# Введение

В 1965 году, на заре компьютерной эры, директор отдела исследовательской компании Fairchild Semiconductors Гордон Мур предсказал, что количество транзисторов на микросхеме будет ежегодно удваиваться. Прошло уже 35 лет, а "закон Мура" по-прежнему действует. Правда, со временем практика микроэлектронного производства внесла в него небольшую поправку: сегодня считается, что удвоение числа транзисторов происходит каждые 18 месяцев. Такое замедление роста вызвано усложнением архитектуры микросхем. И все же, для кремниевой технологии предсказание Мура не может выполняться вечно.

Но есть и другое, принципиальное ограничение на "закон Мура". Возрастание плотности размещения элементов на микросхеме достигается за счет уменьшения их размеров. Уже сегодня расстояние между элементами процессора может составлять 0,13х10-6 метра (так называемая 0,13-микронная технология). Когда размеры транзисторов и расстояния между ними достигнут нескольких десятков нанометров, вступят в силу так называемые размерные эффекты - физические явления, полностью нарушающие работу традиционных кремниевых устройств. Кроме того, с уменьшением толщины диэлектрика в полевых транзисторах растет вероятность прохождения электронов через него, что также препятствует нормальной работе приборов.

Еще один путь повышения производительности - применение вместо кремния других полупроводников, например арсенида галлия (GaAs). За счет более высокой подвижности электронов в этом материале можно увеличить быстродействие устройств еще на порядок. Однако технологии на основе арсенида галлия намного сложнее кремниевых. Поэтому, хотя за последние два десятка лет в исследование GaAs вложены немалые средства, интегральные схемы на его основе используются в основном в военной области. Здесь их дороговизна компенсируется низким энергопотреблением, высоким быстродействием и радиационной устойчивостью. Однако и при разработке устройств на GaAs остаются в силе ограничения, обусловленные как фундаментальными физическими принципами, так и технологией изготовления.

Вот почему сегодня специалисты в разных областях науки и техники ищут альтернативные пути дальнейшего развития микроэлектроники. Один из путей решения проблемы предлагает молекулярная электроника.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА -ТЕХНОЛОГИЯ БУДУЩЕГО.

Возможность использования молекулярных материалов и отдельных молекул как активных элементов электроники уже давно привлекает внимание исследователей различных областей науки. Однако только в последнее время, когда стали практически ощутимы границы потенциальных возможностей полупроводниковой технологии, интерес к молекулярной идеологии построения базовых элементов электроники перешел в русло активных и целенаправленных исследований, которые стали сегодня одним из важнейших и многообещающих научно-технических направлений электроники.

Дальнейшие перспективы развития электроники связываются с созданием устройств, использующих квантовые явления, в которых счет уже идет на единицы электронов. В последнее время широко ведутся теоретические и экспериментальные исследования искусственно создаваемых низкоразмерных структур; квантовых слоев, проволок и точек. Ожидается, что специфические квантовые явления, наблюдающиеся в этих системах, могут лечь в основу создания принципиально нового типа электронных приборов.

Переход на квантовый уровень, несомненно, является новым, важным этапом в развитии электроники, т.к. позволяет перейти на работу практически с единичными электронами и создать элементы памяти, в которых один электрон может соответствовать одному биту информации. Однако создание искусственных квантовых структур представляет сложнейшую технологическую задачу. В последнее время стало очевидным, что реализация таких структур сопряжена с большими технологическими сложностями даже при создании единичных элементов, и непреодолимые трудности возникают при создании чипов с многомиллионными элементами. Выходом из создавшегося положения, по мнению многих исследователей, является переход к новой технологии -молекулярной электронике.

Принципиальная возможность использования отдельных молекул как активных элементов микроэлектроники была высказана Фейнманом еще в 1957 году. Позднее он показал, что квантомеханические законы не являются препятствием в создании электронных устройств атомарного размера, пока плотность записи информации не превышает 1 бит/атом. Однако, только с появлением работ Картера и Авирама стали говорить о молекулярной электронике, как о новой междисциплинарной области, включающей физику, химию, микроэлектронику и компьютерную науку, и ставившую своей целью перевод микроэлектроники на новую элементную базу -молекулярные электронные устройства.

Здесь определенно напрашивается аналогия с историей развития устройств точного времени, которые прошли путь от механических хронометров, использующих различного типа маятники, через кварцевые часы, основанные на твердотельных резонансах, и, наконец, сегодня наиболее точные часы используют внутримолекулярные эффекты в молекулах аммиака и т.д. Подобным образом развивается и электроника, прошедшая путь от механических электромагнитных реле и электровакуумных ламп к твердотельным транзисторам и микросхемам, а сегодня она подошла к порогу, за которым лежит область молекулярной технологии.

Не случайно, что основное внимание было сосредоточено на молекулярных системах. Во-первых, молекула представляет собой идеальную квантовую структуру, состоящую из отдельных атомов, движение электронов по которой задается квантово-химическими законами и является естественным пределом миниатюризации. Другой, не менее важной особенностью молекулярной технологии, является то, что создание подобных квантовых структур в значительной мере облегчено тем, что в основе их создания лежит принцип самосборки. Способность атомов и молекул при определенных условиях самопроизвольно соединяться в наперед заданные молекулярные образования является средством организации микроскопических квантовых структур; оперирование с молекулами предопределяет и путь их создания. Именно синтез молекулярной системы является первым актом самосборки соответствующих устройств. Этим достигается идентичность собранных ансамблей и, соответственно, идентичность размеров элементов и, тем самым, надежность и эффективность протекания квантовых процессов, функционирования молекулярных устройств.

С самого начала развития молекулярного подхода в микроэлектронике открытым оставался вопрос о физических принципах функционирования молекулярных электронных устройств. Поэтому основные усилия были сосредоточены на их поиске, при этом основное внимание уделялось одиночным молекулам или молекулярным ансамблям. Несмотря на большое количество работ в этом направлении, практическая реализация молекулярных устройств далека до завершения. Одной из причин этого является то, что особенно в начальный период становления молекулярной электроники сильный акцент был сделан на работе отдельных молекул, поиске и создании бистабильных молекул, имитирующих триггерные свойства. Конечно, этот подход весьма притягателен с точки зрения миниатюризации, но он оставляет мало шансов на то, что молекулярные электронные устройства могут быть созданы в ближайшее время.

Развитие нового подхода в микроэлектронике требует решения ряда проблем в трех основных направлениях: разработка физических принципов функционирования электронных устройств; синтез новых молекул, способных хранить, передавать и преобразовывать информацию; разработка методов организации молекул в супрамолекулярный ансамбль или молекулярное электронное устройство.

В настоящее время ведется интенсивный поиск концепций развития молекулярной электроники и физических принципов функционирования, и разрабатываются основы построения базовых элементов. Молекулярная электроника становится новой междисциплинарной областью науки, объединяющей физику твердого тела, молекулярную физику, органическую и неорганическую химии и ставящей своей целью перевод электронных устройств на новую элементную базу. Для решения поставленных задач и концентрации усилий исследователей, работающих в различных областях знаний, во всех индустриально развитых странах создаются Центры молекулярной электроники, объединенные лаборатории, проводятся международные конференции и семинары.

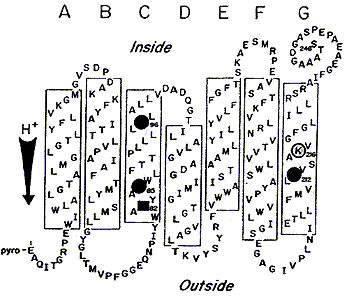
Сейчас, да видимо, и в ближайшее время, трудно говорить о создании молекулярных электронных устройств, работающих на основе функционирования одиночных молекул, но можно реально говорить об использовании молекулярных систем, в которых внутримолекулярные эффекты имеют макроскопическое проявление. Такие материалы можно назвать "интеллигентными материалами". Этап создания "интеллигентных материалов", т.е. этап функциональной молекулярной электроники, естественный и необходимый период в развитии электроники, является определенной стадией в переходе от полупроводниковой технологии к молекулярной. Но возможно, что этот период будет более продолжительным, чем сейчас нам кажется. Представляется более реалистичным, особенно на первых этапах развития молекулярной электроники, использовать макроскопические свойства молекулярных систем, которые обуславливались бы структурными реорганизациями, происходящими на уровне отдельных молекулярных ансамблей. Физический принцип функционирования подобных электронных устройств должен снять размерностные ограничения, по крайней мере, до размеров больших молекулярных образований. С точки зрения электроники и потенциальной возможности стыковки молекулярных устройств с их полупроводниковыми собратьями, было бы предпочтительно иметь дело с молекулярными системами, изменяющими свою электронную проводимость при внешних воздействиях, в первую очередь под воздействием электрического поля.

Идеи молекулярной электроники не сводятся к простой замене полупроводникового транзистора на молекулярный, хотя будет решаться и эта частная задача. Главной целью все же является создание сложных молекулярных систем, реализующих одновременно несколько различных эффектов, выполняющих сложную задачу. К задачам этого типа естественно в первую очередь отнести задачу создания универсального элемента памяти, как наиболее важной части любого информационно-вычислительного устройства. Представляется весьма очевидным, что потенциальные возможности молекулярной электроники будут раскрыты в большей мере при создании нейронных сетей, состоящих из нейронов и связывающих их электроактивных синапсов. Создание средствами молекулярной электроники искусственных нейронов, различного типа сенсоров, включенных в единую сеть, откроет путь к реализации всех потенциальных возможностей, заложенных в нейрокомпьютерной идеологии, позволит создать принципиально новый тип информационно-вычислительных систем и подойти вплотную к решению проблемы создания искусственного интеллекта.

**Бактериородопсин: структура и функции.**

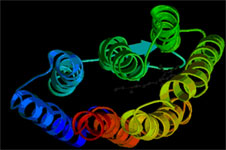
Молекулярная электроника определяется как кодирование (запись), обработка и распознавание (считывание) информации на молекулярном и макромолекулярном уровне. Основное преимущество молекулярного приближения заключается в возможности молекулярного дизайна и производства приборов "снизу вверх", т.е. атом за атомом или фрагмент за фрагментом, - параметры приборов определяются органическим синтезом и методами генной инженерии. Двумя общепризнанными достоинствами молекулярной электроники являются значительное уменьшение размеров устройств и времени срабатывания (gate propagation delays) логических элементов.   
   
Биоэлектроника, являющая разделом молекулярной электроники, исследует возможность применения биополимеров в качестве управляемых светом или электрическими импульсами модулей компьютерных и оптических систем. Основное требование к вероятным кандидатам среди большого семейства биополимеров состоит в том, что они должны обратимо изменять свою структуру в ответ на некое физическое воздействие и генерировать, по крайней мере, два дискретных состояния, отличающихся легко измеряемыми физическими характеристиками (например, спектральными параметрами).   
  
Значительный интерес в связи с этим представляют белки, основная функция которых связана с трансформацией энергии света в химическую в различных фотосинтетических системах. Наиболее вероятным кандидатом среди них является светозависимый протонный насос - бактериородопсин (БР) из галофильного микроорганизма *Halobacterium salinarum* (ранее *Halobacterium halobium*), открытыйв 1971году.   
  
Бактериородопсин - ретиналь-содержащий генератор протонного транспорта представляет собой трансмембранный белок в 248 аминокислот с молекулярным весом 26 кДа, пронизывающий мембрану в виде семи **-спиралей; N- и C-концы полипептидной цепи находятся по разные стороны цитоплазматической мембраны: N-конец обращен наружу, а C-конец - внутрь клетки (рис.1, 2).

**Рис.1.** *Модель БР в элементах вторичной структуры. Выделены аминокислоты,  
участвующие в протонном транспорте: кружками остатки аспарагиновой кислоты,  
квадратом остаток аргинина. С Lys-216 (К-216) образуется основание Шиффа (SB).  
Стрелкой показано направление протонного транспорта.*



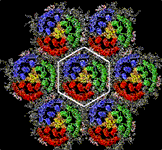
Хромофор БР - протонированный альдимин ретиналя с **-аминогруппой остатка Lys-216 размещен в гидрофобной части молекулы. После поглощения кванта света в ходе фотоцикла происходит изомеризация ретиналя из *all*-E в 13Z-форму. Белковое микроокружение хромофора может рассматриваться как рецептор с субстратной специфичностью для *all*-E /13Z-ретиналя, который катализирует эту изомеризацию при комнатной температуре. Кроме того, часть аминокислот ответственна за подавление изомеризаций, отличных от *all*-E /13Z, например от *all*-E- к 7Z-, 9Z-, 11Z-ретиналю. Остальная часть полипептидной цепи обеспечивает канал протонного транспорта или экранирует фотохромную внутреннюю группу от влияний внешней среды.   
  
Взаимная топография образованных полипептидной цепью БР элементов вторичной структуры после поглощения молекулой хромофора кванта света изменяется, в результате чего формируется канал трансмембранного переноса протонов из цитоплазмы во внешнюю среду. Однако молекулярный механизм светозависимого транспорта до сих пор неизвестен.

**Рис.2.** *Схематическая модель трехмерной (пространственной) структуры БР Семь -спиралей формируют хромофорную полость и трансмембранный канал переноса протона.*



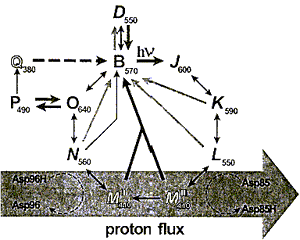
БР содержится в клеточной мембране *H. salinarum* - галофильной архебактерии, которая живет и размножается в соленых болотах и озерах, где концентрация NaCl может превышать 4 М, что в 6 раз выше, чем в морской воде (~ 0,6 М). Этот уникальный белок во многом подобен зрительному белку родопсину, хотя их физиологические функции различны. В то время как зрительный родопсин действует как первичный фоторецептор, который обеспечивает темное зрение большинства позвоночных животных, физиологическая роль БР заключается в том, чтобы давать возможность галобактериям действовать как факультативным анаэробам в случае, когда парциальное давление кислорода в окружающей среде мало. Белок функционирует как светозависимый протонный насос, который обеспечивает образование электрохимического градиента протонов на поверхности мембраны клетки, который, в свою очередь, служит для аккумулирования энергии. Первичная работа, производимая градиентом, заключается в синтезе АТФ через анаэробное (фотосинтетическое) фосфорицирование и, в этом случае, представляет собой классический пример хемиосмотической гипотезы Митчелла об окислительном фосфорицировании. Когда освещение отсутствует, а парциальное давление кислорода высоко, бактерии возвращаются к аэробному окислительному фосфорицированию .  
Клетки *H. salinarum* содержат также два так называемых сенсорных родопсина (СР I и СР II), которые обеспечивают положительный и отрицательный фототаксис. Различные длины волн считываются СР I и СР II как детекторными молекулами, что вызывает каскад сигналов, управляющих жгутиковым двигателем бактерии. При помощи такого элементарного процесса светового восприятия микроорганизмы самостоятельно перемещаются в свет подходящего спектрального состава. Кроме того, в клетках имеется галородопсин (ГР), представляющий собой светозависимый насос ионов Cl–. Его основная функция - транспорт в клетку ионов хлора, которые постоянно теряются бактерией, перемещаясь в направлении изнутри наружу под действием электрического поля, создаваемого БР. Механизм действия ГР неясен. Предполагается, что Cl– связывается с положительно заряженным четвертичным азотом протонированного Шиффова основания, а изомеризация ретиналя из *all*-E в 13Z-форму вызывает перемещение этого азота с прикрепленным к нему ионом Cl– от входного к выходному Cl– – проводящему пути.

**Рис.3.** *Участок пурпурной мембраны (вид сверху).*



БР локализован в участках клеточных мембран *H. salinarum* в виде пурпурных мембран (ПМ), образующих двумерные кристаллы с гексагональной решеткой. Эти участки содержат сам белок, некоторые липиды, каротиноиды и воду (рис.3). Обычно они имеют овальную или круглую форму со средним диаметром около 0,5 мкм и содержат около 25 % липидов и 75 % белка. ПМ устойчивы к солнечному свету, воздействию кислорода, температуре более чем 80ºC (в воде) и до 140ºC (сухие), рН от 0 до 12, высокой ионной силе (3 М NaCl), действию большинства протеаз, чувствительны к смесям полярных органических растворителей с водой, но устойчивы к неполярным растворителям типа гексана. Большое практическое значение имеет существующая возможность встраивания ПМ в полимерные матрицы без потери фотохимических свойств.   
  
Индуцированный светом протонный транспорт сопровождается рядом циклических спектральных изменений БР, совокупность которых называется фотоциклом (рис.4). Тридцать лет исследований привели к довольно детальному пониманию фотоцикла, однако подробности протонного транспорта все еще изучаются.   
  
Фотохимический цикл БР состоит из отдельных интермедиатов, которые могут быть идентифицированы как максимумами поглощения, так и кинетикой образования и распада. На рис.4 показана упрощенная модель фотоцикла БР.

**Рис.4.** *Фотоцикл БР.*

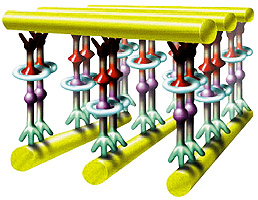
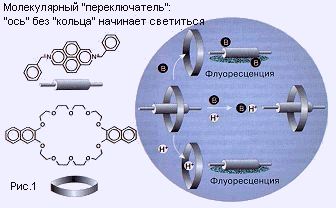


Фотохимические и тепловые стадии показаны как толстые и тонкие стрелки соответственно. Вертикальные символы указывают на *all*-E-конформацию ретиналя (интермедиаты **B** и **О**), наклонные символы - на 13Z-конформацию. В темноте БР превращается в 1:1 смесь **D** и **B**, эта смесь называется темноадаптированным БР. При освещении БР происходит световая адаптация, т.е. переход в основное состояние **B**. Оттуда начинается фотоцикл, который приводит к транспорту протона через мембрану. В течение перехода **L** к **М**, длящегося примерно 40 мксек, Шиффово основание депротонируется и Asp85 становится протонированным. Оттуда протон идет к внешней стороне внеклеточной части протонного канала. В течение перехода **М** к **N** альдимин репротонируется. В качестве донора протонов выступает остаток Asp96. Asp96 репротонируется через цитоплазматический протонный полуканал. В то время как все преобразования между интермедиатами обратимы, переход от **MI** к **MII**, как полагают, является основным необратимым шагом в фотоцикле. В течение этого перехода азот Шиффова основания становится недоступным для внеклеточной части протонного канала, а только для цитоплазматического полуканала , что связано с конформационными изменениями белковой молекулы.   
  
Физико-химические свойства интермедиатов характеризуются длиной волны их максимумов поглощения и величиной специфического молярного коэффициента экстинкции. Протонирование SB и конфигурация ретинилиденового остатка воздействует на величины максимумов поглощения. В течение фотоцикла БР происходит несколько зависящих от температуры конформационных изменений в белке, таким образом, формирование большинства интермедиатов может быть подавлено охлаждением.   
  
Кроме основного фотоцикла имеется два состояния, которые могут быть вызваны искусственно. В интермедиатах **P** и **Q** конформация ретиналя 9Z. Это достигается после фотохимического возбуждения *all*-E-ретиналя, когда в то же самое время Asp85 протонирован. Это может быть достигнуто в диком типе БР при низком значении pH или деионизацией (формирование так называемых голубых мембран), однако такие препараты нестабильны. Альтернативным подходом является замена Asp85 аминокислотой, имеющей другое значение pKa, которая остается незаряженной при интересующих значениях pH или полное удаление карбоксильной группы методами сайт-направленного мутагенеза. Стабильность таких мутантных голубых мембран выше.   
  
Уникальные свойства бактериородопсина обеспечивают широкий диапазон технических приложений, в которых он может использоваться, однако коммерчески осуществимы на сегодняшний день только оптические, поскольку их интеграция в современные технические системы наиболее проста.   
  
Оптические приложения основаны на применении пленок БР - полимерных матриц различного состава с включенными в них молекулами белка. Впервые в мире такие пленки на основе дикого типа БР были получены и исследованы в нашей стране в рамках проекта "Родопсин"; в 80-х годах была продемонстрирована эффективность и перспективность применения таких материалов, названных "Биохром", в качестве фотохромных материалов и среды для голографической записи.   
  
Весьма интересной является возможность варьирования фотохимических свойств пленок БР:   
      а) заменой природного хромофора на модифицированный;   
      б) химическими (физико-химическими) воздействиями;   
      в) точечными заменами определенных аминокислотных остатков методами генетической инженерии.   
  
Такие модифицированные материалы могут обладать ценными пецифическими свойствами, что предопределит их использование как элементной базы биокомпьютера.

**Мыслящая молекула**

В последние годы ученые многих стран вернулись к старой и простой идее "химического" компьютера, в котором вычисления производятся отдельными молекулами. За последний год исследователям сразу из нескольких лабораторий удалось получить в этой области блестящие результаты, обещающие радикально изменить ситуацию.

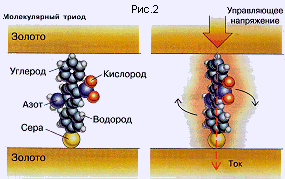
Большого успеха достигли учёные в работе с молекулами псевдоротоксана (они показаны на рис.1).



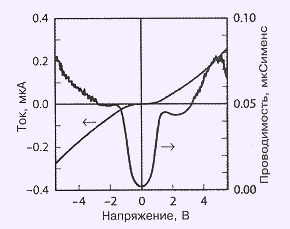
Им удалось насадить такую молекулу, имеющую форму кольца, на ось – линейную молекулу. Для того чтобы кольцо не соскакивало с оси, к ее концам присоединяются крупные молекулярные фрагменты, играющие роль "гаек" (в этом качестве использовались разнообразные донорные группы). При реакции с кислотой (Н+) или основанием (В) кольцо может скользить от одного конца оси к другому, "переключая" химическое состояние. Забавно, что в принципе на молекулярном уровне воссоздается механическое устройство, весьма похожее на соединение стержней и колесиков в первых, самых примитивных, вычислительных устройствах ХVII века (впрочем, при желании в этой молекулярной структуре можно углядеть и простейшие канцелярские счеты, с одной костяшкой на каждом прутике).

Эта изящная химическая молекула переключатель была изучена еще в начале 90-х годов, однако для практической реализации идеи требовалось еще придумать методы объединения и управления массивами этих минимикродиодиков. Создав моно слой одинаково ориентированных молекул такого типа на поверхности металла (эту очень сложную задачу удалось решить, используя новейшие нанотехнологические методы самосборки), ученые осадили на него тончайший слой золота и уже создали на этой основе примитивные прототипы логических вентилей.

Через несколько месяцев после этого объединенная группа Марка Рида и Джеймса Тура (из универси тетов Йеля и Райса) продемонстрировала общественности еще один класс молекул-переключателей. Результаты были настолько впечатляющими, что журнал "Scientific American" (июнь, 2000) даже вынес на обложку анонс "Рождение молекулярной электроники"(хочется добавить – наконец-то!). Как написал со сдержанной гордостью один из авторов: "Мы создали молекулу с переменной электропроводностью, которая может накапливать электроны по нашей команде, то есть работать как запоминающее устройство".



Прежде всего, Джеймс Тур по специальной методике синтезировал молекулярную цепочку из звеньев бензол-1,4-дитиолата длиной 14 нанометров. В нее были введены группы, которые захватывают электроны, если молекула находится "под напряжением". Сложнейшая проблема, с которой также удалось справиться, заключалась в том, что переключение должно быть обратимым химическим процессом. Для работы молекулы в качестве запоминающего элемента ее необходимо научить не просто захватывать электроны, а удерживать их только в течение заданного времени. Собственно говоря, именно в этом и состоит главное достижение Рида и Тура с коллегами.   
Электрохимический (в самом строгом и буквальном смысле этого термина!) переключатель показан на рис. 2 (левая часть). Он представляет собой цепочку из трех бензольных колец, к центральному из которых с противоположных сторон присоединены группы NО2, и NН2, (на рисунке выделены цветом). Такая асимметричная молекулярная конфигурация создает электронное облако сложной формы, в результате чего возникает удивительно красивый и принципиально важный для решения поставленной задачи физический эффект – при наложении поля молекула закручивается, ее сопротивление меняется, и она начинает пропускать ток (правая часть рисунка). При снятии поля молекула раскручивается в обратную сторону и возвращается в исходное состояние. Переключатель, созданный по этому принципу, представляет собой линейную цепочку из примерно 1000 молекул нитроаминобензолтиола, расположенную между двумя металлическими контактами. Более того, замеры с использованием туннельного микроскопирования (фрагмент молекулярной цепочки был впаян между сверхтонкими иглообразными золотыми электродами; геометрия эксперимента показана на рис. 3) позволили получить рабочие параметры переключателя, которые с полным правом можно назвать молекулярной вольт-амперной характеристикой и молекулярной проводимостью (рис.4). Кривая проводимости (которая, кстати, оказалась весьма близка к расчетной) имеет четко выраженный "провал". Это позволяет переводить участки молекулы из проводящего состояния в непроводящее, и наоборот, простым изменением приложенного напряжения. Формально и фактически получен (химик, конечно, предпочтет термин "синтезирован") молекулярный триод. Действительно, это можно считать первым этапом создания молекулярной электроники.



|  |
| --- |
| Рис.4 Молекулярная вольт-амперная характеристика |

**Заключение**

Хотя теоретические основы молетроники уже достаточно хорошо разработаны и созданы прототипы практически всех элементов логических схем, однако на пути реального построения молекулярного компьютера встают значительные сложности. Внешне очевидная возможность использования отдельных молекул в качестве логических элементов электронных устройств оказывается весьма проблематичной из-за специфических свойств молекулярных систем и требований, предъявляемых к логическим элементам.

В первую очередь логический элемент должен обладать высокой надежностью срабатывания при подаче управляющего воздействия. Если рассматривать оптическую связь между элементами, то в системе одна молекула - один фотон надежность переключения будет невелика из-за относительно малой вероятности перехода молекулы в возбужденное состояние. Можно пытаться преодолеть эту трудность, используя одновременно большое число квантов. Но это противоречит другому важному требованию: КПД преобразования сигнала отдельным элементом должен быть близок к единице, то есть средняя мощность реакции должна быть соизмерима со средней мощностью воздействия. В противном случае при объединении элементов в цепь вероятность их срабатывания будет уменьшаться по мере удаления от начала цепи. Кроме того, элемент должен однозначно переключаться в требуемое состояние и находиться в нем достаточно долго - до следующего воздействия. Для сравнительно простых молекул это требование, как правило, не выполняется: если переходом в возбужденное состояние можно управлять, то обратный переход может происходить спонтанно.

Однако не все так плохо. Использование больших органических молекул или их комплексов позволяет, в принципе, обойти перечисленные трудности. Например, в некоторых белках КПД электронно-оптического преобразования близок к единице. К тому же, для больших биоорганических молекул время жизни возбужденного состояния достигает десятков секунд.

Но даже в том случае, если отдельный молекулярный вычислительный элемент и не будет обладать надежностью своих кремниевых предшественников, эффективной работы будущего компьютера можно достичь, комбинируя принципы молетроники и параллельных вычислений, применяемых в суперкомпьютерах. Для этого надо заставить несколько одинаковых молекулярных логических элементов работать параллельно. Тогда неправильное срабатывание одного из них не приведет к заметному сбою в вычислениях. Современный суперкомпьютер, работающий по принципу массивного параллелелизма и имеющий многие сотни процессоров, может сохранять высокую производительность даже в том случае, если 75% из них выйдет из строя. Практически все живые системы используют принцип параллелизма. Поэтому несовершенство организмов на уровне отдельных клеток или генов не мешает им эффективно функционировать.

Сегодня в мире существует уже более десятка научно-технологических центров, занимающихся разработкой устройств молекулярной электроники. Ежегодные конференции собирают сотни специалистов в этой области.

Большой интерес к молетронике вызван не только перспективами построения компьютера, но и широкими возможностями развития новых технологий. Благодаря высокой чувствительности молекулярных электронных устройств к свету их можно использовать для создания эффективных преобразователей солнечной энергии, моделирования процесса фотосинтеза, разработки нового класса приемников изображения, принцип действия которых будет напоминать работу человеческого глаза. Молекулярные устройства можно использовать также в качестве селективных сенсоров, реагирующих только на определенный тип молекул. Такие сенсоры необходимы в экологии, промышленности, медицине. Сенсор из органических молекул значительно легче вживлять в организм человека с целью контроля за его состоянием.

Для решения стоящих перед молекулярной электроникой проблем нужны усилия широкого круга ученых, работающих в области академических знаний от коллоидной химии и биологии до теоретической физики, а также в области высоких технологий. Кроме того, требуются значительные финансовые вложения.

Необходима также подготовка новых высококвалифицированных кадров для работы в этой сложной области, лежащей на стыке наук. Но, судя по всему, лет через 10-15 она будет играть заметную роль в науке и технике.

# Список используемого материала

**По материалам сети Internet, статьи:**

1. Гончарова Е., бакалавр биотехнологии;
2. Зайцев В., Шишлова А., физический факультет, МГУ им. М. В. Ломоносова;
3. Кригер Ю., д. ф-м. н.