаны теоретические модели и технологии изготовления элементов молекулярной электроники, которые послужили основой создания целого ряда реально функционирующих лабораторных образцов одноэлектронных молекулярных компонентов.

Серьёзным достижением, имеющим практическое значение, стало открытие эффекта скачкообразного изменения проводимости молекул.

Одно из первых описаний этого явления приведено в работе [1], в которой исследовались закономерности само-

произвольного скачкообразного переключения во времени проводимости одиночных и связанных фениленэтиленовых олигомеров, выделенных в матрицах алкантиолатных монослоев. Было установлено, что период самопроизвольного резкого изменения проводимости может меняться от секунд до десятков часов. Для случаев хорошо упорядоченных несущих матриц скорость переключения встроенных молекул была небольшой. В то же время, когда окружающая матрица была слабо упорядочена, встроенные молекулы переключались чаще. Такой вид неуправляемых самопроизвольных переключений получил название «stochastic switching» – SS. В качестве возможного источника таких скачков проводимости авторы предложили гипотезу вероятных конформационных изменений встроенных молекул. Этот эффект вызвал большой интерес к проблеме, и многие исследователи попытались изучить его более детально.

Всесторонние тщательные исследования показали, что наряду со случайными стохастическими переключениями отдельные типы органических молекул могут переключаться принудительно под воздействием внешних факторов. Так, например, авторы работы [2] описали переключение проводимости определённых органических молекул, которое запускалось напряжением. Этот эффект получил название «voltage-triggered switching» – VTS. В работе были задействованы методы сканирующей туннельной микроскопии (scanning tunnelling microscopy – STM), переход с перекрёстными проводниками (crossed wire junction – CWJ) и магнитный каплевидный переход (magnetic bead junction – MBJ). Эти методы были описаны в первой части статьи. В качестве мишени использовались изолированные молекулы бипиридил-динитроолигофениленэтинилддитиола (bipyridyl-dinitro oligophenyleneethynylene dithiol – BPDN).

Результаты многочисленных измерений, проведённых с использованием разных методик, показали, что этот эффект действительно является внутренним молекулярным явлением, присущим молекуле, и не зависит от экспериментального метода.

Также было установлено, что переключение, запускаемое напряжением (VTS), явно отличается от стохастического переключения (SS), которое, по существу, является переходным процессом, не зависящим от приложенного напряжения.

На рис. 1 показана типичная зависимость тока от приложенного к молекуле BPDN напряжения при использовании методики STM.

В этом эксперименте туннельный ток измеряется при увеличении напряжения смещения в диапазоне от 0 до 2 В (синяя кривая), а затем при уменьшении в обратную сторону до 0 В при выключенной обратной связи (крас-

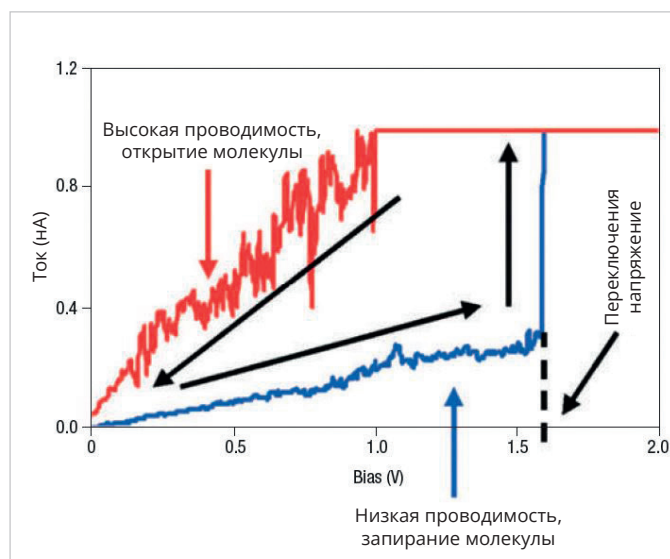


Рис. 1. Зависимость тока от приложенного к молекуле BPDN напряжения при использовании методики STM

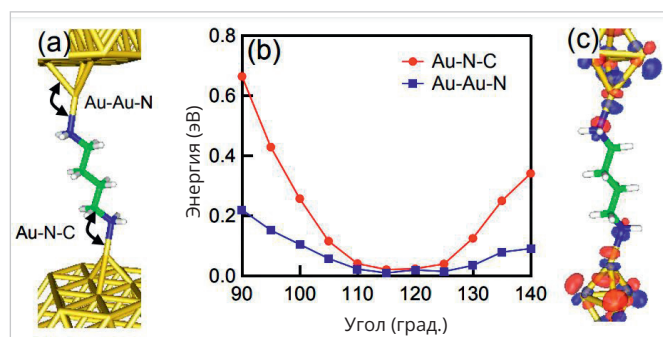


Рис. 2: 1a) пространственное распределение 1,4-бутандиамина в соединении с атомами азота, связывающимися с атомами (adatoms) золота, имеющими недостаточный уровень координации; 1b) результаты моделирования изменения полной энергии в зависимости от угла связи на адатоме с использованием аналога кластера, представляющего адатомы на контактах с кластерами Au5; 1c) уровни граничных орбиталей, соответствующие туннельной проводимости

ная кривая). Эти измерения показывают резкий скачок проводимости при $1,6 \pm 0,3$ В, когда туннельный ток резко возрастает до значения более 1 нА, соответствующего пределу насыщения детектора. Наблюдаемый скачок соответствует 30-кратному увеличению проводимости молекулы. Молекула остаётся в этом состоянии с более высокой проводимостью до тех пор, пока приложенное смещение не приблизится к 0 В. В этот момент молекула снова переключается в состояние с низкой проводимостью. Переключение между состояниями низкой и высокой проводимости было зафиксировано при одном и том же напряжении в пределах указанной погрешности для разных методик и разных образцов BPDN.

Для объяснения явления VTS были предложены четыре основные причины: флуктуации электростатического заряда, конформационные изменения, также углы и разрывы молекулярных связей. Эти варианты были изучены в последовавших вслед за этой работами.

В статье [3] приведены результаты экспериментов и модельных расчётов зависимости проводимости от направления химических связей органических молекул. Значение проводимости может изменяться в зависимости от угла, образованного направлениями химических (ковалентных) связей, исходящих из атома (Au-N-C, Au-Au-N). В этих экспериментах использовались молекулы 1,4-бутандиамина, снабжённые выводными контактами из кластеров золота Au₂₇, 28.

Экспериментальные результаты сравнивались с модельными расчётами, выполненными с помощью «теории функционала плотности» DFT.

Следует отметить, что, в отличие от большинства кластеров металлов, образующих шарообразную форму вокруг центрального атома, золотые кластеры могут иметь пирамидальную форму с одним верхним атомом. Структура такого соединения приведена на рис. 2а. Как видно из рис. 2b, затраты энергии на изменение угла Au-N-C на ± 15 градусов составляют около 0,2 эВ (с учётом вклада обоих контактов). Интересно то, что угол Au-Au-N имеет гораздо более мягкую степень свободы, особенно в сторону широкого угла. При этом затраты энергии на осевое вращение не превышают 0,1 эВ.

На рис. 2c показаны уровни граничных электронных состояний 1,1-бутандиамина, определяющие туннельную проводимость.

Проведённые расчёты показали, что проводимость пропорциональна квадрату расщепления соответствующих граничных орбитальных энергий в кластерных аналогах туннельного перехода.

Анализ этой модели для ряда алканов с 2, 4, 6 и 8 метиленовыми звеньями с диаминами, связанными с адатомами Au, даёт константу туннельного затухания β , равную 0,94 (метилен). При этом изменение туннельной проводимости пропорционально конструктивным особенностям контактов.

Кроме того, важным является то, что с помощью добавок стерического объёма к азотному центру можно регулировать проводимость молекулярной проволоки. Таким образом можно синтезировать концевые группы (молекула/металл) с заданным электрическим сопротивлением.

Аналогичные по структуре исследования провела объединённая группа химиков, физиков и инженеров из университетов Австрии, Швейцарии и IBM. Их работа была посвящена особенностям переноса заряда через металлоорганические молекулы, содержащие центры Fe, Ru и Mo [4].

В этой работе измерялись параметры комплексов органических молекул, содержащих металлические центры железа, рутения и молибдена. Основное внимание в этом исследовании было уделено вопросам переноса заряда через отдельные молекулы, содержащие редокс-активные металлические центры (redox-active metal centres). Было установлено, что окисление/восстановление металлоорганических соединений, содержащих центры Fe, Ru или Mo, может запускаться постоянным напряжением, приложенным к молекулярному мостику. При этом молекулы всех комплексов, содержащих указанные металлы, продемонстрировали выраженный гистерезис, зависящий от напряжения смещения. Однако эффект переключения проводимости наиболее сильно выражался в случае комплекса, содержащего молекулу, модифицированную молибденом. В этом случае отношение тока высокой проводимости к току низкой проводимости было больше чем на три порядка, при напряжении смещения

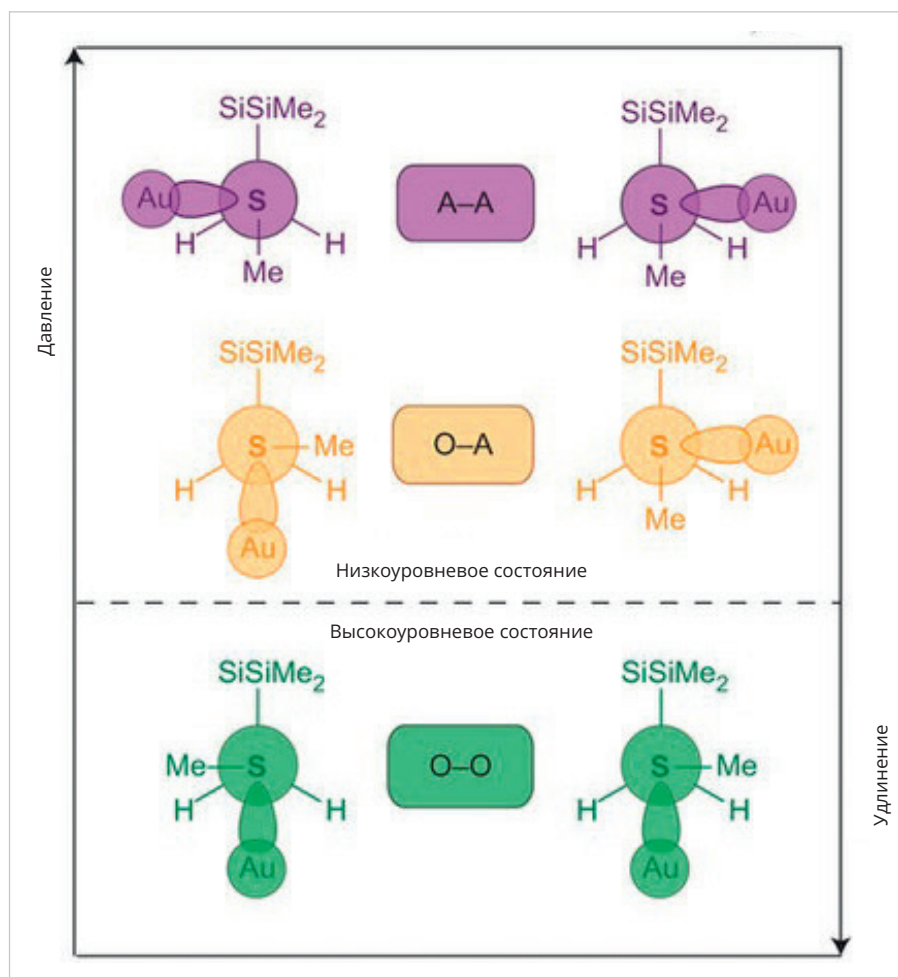


Рис. 3. Схематическое изображение структуры трёх конформационных состояний (A-A, O-A и O-O) молекулы $\text{Me-S-CH}_2\text{-SiMe}_3$

в районе одного вольта. Экспериментальные результаты проверялись с помощью модели (Density functional theory – DFT), которая представляет собой упрощённый метод расчёта электронной структуры систем многих частиц в квантовой физике и квантовой химии. Основное приближение метода DFT заключается в том, что твёрдое тело рассматривается как система, состоящая из большого числа одинаково взаимодействующих между собой электронов, удерживаемых вместе решёткой из атомных ядер. При этом вводится понятие «электронной плотности в основном состоянии», распределение которой описывается одночастичным уравнением Шрёдингера. В доступной форме этот достаточно сложный теоретический метод изложен в документе [5]. Расчёты, проведённые с использованием метода DFT, указывают на то, что такое сильное изменение проводимости может быть обусловлено локализованным окислительно-восстановительным процессом. Электронные переключатели с молекулами перметилолигосиланов

(permethyloligosilanes), использующими триггерный механизм на базе эффекта конформации (conformery) и стерического эффекта (steric effect), рассмотрены в работе [6].

В этих исследованиях золотые выводыные контакты соединялись с органической молекулой с помощью метилтиометилвых (methylthiomethyl) линкеров.

Имеет смысл напомнить, что конформация проявляется в том, что одна и та же молекула может существовать в виде нескольких конформационных изомеров (conformer) с различными физическими свойствами. Особенно часто этот эффект проявляется в органической химии за счёт поворота атомов вокруг углерод-углеродных связей.

Стерический эффект обусловлен тем, что в случае, когда некоторые атомы поднесены слишком близко друг к другу, происходит перекрытие электронных орбитальных лепестков (отталкивание Паули или Борна). Поэтому в молекуле лепестки орбиты также принимают несферическое пространственное распределение. В результате

молекула при отсутствии внешнего источника энергии принимает определённые трёхмерные формы, соответствующие локальным минимумам энергии.

Сочетание эффекта конформации и стерического эффекта, а также сильное σ -сопряжение связей в молекулах олигосиланов (oligosilane) приводит к образованию конформеров. Теоретически возможны три различных конформации с разными диэдральными углами, которые значительно различаются по их характеристикам проводимости. На рис. 3 схематически показаны структуры трёх конформационных состояний (A-A, O-A и O-O) молекулы $\text{Me-S-CH}_2\text{-SiMe}_3$. Поскольку конформеры A-A и O-A имеют аналогичную туннельную связь и поэтому неразличимы на стыке, наблюдались скачки проводимости только для двух состояний.

Результаты модельных расчётов DFM для свободной молекулы триметил(метилсульфанилметил)силана ($\text{Me-S-CH}_2\text{-SiMe}_3$) показали наличие двух изоэнергетических локальных минимумов при 90° и 270° (орто) и глобальный минимум при 180° (анти), обусловленных в основном стерическим эффектом.

Полученные в этой работе результаты определили новое направление исследований одноэлектронных устройств, позволяющие реализовать переключения между разными конформерами с использованием различных механизмов.

В ряде работ изучались параметры переключения ферроэлектрических мемристоров на базе диодов Шоттки, содержащих контактные группы «металл-полупроводник».

Было выяснено, что на эти процессы переключения оказывают заметное влияние глубокие межфазные состояния, связанные с поляризацией. Использование теории полупроводников, учитывающей поляризационные эффекты, позволило понять, что поведение напряжения и тока на границе раздела металл – ферроэлектрик в моменты переключения во многом определяется поляризационно-модулированной высотой барьера Шоттки [7].

Надёжно доказанное свойство регуляции переноса заряда через молекулярный мостик без применения внешнего механического воздействия заставило учёных вспомнить гипотезу, высказанную ещё в 1971 году про-

фессором Леоном Чуа из Калифорнийского университета в Беркли о возможности создания нелинейного пассивного электрического компонента с двумя выводами, который связывал бы электрический заряд и магнитный поток [8].

Это устройство, получившее название «memristor» (мемристор), представляет собой электрический компонент, который ограничивает или регулирует протекание электрического тока в цепи и запоминает количество заряда, прошедшего через него ранее. Коллектив учёных из калифорнийской лаборатории HP Labs создаёт в 2008 году физическую модель, в которой логически возникает мемристор как недостающий элемент макросети, содержащей резистор, ёмкость и индуктивность. Проанализировав уравнения электродинамики, описывающие поведение этих элементов в двухполюснике при различных режимах тока и напряжения, они показали на простом аналитическом примере, что мемристор естественным образом возникает в наноразмерных системах, в которых твердотельный электронный и ионный транспорт связаны под действием внешнего напряжения смещения. При этом R , C , L и M (мемристор) в своих определяющих уравнениях могут быть функциями независимой переменной, что в результате даёт нелинейные элементы.

Эта модель послужила основой для понимания широкого диапазона гистерезисных вольтамперных характеристик, наблюдаемых во многих наноразмерных электронных устройствах, которые связаны с движением заряженных атомных или молекулярных частиц (рис. 1).

В течение последних нескольких десятилетий разрабатывались различные типы мемристоров. Основное число исследований в конце 90-х и начале 2000-х проводилось с использованием различных полупроводниковых или изоляционных тонкоплёночных устройств из семейства биполярных переключателей, активируемых напряжением. В ряде работ было показано, что подобные нелинейные компоненты можно использовать не только в роли динамической памяти, но также и для выполнения некоторых логических операций. Например, авторы публикации [9] продемонстрировали, что с помощью мемристоров возможно выполнение операций материальной имплика-

ции (material implication – IMP), которая представляет собой одну из фундаментальных операций булевой логики (Boolean logic operation). Поэтому мемристоры могут применяться в логических устройствах, выполняя одновременно функции вентилей и памяти.

Несколько лет назад стали появляться статьи с результатами экспериментов, в которых использовались мемристоры интерфейсного типа на основе ферроэлектриков (ferroelectric). В русскоязычной научной литературе вместо этого названия часто используется термин «сегнетоэлектрики», предложенный И.В. Курчатовым, который является одним из основателей теории сегнетоэлектричества.

Ферроэлектрики представляют собой широкий класс диэлектриков, в том числе включая некоторые ионные кристаллы и пьезоэлектрики. Эти вещества обладают в определённом интервале температур собственным электрическим дипольным моментом, который может быть переориентирован за счёт приложения внешнего электрического поля. Зависимость поляризации ферроэлектриков от внешнего электрического поля, имеющая вид петли гистерезиса, объясняется тем, что индукция и поляризованность ферроэлектрика определяются как текущим значением напряжённости поля, так и предшествовавшими состояниями поляризации.

Так, в работе [10] приведены характеристики переключателя постоянного/переменного тока на мемристорах $AlOx$, изготовленных с использованием двухслойной технологии. Показано, что двухслойные мемристоры ($W/AlOx/AlOy/Pt$), протестированные в этой лаборатории, показали следующие основные характеристики: высокую однородность по постоянному току; цикличность ($r/l < 0,12$); большое окно памяти в режиме переменного тока (> 100); большую скорость переключения (около 20 нс); высокую износостойкость (107 циклов); высокую температурную стабильность (104 с при 125°C). Более того, мемристор $W/AlOx/AlOy/Pt$ можно отнести к устройствам стабильной многоуровневой памяти III разряда.

Эти и другие аналогичные исследования заложили основу для разработок устройств молекулярной памяти, основанных на управляемом двустороннем переключении молекулы между двумя проводящими состояниями.

Множество новых работ посвящено разработкам устройств, предназначенных для искусственного интеллекта.

Тема создания наноконструкций для искусственных нейронных сетей является очень модной в последние годы. Для того чтобы отметить актуальность данной тематики, достаточно сказать, что подобными исследованиями занимаются среди прочих такие гиганты индустрии, как, например, IBM и Analog Device, разрабатывающие сверхбыстрые нанопереключатели на основе протонных программируемых резисторов (Protonic Programmable Resistor – PPR) [11].

Протонные резисторы (PPR) представляют особый новый класс устройств, о котором мы постараемся рассказать в следующих номерах журнала.

Идея этого нового направления заключается в том, чтобы создать электронные переключатели, коммутирующие сигналы аналогично тому, как функционируют синапсы, распределяющие информацию между нейронами головного мозга человека.

В классической интерпретации нейроморфные вычисления (Neuromorphic computing) имитируют обработку информации мозгом. Иными словами, они могут выполнять сложные задачи с разбиением главной проблемы на параллельные упрощённые, одновременно решаемые подзадачи, с фиксацией результатов в промежуточной памяти.

Эту задачу разработчики пытались решить разными способами, в том числе и с помощью отмеченных выше методов, когда в качестве критерия переключения используются либо собственные характеристики молекул, либо взаимодействия типа «электрод-молекула», либо внешнее воздействие с помощью электромагнитного поля.

Подобный тип лабораторной установки описан, например, в работе [12], в которой представлены результаты тестирования искусственного синаптического устройства на основе молекулярного ферроэлектрического полупроводникового интерфейса (molecular ferroelectric semiconductor interface). Упрощённая схема этого устройства показана в верхней части рис. 4. На нижнем рисунке приведена оптическая микрофотография устройства с масштабной линейкой 30 мкм. На этом рисунке устройство имеет каналы длиной 5 мкм при отношении ширины к длине, равном примерно пятидесяти.

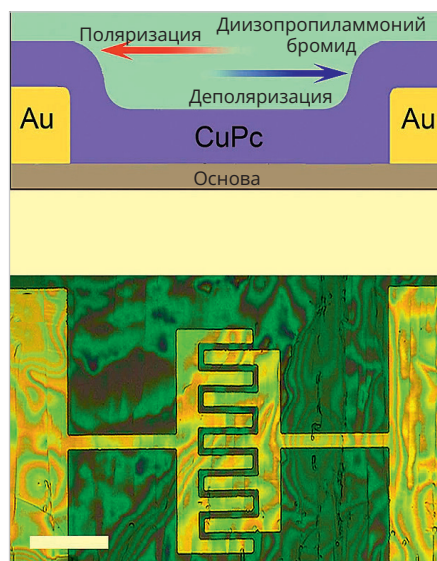


Рис. 4. Схема искусственного синаптического устройства на основе молекулярного ферроэлектрического полупроводникового интерфейса (верхний рисунок); оптическая микрофотография устройства с масштабной линейкой 30 мкм (нижний рисунок)

Межфазные слои были изготовлены на подложках из окиси кремния, на которые были нанесены полупроводниковые плёнки из фталоцианина меди (CuPc – 50 нм) с двумя симметричными золотыми (Au) электродами внизу. Высококачественная плёнка DIPAB (500 нм) была изготовлена с использованием методов литья капель с поверхностным натяжением.

Стабильные на воздухе плёнки DIPAB имели преимущественную кристаллографическую ориентацию, перпендикулярную «с-оси» (out-of-plane c-axis), что характерно для ферроэлектриков этого типа. При этом для плёнок DIPAB наблюдалась преимущественно плоскостная сегнетоэлектрическая поляризация. Типичные кривые гистерезиса фазного и амплитудного напряжения, характерные для ферроэлектриков, подтверждали эффект резистивной памяти интерфейсов DIPAB/CuPc.

Интерес представляют также проведённые в работе эксперименты по активации процессов переключения этого устройства с помощью световых импульсов. Для измерения фотопроводимости использовался лазер с длиной волны 633 нм.

Авторы отмечают, что лазерные импульсы длительностью 100 мс и периодом 200 мс, поглощённые в слое CuPc, вызывали фототок, пропорциональный времени поляризации. Таким

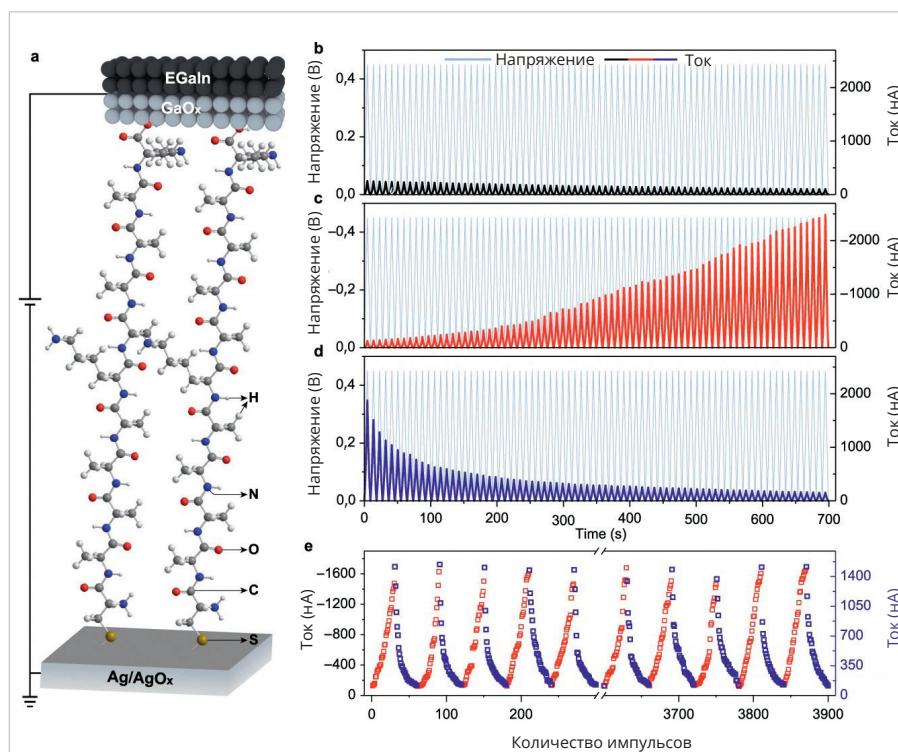


Рис. 5. Упрощённая схема лабораторного макета искусственного молекулярного синапса на базе пептидных молекул из одиннадцати аминокислот

образом, наличие в устройстве полупроводникового рабочего слоя добавляет ему некоторые оптоэлектронные свойства. На основании проведённых испытаний авторы показали, что предложенная ими разработка может быть использована в качестве искусственного синаптического переключаемого интерфейса, управляемого как внешним электрическим полем, так и световыми импульсами.

В принципе, такого рода устройства могут рассматриваться в качестве одного из возможных направлений аппаратной реализации многофункциональных нейроморфных устройств.

Обладая способностью хранения данных и вычислений в одном устройстве (вычисления и памяти), нейроморфные устройства демонстрируют многоуровневую энергонезависимую многообещающую функцию памяти для вычислительных систем следующих поколений [13].

В одной из последних интересных работ в этой области, опубликованной в январе 2023 года, китайские специалисты из «CAS Key Laboratory» исследовали возможности создания на базе молекулярных проводников искусственных синапсов, которые можно было бы использовать для создания аналоговых нейронных сетей [14].

Китайские учёные из CAS предложили вариант макета искусственного

молекулярного синапса, схема которого приведена на рис. 5.

Приведённая на рисунке упрощённая схема (левая часть) включает нижний электрод из Ag/AgOx, проводящую молекулу пептида SAM (CAAAAAAAAAAK) и верхний электрод из жидкого GaOx/EGaIn. Верхний электрод Ag/AgOx, изготовленный методом термического отжига тонкого слоя Ag (200 нм), напылённого с помощью метода EB (electron-beam), заземлён в нижней точке.

Авторы подчёркивают, что жидкий нижний электрод, содержащий эвтектический галлий (eutectic gallium-indium alloy eGaIn), обладает уникальными свойствами, в частности, большим поверхностным натяжением, низкой вязкостью и хорошей проводимостью верхней окисной плёнки (GaOx/EGaIn).

В качестве проводящего мостика использовалась самособирающаяся молекулярная сборка (self-assembled monolayer – SAM) пептидных молекул, состоящая из одиннадцати аминокислот.

В процессе эксперимента исследовалось изменение проводимости молекулярного мостика под влиянием приложенного импульсного напряжения. Через пептидную молекулу пропускались серии импульсов различной длительности, формы и амплитуды (рис. 2a/2b/2c).

Результаты проделанных экспериментов и модельных расчётов показали, что проводимость самособирающегося монослоя пептидной молекулы можно модулировать внешним импульсным напряжением различной формы и длительности.

Управляемая электрическим полем накачка и миграция положительных ионов Ag^+ в пептидных молекулах может динамически контролировать ток, проходящий через соединение. Наличие этого эффекта позволяет, в принципе, перенаправлять сигналы в соответствии с «синаптическим весом» (synaptic weight). Данную работу можно расценивать как экспериментальную демонстрацию молекулярного искусственного синапса.

Следует обратить внимание на то, что однозначного теоретического описания механизмов переключения в мемристорах описанного выше типа пока ещё не существует.

Можно также отметить, что в современной концепции понятие мемристора в общем случае включает любую форму энергонезависимой памяти, основанной на переключении сопротивления, которое увеличивает протекание тока в одном направлении и уменьшает протекание тока в противоположном направлении. Мемристоры, которые считаются подкатегорией резистивной ОЗУ, являются одной из нескольких технологий хранения, которые, по прогнозам, заменят флеш-память.

Если бы можно было заменить динамическую оперативную память и жёсткие диски мемристорами, теоретически можно было бы создать аналоговые компьютеры, способные выполнять вычисления на тех же чипах, которые хранят данные. Поэтому многие крупные ИТ-компании изучают возможности использования мемристоров на органических молекулах для создания миниатюрных, быстрых компьютеров с низким энергопотреблением, которым не требуется передача данных между энергозависимой и энергонезависимой памятью.

Одномолекулярные аналоги диодов и транзисторов

В англоязычной литературе и в переводных статьях часто различные термины используются для обозначения одних и тех же устройств.

Так, например, в одних случаях одномолекулярные диоды называют single –

molecule rectifier (SMR), а в другом single – molecule transistor (SMT).

Поэтому целесообразно разграничить понятия, которые переключались в молекулярную электронику из классической электротехники.

В самом общем случае термин «диод» (diode) обозначает активный электронный компонент с двумя электродами, который пропускает ток в одном направлении и не пропускает в другом. Иными словами, диод – это неуправляемый клапан. Часто такие диоды называют также выпрямителями (rectifier) или выпрямительными клапанами (rectifier valve).

В 1974 году химики из нью-йоркского университета (New York University) обосновали идею одномолекулярного выпрямительного диода, принцип действия которого был основан на использовании молекулярных орбитальных структур. Новое устройство авторы назвали «Molecular rectifiers» [15].

Однако экспериментальная реализация одномолекулярных выпрямителей оказалась достаточно сложной задачей. Первый лабораторный макет одномолекулярного выпрямителя был изготовлен только в 2005 г. Этот макет был получен методом контролируемого механического разрыва и состоял из двух золотых электродов с органической молекулой компанда молекул серы и золота, объединённых углеродными связями [16].

В этой работе впервые была выявлена асимметрия вольт-амперной характеристики в зависимости от приложенного напряжения, которая присуща кремниевым выпрямительным диодам.

Следует особо подчеркнуть, что все опубликованные результаты работ по исследованиям SMR (SMT), цитированные в настоящей статье, относились к лабораторным макетам, созданным с помощью методов STM (scanning tunnelling microscopy), либо EMJ (electro migration junctions), либо MCBJ (mechanically controllable break junctions).

Эти технологии позволяют создавать с помощью сложного, коммерчески доступного оборудования некое устройство, в котором на подложке из изолятора размещены два или три контакта, между которыми закреплена одна органическая молекула. Именно одна молекула, а не наностержень, не нанопроволока и не наноплёнка. Когда речь идёт о единственной задейство-

ванной молекуле (single molecule), то под таким устройством не подразумевается какая-то законченная деталь, оформленная в корпусе, которую можно потрогать и приобрести. Пока ещё современная наука и технологии производства далеки от этого момента.

Несмотря на то что с начала процесса изучения молекулярных диодов были выполнены многочисленные усовершенствования первоначальных вариантов конструкции, разработчикам не удавалось преодолеть некоторые существенные недостатки. В первую очередь это касалось коэффициента выпрямления (rectification ratio – RR), определяемого как отношение прямого тока диода к обратному току (это безразмерная величина). Этот важнейший показатель выпрямителей у первого одномолекулярного диода составлял всего десять относительных единиц, в то время как у современных выпрямительных кремниевых диодов эта величина превышает миллион единиц.

Детальный анализ многочисленных экспериментов по исследованию всевозможных характеристик одномолекулярных диодов приведён в обзоре [17].

Для того чтобы преодолеть этот барьер, были предложены различные варианты, основанные на эффекте асимметрии процесса проводимости. Этот эффект может быть обусловлен нарушением внутренних связей, как простых [18], так и сложных органических молекул [19].

Кроме того, были предложены модели одномолекулярных диодов, в которых выпрямительный эффект проявлялся благодаря асимметрии концевых якорных групп, с помощью которых осуществлялась связь молекулы с выводными электродами [20].

Ситуация с коэффициентом выпрямления изменилась коренным образом после появления модернизированного метода механически контролируемого разрыва (Advanced of Mechanically – MCBJ). Идея нововведения заключалась в том, что в схему был введён третий управляющий электрод. Схема метода MCBJ показана на рис. 6.

Введение третьего электрода затвора в схемы методов STM и MCBJ практически превращает макет устройства, полученный с их помощью, в молекулярный аналог полевого транзистора. В классическом варианте транзистор определяется как электронный компонент, способный регулировать

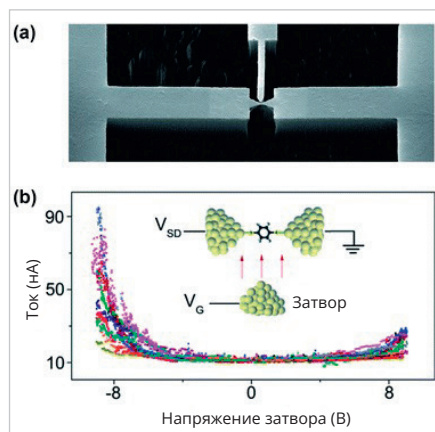


Рис. 6. Механически контролируемое разрывное соединение с третьим управляющим электродом затвора: а) изображение микрочипа МСВJ, полученное с помощью сканирующей электронной микроскопии (scanning electron microscopy – SEMC); б) эквивалентная схема АМСВJ соответствует транзистору с электродами истока, затвора и стока [21]

выходной ток с помощью управляющего электрода. Поэтому правильнее было бы называть устройства, полученные методом АМСВJ, одномолекулярным аналогом транзистора (single-molecule analogue of a transistor) [22].

Подобные устройства в течение ряда лет разрабатываются исследовательской группой из университетской лаборатории нидерландского города Делфта (Delft University of Technology) [23, 24].

Для изготовления молекулярного диода использовался метод механически контролируемых разрывных соединений (АМСВJ), который описан в первой части нашей статьи.

Уникальной особенностью разработанной конструкции стал третий электрод, который выполнял функцию затвора.

Управляющий электрод в этом одноэлектронном устройстве играет роль затвора транзистора. Это позволило регулировать электростатический потенциал молекулы относительно энергии Ферми электродов. В результате был реализован механизм выравнивания энергетических уровней, ответственных за транспорт заряда. В данной публикации описан метод изготовления третьего электрода. Образ алюминиевого затвора был нанесён на гибкую подложку из фосфорной бронзы с помощью литографического способа. В качестве электроизоляции был использован слой полиимида.

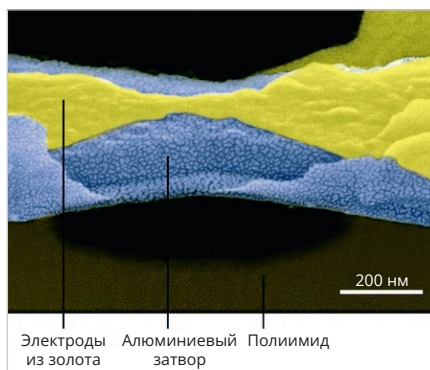


Рис. 7. Изображение мостика в одномолекулярном устройстве с тремя электродами, полученное с помощью SEM с разрешением 200 нм

На первом этапе с помощью метода атомно-слоевого осаждения (atomic-layer-deposition) был сформирован слой из оксида алюминия, предназначенный специально для затвора. Затем на него накладывалась золотая проволока толщиной 15 нм. Для окончательного формирования затвора использовался метод изотропного плазменного травления (isotropic plasma etch). Затвор должен быть расположен максимально близко к молекуле, но при этом быть надёжно электрически изолирован от истока и стока, а также от самой молекулы. На рис. 7 показано изображение мостика в одномолекулярном устройстве с тремя электродами, полученное с помощью SEM с разрешением 200 нм.

В основе конструкции использована асимметричная молекула DPE-2F.

Молекула, используемая в данной работе, состоит из двух сопряжённых частей, соединённых насыщенным этановым мостиком,рывающим сопряжение, как показано на рис. 8а. Асимметрию, ответственную за выпрямление, вносят два атома фтора, которые расположены на одном из фенильных колец, оба в ортоположении по отношению к этановой группе. Молекула имеет на обоих концах тиоловые группы, которые действуют как якорные переходники для соединения с металлическими электродами. Подробное описание процесса синтеза этой молекулы DPE-2F приведено в дополнительной документации [25].

На рис. 8b и 8c показана эволюция энергетических уровней в зависимости от напряжения смещения. При нулевом напряжении смещения (bias) ток практически отсутствует. Ток увеличивается при увеличении положительного смещения. В какой-то момент, при смещении, равном 0,55 В, проявляет-

ся ярко выраженный пик. Эта точка соответствует случаю, когда два молекулярных элемента (МЭ) имеют одинаковые энергии, и в этот момент происходит резонансный скачок переноса заряда. При более высоких напряжениях МЭ выходят из резонанса, и ток уменьшается. При обратном смещении (Stark shift) энергия правого молекулярного элемента уменьшается, и ток резко падает (см. нижнюю левую часть рис. 1с).

Поскольку ток проходит через молекулу только при определённой полярности смещения, молекула ведёт себя как выпрямитель.

Зависимость тока через молекулу DPE-2F от напряжения смещения показана в нижней части рис. 8.

Кривая, выделенная сплошной синей линией, получена с помощью теории функционала плотности (DFT) в сочетании с формализмом неравновесной функции Грина (NEGF). В этом случае для ЕС (electronic coupling) взято значение – 100 МэВ. Падение напряжения внутри молекулы было получено из модели DFT и составляло 0,54 В.

Пунктирная красная кривая соответствует расчётам, выполненным с помощью двухэлементной модели при значении ЕС, равном 25,8 МэВ.

При переносе заряда возникают делокализованные связи НОМО (высшие занятые молекулярные уровни). При этом возможны два варианта – с образованием химической связи и без образования связи. В этих модельных расчётах пик был получен при положительном смещении. Однако в экспериментах ориентацию молекулы контролировать было невозможно. Поэтому пик тока можно было ожидать как при положительном, так и при отрицательном напряжении смещения.

В процессе экспериментов было также зафиксировано появление отрицательной дифференциальной проводимости (NDC), что указывает на перенос заряда с преобладанием НОМО.

Также важно отметить, что диод работает оптимально, когда НОМО-уровни молекулы близки (< 0,25 эВ) к энергии Ферми.

Для расчётной кривой, показанной на рис. 8с, было получено максимальное значение RR = 751 при смещении 0,55 В. Кроме того, полученная зависимость коэффициента выпрямления от напряжения на затворе послужила доказательством действия в молекуле механизма именно двухэлемент-

ного выпрямления. Нужно отметить, что это было одним из критериев отбора выпрямителей с двухэлементными молекулами.

Дополнительное увеличение производительности выпрямителей такого типа может быть достигнуто за счёт использования асимметрии электронной связи молекулы с электродами.

В работе [26] приведены результаты модельных расчётов молекулярного выпрямителя с четырьмя последовательными элементами аналогично рассмотренной выше конструкции с двумя элементами. В расчётах, выполненных DFT-методом, использовалась схема, в которой при нулевом смещении четыре элемента имеют энергетические уровни, расположенные «лесенкой» в порядке возрастания ($\epsilon_1 > \epsilon_2 > \epsilon_3 > \epsilon_4$). Поскольку все элементы обладают разной энергией, перенос заряда через такую цепочку крайне мал. При увеличении смещения напряжение частично падает внутри молекул. Дополнительное падение напряжения происходит на крайних молекулах за счёт введённой асимметрии между молекулой и якорными соединениями с выводными электродами. Постепенно энергетические уровни между отдельными элементами выравниваются, создавая наиболее благоприятные условия переноса заряда «по прямой», без необходимости преодолевать «ступеньки энергетической лесенки». В этот момент наступает резонанс проводимости, при котором расчётные значения коэффициента проводимости могут теоретически достигать интервала 100 000–10 000 000.

Авторы также проанализировали возможные варианты молекул, которые могли бы содержать такие последовательно соединённые элементы. Именно такого типа молекулы пока ещё не синтезированы. Однако их основу могут составлять гексановые группы, содержащие двойные связи C-C, за которыми следуют четыре насыщенные группы CH₂ (C-C double bond followed by four saturated CH₂ groups). Эти соединения были обнаружены в натуральных продуктах, таких, например, как фульвинолы (fulvinols). Более короткие повторяющиеся звенья с меньшим количеством насыщенных атомов углерода широко распространены в нескольких классах натуральных продуктов, включая терпены, липиды и витамины (например, витамин К).

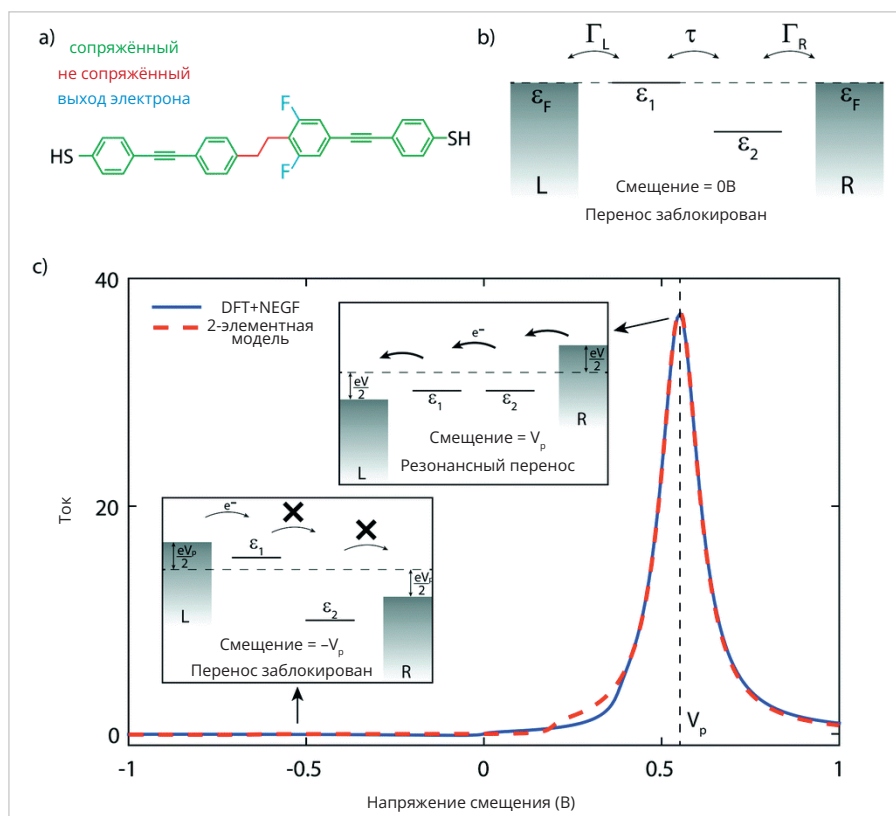


Рис. 8. Принцип работы одномолекулярного диода Delft University: a) структура молекулы DPE-2F; b) энергетические уровни молекулы; c) зависимость тока через молекулу от напряжения смещения (bias)

Большинство этих продуктов было синтезировано несколькими путями, множество примеров которых можно найти в открытых публикациях.

В настоящее время исследуются различные варианты конструкций молекулярных диодов, разрабатываемые на базе самых разных молекул и кластеров. Так, например, китайские физики из Нанкинского университета в своей конструкции одномолекулярного устройства использовали кластер $[Au_{25}(PPh_{3,10})(SC_2H_4Ph)_5Cl_2]^{2+}$ ($Au_{25}-R$) [27].

Возвращаясь к вопросу о названиях, любопытно отметить, что своё устройство с третьим управляющим электродом авторы назвали «single-molecule tidal diode». Термин «tidal diode» придуман самими учёными только потому, что одна из полученных зависимостей тока через молекулу от приложенного напряжения напоминала приливную волну.

На рис. 9а показан процесс переноса заряда через рабочую молекулу для различных уровней энергии молекулы и уровней Ферми левого (L) и правого (R) электродов (Γ_L, Γ_R), а также приложенного напряжения смещения V_{sd} . При отсутствии смещения энергетические уровни молекулы находятся выше

уровня энергии Ферми. Они смещаются вниз или вверх, в соответствии с уровнями Ферми электродов, изменяющихся в зависимости от положительного или отрицательного напряжения сдвига. При отрицательном смещении энергетический уровень молекулы легче выравнивается с уровнем Ферми правого электрода, что вызывает резонанс процесса туннелирования и скачок тока. Однако при положительных значениях приложенного напряжения уровень Ферми левого электрода расположен ниже энергетического уровня молекулы, что обуславливает малые значения тока. Ситуация меняется на противоположную, когда энергетический потенциал молекулы опускается с помощью смещения ниже уровня Ферми электрода (рис. 9б).

В результате проведённых экспериментов и расчётов, выполненных с помощью модели резонансного туннелирования Ландауэра (Landauer asymmetric coupling model), были получены зависимости тока через молекулу от напряжения смещения для диапазона криогенных температур 2К–60К.

Наибольший интерес представляет резонансная область этих характеристик. В частности, было установлено, что в районе резонансного пика для

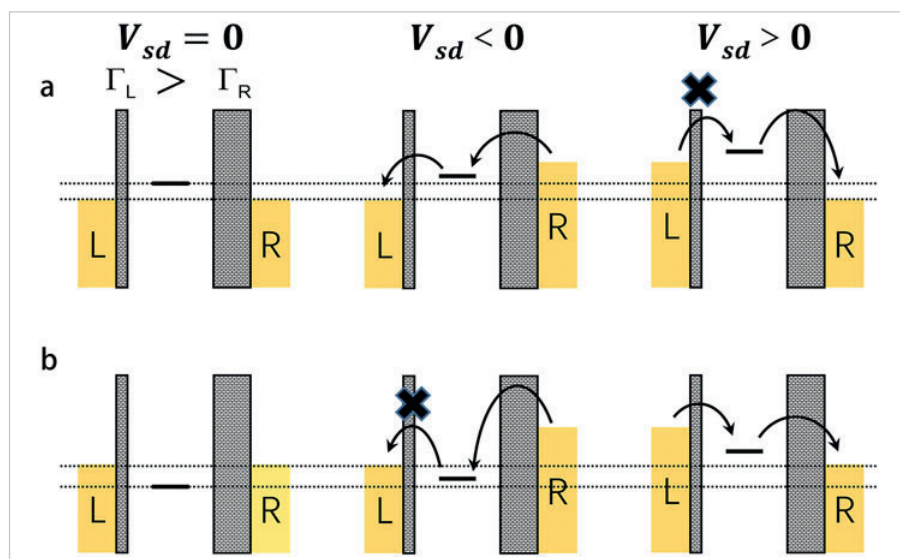


Рис. 9. Схема переноса заряда через молекулу (Au25-R) при различных энергетических уровнях и напряжениях смещения

трёх различных значений приложенного к диоду напряжения V_g можно было наблюдать три разных поведения тока в зависимости от температуры: ток увеличивался, уменьшался или оставался постоянным при повышении температуры. Во всех этих случаях наблюдалась хорошая производительность выпрямителя. Подробные объяснения температурных зависимостей с точки зрения использованной математической модели можно посмотреть в оригинальной статье и дополнительной технической документации (Supplementary Information, An Au25-R Single-Molecule Tidal Diode).

Авторы подчёркивают тот факт, что конструкция их устройства обеспечивает как прямое, так и обратное выпрямление, зависящие от напряжения смещения V_{sd} и от напряжения V_g , приложенного к выводам истока и стока. В диапазоне приложенных напряжений V_g от 0 до 10 В транзистор демонстрирует эффект обратного выпрямления и меняет направление выпрямления в диапазоне от 10 до 15 В.

Суммируя краткую информацию по данной теме, нужно подчеркнуть, что в принципе возможно появление нового класса молекулярных устройств со многими последовательно соединёнными элементами и независимым электростатическим управлением для каждого из них. Как было показано, добавление элементов в составную молекулу действительно приводит к существенному подавлению обратного тока, тем самым резко увеличивая коэффициент выпрямления RR . Однако одновременно процесс изго-

товления такого выпрямителя заметно усложняется, а значит, и его стоимость многократно увеличивается.

Органические полевые транзисторы и светодиоды

В настоящее время технологии молекулярной электроники пока ещё не достигли того уровня, на котором стало бы возможным массовое производство одномолекулярных переключателей, ячеек памяти, диодов и транзисторов.

Сегодня развитие коммерческой молекулярной электроники пошло несколько иным путём.

Наибольшее число реальных внедрений результатов разработок в области молекулярной электроники приходится на долю органических светодиодов (Organic light-emitting diodes – OLEDs) и полевых органических транзисторов (Organic Field-Effect Transistors – OFETs). Встречается также и другое название – Flexible organic field-effect transistors – FOFET.

Благодаря низкой стоимости производства, миниатюрным размерам, механической гибкости конструкции и простоте оптоэлектронных настроек эти устройства получают всё большее распространение в таких областях, как квантовая химия, материаловедение, микробиология, производство гибких дисплеев, уличная реклама и других аналогичных приложениях.

В этих транзисторах и диодах вместо одной молекулы используются молекулярные наноплёнки из органических полупроводников. Механизм переноса заряда при этом носит иной характер, чем в рассмотренных выше одномоле-

кулярных полупроводниковых устройствах. Поэтому тема органических транзисторов OFET и органических светодиодов несколько выходит за рамки данной статьи. Здесь мы ограничимся лишь кратким обзором основных характеристик транзисторов OFET и светодиодов OLED. Подробную информацию о транзисторах OFET можно найти, например, в обзоре [28].

Органический полевой транзистор (organic field-effect transistor – OFET) представляет собой аналог обычного полевого транзистора, с той лишь разницей, что в нём вместо металлического используется органический полупроводник.

Первый органический полевой транзистор на основе полимера молекул тиофена был разработан сотрудниками концерна Mitsubishi в 1986 году [29].

Полимер тиофена представляет собой тип сопряжённого полимера, способного проводить заряд.

В настоящее время известно множество других сопряжённых полимеров, которые обладают полупроводниковыми свойствами [30].

Конструкция современных OFET значительно отличается от первоначальной схемы, предложенной японскими физиками. Однако сохранился базовый принцип действия тонкоплёночного транзистора TFT, который изначально был использован при проектировании органических транзисторов. В упрощённом варианте конструкция OFET показана на рис. 10.

Основой транзистора OFET является структура «металл-изолятор-полупроводник» (MIS), которую в принципе можно рассматривать как конденсатор с параллельными пластинами. Две пластины конденсатора, образованные металлическим затвором и полупроводником, разделены тонкой изолирующей плёнкой (затворный диэлектрик). Два дополнительных электрода (исток и сток) предназначены для контакта с органическим полупроводником.

В первых моделях OFET в качестве подложки для изолятора затвора использовался в основном термически окисленный кремний. В настоящее время для этих целей всё больше стали применять различные модификации оксида алюминия.

Активный слой полевого транзистора может быть нанесён различными способами, среди которых, прежде всего, нужно отметить: селективное осаждение с использованием молекул само-

сборки (SAM); термическое испарение; осаждение из органического раствора; электростатическое ламинирование; центрифугирование; струйная печать и трафаретная печать.

В настоящее время всё большую популярность приобретают методы с использованием *n*-тетрадецилфосфоновой кислоты (TDPA) для самособирающегося монослоя (SAM).

Анализ преимуществ и недостатков методов нанесения полупроводников на изолирующую подложку можно найти в работах [31, 32].

За последние несколько лет в конструкциях транзисторов OFET появился ряд изменений, позволивших улучшить параметры полевого эффекта, а также коэффициенты включения и выключения тока.

Коренное отличие в принципе действия заключается в том, что MOSFET обычно работает в режиме инверсии, а OFET обычно работает в режиме накопления.

Характерной общей чертой большинства моделей OFET является то, что их органические полупроводники включают в свои структуры ароматические или сопряжённые π -электронные элементы, облегчающие делокализацию орбитальных волновых функций. Присоединённые электроноакцепторные группы или донорные группы значительно облегчают транспорт дырок или электронов.

В качестве стимуляторов активного полупроводникового слоя наиболее часто используются такие ароматические и сопряжённые включения, как, например, рубрен, тетрацен, пентацен, диинденоперилен, перилендиимиды, тетрацианохинодиметан (TCNQ). Среди полимеров популярны такие как: политиофены (поли(3-гексилтиофен) P3HT), полифлуорен, полидиациетилен, поли(2,5-тиениленвинилен), поли(п-фениленвинилен) (PPV). Перечисленные соединения предназначены для использования в транзисторах OFET *p*-типа.

Проблемы синтеза органических полупроводников для устройств OFET *n*-типа изучены заметно хуже. Изначально они были основаны на перилендиимидах или фуллеренах, а также на их производных. Однако производительность таких устройств была невысокой. Один из способов улучшения ситуации заключается в том, чтобы внедрять фрагменты молеку-

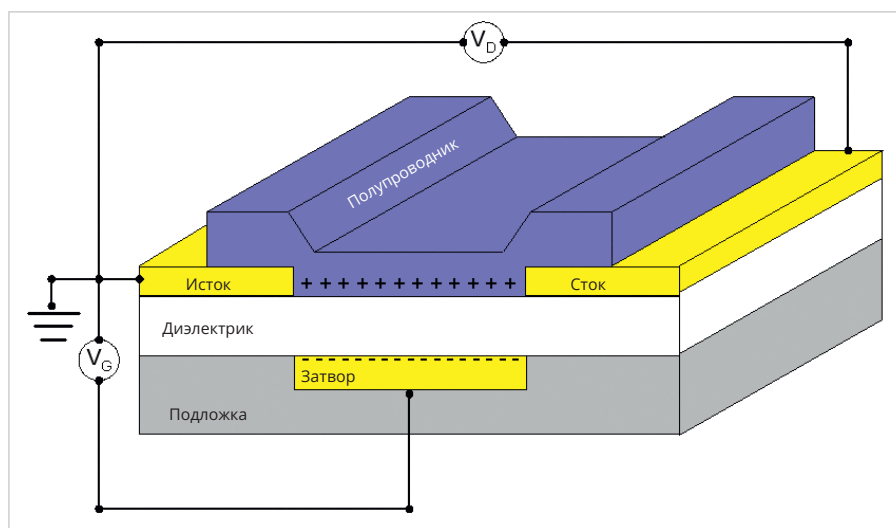


Рис. 10. Упрощённая схема транзистора на базе органического полупроводника OFET

лярных комплексов *p*-типа в структуры органических полупроводников с *n*-проводимостью [33].

Синтез органических полупроводников является быстроразвивающимся направлением. Предлагаются как новые химические соединения, так и новые технологии синтеза. В одной из недавно опубликованных работ предлагается новый метод изготовления FOFET – органического полупроводника на полиимидной (PI) подложке с тонкими плёнками poly(3-hexylthiophene). Использование газового потока способствует улучшению кристаллического расположения ультратонких плёнок поли(3-гексилтиофена) – P3HT за счёт образования защитного слоя из ионов гелия.

Результаты тестов показывают, что полученный таким способом органический полупроводник имеет подвижность носителей до $2,527 \pm 1,194 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при рабочем напряжении около $-1,5 \text{ В}$ [34].

В последнее время появляется много публикаций с другими новыми названиями материалов для OFET обоих типов проводимости. Среди новых разработок органических полупроводниковых материалов можно отметить, например, синтез асимметричного алкоксинафтила антрацена, содержащего циклогексилрованную алкильную концевую группу, 2-(6-((6-циклогексилгексил)окси)нафталин-2-ил) антрацен (C-HNA) [35].

Ознакомиться с другими наименованиями можно, например, в работах [36, 37, 38].

Одно из основных технологических преимуществ изготовления OFET заключается в том, что все слои могут быть нанесены на заготовку при ком-

натной температуре по шаблону или методом прямой печати. Это значительно упрощает процесс и удешевляет стоимость производства.

Другое важное преимущество современных моделей OFET заключается в том, что они могут работать при низких напряжениях питания. Низкое потребление является одним из основных требований, предъявляемых к устройствам Интернета вещей. Многочисленные сенсоры самого различного назначения проектируются так, чтобы их можно было эксплуатировать несколько лет без замены миниатюрных батарей питания [39].

Органические светоизлучающие диоды (OLED) стремительно завоевывают различные сегменты мирового радиоэлектронного рынка благодаря своим уникальным свойствам, таким, например, как: качество цвета, широкий угол обзора, производство без использования ртути, механическая гибкость и т.д.

Впервые внимание широкой научной общественности к проблеме OLED было привлечено опубликованной в 1987 году статьёй Танга и Ван Слайка [40].

В последнее время OLED нашли широкое применение в качестве дисплеев в различной бытовой электронике, такой как сотовые телефоны, цифровые камеры и телевизоры сверхвысокой чёткости.

Одним из главных направлений в современных разработках высокоэффективных OLED является синтез полимерных и низкомолекулярных излучающих материалов с соответствующими электрическими и оптическими свойствами, необходимыми

для наиболее полного преобразования энергии при использовании синглетных и триплетных экситонов.

Практически все современные OLED имеют многослойную тонкоплёночную структуру. Это является причиной того, что значительная часть генерируемых фотонов задерживается внутри устройства из-за несоответствия показателей преломления между различными слоями. Поэтому вопросы эффективности излучения генерируемого света являются также крайне актуальными.

Кроме того, учитывая потенциальную ёмкость рынка различных дисплеев, большое внимание уделяется разработкам, улучшающим механическую гибкость OLED.

Необходимо также отметить важность разработок эффективных флуоресцентных излучателей с повышающим преобразованием, таких, например, как TADF. Термически активируемая задержанная флуоресценция (TADF) является наиболее эффективной с точки зрения максимального использования для излучения всех триплетных экситонов.

Ещё одно направление развития OLED связано с разработками молекулярных эмиттеров на основе радикалов, излучение которых происходит из возбуждённых состояний дублетов.

Фосфоресцентные излучатели на основе атомов тяжёлых металлов широко используются в таких приложениях, как бытовые дисплеи, оборудование для освещения жилых помещений и других аналогичных. Кроме того, что они экологически вредны и сравнительно дороги, наблюдается всё больший дефицит сырья для их производства. На смену им постепен-

но приходят чисто органические фосфоресцирующие излучатели, использующие механизмы TADF и TTA. По мере развития технологий и снижения себестоимости органические светодиоды будут иметь всё большее значение в бытовых и промышленных приложениях.

Подробную информацию о светодиодах OLED можно найти, например, в обзорах [41, 42, 43].

Литература

- URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1060294>.
- URL: <https://bit.ly/3Nm9xQK>.
- URL: <https://arxiv.org/ftp/cond-mat/papers/0603/0603281.pdf>.
- URL: <https://arxiv.org/pdf/1609.01200.pdf>.
- URL: http://www.unn.ru/books/met_files/Intro_DFT.pdf.
- URL: <https://bit.ly/3pnr6H3>
- URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adfm.202000664>.
- URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1083337>.
- URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20376145/>.
- URL: <https://bit.ly/44Bi311>.
- URL: <https://bit.ly/43Xogrr>.
- URL: <https://www.nature.com/articles/s41528-022-00152-0>.
- URL: <https://bit.ly/46nTsBV>.
- URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-023-35817-5>.
- URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0009261474850311>.
- URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15956208/>.
- URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/cp/d0cp01448f>.
- URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26005998/>.
- URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27102683/>.
- URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30424167/>.
- URL: <https://bit.ly/46kfMw3>.
- URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2015/cs/c4cs00231h>.
- URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/nr/c6nr00735j>.
- URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/cp/d0cp01448f>.
- URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26809645/>.
- URL: <https://bit.ly/3XvKj6c>.
- URL: <https://bit.ly/43Z2Euz>.
- URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451929418303577>.
- URL: <https://bit.ly/3NiVbzy>.
- URL: <https://sites.unica.it/dealab/organic-field-effect-transistors-ofets/>.
- URL: <https://bit.ly/3NizG18>.
- URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-022-29221-8>.
- URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/tc/c8tc05740k/unauth>.
- URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1566119923000691>.
- URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0254058419312131>.
- URL: <https://bit.ly/42WO71q>.
- URL: <https://bit.ly/3NMcjPt>.
- URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-022-29221-8>.
- URL: <https://bit.ly/3NNFq54>.
- URL: <https://bit.ly/3r5i81y>.
- URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adom.202100269>.
- URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/qm/c9qm00716d#cit1>.
- URL: <https://www.nature.com/articles/lsa2017168>.



НОВОСТИ МИРА

Представлен инновационный клей для электронных устройств

Исследователи Ульсанского национального института науки и технологии (UNIST) разработали инновационные сшиватели для эластичных клеев, которые сочетают в себе исключительную способность к восстановлению и высокую адгезионную прочность.

В качестве жёстких сегментов в этих сшивателях используются м-ксилилендиизоцианат (XDI) или 1,3-бис(изоцианатометил)циклогексан (H6XDI), а в качестве мягких – группы

поли(этиленгликоля). Включение этих материалов в состав клеев, чувствительных к давлению, позволило значительно повысить их восстанавливаемость по сравнению с традиционными методами.



Созданный клей продемонстрировал удивительную стабильность при многократных деформациях, что делает его пригодным для применения в местах, требующих одновременно гибкости и восстанавливаемости, например, в складных дисплеях. Даже при деформации до 20% он сохранял высокий оптический коэффициент пропускания (>90%).

Этот прорыв в области адгезивных технологий открывает многообещающие возможности для гибких электронных устройств, решая проблему баланса между прочностью адгезии и эластичностью.

ferra.ru

НОВОСТИ МИРА

В ФИ РАН удвоили КПД свечения молекул для органических светодиодов

Исследователи заменили молекулы водорода в соединениях, лежащих в основе диодов, на большое число молекул фтора, что позволило значительно повысить эффективность люминесценции.

Российские учёные обнаружили, что эффективность свечения молекул на базе соединений европия, пригодных для создания органических светодиодов (OLED), можно удвоить, если внедрить в их состав большое количество атомов фтора. Об этом сообщила пресс-служба Российского научного фонда (РНФ). Исследование опубликовано в журнале *Dyes and Pigments*.

«Мы экспериментально доказали, что увеличение числа атомов фтора позволяет в два раза повысить эффективность люминесценции рассматриваемых соединений европия. Полученные соединения могут быть полезны при разработке высокоэффективных светоизлучающих устройств, потребность в которых существует в современной быстро развивающейся технике», – пояснил ведущий научный сотрудник Физического

института РАН (Москва) Илья Тайдаков, чьи слова приводит пресс-служба РНФ.

Тайдаков и его коллеги изучали физические свойства соединений бета-дикетонатов, кислородсодержащих органических молекул и редкоземельного металла европия. Как и другие типы материалов, применяемых при создании органических светодиодов, эти вещества отличаются относительно низким КПД – эффективностью действия относительно энергозатрат.

Низкая эффективность работы этих излучателей, как объясняют российские физики, связана с наличием множества высокоэнергетических связей между атомами углерода и водорода в их молекулах. Исследователи решили выяснить, как замена разного числа атомов водорода на фтор в молекулах бета-дикетонатов и других органических соединений, окружающих ионы европия, повлияла на эффективность их свечения.

В общей сложности учёные изучили свойства шести вариаций соединений европия с органикой и обнаружили, что молекулы, содержащие 13 атомов фтора, преобразовывали падающий на них свет в собственное излучение в два раза эффективнее, чем

молекулы с тремя атомами этого элемента. По уровню КПД они не уступали лучшим представителям этого класса материалов.

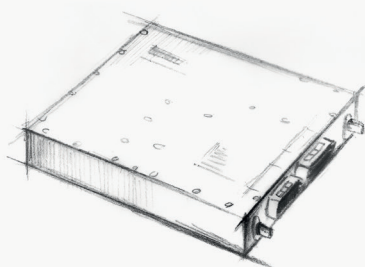
Как отмечается в сообщении, разработанные соединения могут успешно применяться в качестве источников красного света для электролюминесцентных устройств. Кроме того, физики предполагают, что схожими свойствами должны обладать другие соединения органики и редкоземельных металлов, что открывает дорогу для создания целого класса высокоэффективных органических светодиодов.

Первые органические светодиоды были созданы ещё в конце 1980-х годов, однако они начали массово использоваться в технике и промышленности лишь на рубеже веков. Сейчас их применяют как для создания осветительных приборов, так и для компонентов электронных гаджетов, в частности дисплеев. OLED-устройства отличаются высокой контрастностью, небольшими габаритами и гибкостью. Более широкому использованию пока мешает недолговечность органических светодиодов, а также относительно низкий КПД.

russianelectronics.ru

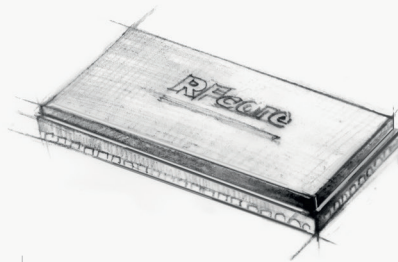


НОВЫЕ МОЩНОСТИ — НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ



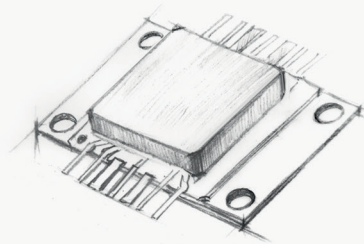
СВЧ-усилители мощности

- Диапазон частот: от HF до Ku
- Выходная мощность: 2...1000 Вт
- Типовое усиление: 25...65 дБ
- Рабочее напряжение: 28, 40 В



Многофункциональные CMOS MMIC

- Диапазон частот: S, C, X, Ku
- Выходная мощность: до 15 Вт
- Исполнение: QFN-корпус



GaN и GaAs MMIC

- Диапазон частот: 2...18 ГГц
- Выходная мощность: до 12 Вт
- Типовое усиление: 10...23 дБ
- Исполнение: QFN-корпус/кристалл



ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА
(495) 232-2522 ■ INFO@PROCHIP.RU ■ WWW.PROCHIP.RU

Реклама