

Abstract.

This paper provides an overview of 8 years of world scientific publications on various micro-and nanodevices that can serve as invasive sensors of the nervous system of animals and humans. It is concluded that the modern achievements of scientific and technological progress in the field of high technology, allow you to start a series of experimental works that practically implement the theoretical positions, goals and objectives of the new interdisciplinary science of settleretics.

Введение.

В обобщающих, за 20 лет (1996 – 2016), работах автора [1, 2], по новой междисциплинарной науке

сеттлеретик

е

[3]

, был введен термин

нанонейродатчик-«шпион»

, как основной метод реализации целей и задач сеттлеретики. «Снимать информацию (нейроактивность) с мозга человека должны т. н.

нанонейродатчики-«шпионы»

, то есть, наносенсоры, в виде «искусственной мембраны», вживленные в естественную мембрану каждой из 70 миллиардов нервных клеток (нейронов) головного мозга.

Доставка и вживление таких датчиков должна осуществляться естественным путем, с кровотоком, специальными

нанороботами

. Мониторинг работы мозга, круглосуточно и прижизненно, производимый датчиками-«шпионами», непрерывно должен передавать информацию вовне черепной коробки, по сети датчиков-«шпионов» и, в конечном счете, через

вживленный в мозг «чип с передатчиком»

(в радио- или оптодиапазоне длин электромагнитных волн). Далее, собранная датчиками первичная информация, - обрабатывается супер-нейрокомпьютером, с применением специального программного обеспечения (основанного на математическом методе «функциональных рядов и ядер Винера - Вольтерра»), восстанавливающего переходную/передаточную функцию нейрона, как «черного ящика», по сигналам с его входа и выхода»

[4]

«Метод сеттлеретики, – «оцифровка» нервно-гуморальной системы, то есть создание таких «материала, способа и устройства» (например, томографы, плюс нанодатчики-"шпионы"), и «программ ЭВМ», которые окажутся способными «переселить»

(переместить, скопировать) всю необходимую информацию, из оригинального нейроносителя, – на эквивалентный ему, по структуре и функции, резервный и дублирующий, искусственный нейроноситель (например, на графеновый или кремниевый, в супер-нейрокомпьютер, управляющий «телом» робота), путем пожизненного и круглосуточного «симбиоза» с ним»

[5]

(В научно-технической литературе по теме встречаются и другие, синонимичные к авторскому, термины: *инвазивные электроды, микрозонды и наносенсоры, микро- и наноимпланты, средства доставки, нейрочипы* , и др.)

Там же, автором упоминался список работ, где предлагалась техническая реализация такого нанонейродатчика-«шпиона»: «Как стало известно автору в последнее время, подходящий на роль «датчика-шпиона» наносенсор, – уже создан! К сожалению, – указанный датчик был создан не у нас, в России, а в Америке. Учёными Гарвардского университета (Harvard University), во главе с профессором Чарльзом Либером (Charles M. Lieber), и совместно с группой исследователей Массачусетского технологического института. И называется он теперь иначе: «nanoFIT» («nanoscale field-effect transistors», или «наноразмерный полевой транзистор»). Источник: [17–24], прежде всего, Science, 2010, DOI: 10.1126/science.1192033 (см. <http://news.harvard.edu/...icate-touch/>, <http://cmliris.harvard.edu/publications/index.php>

). Но, структурно и функционально, – это именно сеттлеретический «датчик-шпион». Поскольку он создан для нетравмирующего самопроникновения в мембраны нервных клеток, с целью мониторинга, происходящих там, электрохимических процессов»

[6].

Прошло 8 лет с упомянутых публикаций и, за это время, мировые высокие технологии, продвинулись далеко вперед, по пути научно-технического прогресса. Всё необходимое, для создания сеттлеретической технологии, в мировой науке и технике, было готово ещё тогда и, тем более, имеется оно уже и сегодня. Автор постоянно ведёт мониторинг информации по данной тематике и, в настоящей работе, предлагает своим читателям

ознакомиться с новыми достижениями, в упомянутой выше области (микро- и наноимплантов, средств доставки, и вживленных нейрочипов), и убедиться в этом.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Микро- и нано- нейроэлектроды: одиночные, матричные, сетевые.
2. Новые материалы нанoeлектроники: фуллерен, диамантоид, нанотрубки, графен, и другие.
3. Нейроэлектроды: системный переход от микро- к нано-.
4. Биофотоника и биоакустика.
5. Микро- и нанонейропыль.
6. Мониторинг ионных каналов.
7. Перепрограммирование нейронов.
8. Биodeградирующие импланты.

9. Нейромемристоры.

10. Нейрочипы, искусственные нейроны и синапсы.

11.* Биоэлектроника.

12.* Средства доставки.

1. Микро- и нано- нейроэлектроды: одиночные, матричные, сетевые.

Начать обзор можно с традиционного, в нейрофизиологии и нейромедицине, способа инвазивного воздействия на нервную ткань: введением отдельных электродов, групп электродов, матриц электродов, и сеток электродов. Но пакеты таких электродов являются достаточно жесткими, раздражающими, иммунно-отторгаемыми, или обволакиваемыми защитным слоем клеточных тканей. Что затрудняет процесс коммуникации с нервной системой, и большинство систем с вживляемыми электродами работоспособны недолго, несколько суток, максимум пару месяцев. Это называется «проблемой биосовместимости».

Упомянутые выше ученые из Гарвардского университета, возглавляемые профессором химии Чарльзом Либером (Charles Lieber), успешно решили эту проблему. Созданная ими сетка вживляемых электродов практически лишена всех упомянутых выше недостатков, и ее применение уже позволило произвести запись деятельности нейронов мозга подопытного животного, непрерывно на протяжении восьми месяцев, чего уже достаточно для отслеживания «долговременных» изменений мозга. Основой новых вживляемых электродов является сетка из очень тонких кремниевых проводников, покрытых слоем биологически совместимого полимерного материала. Толщина проводников и защитного слоя выбраны так, что в точках пересечения нанопроводников образуются, своего рода, полевые транзисторы. Размеры этих сеток столь малы, что они сворачиваются естественным образом, попав в жидкость с определенной

концентрацией солей, и могут быть введены в мозг при помощи шприца. Попав в мозг, сетка распрямляется, и закрепляется на поверхности нейрона. В данном случае, нейрон начинает выступать в роли управляющего электрода (затвора) полевого транзистора. Когда он активируется и генерирует электрический импульс, транзистор открывается, и через него протекает ток, который измеряется специальным устройством, что позволяет получить достаточно четкую картину сигналов, циркулирующих в нейронах головного мозга. Сейчас исследователи пробуют включить в матрицу открытые электроды, которые позволят реализовать процесс электрического возбуждения нейронов. Такая комбинация позволит ученым, в случае идентификации ранней стадии заболевания, использовать электрическую стимуляцию для остановки или замедления этого процесса. Помимо всего этого, группа Чарльза Либера собирается использовать данную технологию и на других участках нервной системы. К примеру, сетка электродов на сетчатке глаза, может снабдить ученых информацией о работе зрительной системы. А электроды, внедренные в спинной мозг, смогут дать ученым массу новой информации и обеспечить совершенно новые формы терапевтического лечения. Сообщение опубликовано в трудах *Harvard University, The Human OS Newsletter* [7]. Статья, с описанием нового метода, опубликована журналом *Nature Methods* [8].

Группой исследователей из Орегонского университета (Oregon State University, OSU) так же предлагается заменить отдельные вводимые электроды – матрицей электродов, сразу из группы в 100 микроэлектродов USEA (Utah Slanted Electrode Array), площадью по 16 кв. мм., в нервные ткани конечности подопытного животного (кошки, в данном случае). Матрица состоит из электродов разной высоты, что обеспечивает ее контакт с различными слоями нервных тканей. Работа была опубликована в *Frontiers in Neuroscience* [9].

Исследовательская группа, возглавляемая учеными из Калифорнийского университета в Сан-Диего (the University of California San Diego), разработала новую технологию изготовления матриц из нанопроводников, использование которой позволит произвести запись электрической деятельности отдельных нейронов в самых мелких деталях. А практическое применение таких матриц наноэлектродов и нанопроводников позволит в будущем с большей точностью определить нюансы «общения» между собой отдельных нейронов, входящих в состав больших нейронных сетей, что, в свою очередь, позволит выяснить реакцию организма на использование новых лекарственных препаратов и новых методов лечения неврологических заболеваний. В настоящее время исследователи, занимающиеся изучением деятельности отдельных нейронов, используют нейроны, выращенные в пробирке из так называемых плюрипотентных стволовых клеток. Этот подход дает ученым массу информации, но ее еще большее количество можно получить только подключившись напрямую к нейронам головного мозга. «Сейчас мы адаптируем технологию изготовления наноэлектродов и

нанопроводников для того, чтобы при ее помощи можно было создать устройство, которое можно имплантировать в мозг человека» - рассказывает Шади Дае (Shadi Dayeh), профессор из Калифорнийского университета, - «Наша технология позволит создавать имплантаты, которые внедряются в мозг, не нарушая целостности нейронов и не оказывая влияния на их функционирование». Пока новая технология позволяет производить измерения и запись электрических ионных канальных токов и изменения внутриклеточного электрического потенциала. Как уже упоминалось выше, данная информация позволяет судить о «состоянии здоровья» нервной клетки, об его активности и о реакции на определенные химические вещества. Но у данной технологии имеется гораздо более широкий потенциал, при ее помощи можно будет заново соединить разорванные нейронные связи, восстанавливая работоспособность пораженных какой-либо болезнью нервных тканей. Сообщение опубликовано в *Kurzweil*

A
ccelerating
I
ntelligence

[10]

. Статья опубликована в

N
ano
L
ett
ers
 [11].

Однако, как уже было отмечено выше, такие решетки крайне некомфортны, и вызывают воспаление тканей, а, кроме того, очень дороги. Но главный их недостаток заключается в том, что они способны регистрировать активность только групп нейронов, а не индивидуальных клеток. Исследователи из США и Китая применили мозговой имплантат, лишенный этих недостатков, и регистрирующий активность отдельных нейронов. Впервые, от испытаний на мышах (2013), учёные успешно перешли к клиническим испытаниям на людях. Устройство NeuroGrid позволяет выявлять очаги поражения в мозге больных эпилепсией, и представляет собой решетку, толщиной около 4 микрон, сделанную из парилена (поли-п-ксилилена). Решетка покрывает площадь коры мозга около 420 мм². По консистенции она напоминает тонкую целлофановую пленку, и хорошо прилипает к влажным поверхностям — таким, как головной мозг. На решетке сидит 120 полимерных проводящих электродов. На каждые 10 из них приходится один провод, который присоединяется к силиконовому чипу, находящемуся вне мозга, и выполняющему функцию усилителя сигнала. Чип проводит компрессию сигналов, и по проводу посылает их в компьютер, который затем проводит их декомпрессию и анализ. В дальнейшем, авторы планируют усовершенствовать имплантат: сделать блок питания и усилитель сигнала полностью имплантируемыми в мозг, а также усилить их эффективность. Работа была опубликована в журналах *Nature*

Neuroscience

[12]

и
*Science
 Advances*
[13].

2. Новые материалы наноэлектроники: фуллерен, диамантоид, нанотрубки, графен, и другие.

Для решения «проблемы биосовместимости», учеными всего мира ищутся новые, нетравмируемые и неотторгаемые, современные материалы. Ранее ученые внедряли микроэлектроды, изготовленные из вольфрама или кремния. Использование матриц таких электродов было успешным на протяжении некоторого времени, но затем, из-за реакции тела человека на травму, вокруг этих электродов формировались более плотные защитные ткани, которые служили помехой для получения качественных сигналов. Кроме этого, из-за высокой твердости и хрупкости материалов, матрицы электродов, через некоторое время, выходили из строя, вследствие механических повреждений. Первым кандидатом на роль биосовместимого электрода, лишенного этих недостатков, стал, весьма популярный ныне, графен. Чистый графен обладает гибкостью, прочностью и он абсолютно безопасен для живого организма. Следует отметить, что это далеко не первая попытка исследователей использования графена для создания интерфейсов между мозгом и электроникой. Однако, во всех предыдущих попытках графеновые электроды могли обеспечить лишь сигнал с низким уровнем и низким значением соотношения сигнал/шум. Но усилия ученых из университета Триеста, Италия, и Кембриджского университета, Великобритания, увенчались успехом, благодаря тому, что они использовали электроды из необработанного графена (graphene-based substrates, GBS). «В настоящее время мы только внедряемся в пограничную область, где сходятся графеновые нанотехнологии и биомедицина» - рассказывает профессор Маурицио Прато (Maurizio Prato), - «А дальнейшее развитие высокоэффективных биомедицинских устройств, на основе графена, потребует дополнительных исследований взаимодействия графеновых нано- и микропокрытий с сигнальным механизмом клеток нервных тканей. И наша работа является первым шагом в этом направлении». (Данные работы проводились в рамках и под финансированием европейского проекта Graphene Flagship.) Сообщение была опубликовано в трудах *Unive*

rsity
f
Cambridge
, New Atlas
[14]

0

, статья в

ACS

Nano

[15].

Матрица биосовместимых графеновых микротранзисторов была создана и испытана еще, в далеком теперь, 2011 году. Команда ученых из Технического университета Мюнхена (Technische Universitaet Muenchen) объявила о создании того, что в недалеком будущем станет основой электронных устройств, способных общаться напрямую с человеческим мозгом. Ученые создали матрицу из транзисторов на основе графена, которые совместимы с живыми тканями, могут производить съём и запись электрических сигналов, вырабатываемых процессами, протекающими в клетках живых организмов. Транзисторы, используемые в современной электронной технике, изготавливаются преимущественно из кремния. Кремний является химически активным материалом, который плохо реагирует на условия, существующие внутри живых клеток, в первую очередь на влагу, насыщенную активными органическими и неорганическими соединениями. Для этих целей практически идеально подходит графен, который химически устойчив и биологически инертен. Графеновые пленки легко наносить на гибкие основания и его можно производить достаточно дешево в промышленных масштабах. «Чувствительный механизм этих устройств довольно прост», - говорит д-р Хосе Антонио Гарридо (Dr. Jose Antonio Garrido). – «Изменения электрической и химической окружающей среды в районе зоны ворот ФЭТ (FET, field-effect transistors) будут преобразованы в изменение тока транзистора». Исследователи из Мюнхена начали с того, что изготовили матрицу из 16 графеновых полевых транзисторов (graphene solution-gated field-effect transistor, G-SGFET). Графеновая пленка была осаждена из паровой фазы на поверхность медной фольги, затем, используя обычный метод фотолитографии и травления были получены все элементы электрической схемы. После этого поверх созданной транзисторной матрицы ученые вырастили слой живых клеток, клеток тканей, подобной ткани сердечной мышцы. Изменения в химической и электрической составляющей окружающей среды в районе затворов полевых транзисторов были преобразованы в изменения электрического тока, протекающего через транзистор. Исследователи обнаружили, что эти сигналы биологического происхождения весьма легко отделить от шумов и помех. Дальнейшие исследования ученых направлены на уменьшение уровня собственных шумов создаваемых графеновых транзисторов. Это позволит еще более точно выделять сигналы биологического происхождения и использовать их в других целях. Так же идет доработка технологии изготовления графеновых транзисторов для того, что бы матрицы из них можно было создавать на подложках из гибких полимерных материалов, используемых для изготовления имплантов. Так же немецкие ученые работают совместно с учеными из парижского Института зрения (Vision Institute), определяя, совместимы ли графеновые транзисторы с тканями сетчатки глаза и нейронами глазных нервов. Так же, совместно с командой других европейских ученых проводятся разработки мозговых имплантов, основой которых являются гибкие устройства на основе графеновых транзисторов. Сообщение было опубликовано в *TG Daily* [16], статья опубликована в *Advanced Materials*

[17].

Что будет, если взять молекулу фуллерена C_{60} и разрезать ее пополам, словно арбуз? То, что получится в результате такого действия, называется «корануленом» (corannulene, $C_{20}H_{10}$), молекулы которого, согласно результатам последних исследований, могут стать основой компонентов так называемой молекулярной электроники, схемы которой миниатюризированы до уровня отдельных молекул. И из этих молекул можно достаточно просто «составлять» распространенные виды базовых электронных приборов - транзисторы, диоды и т.п. Фуллерен - это достаточно распространенный и хорошо изученный материал. Его молекулы, называемые еще бакиболлами, состоят из 60 атомов углерода, образующих сетку из шести- и пятиугольных ячеек, сформированную в виде полый сферы. В некоторых условиях молекула фуллерена действует, как один огромный суператом, способный захватывать, удерживать и пропускать сквозь себя свободные электроны. Такое состояние молекулы называют «пустым состоянием» (buckybowl superatom states, BSS). Но, к сожалению, в такое состояние «суператом» молекулы фуллерена переходит лишь на достаточно высоком энергетическом уровне, что делает чрезвычайно трудным использование всего этого в электронике.

Для нормальной работы любого электронного устройства и прибора необходимо, чтобы электроны в его пределах имели возможность перемещаться легко и без потерь своей энергии. «Для помещения молекул фуллерена на любой из энергетических BSS-уровней требуются значительные затраты энергии» - объясняет Лейла Мартин-Сэмс (Layla Martin-Samos), исследователь из итальянского международного научного института SISSA (SISSA Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati, Trieste, Italy), - «Молекулы коранулена гораздо лучше подходят для их использования в молекулярной электронике. Они переходят в «пустое» состояние при более низких уровнях энергии и это подтверждается нашими расчетами». Итальянские исследователи провели тщательное изучение всех свойств молекул коранулена. «На этот раз, мы уделили особо пристальное внимание электронным свойствам этих молекул и особенностям перехода этих молекул в одно из BSS-состояний» - рассказывает Лейла Мартин-Сэмс, - «Молекулы коранулена переходят в такое состояние при более низких уровнях энергии, нежели молекулы фуллерена, и все это делает коранулен превосходным кандидатом на его использование в элементах молекулярных электронных схем. Если молекулы коранулена расположить рядом друг с другом и обеспечить им небольшую энергетическую «подпитку», то электроны беспрепятственно переходят от одной молекулы к другой, формируя своего рода туннель, из которых и состоят электронные схемы». Работа, проведенная итальянскими учеными, не только «вскрыла» весь потенциал молекул коранулена. Результаты этой работы являются основой для будущих исследований, указывая ученым, на что им стоит обращать свое внимание. Это приведет к ускорению и удешевлению проведения реальных экспериментов, к которым итальянцы планируют приступить в самом ближайшем времени. «Мы все держим

скрещенными наши пальцы. Наши теоретические и математические исследования могут привести к появлению первых в истории сложных молекулярных электронных схем. И если все пойдет, как задумано, это положительные результаты экспериментов могут быть получены уже в течение следующих нескольких месяцев». Сообщения опубликованы в *Phys. Org* [18, 20], статьи опубликованы в *Physical Chemistry Chemical Physics* [19] и *Nature Chemistry* [21].

Ранее (2014) сообщалось, что группе ученых из Стэнфордского университета (Stanford Institute for Materials and Energy Sciences (SIMES) at the Department of Energy's SLAC National Accelerator Laboratory), при содействии ученых из Бельгии, Германии и Украины, удалось «скрестить» две не самых обычных формы углерода, микроскопический алмаз, так называемый алмазоид, с бакиболлом, еще одним из видов углерода, форма которого напоминает форму футбольного мяча. Получившаяся в результате такого «скрещивания» молекула проводит электрический ток в одном направлении, являясь, по сути, аналогом известного электронного компонента, называемого диодом. Данное достижение является достаточно значимым шагом для сокращения компонентов электронных чипов до молекулярного уровня, что, в свою очередь, позволит изготавливать действительно миниатюрные электронные устройства, обладающие достаточно высокой мощностью и эффективностью. «Экспериментируя, мы изучали то, какие новые свойства могут обрести молекулы, составленные из двух совершенно разных форм углерода. Мы назвали эти новые молекулы «бакиалмазоидами (buckydiamondoid)» - рассказывает Хари Мэнохаран (Hari Manoharan), ученая из Института материаловедения и энергетики (Stanford Institute for Materials and Energy Sciences, SIMES) Стэнфордского университета, - «То, что нам удалось получить, является односторонним «клапаном» для электрического тока, который действует совершенно отлично от действия его составных частей». Бакиболлы (Buckyballs, Buckminsterfullerenes) - это полые сферы из 60 атомов углерода, за открытие которые трое ученых в 1985 году удостоились Нобелевской премии по физике и химии. Алмазоиды (Diamondoids) - это крошечные кристаллы алмаза, состоящие из нескольких атомов углерода и весящие всего одну миллиардную часть от миллиардной части карата. И, следует заметить, эти оба материала являются сейчас предметом повышенного интереса со стороны ученых в силу их некоторых уникальных свойств. Базой для создания углеродного молекулярного диода стали следования 2007 года, проведенные учеными из Стэнфордского университета и лаборатории линейных ускорителей SLAC. В то время ученым удалось обнаружить, что тонкий слой из алмазоидов, нанесенный на поверхность металла, является весьма эффективным источником электронного излучения. И недавно ученым пришла в голову мысль совместить излучающие электроны алмазоиды с бакиболами, которые, наоборот, очень хорошо их поглощают. Получившиеся бакиалмазоиды являются крошечными структурами, длина которых равна всего нескольким нанометрам. Изображения этих гибридных молекул были получены при помощи сканирующего туннельного микроскопа, который использовался еще и для проведения измерений электрических характеристик углеродного диода. Оказалось, что этот диод является самым лучшим диодом из всех

молекулярных диодов, созданных учеными ранее. В одну сторону он пропускает ток, в 50 раз превышающий ток, который может пройти в обратном направлении. В заключение стоит отметить, что углеродный диод является не первым молекулярным диодом, изготовленным учеными. Но, в отличие от других представителей этого семейства новый электронный прибор отличается превосходными электрическими характеристиками и тем, что в его составе находятся только атомы углерода и немного атомов водорода, который используется в качестве своеобразного "клея". А в самом ближайшем времени ученые собираются провести дополнительные исследования в направлении создания молекулярных электронных приборов. И очередным кандидатом на его изготовление из одного углерода станет транзистор, прибор, имеющий два полупроводниковых перехода и играющий самую главную «скрипку» во всей современной электронике. Сообщение опубликовано в *Phis. Org* [22], статья опубликована в *Nature Communications* [23].

Используя углеродные нанотрубки, состоящие из одного из самых тонких материалов в природе, ученые IBM создали транзисторы с самыми маленькими, на сегодняшний день, размерами их элементов. Но, при этом, новые транзисторы существенно выигрывают у кремниевых аналогов по скорости их работы. Следует отметить, что ученые уже достаточно давно экспериментируют с транзисторами на углеродных нанотрубках, крошечных трубках, диаметром около 1 нанометра, стенки которых состоят из атомов углерода и имеют толщину в один атом. Однако ученые постоянно сталкиваются с массой трудностей технического и технологического плана. Эти трудности заставляют исследователей идти на компромиссы, некоторые из которых определяют, что для обеспечения высокой скорости и эффективности работы, размеры нанотрубочных транзисторов должны быть больше размеров традиционных кремниевых транзисторов, которые составляют сейчас порядка 100 нанометров. Для уменьшения размеров транзистора ученые IBM использовали новую технологию, позволившую им установить на основании электроды, размером в 10 нанометров, подающие или отводящие электрический ток от углеродной нанотрубки. Эти электроды изготовлены из молибдена, материала, который хорошо сочетается и контактирует с углеродом на концах нанотрубок. А добавка кобальта к материалу электродов позволила проводить технологический процесс при более низкой температуре. Но для того, чтобы транзистор можно было использовать в практических целях, он должен иметь возможность проводить большой электрический ток, нежели может провести через себя одна углеродная нанотрубка. Ученым удалось «уложить» параллельно несколько нанотрубок, длина которых равнялась всего 7-ми нанометрам и надежно соединить их концы с молибденово-кобальтовыми электродами. В результате всего перечисленного выше полный размер структуры нанотрубочного транзистора составил всего 40 нанометров. Так как первые такие транзисторы являются лишь опытными образцами, приводить их точные характеристики не имеет никакого смысла, стоит упомянуть лишь, что новые транзисторы имеют более высокую скорость работы и эффективность, нежели ближайшие кремниевые аналоги. В ближайшем времени специалисты компании IBM планируют заняться изготовлением нанотрубочных транзисторов, в которых будут использованы нанотрубки, длиной в 5 нанометров. И такие транзисторы, за счет меньшей длины канала, смогут работать еще на более высоких скоростях, потребляя

меньше энергии, чем требуется транзисторам с 7-нм нанотрубками. Сообщение опубликовано в *Technology* [24], статья опубликована в *Science* [25].

В течение многих лет, ученые пытаются использовать уникальные свойства углеродных нанотрубок, крошечных цилиндров, углеродные стенки которых имеют одноатомную толщину, для изготовления миниатюрной и высокоэффективной электроники. Однако, несмотря на все попытки, транзисторы, изготовленные из нанотрубок, раньше проигрывали по всем параметрам традиционным транзисторам, изготовленным из кремния, арсенида галлия и других полупроводниковых материалов. И лишь недавно ученым из университета Висконсина-Мадисона (University of Wisconsin-Madison) впервые в истории удалось создать «нанотрубочные» транзисторы, которые по некоторым параметрам превосходят их кремниевые аналоги. Транзисторы на основе углеродных нанотрубок были созданы группой, возглавляемой профессорами Майклом Арнольдом (Michael Arnold) и Падмой Гопалан (Padma Gopalan). Во время испытаний транзисторы смогли проводить через себя электрический ток, силой в 1.9 раза превосходящей силу тока, который способны проводить кремниевые транзисторы с аналогичной длиной канала, размерами и другими параметрами. Согласно теоретическим расчетам, транзисторы из углеродных нанотрубок должны иметь набор характеристик, который минимум в пять раз превышает по всем показателям характеристики кремниевых транзисторов. Однако, для того, чтобы иметь возможность изготовления близких к идеальным транзисторов, требуются нанотрубки высокой степени чистоты, в которых отсутствуют нанотрубки, обладающие металлическими свойствами в силу дефектов их структуры. Ученым удалось решить эту проблему при помощи определенных полимерных материалов, которые выступили в роли фильтра, связавшего только металлические нанотрубки и оставив в фильтруемом растворе только нанотрубки, обладающие полупроводниковыми свойствами. «Нам удалось подобрать особые условия, которые позволили нам избавиться от почти всех металлических нанотрубок. В результате мы получили раствор с концентрацией металлических нанотрубок меньше 0.01 процента» - рассказывает Майкл Арнольд. Кроме очистки раствора от ненужных нанотрубок, ученым удалось решить проблему точного размещения и выравнивания нанотрубок на основании. Это было сделано при помощи технологии самосборки и самовыравнивания (floating evaporative self-assembly), разработанной в университете Висконсина-Мадисона еще в 2014 году. И последней решенной сложной проблемой стало обеспечение надежного электрического контакта углеродных нанотрубок с металлическими электродами будущих транзисторов. Это было сделано снова при помощи полимера, речь о котором шла немного выше. Этот полимер действовал как изолятор между нанотрубкой и металлическим электродом. После высокотемпературной обработки в микроволновой печи этот полимер распался, изолирующий слой исчез и между нанотрубкой и электродом образовался отличный электрический контакт. В настоящее время исследователи работали с кремниевыми подложками, размером 1 на 1 дюйм, а в ближайшее время они начнут адаптировать разработанные ими технологии и методы для работы с 300-мм промышленными подложками, что в будущем позволит наладить широкомасштабное производство первых нанотрубочных транзисторов, предназначенных для эффективных высокочастотных усилителей, которые можно будет

использовать в мобильных телефонах. Параллельно с этим ученые будут продолжать работу над совершенствованием всех технологий, что позволит приблизить характеристики реальных транзисторов к идеальным характеристикам. Сообщения опубликованы в *News University of Wisconsin–Madison* [26], и в *Science Daily News* [27], статья опубликована в *Science Advances* [28].

Деятельность исследователей, работающих в области молекулярной электроники, направлена на создание аналогов базовых электронных компонентов, состоящих из отдельных молекул различных химических соединений. За последние пять лет, на свет появилось множество вариантов реализации диодов и транзисторов, построенных на основе молекул органических и неорганических соединений, и даже на базе отдельных атомов. К сожалению, использование органических молекул не дает необходимого уровня повторяемости результатов, другими словами, характеристики каждого органического молекулярного транзистора отличаются от характеристик другого точно такого же транзистора. Транзисторы же на основе неорганических молекул демонстрируют приблизительно одинаковые характеристики, но, к сожалению, до последнего времени такие транзисторы могли работать только будучи охлажденными до сверхнизких температур. Прорыв в области неорганических молекулярных транзисторов удалось совершить исследователям из Колумбийского университета (Columbia University School of Engineering and Applied Science). Они изготовили свой вариант транзистора, состоящего из молекулярной «группы» в состав которой входят 14 атомов различных элементов. Такая искусственно созданная «молекула» подключена к двум золотым электродам, и когда в этой молекуле изменяется электрический потенциал путем добавления из удаления одного электрона, то транзистор переключается из открытого в закрытое состояние, т.е. из проводящего в непроводящее электрический ток состояние. Основной «изюминкой» данной разработки является искусственная молекула, каждый из 14 атомов которой расположен в строго заданном месте молекулы. Для создания таких молекул и манипулирования ими был разработан ряд технологий, в которых использовался наконечник электронного микроскопа. Однако согласно предоставленной исследователями информации, множество таких идентичных молекул можно получать в промышленных масштабах, используя цепочку несложных химических реакций и физических процессов. Управление состоянием неорганического молекулярного транзистора осуществлялось при помощи электрического потенциала, называемого напряжением смещения, создаваемого наконечником электронного сканирующего микроскопа. При комнатной температуре соотношение электрической проводимости транзистора в открытом и закрытом состоянии было равно 600, что совсем неплохо для транзистора на основе единственной молекулы. Структура искусственной молекулы была получена в ходе череды сложных компьютерных расчетов, в которых учитывались особенности строения и взаимодействия атомов различных элементов. Точно такой же метод расчета и синтеза можно использовать и для создания молекул, электронные компоненты на базе которых будут обладать целым рядом уникальных электрических свойств. К сожалению, данные исследования носят

исключительно фундаментальный характер и не стоит ожидать скорого появления электронных устройств следующего поколения, построенных на базе молекулярных транзисторов. Тем не менее, как это хорошо известно из истории, череда фундаментальных исследований позволяет накопить данные, большой объем которых дает людям возможность совершить качественный рывок и использовать все это в практических целях. Сообщение опубликовано в *Phis. Org* [29], статья опубликована в *Nature*

Nanotechnology

[30].

Группе исследователей из Германии, Японии и США удалось создать крошечный транзистор, собранный из единственной молекулы и десятка дополнительных атомов различных химических элементов. Чувствительность этого транзистора столь высока, что он может управлять потоком, состоящим из единичных электронов, и такая способность молекулярного транзистора открывает путь к разработке нового поколения различных наноматериалов и сверхминиатюризированной электроники. Практически вся используемая людьми электроника состоит из крошечных "выключателей", транзисторов, и для того, чтобы современные цифровые электронные устройства продолжали становиться все быстрее и экономичней, требуется уменьшение габаритных размеров транзисторов. Однако, размер кремниевых транзисторов невозможно сокращать до бесконечности. Диаметр одного атома кремния равен приблизительно половине нанометра, а в современных кремниевых транзисторах их электроды разделяет расстояние, равное диаметру 30 атомов. Но как только эти расстояния начнут исчисляться единицами атомов, транзисторы потеряют свою работоспособность поскольку электроны начнут самопроизвольно перемещаться между электродами за счет эффекта квантового туннелирования. Крошечные молекулярные транзисторы, созданные учеными, имеют намного меньшие размеры, нежели размеры транзисторов в процессорах наших компьютеров. Однако, при создании первых образцов молекулярных транзисторов ученые столкнулись с весьма тяжелой задачей. Поскольку такие транзисторы имеют очень малые размеры их включенное или выключенное состояние определяется местоположением одного единственного электрона. И лишь недавно вышеупомянутой группе ученых удалось добиться реализации высокоточного управления состоянием молекулярного транзистора, который стал способен контролировать движение через него единственных электронов. В отличие от кремниевых транзисторов, молекулярные транзисторы строятся постепенно, собирая атомы будущей молекулы один за другим при помощи химических методов. С первого взгляда такой процесс кажется невероятно сложным и трудоемким, однако все используемые технологии обеспечивают достаточно высокую точность сборки и повторяемость результатов. И на основе этих технологий достаточно несложно будет разработать полностью автоматизированный технологический процесс, при помощи которого можно будет производить крошечные молекулярные транзисторы в сколь угодно больших количествах. Для создания молекулярного транзистора ученые использовали туннельный сканирующий микроскоп (scanning tunneling microscope, STM). Заготовкой для будущего транзистора стал крошечный кристалл арсенида индия, на

который в соответствующих местах были помещены 12 атомов индия, образовавших шестиугольную структуру. А "ядром" транзистора стала молекула фталоцианина, помещенная в центр шестиугольной структуры из атомов индия. Центральная молекула очень слабо связана с поверхностью кристалла арсенида индия. Когда ученые подвели наконечник микроскопа к молекуле на определенное расстояние и подали на него электрический потенциал, то отдельные электроны начали "туннелироваться" с наконечника через молекулу на поверхность кристалла. Положительно заряженные ионы, окружающие молекулу, действуют как управляющий электрод, затвор транзистора, регулируя поток электронов, перемещающихся с наконечника микроскопа на кристалл. Контролируя работу молекулярного транзистора, ученые заметили весьма необычный эффект. Оказывается, что центральная молекула не находится в статичном состоянии, она ориентируется в различных направлениях в зависимости от ее электрического заряда и положение молекулы имеет сильное влияние на поток электронов, протекающий через структуру молекулярного транзистора. В настоящее время ученые исследуют работу созданного ими транзистора с целью лучшего понимания всех явлений, происходящих в процессе его работы. Если ученым удастся точно определить и описать математически зависимости проводимости транзистора от ориентации молекулы, то люди получат достаточно надежный метод регулирования электрического тока с невероятной точностью, с точностью до отдельных электронов. И это будет использовано для создания новых типов высокоэффективных полупроводников и наноматериалов, при помощи которых будут реализовываться технологии следующих поколений. Сообщение опубликовано *Naval Research Laboratory*,

в

New Atlas

[31]

, статья опубликована в

Nature Physics

[32]

.

К сожалению, полупроводниковые свойства являются слабым местом графена. У него отсутствует т.н. «естественная запрещенная зона», что значительно уменьшает полезность материала, несмотря на высокую подвижность электронов в его среде. Поэтому, помимо графена, учеными ищутся и другие биосовместимые материалы для нейроимплантов. Вид селенида индия (InSe), созданный в лаборатории Национального института исследований графена (National Graphene Institute, NGI) Манчестерского университета (Великобритания), имеет достаточно широкую запрещенную зону, что позволяет избежать использования дополнительных уловок, отрицательно сказывающихся на подвижности электронов, как в случае графена. Исследования, проведенные учеными, показали, что селенид индия, при комнатной температуре, обладает высокой подвижностью электронов, которая существенно превышает аналогичный показатель кремния, и превышает показатели некоторых материалов-халькогенидов. А ширина запрещенной зоны у селенида индия составляет 0.5 электронвольта. «Сверхтонкий селенид индия является своего рода "золотой

серединой" между кремнием и графеном», - рассказывает Андрей Гейм, лауреатами Нобелевской премии (2010 г.) в области физики за открытие графена, - «Подобно графену, этот материал имеет очень тонкую структуру, толщина которой измеряется нанометрами. И он является замечательным полупроводником, подобно кремнию». Статья опубликована в *сборнике трудов University of Manchester* [33, 34].

3. Нейроэлектроды: системный переход от микро- к нано-

Чем тоньше нейроэлектрод, тем менее он травматичен для ткани, поэтому логично было ожидать системного перехода в изготовлении электродов, с микро- на наноуровень. И, недавно, (2016) он был сделан, американскими учеными из Стэнфордского университета и Департамента энергетики США, мексиканскими и немецкими физиками, которые использовали алмазы минимальных размеров, для сборки тончайшего в мире электрического провода, толщиной всего в три атома! Провод состоит из проводящей и изолирующей частей. Проводящая часть образована атомами серы и меди, изолирующая — наноалмазами. Исходными веществами для синтеза были раствор сульфата меди, содержащий ионы металла, и раствор адамантантиола. (Последний представляет собой молекулу, структура углеродного скелета которой повторяет структуру алмаза. Иными словами, адамантиол – это наноалмаз, состоящий из всего 10 атомов углерода, окруженный атомами водорода. Окончание *-тиол* означает, что к структуре прикреплен один боковой атом серы, ответственный за соединение алмазоподобной частицы с медью.) За счет действия между кристаллами сил Ван-дер-Ваальса, ученым удалось добиться самосборки такой конструкции. (Помимо меди, ученым удалось получить похожие провода из серебра, цинка, кадмия и железа, что показывает универсальность подхода. Если заменить медь на цинк, то структуры будут обладать пьезоэлектрическими свойствами, и смогут вырабатывать электрический ток при деформации. Авторы рассказывают, что структуры, получившиеся с сульфидом кадмия, могут быть интересны с точки зрения их оптических свойств — они близки к материалам, используемым в светодиодах. А аналогичный селенид железа интересен с точки зрения возможных сверхпроводящих свойств.) Наноалмаз, или адамантан, представляет собой наименьшую структурную единицу кристаллической решетки алмаза. Такая молекула состоит из десяти атомов углерода и шестнадцати атомов водорода. На основе диамондоидов – полимерных органических молекул, в которых углеродные атомы скелета связаны между собой, точно так же, как и во фрагментах кристаллической решетки алмаза, — исследователи смогли создать электропроводники толщиной всего в три атома. (Почему три атома, а не один? Протяженные наноструктуры, получающиеся методами самосборки, часто состоят из одноатомных цепочек, по которым могут

перемещаться заряды. Это значительно ограничивает электронные свойства таких структур: носителям заряда приходится поочередно перемещаться от атома к атому, образуя «очереди». Обойти это ограничение можно, немного увеличив диаметр проводящей части, как раз до трех атомов.) Исследование было опубликовано в журнале *Nature Materials* [35], кратко о нем

сообщает

из

нальной ускорительной лаборатории SLAC

[36]

пресс-рел

Нацио

Для обеспечения коммуникации между мозгом и внешним устройством, необходим более «толстый» транспортный канал связи, чем в три атома, и более универсальный, но без потери биосовместимости. Международная группа ученых, возглавляемая учеными из Массачусетского технологического института, создала первое, в своем роде, гибкое волокно, толщина которого сопоставима с толщиной человеческого волоса, и которое позволяет передавать в мозг, и получать обратно, сигналы электрической, химической и оптической природы одновременно. Материал универсального проводящего волокна подбирался таким образом, чтобы обеспечить его максимальное подобие мягким нервным тканям. Это, в свою очередь, позволит подключать к мозгу имплантаты любой степени сложности, при этом, глубина погружения в мозг будет намного больше, чем это позволяют сделать используемые сейчас матрицы жестких металлических или кремниевых электродов. Естественно, испытания функционирования волокна производились на подопытных животных. Через один из двух крошечных каналов внутри волокна, в нейроны мозга грызунов, был введен генетический препарат, делающий эти нейроны чувствительными к свету. Затем обработанные нейроны были освещены светом, переданным через оптический волновод внутри волокна. И, под конец, ученые произвели регистрацию электрической деятельности отдельных нейронов, используя для этого электрическую проводимость определенных слоев волокна. И все это было сделано при помощи единственного волокна, толщиной около 200 микрон, что чуть больше толщины человеческого волоса. Ключевым моментом, позволившим создание такого многофункционального волокна, стала технология производства тончайших проводников, гибких и имеющих высокую электрическую проводимость. Основу проводников составляет тонкая полиэтиленовая трубочка, объем которой заполнен хлопьями графита. А процесс ее производства заключается в повторяющейся последовательности двух операций, нанесения графитового слоя на полиэтиленовую основу, и сжатие всего этого под давлением с последующим нанесением очередного тончайшего слоя полиэтилена. Наличие графита в специальном полиэтилене, которой обладает собственной электрической проводимостью, увеличило его проводимость в четыре-пять раз. Помимо высокой электрической проводимости, созданное волокно обладает прозрачностью, достаточной для передачи по нему оптических каналов. Кроме этого, за счет увеличения толщины одного из графитовых слоев во время производства, в одном волокне организовано два независимых световода, которые практически не оказывают влияния друг на друга. А полости, оставленные в объеме волокна, выступают

в роли каналов, которые можно использовать для транспортировки по ним жидких веществ. За счет малой толщины волокна ученые имеют возможность использовать матрицы таких волокон, охватывая ими достаточно большие участки мозга. Для демонстрации этой возможности, волокна были помещены в несколько отдельных участков мозга подопытного животного, что это позволило ученым проследить пути следования нервных сигналов и сигналов ответных реакций мозга на эти сигналы. В ближайшем времени ученые планируют уменьшить толщину многофункционального волокна, сделав его более гибким. Помимо этого, на замену полиэтилену ищется материал, который обеспечит волокну большую мягкость, и увеличит его биологическую совместимость со всеми видами нервных тканей. А, тем временем, множество научных групп, из различных уголков земного шара, уже оценили возможности новой разработки, и запросили в свое распоряжение некоторое количество многофункционального волокна, для проведения собственных исследований. Сообщение опубликовано в трудах *MIT News Office*, *Medical*

[37]

, статья опубликована в *Nature Neuroscience*

[38].

4. Биофотоника и биоакустика.

Что дальше? А дальше, как рекомендует ТРИЗ Г. С. Альтшуллера, - переход к полевым, электромагнитным и акустическим, воздействиям и структурам, реализующим идеальный конечный результат (ИКР), когда вещественного проводника как бы и нет, а его проводящие функции – выполняются.

Десять лет назад весь научный мир говорил о недавно открытой оптогенетике, которая могла манипулировать нейронной активностью с помощью света. Проблема была в том, что для этого изначально нужно было генетическое вмешательство: внедрение гена в фокусную клетку, который бы заставил ее реагировать на свет. С тех пор, ученые предлагали и другие способы модулирования нейронов, но внятной альтернативы пока не было.

Исследователи из Мичиганского университета работают над превращением клеток крови человека - в миниатюрные лазеры, которые излучают инфракрасный свет, позволяя медикам обнаруживать зарождающиеся злокачественные опухоли. Термин «лазер» вызывает в воображении образ сложного устройства, опутанного электроникой. Но, фактически, лазеры могут быть изготовлены из самых различных материалов, включая живые клетки. Для того, чтобы создать лазер, требуется источник света, материал, усиливающий этот свет, и оптический резонатор. Худонг Фан (Xudong Fan), и его коллеги из Мичиганского университета, использовали краситель indocyanine green (ICG) для того, чтобы превратить клетки крови в лазеры. Этот краситель обладает флуоресцентными свойствами, излучая свет инфракрасного диапазона, и он уже достаточно широко используется в рентгенографии. Попав в кровоток, краситель ICG связывается с белками, находящимися в кровяной плазме, что увеличивает способности этого материала к усилению света. «Чистый ICG практически не работает, он светится только, когда он попадает в кровь», - сообщает Фан. Поместив смесь красителя ICG и крови внутрь маленького зеркального цилиндра, и осветив это все светом обычного лазера, ученые добились того, что кровь начала излучать инфракрасный свет. Краситель ICG прикрепляется в основном к стенкам кровяных клеток, таким образом, области, где наблюдается скопление таких клеток, к примеру, области опухолей, светятся более интенсивно. И для того, чтобы найти местоположение опухоли, врачам требуется осветить тело человека лазером, и посмотреть на него при помощи инфракрасной камеры. Исследователи собираются использовать подобную технологию и за пределами кровотока живых организмов. Сейчас они рассматривают все возможности создания оптических резонаторов внутри клеток плотных тканей. И одним из возможных вариантов решения является использование золотых наночастиц. Статья опубликована в *New Scientist* [39].

Новое исследование Чикагского университета (University of Chicago) показывает, как крохотные, активируемые светом провода, можно сделать из кремния, для создания электрических сигналов в мозге. Команда исследователей, под руководством профессора Бози Тиана (Bozhi Tian), создали микроскопические провода, которые до этого были спроектированы для солнечных батарей. Эти нанопровода настолько малы, что на срезе бумажного листа их может уместиться до нескольких тысяч. В нанопроводах сочетаются два типа кремния, и поэтому они могут создать небольшой электрический ток при облучении светом. А на поверхности провода есть золото, которое действует, как катализатор электрохимических процессов. Ученые протестировали провода на крысиных нейронах, выращенных в лаборатории, и увидели, что провода действительно способны на выработку электрических сигналов в нейронах, а значит, такой проводкой можно инициировать определенные реакции в мозге с помощью обыкновенного света. Сообщение опубликовано в *трудах University of Chicago* [40]

, статья опубликована в *Nature Nanotechnology* [41].

А можно ли вообще обойтись без нанозлектродов, стимулируя нейроны одним лишь светом, но не производя оптогенетическую модификацию самого организма? Да, можно. Группа исследователей, из Национальной лаборатории им. Лоуренса, в Беркли (США), изучила свойства полимерных гранул, на основе коллоидов — прозрачных частиц, способных пропускать свет. Ученые планировали применять их для визуализации головного мозга. В ходе экспериментов авторы исследования соединили гранулы с наночастицами тетрафторитрата натрия, покрытыми тулием. (Еще в 2016 году ученые выяснили, что если подвергнуть частицы такого типа лазерному ИК-излучению определенной частоты, то возникает феномен ап-конверсии. Благодаря этому эффекту наночастицы получают способность излучать свет, причем с еще более высокой частотой, чем сам лазер. Также оказалось, что наночастицы периодически производят яркие вспышки света определенных цветов.) Как только ИК-лучи попадают на внешнюю поверхность гранул, внутри гранул свет начинает отскакивать, точно так же, как «шепот отскакивает с усилением от стен церковного собора». Как только интенсивность света достигает определенного порога, запускается процесс непрерывной стимуляции излучения. Как поясняет *Science Daily*, полученный микролазер может работать часами в непрерывном режиме. «Большинство лазеров на основе наночастиц быстро нагреваются, и через несколько минут выходят из строя. Наши лазеры работают постоянно», — пояснил автор исследования, Джим Шак. Он добавил, что даже спустя пять часов наночастицы способны производить стабильное излучение. Микролазеры диаметром всего 5 мкм по размеру уступают эритроцитам, диаметр которых в зрелом виде доходит до 7-8 мкм. В перспективе их можно будет вводить в организм человека, и проводить медицинские манипуляции. Чтобы доказать, что лазеры могут работать в жидкой среде, ученые поместили гранулы в сыворотку крови — благодаря белковому покрытию лазеры продолжили работать даже в этих условиях. Технология позволит создавать микроскопические лазеры для контроля за активностью нейронов и управления оптическими микрочипами, а также для распознавания химикатов и изменений температуры окружающей среды. Статья опубликована в *Nature Nanotechnology*

[42]

А управлять точной доставкой микрошариков - ученые уже умеют. Эта технология сочетает в себе использование МРТ-сканера и крошечного металлического шарика диаметром 1 мм. Шарик, из хромированной стали, вводится в тело, и доставляется в место расположения раковой опухоли, используя магнитное поле сканера. Когда он попадает в нужное место, радиоволны сканера нагревают его, и опухоль разрушается. Шарик можно также заточить, чтобы использовать его как миниатюрный скальпель. Технология была успешно протестирована на мозге мертвой свиньи, и исследователи уверены, что она не менее успешно будет работать и на живых людях. Для отработки технологии будет проведено углублённое исследование, чтобы убедиться в этом. «Этот новый класс устройств является прорывом — это впервые в мире», — сказал профессор

Лондонского колледжа Марк Литго (Mark Lythgoe, by *University College London's*), который представил новую технологию на научном симпозиуме в Челтене (*at the Cheltenham Science Festival*)

al

)

[43].

5. Микро- и нанонейропыль.

Желательно и далее совершать системные переходы, от микро- к наноразмерам, чтобы сделать управляемой доставку микролазеров, или иных агентов нейровоздействия, посредством электромагнитного поля.

Простой способ синтеза таких наночастиц недавно был создан сотрудниками химического факультета МГУ и лаборатории «Биомедицинские материалы» НИТУ «МИСиС». Учёные разработали абсолютно новый способ синтеза магнитных наночастиц, основанный на использовании различных органических кислот. Ими были проведены исследования структуры, фазового состава и магнитных свойств полученных уникальных образцов. Относительно простой способ синтеза наночастиц заключается в термическом разложении комплексов иона железа (III) с органическими циклокарбоновыми кислотами. Варьируя природу органической кислоты — концентрации исходных растворов и температуру — исследователи и получают нанокластеры необходимой формы и размера. Синтезированные нанокластеры показали высокие значения T2-релаксивности, что говорит об их потенциальной эффективности, при применении в магнитно-резонансной томографии, в качестве контрастных агентов. Синтезированные нанокластеры так же обладали высоким значением магнитного насыщения. (Чем выше магнитное насыщение вещества, тем меньше должно быть приложенное магнитное поле для намагничивания частиц.) Результаты исследования учёных опубликованы в журнале *Langmuir* [44].

Международная группа ученых, в составе которой находятся ученые из университета Нового Южного Уэльса (University of New South Wales), Мельбурнского университета (Melbourne University) и университета Пердью (Purdue University), реализовала

технологии, применение которой позволит небезызвестному закону Гордона Мура продержаться еще несколько поколений. Ученые разработали и изготовили самые тонкие в настоящее время проводники из кремния и фосфора, высотой всего в один атом фосфора и шириной в четыре атома. Несмотря на столь малые габариты, новые проводники демонстрируют электрическую проводимость, сопоставимую с электрической проводимостью медных проводников. Предыдущие исследования, которые проводились в данном направлении, указывали на то, что при сокращении габаритных размеров проводников до отметки в 10 нм и меньше электрическое сопротивление последних должно увеличиваться по экспоненциальной зависимости в зависимости от приложенного напряжения. Это является прямым нарушением закона Ома, который описывает линейную зависимость тока от напряжения. Последние эксперименты и математическое моделирование, выполненное на суперкомпьютере, показали, что кремний-фосфорные проводники будут иметь низкое сопротивление несмотря на то, что они являются в 20 раз более тонкими, чем медные проводники, используемые в современных микропроцессорах. У этого достижения, сделанного учеными, есть очень важное значение для некоторых областей. Во-первых, инженеры поучили в свое распоряжение технологию, которая позволит им создавать в будущем наноразмерные электронные устройства, ведь теоретически пределом уменьшения размеров проводников будет единственный ряд атомов фосфора, заключенный в кремнии. Во-вторых, для разработчиков вычислительной техники новая технология открывает возможность создания отдельных атомов-доноров и соединений с ними, что существенно приближает реализацию квантовых вычислений на кремниевых чипах. И в-третьих, ученые-физики получили доказательство того, что закон Ома действует даже на атомарном уровне. Технологическая реализация изготовления тончайших фосфорных проводников на кремнии существенно отличается от современных методов изготовления полупроводниковых чипов микропроцессоров. Вместо нанесения слоев материала и травления, ученые буквально выкладывали будущий проводник атом за атомом. «Это невероятно трудно» - рассказывает Герхард Климек (Gerhard Klimeck), профессор электротехники и вычислительной техники университета Пердью. – «Когда мы добираемся до пределов в 20 атомов, возникают атомные флуктуации и аномалии, которые затрудняют получение точных форм конечных изделий». Но ученые создали специальные устройства, с помощью которых стало возможным нанесение чрезвычайно тонких слоев фосфора на кремний, которые проводят электрический ток точно так же как медные проводники. «Мы находимся на пороге создания транзистора, состоящего из нескольких атомов» - рассказывает Мишель Симмонс (Michelle Simmons), директор Центра квантовых вычислений и коммуникационных технологий университета Нового Южного Уэльса. – «Но для создания реального квантового компьютера нам потребуется еще, что бы вся его схема и проводники были уменьшены до атомарного уровня». Сообщение опубликовано в *Kurzweil accelerating intelligence* [45], статьи опубликованы в *Science* [46, 47].

От простой нанопыли, пассивно управляемой внешним электромагнитным полем, можно было бы перейти к би-системе, соединив её с микроразмерными ультразвуковыми

нейросенсорами, по типу устройства StimDust.

Устройство StimDust, с миниатюрными беспроводными пьезосенсорами, размерами 3 мм в длину, 1 мм в высоту и 4,5 мм в толщину, имеет объем 6.5 мм³, разработано учёными Калифорнийского университета в Беркли (The University of California, Berkeley). StimDust является самым маленьким имплантируемым стимулятором нервной деятельности. «Он может работать практически со всеми видами нервных тканей периферической нервной системы, что обеспечивает весьма широкую область его применения в терапевтических целях» - рассказывает Рикки Мюллер (Rikky Muller), ведущий исследователь – «Это устройство может стать звеном, связующим разорванные или поврежденные нервные цепи. Кроме этого, оно сможет заменить нефункциональные нервные цепи и узлы, неспособные вырабатывать сигналы, заставляющие работать другие нервы и органы организма живого существа». Это устройство может искусственно стимулировать нервную деятельность, и эффективность этой процедуры составляет 82 процента при уровне подводимой к устройству мощности в 4 микроватта. Так называемая «нейропыль» записывает и воспроизводит информацию с помощью ультразвука. Ультразвук уже широко используется в больницах и, в отличие от радиоволн, проникает практически в любую часть организма. В состав устройства StimDust входят только необходимые для его работы компоненты. Пьезокристалл выступает в качестве антенны, принимающей сигналы извне и обеспечивающей систему энергией, необходимой для ее работы. Эта энергия накапливается в конденсаторе, а управляет работой системы миниатюрный чип, размер которого не превышает одного миллиметра. На основании устройства находятся электроды, которые касаются поверхности нервных клеток. Для обеспечения работы устройства StimDust был разработан специальный беспроводной протокол, который допускает программирование функциональности устройства в достаточно широких пределах, несмотря на его весьма скромные размеры и встроенные ресурсы. «Измерения непосредственно в теле раньше были недоступны, потому что не существовало способа засунуть что-нибудь супермаленькое суперглубоко, — говорит Мишель Махарбиц (Michel Maharbiz), один из авторов исследования. — Но теперь я могу взять пылинку, «припарковать» её рядом с нервом, органом, вашим ЖКТ или мускулом и считать данные». Сенсоры, объемом в 1 мм

3

, содержат пьезокристалл, который преобразует ультразвуковые колебания в электричество. Оно питает маленький транзистор, находящийся в контакте с нервом или мышечным волокном. Скачок напряжения в ткани изменяет электрическую цепь и колебания кристалла, а он искажает посланный прибором звук. Отражение сигналов, называемое «обратным рассеянием», позволяет определить напряжение. Нейропыль протестировали на лабораторных животных: учёные имплантировали датчики в мышечные волокна и периферическую нервную систему крыс, и посылали им 540-наносекундные ультразвуковые импульсы каждые 100 микросекунд. Это позволило считывать информацию в режиме реального времени. По словам исследователей, новые устройства будут так же хорошо работать в ЦНС и других системах организма. «Я думаю, что в долгосрочной перспективе область применения нейропыли не ограничится нервами и мозгом, а будет гораздо шире», — комментирует Махарбиц. Датчики первого

поколения покрыты материалом на основе эпоксидной смолы, но в будущем учёные собираются использовать тонкие биосовместимые плёнки, которые могут находиться в организме более десяти лет. Современные вживляемые электроды разлагаются в течение 1—2 лет, и работают от проводов, пропущенных через отверстия в черепе. «Когда нейропыль пройдёт клинические испытания, она заменит проволочные электроды», — говорит член научной группы Хосе Кармена (Jose Carmena). Теперь учёные намерены уменьшить размер «пылинок», опробовать новые материалы и усовершенствовать передатчик ультразвука. Кроме того они пытаются использовать устройство для регистрации неэлектрических сигналов, например, уровня гормонов или кислорода. Новые датчики позволяют стимулировать нервы и мускулы, и учёные надеются, что однажды с их помощью можно будет лечить эпилепсию, мобилизовать иммунную систему или подавлять воспалительные процессы. А дальнейшие работы в данном направлении позволят создать действительно интеллектуальное устройство, которое позволит людям избавиться от некоторых специфических заболеваний, таких, как астма, эпилепсия и хронические боли. Принципы работы устройства описаны в трудах

University of California, Berkeley: Berkeley News

[48

] и

ECN Magazine

[49]

, и в статье, опубликованной в журнале

Neuron

[50].

К настоящему моменту, в ещё меньшем объеме (всего 0,04 мм³), удалось разместить не просто сенсор, а полноценный компьютер. Группа инженеров из Мичиганского университета (the University of Michigan), под руководством проф. Дэвида Блаау (Dr. David Blaauw), создали самый маленький компьютер в мире, в нем установлен ARM-процессор и датчик температуры, которые получают энергию и входные сигналы через световые импульсы, а также передают данные о температуре через встроенный светодиод. Созданный ими чип оснащен 32-битным процессором, построенным на основе архитектуры ARM Cortex-M0+. Кроме того, в нем установлена энергозависимая оперативная память, датчик температуры и оптическая схема из фотовольтаического элемента и светодиода, позволяющая чипу принимать энергию и входящие сигналы через световые импульсы, а также отправлять исходящий сигнал таким же образом. Поскольку потребление чипа составляет всего 16 нановатт, получаемой через фотовольтаический элемент энергии достаточно для его работы. Датчик температуры передает процессору данные о температуре в виде импульсов с соответствующим временным интервалом, которые процессор сравнивает с импульсами с постоянным интервалом, получаемыми от базовой станции через световые сигналы. Разработчики утверждают, что точность измерения температуры составляет 0,1 градуса Цельсия. Инженеры предлагают использовать чип для измерения разницы температур в тканях, которая может указывать на наличие злокачественной опухоли. Стоит отметить, что

авторы сомневаются, можно ли называть это устройство компьютером — оно может принимать входящий сигнал, проводить вычисления и выдавать результат в виде исходящего сигнала, но не имеет постоянной памяти и не может хранить данные без внешнего питания. Разработчики из Мичиганского университета обновили рекорд, поставленный инженерами из IBM в феврале. Тогда они представили чип, имеющий длину и ширину в один миллиметр. В нем используется похожий принцип работы, при котором чип не имеет собственного аккумулятора и обменивается данными через световые импульсы. Сообщение опубликовано в *Tech Times*

[
51
].

Для создания нейроимплантируемых микро- и наночипов, потребны транзисторы, размером всего в несколько атомов. И такие транзисторы - недавно были созданы.

Группа физиков из Национальной лаборатория имени Лоуренса в Беркли (Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, USA) создала первый в мире транзистор, размер затвора которого составляет всего лишь один нанометр. Это на порядок меньше, чем размер затворов самых маленьких по размеру современных транзисторов. «Нам удалось создать самые маленькие на сегодняшний день транзисторы. Размер затвора — один из основных факторов, определяющих размер самого транзистора. Мы добились радикального снижения размера затвора, доказав возможность дальнейшей миниатюризации электроники», — говорит Али Джави (Ali Javey) из Калифорнийского университета в Беркли (США). Считается, что из-за квантовых ограничений размер затвора кремниевого транзистора не может быть меньше 5 нм. Если попытаться сделать затвор меньшим по размеру, то на работу элемента будет оказывать негативное влияние туннельный эффект. В этом случае транзистор прекращает выполнять свои функции из-за токов утечки и других проблем. До граничного показателя в 5 нм производители электронных устройств еще не добрались. Сейчас минимальный размер затвора транзисторов составляет 20 нанометров. Но ученые, как видим, уже доказали возможность преодоления лимита в 5 нанометров. Для того, чтобы обойти ограничение по кремнию, для создания миниатюрных электронных элементов специалисты решили использовать другие материалы: дисульфид молибдена, графена или углеродные трубки. Ученым из Беркли удалось объединить в единую систему дисульфид молибдена (MoS_2) и углеродные нанотрубки. Такая комбинация позволила значительно снизить размеры затвора. Самый маленький транзистор в мире состоит из трех основных слоев. Это подложка из кремния, пластинка из диоксида циркония, проходящая через этот материал углеродная трубка и пленка из дисульфида молибдена. Пленка соединяет исток и сток транзистора. Как и кремний, дисульфид молибдена имеет кристаллическую структуру решетки. Но проходящие по MoS

2

электроны тяжелее, чем в кремнии. Это означает, что электроны лучше удерживаются энергетическим барьером затвора. Ученые говорят о том, что дисульфид молибдена образует листы толщиной в 0,65 нм с низким значением диэлектрической проницаемости. По этой причине небольшие затворы транзисторов смогут вырабатывать электрическое поле, достаточно сильное, чтобы не допустить появления туннельного эффекта. К сожалению, миниатюрные транзисторы, созданные в Беркли — это штучная работа, массово их производить пока нельзя. «Создав транзистор, мы доказали, что затвор меньшего размера, чем 5 нм — вполне достижимая цель. Это ограничение оказалось преодолимым. И закон Мура может и дальше действовать, при условии, что мы будем выбирать правильные материалы», — заявил Джави. Если специалисты научатся создавать такие транзисторы в промышленных масштабах, то в ближайшее время закон Мура действительно будет продолжать действовать. Сообщение было опубликовано в трудах

University of California, Berkeley, EnGadget

[52]

. Результаты работы ученых были опубликованы в журнале *Science*

e

[

53

].

И даже – нанодатчик ровно в один атом. Пока только тензодатчик, для измерения сил и перемещений, но авторы планируют создать устройство и для электромагнитных измерений тоже.

Исследователи из университета Гриффита (Griffith University), работавшие совместно с учеными из австралийской научно-исследовательской организации CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), разработали новую высокоточную технологию научных измерений. В этой технологии в качестве чувствительного элемента используется один единственный атом, что, в свою очередь, позволяет датчику измерять силы с чувствительностью менее 100 зептоНьютонов. В датчике также используются миниатюрные сегментированные линзы Френеля (Fresnel lenses), которые позволяют получить достаточно высококачественные изображения атома, по которым можно вычислить смещение его положения с нанометровой точностью во всех трех пространственных измерениях. «У атома-датчика отсутствует один электрон, таким образом, он очень чувствителен по отношению к электрическим полям» - рассказывает доктор Эрик Стрид (Dr Erik Streed), ученый из Центра квантовой динамики, - «Измеряя смещение положения атома, мы можем с очень высокой точностью вычислить величину действующих на атом сил электрической природы. 100 зептоНьютонов - это очень маленькая сила. Она эквивалентна силе притяжения,

возникающей между двумя людьми, находящимися на разных сторонах Австралии» - рассказывает доктор Стрид, - «Датчик, обеспечивающий такую разрешающую способность, может использоваться для исследований того, что происходит на поверхности материалов, которые могут быть использованы для создания миниатюрных квантовых вычислительных и других устройств». Исследователи из Гриффита имеют достаточно богатый опыт использования линз Френеля в квантовой физике. Они начали работать с такими линзами с 2011 года, но данный случай является первым разом использования этих линз для получения высокой точности измерений сил, действующих на единственный атом. Преднамеренно создав небольшую расфокусировку оптической системы, ученые смогли измерить значение смещения положения атома в трех измерениях. Это смещение измерялось как изменение уровня расфокусировки изображения атома. «Дальнейшее развитие данной технологии может привести к созданию нового инструмента, способного измерять электрические поля, создаваемые единственной изолированной от окружающей среды биомолекулы. Это, в свою очередь, позволит нам узнать намного больше о функциях и поведении каждого вида таких молекул». Отметим, что новая технология измерения сил является развитием технологий предыдущего поколения, в которых в качестве чувствительного элемента использовались группы атомов, и которые могли измерять силы только в одном из пространственных измерений. Сообщение было опубликовано в трудах *University of California, Berkeley*

, см.

EnGadget

[54]

, статья опубликована в

Science Advances

[55].

Исследователи из Массачусетского технологического института (Massachusetts Institute of Technology) сообщили о том, что им удалось изготовить самый маленький на сегодняшний день MOSFET-транзистор, сделанный из арсенида галлия-индия, который имеет размер всего в 22 нанометра. Исследователи надеются, что такие транзисторы, когда они войдут в массовое применение, могут обеспечить истинность закона Гордона Мура еще на достаточно продолжительное время. «Мы продемонстрировали, что любой производитель полупроводниковых приборов может выпускать чипы на основе MOSFET-транзисторов из арсенида галлия-индия, который обладает превосходными скоростными характеристиками работы в цифровых логических схемах. Это должно обеспечить истинность закона Гордона Мура еще достаточно долгое время после того, как возможности кремниевой электроники в этом направлении будут исчерпаны» - рассказал Джесус дель Аламо (Jesus del Alamo), профессор электротехники и информатики, возглавлявший группу, разработавшую и изготовившую новый транзистор, на Международной конференции по электронным приборам (IEEE International Electron Devices Meeting, IEDM), проходившей недавно в Сан-Франциско. Международная организация International Technology Roadmap for Semiconductors уже достаточно давно определила направление использования MOSFET-транзисторов из арсенида

галлия-индия, как одно из наиболее перспективных направлений развития электроники. Но у некоторых специалистов возникают сомнения в том, что транзисторы, разработанные в Массачусетском технологическом институте будут оптимальным решением с точки зрения технологичности их производства. Исследователи из ЭМАЙТи использовали процесс электроннолучевой литографии для того, что бы точно сделать все элементы крошечного транзистора, а известно, что использование подобного подхода не приемлемо при промышленном производстве. Все чипы, изготавливаемые на сегодняшний день, производятся с помощью технологии ультрафиолетовой литографии и в течении следующего десятилетия можно ожидать только переключения технологий литографии с на более коротковолновую часть ультрафиолетового света. Помимо всего вышесказанного новый транзистор был изготовлен на подложке из фосфида индия, который является более хрупким и менее прочным материалом, нежели кремний, используемый в настоящее время. Таким образом, пока ученые не придумают, как изготавливать MOSFET-транзисторы на 300-миллиметровых кремниевых пластинах, не стоит и думать о практическом применении таких транзисторов, несмотря на их замечательные качества и превосходные характеристики. Несмотря на все это, нанотранзистор, разработанный исследователями Массачусетского технологического института, является большим шагом вперед. Но для того, что бы сделать огромный качественный прорыв в области электроники потребуются сделать еще много подобных шагов. Сообщение опубликовано в трудах *Massachusetts Institute of Technology (MIT), USA*, в журнале

IEEE Spectrum

[56]

, а пресс-релиз - опубликован в журнале

MIT News

[57].

Миниатюризация является основной двигающей силой, толкающей вперед развитие микроэлектроники и компьютерных технологий уже в течение нескольких десятилетий. Австралийские ученые из Университета Нового Южного Уэльса (University of New South Wales), работавшие совместно с учеными Университета Висконсина (University of Wisconsin), показали всему миру тот предел, до которого может пойти миниатюризация в области электроники. Они, используя всего семь атомов вещества, создали транзистор на основе квантовой точки, являющийся наименьшим электронным устройством, созданным когда-либо человеком. Этот квантовый транзистор имеет размеры около 4 нанометров, сравнивая этот размер с размерами обычных транзисторов, на основе которых изготавливают чипы в настоящее время, и размер которых составляет порядка 40 нанометров, можно сделать вывод, что создание такого миниатюрного транзистора является огромным шагом в миниатюризации электроники. Но, помимо этого, такая технология значительно приблизит момент создания сверхбыстродействующих квантовых компьютеров, по сравнению с которыми самые мощные современные компьютеры будут выглядеть просто анахронизмами. Используя сканирующий туннельный микроскоп для слежения за ходом процесса, ученые буквально заменили в кристалле кремния семь атомов кремния атомами фосфора. Таким образом они создали

чрезвычайно маленькое электронное устройство которое способно выполнять свои функции (пропускать электрические сигналы) под воздействием сигналов внешнего управления. Технология манипулирования атомами на таком уровне уже известна давно и применялась в исследовательских целях, к примеру, в компании IBM, да и транзисторы, состоящие из нескольких атомов, уже существовали, правда, только в теории. Но, до сих пор никто еще не мог управлять атомами для создания работоспособных компонентов электронной техники. Главной целью программы исследователей Нового Южного Уэльса, в рамках которой был создан транзистор, является реализация квантового компьютера на кремниевой основе. Конечно, одному созданному транзистору до компьютера еще очень далеко, но само доказательство того, что подобные вещи уже возможно реализовать, само по себе является замечательным. Дальнейшие исследования, которые будут проводиться учеными, направлены на то, что бы разработать технологию массового производства таких миниатюрных электронных компонентов и технологии создания на их базе электронных логических схем, составных кирпичиков будущих микропроцессоров, работающих на атомном уровне. Сообщение опубликовано в *Popular Science*, статья опубликована в *Nature Nanotechnology* [58].

За последние несколько лет область так называемой молекулярной электроники существенно продвинулась вперед. Учеными были созданы функционирующие молекулярные диоды, транзисторы, ячейки памяти и молекулярные аналоги других электронных компонентов. Тем не менее, до последнего времени так и не была решена главная задача, задача передачи и обмена информацией между молекулярными устройствами при комнатной температуре. А без этого будущее всей области молекулярной электроники продолжает оставаться в подвешенном состоянии.

Недавно исследователи из Наньчанского университета (Nanchang University), Китай, закончили разработку нового устройства, в основе которого лежат молекулы особого вида (SnCl_2Pc), которые могут находиться в двух строго определенных формах при контакте с медной поверхностью. Эти две формы можно интерпретировать как логические 1 и 0, знакомые нам из цифровой логики. Работа нового устройства базируется на явлении, известном под названием плоскостной молекулярной ориентации (in-plane molecular orientation). Это явление происходит в момент, когда молекула сложного органического соединения "приземляется" на твердую поверхность. Эта адсорбированная поверхностью молекула может принять одну из нескольких ее форм, а множество этих форм можно условно разбить на группы. «У молекулы, которую мы использовали в экспериментах, имеются две определенные адсорбционные конфигурации в случае ее контакта с медной поверхностью» - рассказывает Ли Ван (Li Wang), профессор физики, - «Мы рассматривает одну (левую) ориентацию молекулы, как логическую 1, а правую ориентацию - как логический 0». Группа профессора Ванна обнаружила, что ориентацию одной молекулы можно изменять путем межмолекулярных взаимодействий, изменяя ориентации двух соседних молекул. Несколько таких молекул, расположенных определенным образом друг относительно друга, можно рассматривать

как своего рода логический элемент, в котором выходной сигнал зависит от значений двух входных сигналов. «Мы впервые в истории науки преуспели в реализации передачи сигналов и взаимодействии между отдельными молекулами» - рассказывает профессор Ван, - «Каждая молекула является носителем определенного сигнала, содержащего хранимую или передаваемую информацию. А совокупность молекул, расположенных заданным способом, позволяет выполнять достаточно сложные операции по обработке информации». Молекулярные устройства, созданные в лаборатории профессора Ванна, были изготовлены путем последовательной установки каждой молекулы на медное основание. Но для того, чтобы появилась возможность создания подобных молекулярных устройств в промышленных масштабах, потребуется разработка соответствующих методов производства, которые позволят располагать молекулы в заданных местах с высокой точностью, что обеспечит необходимую функциональность межмолекулярных взаимодействий. В своих дальнейших исследованиях китайские ученые намерены создать ряд новых сложных молекулярных устройств, при помощи которых особенности межмолекулярных взаимодействий будут изучены более тщательно. «И в конце концов мы попытаемся соединить молекулярные устройства разного вида в одну сложную систему, которая сможет выполнять вычисления, подобные вычислениям, которые способны производить обычные электронные устройства» - пишут исследователи. Сообщение было опубликовано в *IEEE Spectrum*

[59]

, статья была опубликована в *Nature Nanotechnology*

[60].

Поскольку элементы полупроводниковых чипов становятся все меньше и меньше, мы неуклонно приближаемся к моменту, когда фундаментальные законы физики, определяющие некоторые ограничения, начнут препятствовать дальнейшей миниатюризации электронных компонентов. Одним из таких существенных препятствий является то, что поведение проводников электрического тока может стать непредсказуемым в случае уменьшения количества атомов, из которых они состоят, ниже определенного предела. И в поисках решения, которое позволит обойти вышеприведенное ограничение, ученые все чаще и чаще обращаются к использованию графена, углеродных нанотрубок и других материалов одноатомной толщины для изготовления элементов чипов процессоров следующих поколений. Однако, людям требуется беспокоиться не только о производстве новых процессоров. Такая же самая участь ожидает и флэш-память, когда-нибудь размеры ячеек этой памяти сократятся настолько, что не сможет гарантировать надежное и длительное хранение электрического заряда, а следовательно, и записанной в такую память информации. Но эта проблем может быть решена благодаря работе ученых, которые, скомбинировав молекулы двух разных типов, получили возможность длительного удержания в них некоторого количества электронов, превратив их, таким образом, в молекулярную ячейку флэш-памяти. В своей работе ученые пошли по весьма нетрадиционному пути. Вместо того, чтобы создавать многослойные структуры из одноатомных материалов,

которые являются конденсатором, накапливающим и удерживающим электрический заряд, ученые реализовали возможность накопления заряда в пределах одной молекулы. Эта молекула является молекулой достаточно сложного оксида, состоящего из 18 атомов металла, вольфрама в данном случае, и 54 атомов кислорода. Такая молекула имеет ячеистую структуру, а ее размер составляет приблизительно один нанометр. Поверх этой молекулы ученые поместили две молекулы триоксида селена $(\text{Se(IV)O}_3)_2$, в которых обычно содержатся избыточные электроны, дающие молекуле отрицательный электрический заряд. Когда под воздействием внешних факторов из получившейся структуры удаляются два электрона, молекулы триоксида селена химически связываются друг с другом, образуя единственную молекулу соединения Se(v)2O_6 . Обмен электронами осуществляется при помощи большой оксидно-металлической молекулы, через которую пропускается электрический ток. И, как отмечают исследователи, использованные соединения сохраняют свою стабильность при температурах до 600 градусов Цельсия, что позволяет использовать такие материалы практически в любом из существующих технологических процессов. Для проверки работоспособности разработанной технологии ученые покрыли поверхность металлического электрода оксидно-металлическими молекулами с "сидящими" на них молекулами триоксида селена. Подав на электрод отрицательные электрический потенциал, ученые добились того, что все молекулы триоксида утратили избыточные электроны, соединившись в молекулу Se2O_6 , и сохраняли такое состояние в течение длительного времени (336 часов). Наличие избыточных электронов читалось при помощи прикладывания меньшего электрического потенциала, а приложенный положительный потенциал привел к захвату молекулами триоксида избыточных электронов и образованию двух независимых молекул, т.е. к возврату ячейки в исходное состояние. К сожалению, все вышеописанные процессы проходили при слишком высоком значении электрических потенциалов, +20 и -20 Вольт. Использование столь высокого напряжения абсолютно непрактично с точки зрения электроники, но ученые уже рассчитали, что оптимизация геометрии расположения молекул может решить эту проблему, позволяя стирать, записывать и считывать информацию при прикладывании гораздо меньшего электрического потенциала. Кроме этого, хромают пока и скоростные показатели молекулярных ячеек памяти. Процедура стирания и записи информации длится 0.1 секунду, а время считывания информации имеет приблизительно такой же порядок. Такие времена слишком велики для создания любого запоминающего устройства, однако, результаты расчетов молекулярных математических моделей показывают то, что это время может быть на уровне пикосекунды, требуется лишь обеспечить скоростной и беспрепятственный подвод электронов к основной большой молекуле ячейки. Несмотря на то, что ученые уже занимаются изготовлением и исследованиями молекулярных ячеек памяти, имеющих различную геометрию, большая часть исследований проводится в виде расчетов соответствующих математических моделей. И эти расчеты говорят о том, что разница в определенных характеристиках молекулярной системы ячейки памяти может составлять 11 порядков при нахождении этой ячейки в различных состояниях, в состоянии 1 и 0. И следует заметить, что столь большой разницей не обладает ни один из типов существующих ячеек памяти и это является тем, что служит доказательством перспективности данного направления и обоснованием для проведения дальнейших исследований. Сообщение опубликовано в *Ars Technica*

[61]

, статья опубликована в

*Nature***[62]**

.

Для непрерывного мониторинга нанонейросенсоров, требуется обеспечить надежный, толстый и быстрый канал связи. Проблема с обеспечением прямой связи между головным мозгом и каким-либо внешним устройством заключается в том, что эти два объекта «разговаривают» на совершенно различных языках. Для передачи информации внутри мозга используются электрические сигналы и электрохимические процессы, происходящие на атомарном и молекулярном уровнях, и в настоящее время считывание и управление такими сигналами осуществляется при помощи примитивных методов - путем внедрения электродов, соединяемых обычными проводами с электронными устройствами.

Однако, в скором времени эта ситуация может измениться, согласно материалу, опубликованному в журнале *Future Medicine*. Группа исследователей-медиков из Международного университета Флориды в Майами разработала способ установления своего рода прямого «беспроводного соединения» с нейронами головного мозга, при помощи специальных наночастиц, которые в количестве 20 миллиардов штук были введены в мозг подопытного животного. Магнитоэлектрические наночастицы (*magnetolectric nanoparticle, MEN*), введенные в мозг подопытных грызунов, обладают рядом специальных свойств. Они достаточно малы для того, чтобы они могли приблизиться непосредственно к внешней оболочке нейронов на расстояние, позволяющее им реагировать на электрические сигналы нервных импульсов. Эти частицы могут быть активированы при помощи внешнего магнитного поля, производя свое собственное электрическое поле, воздействующее на расположенные рядом нейроны. И это электрическое поле наночастиц может объединять непосредственно с электрическим полем нейронных сетей, вмешиваясь в их функционирование. «Когда MEN-частицы подвергаются воздействию низкочастотного магнитного поля, они производят свое собственное локальное электрическое поле, частота которого совпадает с частотой магнитного поля» - рассказывает Сахрат Хизроев (*Sakhrat Khizroev*), ведущий исследователь, - «Это электрическое поле объединяется с полем нейронной сети, позволяя вмешиваться извне в работу ее электрической схемы». Используя такой подход, исследователи успешно реализовали технологию доставки лекарственных препаратов в строго определенные участки головного мозга. Естественно, использование MEN-частиц не ограничено лишь головным мозгом, они могут использоваться буквально внутри всего тела, эффективно противодействуя распространению рака и других заболеваний. Кроме этого, MEN-частицы могут быть использованы для создания нового типа прямого интерфейса между мозгом и компьютером. Обратная связь в таком случае получается за счет измерений магнитных

полей, создаваемых наночастицами в ответ на электрические сигналы, проходящие по нейронным сетям. Сообщение опубликовано в *Seeker* [63], статья опубликована в *Future Medicine / Nanomedicine*

[64].

6. Мониторинг ионных каналов.

Предположим, микролазер, любым из имеющихся способов доставки, некоторые из которых приведены далее в настоящем обзоре, был успешно доставлен к нейрону. Каким же образом он сможет мониторить нейрон, контролировать его, и управлять им? Такой способ был недавно продемонстрирован международной группой ученых. Сотрудники из Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Института биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН, и Университета Сассекса, выявили новый способ регуляции электрической активности нейронов, с помощью располагающихся в синапсах нейрона калиевых ионных каналов ВК-типа, чувствительных к кальцию, и открывающихся под действием электрического потенциала. (От работы калиевых каналов зависит, насколько быстро мембрана нейрона восстановится и будет готова снова генерировать нервный импульс, а значит, и с какой частотой нейрон сможет передавать сигналы по своему аксону к другим нейронам сети.) Чтобы установить, как внутриклеточный кальций меняет параметры разрядов нейрона, ученые использовали метод фотолитического высвобождения кальция из связанного фоточувствительного соединения, которым предварительно заполняли пирамидный нейрон пятого слоя зрительной коры крысы. Используя сканирующий микроскоп, ученые проецировали лазерный импульс длительностью десятки миллисекунд точно на пресинаптический бутон аксона, вызывая там локальное фотовысвобождение кальция, и регистрируя его распространение по аксону, с использованием флуоресцентного кальциевого индикатора. Одновременно, ученые регистрировали уменьшение длительности электрических импульсов в нейроне, с помощью стеклянного микроэлектрода, внедренного в его мембрану. Эксперименты показали, что искусственно вызванная «кальциевая волна», сравнимая с эффектом от предшествующего электрического импульса, вызывает значительное сужение последующих импульсов в серии. Результаты, раскрывающие механизмы, с помощью которых нейронная сеть без искажений передаёт высокочастотные сигналы, необходимые для точной детекции совпадений во времени, опубликованы в журнале *Science Advances*

[65].

7. Перепрограммирование нейронов.

Известны ли, на данный момент, экспериментально подтвержденные научные факты «перепрограммирования» нейронов мозга, под действием света? Да, известны, по недавно опубликованной работе ученых из Массачусетского технологического института. Им удалось перепрограммировать нейронную сеть в мозге мышей, выявив механизмы, лежащие в основе нейропластичности. Исследователи осуществили перепрограммирование отдельных нейронов в первичной зрительной коре у бодрствующих мышей. Грызунам провели вскрытие черепа, после чего, в интересующий нейрон, был введен ген флуоресцирующего белка GCaMP₆, который начинает испускать свет при прохождении через клетку импульса. Это было необходимо для визуализации изменений, происходящих в клетке. Кроме того, в некоторые нервные клетки по соседству был внедрен ген CHR2, кодирующий белок родопсин, вызывающий возбуждение нейронов в ответ на прямое облучение светом. Изменения в нейроне отслеживали с помощью двухфотонной микроскопии. Через пять дней после операции грызунам, у которых в ходе эксперимента была зафиксирована голова, демонстрировали серый экран с белым квадратом, появляющимся на одну секунду в случайных точках. При этом, в определенные моменты белый квадрат попадал в точку (мишень), которая была смещена немного в сторону от «поля зрения» нейрона с флуоресцирующим белком, но «воспринималась» некоторыми другими нейронами, по соседству с ним. В тот момент, когда квадрат совпадал с мишенью, происходила световая стимуляция «воспринимающих» его нейронов. В результате, у нейрона с GCaMP₆ наблюдалось увеличение размеров дендритных шипиков, образующих синаптические соединения с этими клетками. Это позволяло сместить его «поле зрения» на мишень. Одновременно, с этим уменьшались шипики, соединяющие нейрон с клетками, не участвующими в проведении зрительного сигнала. Таким образом, осуществлялось перепрограммирование небольшой нервной сети. Ученые также зафиксировали изменения в активности белковых рецепторов AMPA, которая коррелировала с усилением и ослаблением связей. По словам исследователей, им впервые удалось перепрограммировать отдельные нейроны в мозге живого существа, и наблюдать за молекулярными механизмами, лежащими в основе нейропластичности. Статья с результатами работы опубликована в журнале *Science*

[66]

.

8. Биodeградирующие импланты.

А что, если что-то пойдет не так? И нанонейроимплант - перестанет работать в штатном режиме: станет неисправным, попадет не в назначенное место, или необходимость в нем со временем исчезнет, и т.п.? Как, без хирургического вмешательства, безопасно и безболезненно для организма, устранить последствия такого воздействия? Для этого разрабатываются технологии самоуничтожения имплантов. Например, их можно сделать растворимыми.

Американские ученые из Стэнфордского университета разработали биосовместимое имплантируемое устройство, для измерения растяжения и давления, а после заданного времени оно способно раствориться в организме. Оно состоит из нескольких слоев, которые вместе образуют два датчика. Два слоя с магниевыми электродами, изолированными полимерными слоями, могут перемещаться относительно друг друга, тем самым менять емкость, и показывать растяжение. Другая часть слоев образует емкостной датчик давления. Он состоит из двух электродов, разделенных хорошо сжимаемым слоем диэлектрика. При сжатии датчика, расстояние между электродами уменьшается, что приводит к изменению емкости, которую также можно измерить. Снаружи датчик покрыт биodeградебельным полимером. Ученые провели испытания биосовместимости устройства на крысах. Они наблюдали воспалительную реакцию в месте имплантации только в течение первой недели, а в последующие семь недель она уже не наблюдалась. Стоит отметить, что пока у разработки ученых есть важный недостаток — растворимо и биосовместимо только само устройство, но снимать показания с него приходится с помощью отдельных электродов. В будущем, авторы собираются разработать полностью биodeградебельную систему беспроводной передачи собираемых данных. Благодаря такой способности не потребуются хирургического вмешательства, рассказывают разработчики в журнале *Nature Electronics* [67].

Биodeградирующими могут быть и более сложные нейроимпланты, например, искусственные нейроны на базе мемристоров. Мемристоры - это электронные приборы, имеющие два электрода, которые не только ограничивают проходящий через них ток, как обычные резисторы, но и запоминают в виде своего сопротивления силу

проходившего ранее через них тока. Таким образом, мемристоры являются подходящими кандидатами на использование их в качестве базовых компонентов для построения нейроморфных чипов, имплантатов, контролирующих функционирование различных органов организма человека, или средств доставки лекарственных препаратов прямо к месту назначения.

Группа исследователей, в состав которой вошли исследователи из нескольких китайских университетов, и нескольких университетов из Великобритании, разработали структуру и изготовили опытные образцы электронных устройств-мемристоров, которые состоят из органического белка и небольшого количества магния и вольфрама. Большое значение в данном случае имеет растворимость компонентов, что позволяет очень просто удалить и вывести из организма внедренные ранее устройства, выполнившие свою функцию. Для создания биологически совместимого и растворимого мемристора, исследователи использовали яичный белок, - известную всем, прозрачную вязкую жидкость, находящуюся внутри куриного яйца. Путем высушивания, из белковой жидкости была сформирована тончайшая пленка, которая использовалась в качестве диэлектрика интегральной схемы. Нанесенные поверх этой пленки магниевые и вольфрамовые электроды, выполненные в виде решетки 4 на 4, превращают это все в ячейку мемристора, с достаточно неплохими характеристиками. Полученные таким образом мемристоры работают при электрическом потенциале до 1 Вольта, соотношение состояния их высокого и низкого сопротивления составляет 100 к 1. Опытные образцы органических мемристоров сохраняли свое состояние в течение нескольких часов, без каких-либо признаков потери хранимой в них информации. А принцип их работы весьма подобен процессу деградации литиевых аккумуляторных батарей, и он заключается в формировании или разрушении металлических нанонитей, пронзающих слой диэлектрика, и влияющих на электрическую проводимость. В сухих условиях органические мемристоры работали более трех месяцев, но стоило только открыть доступ к ним влаге, как их органическая составляющая растворялась приблизительно за 10 часов, а оставшаяся часть растворялась за последующие 72 часа, практически не оставляя никаких следов. Сообщение опубликовано в *EETimes* [68], статья опубликована в

ACS [

6
9
].

9. Нейромемристоры.

Каким же образом мемристоры могут служить элементной базой для создания искусственных нейронов, и нейроморфных чипов на их основе? Мемристоры и нанопроводники уже некоторое время фигурируют, как одни из перспективных направлений в создании нейронных сетей и искусственного интеллекта. Исследователи уже использовали нанопроводники для создания электрических цепей, сверху которых могут быть выращены искусственные нервные ткани, что позволяет объединить нервные клетки с электроникой. А мемристоры уже достаточно давно рассматриваются, как базовый элемент для создания чипов, на основе которых могут быть созданы системы искусственного интеллекта.

Так, ранее (2013) сообщалось о работах учёных из Исследовательского центра адаптивных наноустройств и наноструктур (Centre for Research on Adaptive Nanostructures and Nanodevices, CRANN) из Тринити-Колледжа в Дублине, которые занимаются поиском новых принципов построения нейронных сетей, в основе которых лежит использование наноматериалов, нанопроводников и мемристоров. Целью этого проекта, который уже получил грант в размере 2.5 миллиона евро от Европейского Научного совета (European Research Council, ERC), является разработка новых вычислительных принципов и парадигм, которые подражают работе нейронных сетей головного мозга высокоразвитых существ. Профессор Джон Болэнд (John Boland), директор центра CRANN, и его коллеги, нацелены на начало новых исследований, в основе которых будет лежать опыт и данные, полученные во время предыдущих исследований. Во время этих предыдущих исследований ученым удалось выяснить, что электричество, равно как и другие виды сигналов, световые или химические, приложенные к сети нанопроводников, организованной случайным образом, приводят к проявлению некоторых явлений в определенных местах, там, где нанопроводники пересекались друг с другом. Вышеописанное явление подобно тем процессам, которые происходят при работе мозга, в котором есть пучки нервов, формирующие соединения в местах пересечения друг с другом. И это именно то место, где необходимо использовать мемристоры, способные запоминать свое состояние после того, как через них прошел электрический сигнал. Такие самообучающиеся нейронные сети, созданные на основе нанопроводников и мемристоров, по мнению исследователей из центра CRANN, могут найти широкое применение в процессорах, способных решать ряд узких специализированных задач, решение которых обычными методами требует большого количества вычислений и высокой вычислительной мощности. В качестве примера такой задачи «искусственного интеллекта», можно привести задачу распознавания лиц, задачу, которую мозг выполняет практически моментально, а ее решение математическим способом требует значительных затрат вычислительной мощности. Сообщение опубликовано в *IEEE Spectrum* [70].

Недавно (2015) сообщалось, что исследователи из Королевского технологического

института в Мельбурне (Royal Melbourne Institute of Technology, RMIT), Австралия, продолжая начатую ими ранее работу, разработали новый вид мемристоров, на базе которых были созданы тонкопленочные устройства сверхскоростной аналоговой памяти, ячейки которой могут принимать очень большое количество значений. И эти мемристоры, работа которых весьма эффективно подражает работе нейронов, позволят создать чипы, способные одновременно обрабатывать и сохранять многочисленные независимые потоки данных так, как это делает мозг человека. «Наше достижение имеет важное значение, ведь оно позволяет создать ячейки памяти, способной принимать одно из большого количества состояний и обрабатывать информацию способом, каким это делают нейроны головного мозга», - рассказывает доктор Хуссейн Нили (Dr. Hussein Nili), - «Введенные нами в материал мемристора искусственные дефекты, на основе частичек окисных соединений других металлов, позволяют открыть полный потенциал мемристора. Теперь поведение этого электронного компонента также зависит не только от текущего состояния, но и от его прошлых состояний, т.е. матрица таких элементов в своей работе может учитывать полученный ранее опыт». Все вышесказанное выходит за рамки понятия привычной нам цифровой памяти компьютера, которая может хранить данные, представленные в виде единиц и нулей. На основе сложных сетей мемристоров нового типа, в будущем, можно будет создать системы «искусственного интеллекта», которые, за счет малых размеров ячеек памяти, можно будет поместить в объем, сопоставимый с объемом мозга человека. Кроме этого, считает доктор Хуссейн Нили, в будущем, на основе подобных мемристоров, можно будет создать устройства, на которые можно будет переписать, в случае такой необходимости, сознание человека полностью. Сообщение опубликовано в *IEEE Spectrum*

[71]

, статья опубликована в *Advanced Functional Materials* [72].

В следующем году (2016), был разработан нейроподобный «забывающий мемристор». В рамках нового проекта, который реализуется объединенными усилиями нескольких компаний и организаций, включая Hewlett Packard Enterprise, и даже ВВС США, удалось разработать мемристор, который ведет себя, как нейрон. Инженеры компании Hewlett-Packard, в лабораториях которой ещё в 2008 году были созданы первые мемристоры, заметили, что свойства мемристоров подобны свойствам синаптических связей, которые усиливаются по мере их использования в процессе формирования воспоминаний. Синаптические связи между нейронами мозга могут усиливаться или ослабляться при помощи миграции ионов кальция через клеточную мембрану нейрона в ту или иную сторону. Именно высокая концентрация ионов кальция отвечает за "силу" синаптической связи и это свойство нервных тканей очень хорошо моделируется при помощи мемристора. Но, как обнаружили ученые, для качественной имитации синаптической связи недостаточно одного мемристора, они использовали два таких устройства, включенные последовательно. При этом, использованный учеными мемристор был не совсем обычными, он относился к классу диффузионных мемристоров (diffusive memristor), атомы резистивного материала которых способны перемещаться и

без приложенного к ним электрического напряжения. В качестве этого материала выступала тонкая пленка диэлектрического материала с заключенными в ней серебряными наночастицами, которая была зажата между электродами из платины или золота. Именно эти наночастицы выполняли роль ионов кальция в экспериментах по моделированию синапсов. Исследуя движение наночастиц в слое резистивного материала, исследователи заметили поразительное сходство этого с тем, как ионы кальция выполняют свои функции в биологических системах. Импульс напряжения, приложенный к гибриднему мемристорному устройству, привел к формированию «нити» из наночастиц, которая замыкает два электрода. После снятия напряжения эта нить, за счет спонтанного движения серебряных наночастиц, начинала постепенно разрушаться, что приводит к постепенному увеличению сопротивления мемристора. Вторым мемристором в цепочке гибридного устройства являлся более традиционный прибор, который способен сохранять свое сопротивление неизменным в течение длительного времени. Когда на гибридное устройство подавался импульс напряжения с определенными временными параметрами, этот искусственный синапс, за счет второго мемристора, формировал «длительную память». А если длительность импульса была недостаточной, то гибридный мемристор, через некоторое время, «забывал» о данном событии, что соответствует поведению синапса наиболее точным образом. Следующим шагом, который намерены предпринять ученые, станет объединение искусственный синапсов в нейроморфные цепи, которые будут копировать строение некоторые из нейронных сетей головного мозга, и тщательное изучение функционирования этих цепей. Сообщение опубликовано в *IEEE Spectrum* [73], статья опубликована в *Nature Materials*

[74]

В этом году (2018), исследователи из университета Саутгемптона создали улучшенный вариант мемристора. Новый мемристор способен переключаться в любое из 128 стабильных состояний, что в четыре раза больше, чем аналогичные показатели любых других мемристоров, созданных ранее. Данная технология, после ее доведения до совершенства, может стать основой компьютерной памяти и нейроморфных процессоров следующего поколения. «Мемристоры являются ключевой технологией, предоставляющей возможности для создания чипов следующего поколения, подражающих принципам работы головного мозга», - пишут исследователи, - «И, для наилучшего подражания, эти чипы должны быть полностью реконфигурируемыми, масштабируемыми и максимально эффективными, насколько это возможно». Основой структуры новых мемристоров являются несколько металл-оксидных двойных барьерных слоев, каждый из которых имеет отличные от других слоев электрические характеристики. Совокупность этих нескольких слоев, вносящих свою долю в общую ионную проводимость устройства, и позволила расширить количество состояний одного мемристора до 128, что позволяет хранить в одной ячейке памяти, на базе такого мемристора, $\log_2(128) = 7$ бит информации. Более того, со слов исследователей, мемристоры нового типа демонстрируют достаточно высокую стабильность, быстроедействие и эффективность, т.е., для их функционирования требуется совсем незначительное количество энергии. В настоящее время, создано несколько опытных

образцов мемристоров нового типа, характеристики которых из-за условий полукустарного производства, значительно отличаются от экземпляра к экземпляру, поэтому приводить сейчас какие-либо цифры совершенно бессмысленно. Но ученые считают, что разработка технологии промышленного производства, которая уже ведется в данное время, позволит увеличить повторяемость и уменьшить разброс характеристик отдельных устройств. Сообщение опубликовано в трудах *University of Southampton* :
Next Big Future

[75]

, и
News by University of Southampton

[76]

, статья опубликована в
Scientific Reports

[77].

Так же, в этом (2018) году, был создан нейроморфный гибрид мемристора и транзистора, который ученые из Северо-Западного Университета США (Northwestern University, Evanston, Illinois, USA) назвали «мемтранзистором», и работает оно, как нейрон мозга, одновременно выполняя операции с информацией и памятью. Сочетая в себе свойства мемристора и транзистора, мемтранзисторы состоят из терминалов, которые действуют наподобие нейронной сети. Для разработки мемтранзистора Марк Херсем (Mark C. Hersam), и его коллеги, использовали атомно тонкий дисульфид молибдена (MoS_2), с хорошо определенными границами зерен, что влияет на движение тока. Как волокна в древесине, атомы образуют организованные группы, или зерна. Под воздействием большого напряжения границы зерен создают атомное движение, вызывая изменение сопротивления. Благодаря тому, что MoS_2 состоит из одного слоя атомов, на него проще воздействовать электрическим полем. Это свойство позволило ученым создать транзистор, а свойства мемристора появились из-за относительно подвижных дефектов в материале. Но, в отличие от предыдущих мемристоров, которые состояли из отдельных небольших хлопьев MoS_2

, мемтранзисторы Херсема сделаны из пленки поликристаллического MoS_2

. Это упрощает их производство. «Когда длина устройства больше размера отдельного зерна, вы гарантированно получаете границу зерна в каждом устройстве на подложке», — говорит он. После изготовления мемтранзисторов ученые добавили к ним дополнительные электрические контакты. В обычных транзисторах по три терминала, но в изобретении Херсема их семь, один из которых управляет током в остальных шести, пишет Phys.org. «Это еще больше напоминает нейроны в мозге, — считает Херсем. — Как правило, в мозге не бывает такого, чтобы нейрон был соединен всего с одним нейроном. Один нейрон в мозге соединен со множеством других нейронов, образуя сеть. Структура нашего устройства позволяет создавать много контактов наподобие множеству синапсов у нейронов». Сообщение опубликовано в

PhisOrg

[78]

статья опубликована в

Nature

[79]

10. Нейрочипы, искусственные нейроны и синапсы.

От отдельных нейроэлектродов, нейросенсоров и нейромемтранзисторов, разработчики нейроимплантов переходят к целым нейроморфным чипам, искусственным нейронам и искусственным синапсам.

Работы в данном направлении уже достаточно долго ведут исследователи из канадского Университета Калгари (University of Calgary, Canada), а, недавно, они закончили разработку нового биологического гибридного нейрочипа, который в состоянии сделать запись сигналов нервной деятельности, с самой высокой, на сегодняшний день, разрешающей способностью, и на протяжении длительного промежутка времени. «Чувствительность нового чипа в 15 раз превышает чувствительность других подобных нейрочипов», - рассказывает Ноид Сайед (Naweed Syed), исследователь из университета Калгари, - «Этот чип позволяет нам считывать сигналы нервных клеток, усиливать их и получать запись деятельности мозга с более высокой разрешающей способностью, чем это было возможно ранее». В основе нового чипа лежат принципы полной биологической совместимости, которые позволяют создать его контакт с нервными тканями так, что клетки головного мозга «искренне считают», что они соединились с другими нервными клетками. Помимо высокого качества, такое соединение позволяет реализовать двусторонний обмен информацией, и такое соединение остается стабильным на протяжении длительного промежутка времени. «Запись картины деятельности нервных клеток за длительное время, позволяет нам отслеживать изменения, которые происходят очень малыми темпами», - рассказывает Пьер Виждан (Pierre Wijdenes), - «Это, в свою очередь, позволит нам установить, почему одни нейроны устанавливают связи только с определенными нейронами, а не со всеми остальными». В настоящее время опытный образец нового нейрочипа используется для записи и анализа деятельности клеток мозга подопытных

животных. Полученные положительные результаты этих экспериментов позволяют ученым считать, что до момента начала использования чипа для получения картины деятельности мозга человека, осталось совсем немного времени. «Сигналы нервных клеток мозга человека гораздо слабее сигналов в мозге других животных, и для записи этих сигналов требуется более высокочувствительное оборудование», - рассказывает Колин Далтон (Colin Dalton), один из исследователей, - «Эксперименты показали, что наш новый нейрочип полностью подходит для использования его с мозгом человека, и он может быть использован в качестве инструмента, при помощи которого будут разрабатываться персонифицированные методы лечения для пациентов, страдающих различными неврологическими заболеваниями». Сообщение опубликовано в трудах *University of Calgary*, *Medical Press*

[80]

, статья опубликована в *Nature*

[81].

Другой разработчик вживляемого в мозг нейрочипа, Теодор Бергер (Theodore Berger), возглавляет Центр нейроинженерии в Университете южной Калифорнии (Center for Neural Engineering at the University of Southern California), и отвечает за научную составляющую проекта. Именно на его работе основан стартап, под названием Kernel, в рамках которого создается нейропротез. Он подражает структуре, называемой гиппокамп, с помощью электрической стимуляции мозга, чтобы формировать воспоминания. Бергер использует теорию о том, как гиппокамп превращает краткосрочные воспоминания в долгосрочные. По словам Грегори Кларка, бывшего ученика Бергера, можно сформировать определенную модель поведения, путем обучения гиппокампа. Бергер утверждает, что он может создать математическую модель правила, которое гиппокамп использует для того, чтобы преобразовывать краткосрочные воспоминания в долгосрочные. Это можно будет использовать, к примеру, для восстановления воспоминаний. Устройство в виде крохотного чипа будет имплантироваться в головной мозг пациентов, страдающих от нейродегенеративных расстройств, и с помощью искусственного интеллекта моделировать утраченные связи между клетками. Например, подчиненный общается с начальником. После разговора мозг кодирует информацию и, в виде набора сигналов, перемещает ее из краткосрочной памяти в долгосрочную. Эти сигналы похожи на текст компьютерной программы, который уникален для каждого человека. Нейродегенеративные расстройства разрушают этот код. Задача нейропротеза — в каждой конкретной ситуации смоделировать, какие сигналы должна была послать клетка, если бы она была здорова, создать нужный код и отправить его по нужному адресу. Теодор Бергер уже проводил испытания на крысах и обезьянах, и по результатам работы животные показывали улучшения в этой области. По словам Бергера, адаптировать его к людям достаточно сложно из-за миллиардов нейронов в головном мозге человека, и триллионах связей между ними, благодаря которым они работают сообща. Создать технологию, которая сможет работать с ними, не так то просто. Но это не останавливает Бергера, он активно работает над этим, и создал стартап под названием Kernel, чтобы со временем вывести

имплант на рынок. В августе 2016 г. американский стартап Kernel объявил о начале разработки имплантата для улучшения памяти и обучаемости людей с нарушениями этих функций — например, при болезни Альцгеймера. Теодор Бергер стал научным руководителем проекта, в Kernel Бергер займется созданием «гиппокамповых протезов» для людей, нуждающихся в них. Сообщения опубликованы в *Live Science* [82] и *IEEE Spectrum*

[83]

Группа ученых из нескольких научных учреждений Швеции разработала синтетический нейрон, способный естественным образом «общаться» с обычными органическими нейронами. Внедрение таких синтетических нейронов в поврежденные области головного мозга может восстановить пути распространения нервных сигналов, что может стать самым эффективным способом лечения множества неврологических заболеваний. Искусственный нейрон работает точно также, как и его естественный аналог. Своим одним концом он обнаруживает наличие химического сигнала, передает этот сигнал на другой конец при помощи переноса электрического заряда, и испускает собственный нейромедиатор из резервуара на втором конце. Пока ученые проверили работу искусственных нейронов, изготовленных из органических биоэлектронных полимерных материалов лишь только в лабораторных условиях. Помещая чувствительный конец искусственного нейрона в раствор, содержащий набор определенных химикатов, ученые отслеживали электрические изменения, происходящие в структуре нейрона, которые привели к высвобождению заданного количества вещества-нейромедиатора из резервуара на втором конце нейрона. Другими словами, ученые убедились в том, что созданный ими искусственный нейрон функционирует должным образом. Одной из причин, по которой испытания искусственных нейронов проводятся лишь в чашке Петри, являются их относительно большие размеры. Но следующими шагами, которые намерены сделать шведские ученые, станет миниатюризация структуры искусственного нейрона, после чего его можно будет имплантировать в мозг подопытного животного, где будет проведена проверка работоспособности в реальных условиях. И если все это закончится успехом, то на основе таких синтетических нейронов можно будет создавать искусственные нервные ткани, при помощи которых можно будет полностью восстанавливать пути распространения нервных сигналов, нарушенные в результате болезней или травм. Сообщение опубликовано в *Popular Science* [84], статья опубликована в журнале *Biosensors and Bioelectronics*

[85].

Исследователи Пхоханского университета Южной Кореи (Pohang University of Science & Technology (POSTECH)) создали органическое устройство из нановолокон, которое имитирует не только важные моторные и энергетические принципы биологических синапсов, но и их морфологию. Ученые давно стремятся к созданию системы

искусственного интеллекта, которая полностью имитирует функции человеческого мозга, который во многом превосходит суперкомпьютер, несмотря на свой малый вес, размер и потребление энергии. Для этого требуется разработать искусственную нейронную сеть с огромным числом синапсов. Южнокорейские ученые успешно создали электронное устройство из органического нановолокна (ONF), которое копирует морфологию биологических нейронных связей. Морфология ONF очень похожа на строение нервных волокон человеческого мозга, образующих перекрещивающиеся сети для обеспечения высокой плотности памяти. Благодаря технологии печати нанопроводов, ONF можно производить с высокой точностью и плотностью. Такое строение позволяет создавать нейроморфические системы с памятью высокой плотности. При этом ученым удалось сократить потребление энергии до уровня фемтоджоулей за синаптическое событие, что на порядок меньше, чем предыдущие достижения, и может соперничать с биологическими системами. Эта технология искусственных синапсов, разработанная командой профессора Тай-Бу Ли (Prof. Tae-Woo Lee, research professor Wentao Xu, and Dr. Sung-Yong Min with the Dept. of Materials Science and Engineering at POSTECH), может найти применение в разработке ИИ автономных машин, анализе больших данных, сенсорных системах и других формах взаимодействия компьютеров и людей, пишет *Science Daily* [86]. Статья опубликована в *Science Advances* [87].

11. Биоэлектроника.

В мозгу человека примерно 70 миллиардов нейронов, а если отслеживать еще и все возбудимые образования (дендриты и аксоны), то это количество надо умножить минимум еще примерно на 100. Если при этом один нейросенсор будет стоить всего 1 цент, всё равно сумма получится астрономическая, в 7 трлн. долларов. А товар для массовой продажи не должен стоить выше заветной пороговой суммы в 1000 долларов. Следовательно, для целей сеттлеретики, каждый такой сенсор должен быть наноразмерным, производиться быстро, массово, и практически ничего при этом не стоить. Заманчиво при этом превратить в нанотранзистор нанопыль в несколько атомов, или даже один атом, поскольку атомы созданы природой, и они бесплатны. А самосборку - осуществлять посредством их биологического размножения. То есть, мы приходим к идее биоэлектроники – живых организмов, типа бактерий или вирусов, которые могут быть генетически запрограммированы на работу в качестве электронных устройств. Но возможно ли такое, теоретически и практически? Да, возможно, но соответствующий обзор будет представлен в следующей статье автора.

12. Средства доставки.

Аналогично, обзор средств доставки будет представлен в следующей статье автора.

ВЫВОДЫ.

Автор делает вывод о том, что, к настоящему моменту, **уже имеется достаточно** микро- и наноустройств, изготовленных из нетравмирующих биосовместимых материалов, которые могут быть использованы **для практической проверки** теоретических положений, и реализации целей и задач **сеттлеретики**

ЛИТЕРАТУРА.

1. *Yan I. Korchmaryuk. Settleritics as a new conception, science and technology of immortality: 1996 – 2015.* (Научен доклад.) //Осми Интернационална и интердисциплинарна научна конференция «Авангардни научни инструменти в управлението '2015 (VSIM:15)» (Университет за национално и световно

стопанство, катедра «Управление», гр. Равда, 09 – 13 септември 2015 г.: Списание «Авангардни научни инструменти в управлението». Том 2 (11) 2015. ISSN 1314-0582.

Компакт-диск и уебсайт

<http://vsim-journal.info>

[urnal.info](http://vsim-journal.info)

). –

София: «Евдемония Продъкшън» ЕООД (Eudaimonia Production, Ltd.), 2015.

<http://www.settleretics.ru/ru/raboty-avtora/stati-avtora/141-xii-settleretika-kak-novaja-koncepcija-nauka-i-tehnologija-bessmertija-1996-2015-gg>

1. Корчмарюк Я. И. Сеттлеретика-2016: Рукопись — заменит кибер-телепатия.

(Научный доклад.) //Девета Интернационална и интердисциплинарна научна конференция «Авангардни научни инструменти в управлението '2016 (VSIM:16)»

(Университет за национално и световно стопанство, катедра «Управление», гр. Равда, 21 – 25 септември 2016 г.: Списание «Авангардни научни инструменти в управлението».

Компакт-диск и уебсайт

<http://vsim-journal.info>

). – София: «Евдемония Продъкшън» ЕООД (Eudaimonia Production, Ltd.), 2016.

<http://www.settleretics.ru/ru/raboty-avtora/stati-avtora/142-settleretika2016-rukopis-zamenit-kibertelepatija1>

2. Корчмарюк Я. И. СЕТТЛЕРЕТИКА. Новая наука о кибернетическом бессмертии

(Сборник трудов за 1996 – 2015 г.г. В 4-х книгах, на русском, болгарском, английском и испанском языках.). — Волгоград: ООО «СФЕРА», 2015. — 548 с.

3. Yan I. Korchmaryuk. Settleritics as a new conception, science and technology of immortality: 1996 – 2015.

(Научен доклад.) //Осми

Интернационална и интердисциплинарна научна конференция «Авангардни научни инструменти в управлението '2015 (VSIM:15)» (Университет за национално и световно

стопанство, катедра «Управление», гр. Равда, 09 – 13 септември 2015 г.: Списание «Авангардни научни инструменти в управлението». Том 2 (11) 2015. ISSN 1314-0582.

Компакт-диск и уебсайт

<http://vsim-journal.info>

[urnal.info](http://vsim-journal.info)

). –

София: «Евдемония Продъкшън» ЕООД (Eudaimonia Production, Ltd.), 2015.

<http://www.settleretics.ru/>

1. **Корчмарюк Я. И. Сеттлеретика, или оцифрованный мозг.** (Секц. докл.) // Высокие технологии и фундаментальные исследования. Т. 4: сборник трудов Десятой Международной научно-практической конференции "Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности" 09 – 11. 12. 2010, Санкт-Петербург, Россия / под ред. А. П. Кудинова. — СПб. : Изд-во Политехн. Ун-та, 2010. — 424 с. С. 31 – 39. <http://www.settleretics.ru/ru/raboty-avtora/stati-avtora/21-settleretika-or-qdigitizedq-what-is-the-brain-qsettleretikaq-why-it-is-necessary-to-mankind-and-why-she-needed-him-urgently>

2. Source: /17. [326]. **X. Jiang, J. Hu, L.A. Fitzgerald, J.C. Biffinger, P. Xie, B.R. Ringeisen and C.M. Lieber. Probing electron transfer mechanisms in *Shewanella oneidensis* MR-1 using a nanoelectrode platform and single cell imaging.** Proc. Natl. Acad. Sci. USA Early Edition, September 13th, 2010. DOI: 10.1073/pnas.1011699107.
18

[325].
S. Kwon, J. Kang, C. Seassal, S. Kim, P. Regreny, Y. Lee, C.M. Lieber and H. Park. Subwavelength plasmonic lasing from a semiconductor nanodisk with silver nanopan cavity. Nano Lett. 10, 3679-3683 (2010).
19

[324].
B. Tian, T. Cohen-Karni, Q. Qing, X. Duan, P. Xie and C.M. Lieber. Three-dimensional, flexible nanoscale field-effect transistors as localized bioprobes. Science 329, 831-834 (2010).
20

[323].
G. Zheng, X. Gao and C.M. Lieber. Frequency domain detection of biomolecules using silicon nanowire biosensors. Nano Lett. 10, 3179-3183 (2010).
21

[322].
B.P. Timko, T. Cohen-Karni, Q. Qing, B. Tian and C.M. Lieber. Design and implementation of functional nanoelectronic interfaces with biomolecules, cells and tissue using nanowire device arrays. IEEE Trans. Nanotechnol. 9, 269-280 (2010).
22

[321].
T. Cohen Karni, Q. Qing, Q. Li, Y. Fang and C.M. Lieber. Graphene and nanowire transistors for cellular interfaces and electrical recording. Nano Lett. 10, 1098-1102 (2010).

23

[320].

Q. Qing, S.K. Pal, B. Tian, X. Duan, B.P. Timko, T. Cohen-Karni, V.N. Murthy and C.M. Lieber.

Nanowire transistor arrays for mapping neural circuits in acute brain slices.

Proc. Natl. Acad. Sci. USA 107, 1882-1887 (2010).

24

[319].

X.P. Gao, G. Zheng and C.M. Lieber.

Subthreshold regime has the optimal sensitivity for nanowire FET biosensors.

Nano Lett. 10, 547-552 (2010). /

3. **Neil Savage. Injectable Nanowires Monitor Mouse Brains for Months.** Source: Lieber Group, Harvard University. The Human OS Newsletter, 29 Aug 2016.

<https://spectrum.ieee.org/the-human-os/biomedical/devices/injectable-nanowires-monitor-mouse-brains-for-months>

4. **Xiaochuan Dai, Wei Zhou, Teng Gao, Jia Liu & Charles M. Lieber.**
Three-dimensional mapping and regulation of action potential propagation in nanoelectronics-innervated tissues

. Source: Department of Chemistry and Chemical Biology, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, USA; Harvard John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, USA. Nature Nanotechnology, volume 11, pages 776–782. (2016). DOI

<https://doi.org/10.1038/nnano.2016.96>

June 27th, 2016.

<https://www.nature.com/articles/nnano.2016.96>

1. **David Szondy. Slanted electrode implant restores movement to paralyzed limbs.**

Source: Frontiers in Neuroscience. Medical, November 24th, 2016.

<https://newatlas.com/implanted-electrodes-paralyzed/46593/>

2. **Neuron-recording nanowires could help screen drugs for neurological diseases.**

Source: University of California San Diego (USA), Kurzweil Accelerating Intelligence, April 18th, 2017.

<http://www.kurzweilai.net/neuron-recording-nanowires-could-help-screen-drugs-for-neurological-diseases>

1. **Ren Liu, Renjie Chen, Ahmed T. Elthakeb, Sang Heon Lee, Sandy Hinckley, Massoud L. Khraiche, John Scott, Deborah Pre, Yoontae Hwang, Atsunori Tanaka, Yun Goo Ro, Albert K. Matsushita, Xing Dai, Cesare Soci, Steven Biesmans, Anthony James, John Nogan, Katherine L. Jungjohann, Douglas V. Pete, Denise B. Webb, Yimin Zou, Anne G. Bang, and Shadi A. Dayeh.** **High Density Individually Addressable Nanowire Arrays Record Intracellular Activity from Primary Rodent and Human Stem Cell Derived Neurons.**

Source: Integrated Electronics and Biointerfaces Laboratory, Department of Electrical and Computer Engineering, Neurobiology Section, Biological Sciences Division, Graduate Program of Materials Science and Engineering, and Department of NanoEngineering, University of California San Diego, Gilman Drive, La Jolla, California, United States; Conrad Prebys Center for Chemical Genomics, Sanford Burnham Prebys Medical Discovery Institute, North Torrey Pines Road, La Jolla, California, United States; Division of Physics and Applied Physics, Nanyang Technological University, Nanyang Link, Singapore; Center for Integrated Nanotechnologies, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, United States. Nano Lett., 2017, 17 (5), pp 2757–2764. DOI: 10.1021/acs.nanolett.6b04752. April 6th, 2017.

<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.nanolett.6b04752?journalCode=nalefd>

2. **Dion Khodagholy, Jennifer N Gelin, Thomas Thesen, Werner Doyle, Orrin Devinsky, George G Malliaras & György Buzsáki.** **NeuroGrid: recording action potentials from the surface of the brain.**

Source: NYU Neuroscience Institute, School of Medicine, New York University, New York, USA; Department of Neurology, Comprehensive Epilepsy Center, New York University, New York, USA; Department of Bioelectronics, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Microelectronics Center of Provence–Saint-Etienne School of Mines (CMP-EMSE), MOC, Gardanne, France. Nature Neuroscience, volume 18, pages 310–315 (2015). Nature Neuroscience, December 22th, 2014. ISSN 1546-1726.

<https://www.nature.com/articles/nn.3905>

3. **Dion Khodagholy, Jennifer N. Gelin, Zifang Zhao, Malcolm Yeh, Michael Long, Jeremy D. Greenlee, Werner Doyle, Orrin Devinsky and György Buzsáki.** **Organic electronics for high-resolution electrocorticography of the human brain.**

Source: NYU Neuroscience Institute, School of Medicine, New York University, New York, USA; Neuroscience Research Institute, Peking University, Xueyuan Road, Haidian District, Beijing, China; Department of Neurology, University of Iowa Hospitals and Clinics, Iowa City, USA; Department of Neurosurgery, Human Brain Research Laboratory, University of Iowa Hospitals and Clinics, Iowa City, USA; Department of Neurosurgery, New York University Langone Medical Center, New York, USA; Department of Neurology, Comprehensive Epilepsy Center, New York University, New York, NY 10016, USA. Science Advances, November 9th, 2016: Vol.

2, no. 11, e1601027. DOI: 10.1126/sciadv.1601027.

<http://advances.sciencemag.org/content/2/11/e1601027.full>

4. **Lynda Delacey. Graphene successfully interfaced with neurons in the brain.**

Source:

University of Cambridge. New Atlas, February 15th, 2016.

<https://newatlas.com/graphene-electrode-brain-disorders/41591/>

5. **Alessandra Fabbro, Denis Scaini, Verónica León, Ester Vázquez, Giada Cellot, Giulia Privitera, Lucia Lombardi, Felice Torrisi, Flavia Tomarchio, Francesco Bonaccorso, Susanna Bosi, Andrea C. Ferrari, Laura Ballerini, and Maurizio Prato**
Graphene-Based Interfaces Do Not Alter Target Nerve Cells

. Source: International School for Advanced Studies (SISSA/ISAS), Trieste, Italy; Department of Chemical and Pharmaceutical Sciences, University of Trieste, Trieste, Italy; Life Science Department, University of Trieste, Trieste, Italy; Nanoinnovation Laboratory, ELETTRA Synchrotron Light Source, Trieste, Italy; Department of Organic Chemistry, University of Castilla-La Mancha, Ciudad Real, Spain; Cambridge Graphene Centre, University of Cambridge, Cambridge CB3 0FA, United Kingdom; Istituto Italiano di Tecnologia, Graphene Labs, Genova, Italy; Carbon Nanobiotechnology Laboratory, CIC biomaGUNE, Paseo de Miramón 182, Donostia-San Sebastian, Spain; Basque Foundation for Science, Ikerbasque, Bilbao, Spain. ACS Nano, 2016, 10 (1), pp 615–623. DOI: 10.1021/acsnano.5b05647. December 23th, 2015.

<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsnano.5b05647>

1. **Kate Taylor. Graphene transistors compatible with living cells.** Source: Technische Universitaet, Muenchen (Germany). TG Daily, December 1st, 2011.

<https://www.tgdaily.com/trendwatch-features/59950-graphene-transistors-compatible-with-living-cells>

2. **Lucas H. Hess, Michael Jansen, Vanessa Maybeck, Moritz V. Hauf, Max Seifert, Martin Stutzmann, Ian D. Sharp, Andreas Offenhaeusser, and Jose A. Garrido**
Graphene Transistor Arrays for Recording Action Potentials from Electrogenic Cells.

Source: Walter Schottky Institut, Technische Universität München, Am Coulombwall 4, 85748 Garching, Germany. Advanced Materials, September 23th, 2011, 23, 5045-5049. DOI: 10.1002/adma.201102990

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201102990>

3. **Sissa Medialab. Half spheres for molecular circuits.** Source: SISSA and the University of Zurich (Switzerland). Phys. Org, February 16th, 2015.

<https://phys.org/news/2015-02-spheres-molecular-circuits.html>

4. **L. Zoppi, L. Martin-Samos and K. K. Baldrige. Buckybowl superatom states: a unique route for electron transport** ?

Source: Department of Chemistry, University of Zurich, Winterthurerstrasse, Zurich, Switzerland; University of Nova Gorica, Materials Research Laboratory, vipavska cesta 11C, Ajdovscina, Slovenia; DEMOCRITOS, Istituto Officina dei Materiali, c/o SISSA Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati, Via Bonomea 265, Trieste, Italy. Physical Chemistry Chemical Physics, 2015, 17, 6114-6121. DOI: 10.1039/C4CP05776G.
<http://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2015/CP/C4CP05776G#!divAbstract>

5. **Heather Zeiger. Synthesis and characterization of encapsulated single HF molecule.**

Source: University of Southampton, the University of Nottingham, and Institutions in France and Estonia. Phys. Org, July 26th, 2016.
<https://phys.org/news/2016-07-synthesis-characterization-encapsulated-hf-molecule.html>

6. **Andrea Krachmalnicoff, Richard Bounds, Salvatore Mamone, Shamim Alom, Maria Concistrè, Benno Meier, Karel Kouřil, Mark E. Light, Mark R. Johnson, Stéphane Rols, Anthony J. Horsewill, Anna Shugai, Urmaz Nagel, Toomas Rõõm, Marina Carravetta, Malcolm H. Levitt & Richard J. Whitby. The dipolar endofullerene HF@C60.**

Source: Chemistry, University of Southampton, Southampton, UK; School of Physics and Astronomy, University of Nottingham, Nottingham, UK; Institut Laue-Langevin, Grenoble, France; National Institute of Chemical Physics and Biophysics, Akadeemia Tee 23, Tallinn, Estonia. Nature Chemistry, volume 8, pages 953–957 (2016). DOI:
<https://doi.org/10.1038/nchem.2563>

July 11th, 2016.

<https://www.nature.com/articles/nchem.2563>

7. **SLAC National Accelerator Laboratory. Buckyballs and diamondoids join forces in tiny electronic gadget.**

Source: Stanford Institute for Materials and Energy Sciences (SIMES) at the Department of Energy's SLAC National Accelerator Laboratory. Phys. Org, Nanotechnology / Nanophysics, September 9th, 2014.
<https://phys.org/news/2014-09-buckyballs-diamondoids-tiny-electronic-gadget.html>

8. **Jason C. Randel, Francis C. Niestemski, Andrés R. Botello-Mendez, Warren Mar, Georges Ndabashimiye, Sorin Melinte, Jeremy E. P. Dahl, Robert M. K. Carlson, Ekaterina D. Butova, Andrey A. Fokin, Peter R. Schreiner, Jean-Christophe Charlier & Hari C. Manoharan. Unconventional molecule-resolved current rectification in diamondoid–fullerene hybrids.**

Source: SLAC National Accelerator Laboratory, Stanford Institute for Materials and Energy Sciences, Menlo Park, California, USA; Department of Applied Physics, Stanford University, Stanford, California, USA; Department of Physics, Stanford University, Stanford, California, USA; Institute of Condensed Matter and Nanosciences, Université catholique de Louvain, Louvain-La-Neuve, Belgium; Department of Electrical Engineering, Stanford University, Stanford, California, USA; Institute of Information and Communication Technologies, Electronics and Applied Mathematics, Université catholique de Louvain, Louvain-La-Neuve, Belgium; Institute of Organic Chemistry, Justus-Liebig

University, Heinrich-Buff-Ring 58, Giessen, Germany; Department of Organic Chemistry, Kiev Polytechnic Institute, Kiev, Ukraine. Nature Communications, volume 5, Article number: 4877 (2014). DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms5877> September 9th, 2014. <https://www.nature.com/articles/ncomms5877>

9. **Matthew Hutson. Scientists use carbon nanotubes to make the world's smallest transistors**. Technology, doi:10.1126/science.aan7042 Science, June 29th, 2017. <http://www.sciencemag.org/news/2017/06/scientists-use-carbon-nanotubes-make-world-s-smallest-transistors>

10. **Qing Cao, Jerry Tersoff, Damon B. Farmer, Yu Zhu, Shu-Jen Han. Carbon nanotube transistors scaled to a 40-nanometer footprint.** Source: BM Thomas J. Watson Research Center, Yorktown Heights, NY 10598, USA. Science, 30 Jun 2017: Vol. 356, Issue 6345, pp. 1369-1372. DOI: 10.1126/science.aan2476 <http://science.sciencemag.org/content/356/6345/1369>

11. **Adam Malecek. For first time, carbon nanotube transistors outperform silicon.** Source: University of Wisconsin–Madison materials engineers. News University of Wisconsin–Madison, September 2nd, 2016. <https://news.wisc.edu/for-first-time-carbon-nanotube-transistors-outperform-silicon/>

12. **Stephanie Precourt. For first time, carbon nanotube transistors outperform silicon.** Source: University of Wisconsin-Madison. Science Daily News, September 2nd, 2016.

<https://www.sciencedaily.com/releases/2016/09/160902152049.htm>

1. **Gerald J. Brady, Austin J. Way, Nathaniel S. Safron, Harold T. Evensen, Padma Gopalan and Michael S. Arnold. Quasi-ballistic carbon nanotube array transistors with current density exceeding Si and GaAs.**

Source: Department of Materials Science and Engineering, University of Wisconsin-Madison, University Avenue, Madison, USA; Department of Engineering Physics, University of Wisconsin-Platteville, University Plaza, Platteville, USA. Science Advances, September 2nd, 2016: Vol. 2, no. 9, e1601240. DOI: 10.1126/sciadv.1601240. <http://advances.sciencemag.org/content/2/9/e1601240>

2. **Single molecules can work as reproducible transistors—at room temperature.** Source: Columbia University School of Engineering and Applied Science. Phys. Org, Nanotechnology / Nanomaterials, August 14th, 2017. <https://phys.org/news/2017-08-molecules-transistorsat-room-temperature.html>

3. **Giacomo Lovat, Bonnie Choi, Daniel W. Paley, Michael L. Steigerwald, Latha Venkataraman & Xavier Royoom-temperature current blockade in atomically defined single-cluster junctions**. Source: Department of Applied Physics and Applied Mathematics, Columbia University, New York, USA; Department of Chemistry, Columbia University, New York, USA; Columbia Nano Initiative, Columbia University, New York, USA. Nature Nanotechnology, volume 12, pages 1050–1054 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1038/nnano.2017.156>. August 14, 2017.
<https://www.nature.com/articles/nnano.2017.156>

4. **Dario Borghino. New molecular transistor can control single electrons**. Source: U.S. Naval Research Laboratory. New Atlas / Electronics, July 19th, 2015.
<https://newatlas.com/single-molecule-transistor/38476/>

5. **Jesús Martínez-Blanco, Christophe Nacci, Steven C. Erwin, Kiyoshi Kanisawa, Elina Locane, Mark Thomas, Felix von Oppen, Piet W. Brouwer & Stefan Fölsch. Gating a single-molecule transistor with individual atoms**. Source: Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik, Hausvogteiplatz 5-7, Berlin, Germany; Center for Computational Materials Science, Naval Research Laboratory, Washington, USA; NTT Basic Research Laboratories, NTT Corporation, Atsugi, Kanagawa, Japan; Dahlem Center for Complex Quantum Systems and Fachbereich Physik, Freie Universität Berlin, Berlin, Germany. Nature Physics, volume 11, pages 640–644 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1038/nphys3385>
July 13th, 2015
<https://www.nature.com/articles/nphys3385>

6. **Dexter Johnson. Indium Selenide Takes on the Mantle of the New Wonder Material**. Source: University of Manchester, National Graphene Institute (NGI). IEEE Spectrum, December 8th, 2016.
<https://spectrum.ieee.org/nanoclast/semiconductors/materials/indium-selenide-takes-on-the-mantle-of-the-new-wonder-material>
<https://www.nature.com/articles/nphys3385>

7. **New ultra-thin semiconductor could extend life of Moore's Law**. Source: University of Manchester, November 21th, 2016.
<https://www.manchester.ac.uk/discover/news/new-ultra-thin-semiconductor-could-extend-life-of-moores-law/>

8. **Lisa M. Krieger. Stanford scientists see big potential for tiny wires**. Source: the Stanford University, the Stanford Institute for Materials and Energy Sciences at SLAC National Accelerator Laboratory, by the Department of Energy. Bay Area News Group, December 27-29th, 2016. <https://www.mercurynews.com/2016/12/27/stanford-scientists-see-big-potential-for-tiny-wires/>

9. **Hao Yan, J. Nathan Hohman, Fei Hua Li, Chunjing Jia, Diego Solis-Ibarra, Bin Wu,**

Jeremy E. P. Dahl, Robert M. K. Carlson, Boryslav A. Tkachenko, Andrey A. Fokin, Peter R. Schreiner, Arturas Vailionis, Taeho Roy Kim, Thomas P. Devereaux, Zhi-Xun Shen & Nicholas A. Melosh. Hybrid metal–organic chalcogenide nanowires with electrically conductive inorganic core through diamondoid-directed assembly . Source:

Stanford Institute for Materials and Energy Sciences, Stanford, California, USA; Department of Materials Science and Engineering, Stanford, California, USA; Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, USA; Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, CDMX 04510, México; Institute of Organic Chemistry, Justus-Liebig University, Heinrich-Buff-Ring 17, D-35392 Giessen, Germany; Geballe Laboratory for Advanced Materials, Stanford University, Stanford, California 94305, USA. *Nature Materials*, volume 16, pages 349–355 (2017). DOI

<https://doi.org/10.1038/nmat4823>

December 26th, 2016.

<https://www.nature.com/articles/nmat4823>

10. **David L. Chandler. Tiny Fibers Open New Windows into The Brain.** Source: MIT's Research Laboratory of Electronics, Department of Electrical Engineering and Computer Science, McGovern Institute for Brain Research, Department of Chemical Engineering, and Department of Mechanical Engineering, Tohoku University in Japan and Virginia Polytechnic Institute, the National Institute of Neurological Disorders and Stroke, the National Science Foundation, the MIT Center for Materials Science and Engineering, the Center for Sensorimotor Neural Engineering, and the McGovern Institute for Brain Research. MIT News Office, Medical, February, 22th, 2017.

<https://www.ecnmag.com/news/2017/02/tiny-fibers-open-new-windows-brain>

11. **Seongjun Park, Yuanyuan Guo, Xiaoting Jia, Han Kyoung Choe, Benjamin Grena, Jeewoo Kang, Jiyeon Park, Chi Lu, Andres Canales, Ritchie Chen, Yeong Shin Yim, Gloria B Choi, Yoel Fink & Polina Anikeeva. One-step optogenetics with multifunctional flexible polymer fibers.** Source: Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA; Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA; Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA; Department of Biomedical Engineering, Tohoku University, Sendai, Miyagi, Japan; Department of Electrical and Computer Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, USA; McGovern Institute for Brain Research and Department of Brain and Cognitive Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA; Department of Chemical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA; Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA. *Nature Neuroscience*, volume 20, pages 612–619 (2017), February 20th, 2017.

<https://www.nature.com/articles/nn.4510>

12. **Jacob Aron. Laser made from human blood could help hunt down tumours.**

Source: University of Michigan. *New Scientist*, September 1st, 2016.

<https://www.newscientist.com/article/2104097-laser-made-from-human-blood-could-help-hunt-down-tumours/>

13. **Louise Lerner. Researchers invent tiny, light-powered wires to modulate brain's electrical signals.** Source: University of Chicago. February 20, 2018.

<https://phys.org/news/2018-02-tiny-light-powered-wires-modulate-brain.html>

14. **Ramya Parameswaran, João L. Carvalho-de-Souza, Yuanwen Jiang, Michael J. Burke, John F. Zimmerman, Kelliann Koehler, Andrew W. Phillips, Jaeseok Yi, Erin J. Adams, Francisco Bezanilla & Bozhi Tian. Photoelectrochemical modulation of neuronal activity with free-standing coaxial silicon nanowires.**

Source: Medical Scientist Training Program, University of Chicago, Chicago, IL, USA; The Graduate Program in Biophysical Sciences, University of Chicago, Chicago, IL, USA; Department of Biochemistry and Molecular Biology, University of Chicago, Chicago, IL, USA; Department of Chemistry, University of Chicago, Chicago, IL, USA; John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences, Harvard University, Cambridge, MA, USA; The James Franck Institute, University of Chicago, Chicago, IL, USA; The Institute for Biophysical Dynamics, University of Chicago, Chicago, IL, USA. Nature Nanotechnology, volume 13, pages 260–266 (2018). DOI: 10.1038/s41565-017-0041-7. February 19th, 2018.

https://www.nature.com/articles/s41565-017-0041-7?error=cookies_not_supported&code=11273e65-c687-4d2a-b320-295b22edf2cf

15. **Angel Fernandez-Bravo, Kaiyuan Yao, Edward S. Barnard, Nicholas J. Borys, Elizabeth S. Levy, Bining Tian, Cheryl A. Tajon, Luca Moretti, M. Virginia Altoe, Shaul Aloni, Kenes Beketayev, Francesco Scotognella, Bruce E. Cohen, Emory M. Chan & P. James Schuck. Continuous-wave upconverting nanoparticle microlasers.** Source:

The Molecular Foundry, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA; Department of Mechanical Engineering, UC Berkeley, Berkeley, CA, USA; Department of Physics, Politecnico di Milano, Milan, Italy; Computer Science Laboratory, National Laboratory Astana, Astana, Kazakhstan; Center for Nano Science and Technology@PoliMi, Istituto Italiano di Tecnologia, Milan, Italy; Department of Mechanical Engineering, Columbia University, New York, NY, USA. Nature Nanotechnology, volume 13, pages 572–577. (2018). DOI

<https://doi.org/10.1038/s41565-018-0161-8>

. June 18th, 2018.

<https://www.nature.com/articles/s41565-018-0161-8>

16. **Tom Bawden. A new technology that could transform the way cancer and brain operations are done.**

Source: University College (London). News The Essential Daily Briefing, June 7th, 2018.

<https://inews.co.uk/news/health/revealed-a-new-technology-that-could-transform-the-way-cancer-and-brain-operations-are-done-2/>

17. **Aleksey A. Nikitin, Igor V. Shchetinin, Natalya Yu. Tabachkova, Mikhail A. Soldatov, Alexander V. Soldatov, Natalya V. Sviridenkova, Elena K. Beloglazkina, Alexander G. Savchenko, Natalya D. Fedorova, Maxim A. Abakumov, and Alexander G. Majouga. Synthesis of Iron Oxide Nanoclusters by Thermal Decomposition.**

Source: National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; Department of Chemistry, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation;

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation; The Russian National Research Medical University, Moscow, Russian Federation; Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation. *Langmuir*, 2018, 34 (15), pp 4640–4650. DOI: 10.1021/acs.langmuir.8b00753. March 22th, 2018.

<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.langmuir.8b00753>

18. **Research may extend Moore's law, enable silicon-based quantum computing.**

Source: Centre of Excellence for Quantum Computation and Communication Technology at the University of New South Wales, Melbourne University, and Purdue University. Kurzweil accelerating intelligence, January 6th, 2012.

<http://www.kurzweilai.net/research-may-extend-moores-law-enable-silicon-based-quantum-computing>

19. **David K. Ferry. Ohm's Law in a Quantum World.** Source: School of Electrical, Computer, and Energy Engineering, Arizona State University, Tempe, USA. *Science*, January 6th, 2012: Vol. 335, Issue 6064, pp. 45-46. DOI: 10.1126/science.1215900. January 6th, 2012.

<http://science.sciencemag.org/content/335/6064/45.summary>

1. **B. Weber, S. Mahapatra, H. Ryu, S. Lee, A. Fuhrer, T. C. G. Reusch, D. L. Thompson, W. C. T. Lee, G. Klimeck, L. C. L. Hollenberg, M. Y. Simmons** . **Ohm's Law Survives to the Atomic Scale.**

Source: Centre for Quantum Computation and Communication Technology, School of Physics, University of New South Wales, Sydney, Australia; Network for Computational Nanotechnology, Birck Nanotechnology Center, Purdue University, West Lafayette, USA; Centre for Quantum Computation and Communication Technology, School of Physics, University of Melbourne, Parkville, Australia. *Science*, January 6th, 2012: Vol. 335, Issue 6064, pp. 64-67. DOI: 10.1126/science.1214319. January 6th, 2012.

<http://science.sciencemag.org/content/335/6064/64>

2. **Robert Sanders. Sprinkling of neural dust opens door to electroceuticals.** Source: University of California, Berkeley (USA). Berkeley News, August 3th, 2016.

<http://news.berkeley.edu/2016/08/03/sprinkling-of-neural-dust-opens-door-to-electroceuticals/>

3. **Jennifer De La Osa. Engineers Design Most Efficient Wireless Nerve Stimulator.** Source: University of California, Berkeley (USA). ECN Magazine, November, 4th, 2018.

<https://www.ecnmag.com/blog/2018/04/engineers-design-most-efficient-wireless-nerve-stimulat>

[or](#)

1. **Seo D., Neely R.M., Shen K., Singhal U., Alon E., Rabaey J.M., Carmena J.M., Maharbiz M.M** . **Wireless Recording in the Peripheral Nervous System with Ultrasonic Neural Dust** . Source: Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California, Berkeley, USA; Helen Wills Neuroscience Institute, University of California, Berkeley, USA; UCB/UCSF Joint Graduate Program in Bioengineering, University of California, Berkeley, USA. Neuron, August 3th, 2016. 91(3):529-39. DOI: 10.1016/j.neuron.2016.06.034.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27497221>
2. **Nicole Arce**. **World's Tiniest Computer Is Much Smaller Than A Grain Of Rice**. Source: Dr. David Blaauw, the University of Michigan (USA). Tech Times, June 25th, 2018.
<https://www.techtimes.com/articles/231030/20180625/worlds-smallest-computer-is-just-larger-than-a-grain-of-rice.htm>
3. **Timothy J. Seppala**. **Researchers push Moore's Law with a 1-nanometer transistor gate**. Source: University of California, Berkeley. EnGadget, July 7th, 2016.
<https://www.engadget.com/2016/10/07/researchers-push-moores-law-with-a-1-nanometer-transistor-gate/?guccounter=1>
4. **Sujay B. Desai, Surabhi R. Madhvapathy, Angada B. Sachid, Juan Pablo Llinas, Qingxiao Wang, Geun Ho Ahn, Gregory Pitner, Moon J. Kim, Jeffrey Bokor, Chenming Hu, H.-S. Philip Wong, Ali Javey** . **ArticleMoS2 transistors with 1-nanometer gate lengths** . Source: Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California, Berkeley, USA; Materials Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA; Berkeley Sensor and Actuator Center, University of California, Berkeley, USA; Department of Materials Science and Engineering, University of Texas at Dallas, Richardson, USA; Electrical Engineering, Stanford University, Stanford, USA. Science, October 7th, 2016: Vol. 354, Issue 6308, pp. 99-102. DOI: 10.1126/science.aah4698
<http://science.sciencemag.org/content/354/6308/99>
5. **Griffith University**. **Scientists unveil high-sensitivity 3-D technique using single-atom measurements** . Source: Dr. Erik Streed, of the Griffith University Centre for Quantum Dynamics, Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO). Phys.org, March 23th, 2018.
<https://phys.org/news/2018-03-scientists-unveil-high-sensitivity-d-technique.html>

1. **Valdis Blūms, Marcin Piotrowski, Mahmood I. Hussain, Benjamin G. Norton, Steven C. Connell, Stephen Gensemer, Mirko Lobino and Erik W. Streed. A single-atom 3D sub-atto-Newton force sensor**

. Source: Centre for Quantum Dynamics, Griffith University, Brisbane, Queensland, Australia; Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation Manufacturing, Pullenvale, Queensland, Australia; Queensland Micro and Nanotechnology Centre, Griffith University, Brisbane, Queensland, Australia; Institute for Glycomics, Griffith University, Gold Coast, Queensland, Australia. Science Advances, March, 23th, 2018: Vol. 4, no. 3, eaao4453 DOI: 10.1126/sciadv.aao4453.

<http://advances.sciencemag.org/content/4/3/eaao4453>

2. **Samuel K. Moore. MIT Makes Smallest Gallium Arsenide Transistor.** Source: MIT. IEEE Spectrum, Tech-talk / Semiconductors / Devices, December 12th, 2012.

<https://spectrum.ieee.org/tech-talk/semiconductors/devices/mit-makes-smallest-gallium-arsenide-transistor>

3. **Helen Knight. Tiny compound semiconductor transistor could challenge silicon's dominance**

. Source: Massachusetts Institute of Technology (MIT), USA. MIT News, December 10, 2012.

<http://news.mit.edu/2012/tiny-compound-semiconductor-transistor-could-challenge-silicons-dominance-1210>

4. **Clay Dillow. Researchers Assemble Teeny Working Transistor From Seven Atoms.**

Source: Nature Nanotechnology, by a team from the University of New South Wales University of New South Wales (UNSW) Centre for Quantum Computer Technology (CQCT) and the University of Wisconsin-Madison. UNSW CQCT Popular Science, May 25th, 2010.

<https://www.popsci.com/technology/article/2010-05/researchers-assemble-working-transistor-seven-individual-atoms>

5. **Dexter Johnson. For the First Time, Signal Transfer Between Molecules Has Been Achieved.**

Source: Nanchang University in China. September 22th, 2017.

<https://spectrum.ieee.org/nanoclast/semiconductors/devices/for-first-time-signal-transfers-between-molecules-have-been-achieved>

1. **Chao Li, Zhongping Wang, Yan Lu, Xiaoqing Liu & Li Wang. Conformation-based signal transfer and processing at the single-molecule level.**

Source: Department of Physics, Nanchang University, Nanchang, China. Nature Nanotechnology, volume 12, pages 1071–1076 (2017). DOI:

<https://doi.org/10.1038/nnano.2017.179>

September 18th, 2017.

<https://www.nature.com/articles/nnano.2017.179>

1. **John Timmer. Researchers craft molecule that works as flash storage.** Source: University of Glasgow (UK); Universitat Rovira i Virgili (Spain). ArsTechnica, November 21th, 2014.

<https://arstechnica.com/science/2014/11/researchers-craft-molecule-that-works-as-flash-storage/>

1. **Christoph Busche, Laia Vilà-Nadal, Jun Yan, Haralampos N. Miras, De-Liang Long, Vihar P. Georgiev, Asen Asenov, Rasmus H. Pedersen, Nikolaj Gadegaard, Muhammad M. Mirza, Douglas J. Paul, Josep M. Pobleat & Leroy Cronin.** Design and fabrication of memory devices based on nanoscale polyoxometalate clusters.

Source: WestCHEM, School of Chemistry, The University of Glasgow, Glasgow UK; School of Engineering, The University of Glasgow, Glasgow, UK; Departament de Química Física i Inorgànica, Universitat Rovira i Virgili, Marcellí Domingo street, Tarragona, Spain. Nature, volume 515, pages 545–549 (November 27th, 2014). DOI:

<https://doi.org/10.1038/nature13951>

. November 19th, 2014.

<https://www.nature.com/articles/nature13951>

2. **Glenn Mc. Donald.** 'Wi-Fi' Nanoparticles Send Signals from the Brain. Source: Florida International University, Miami (USA). Seeker, Septemner 6th,2015.

<https://www.seeker.com/wi-fi-nanoparticles-send-signals-from-the-brain-1769933412.html>

3. **Rakesh Guduru, Ping Liang, J Hong, Alexandra Rodzinski, Ali Hadjikhani, Jeffrey Horstmyer, Ernest Levister & Sakhrat Khizroev.** Magnetolectric 'spin' on stimulating the brain . Source: Florida International University, Miami (USA). Future Medicine,

Nanomedicine, Vol. 10, No. 13, May 8th, 2015. DOI:

<https://doi.org/10.2217/nm.15.52>

[15.52](https://doi.org/10.2217/nm.15.52)

[dicine.com/doi/10.2217/nm.15.52](https://doi.org/10.2217/nm.15.52)

[https://www.futureme](https://www.futuremedicine.com/doi/10.2217/nm.15.52)

4. **Matvey V. Roshchin, E. Matlashov, Victor N. Ierusalimsky, Pavel M. Balaban, Vsevolod V. Belousov, György Kemenes, Kevin Staras, Evgeny S. Nikitin.** A BK channel–mediated feedback pathway links single-synapse activity with action potential sharpening in repetitive firing.

Source: Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Moscow, Russia;

Shemyakin-Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry, Russian Academy of Sciences,

Moscow, Russia; Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia; Institute for Cardiovascular Physiology, Georg August University Göttingen, D-37075 Göttingen, Germany; Sussex Neuroscience, School of Life Sciences, University of Sussex, Brighton BN1 9QG, UK. *Science Advances*, 04 Jul 2018: Vol. 4, no. 7, eaat1357 DOI: 10.1126/sciadv.aat1357.

<http://advances.sciencemag.org/content/4/7/eaat1357>

5. ***Sami El-Boustani¹, Jacque P. K., Vincent Breton-Provencher, Graham W. Knott, Hiroyuki Okuno, Haruhiko Bito, Mriganka Sur.*** **Locally coordinated synaptic plasticity of visual cortex neurons in vivo.**

Source: Department of Brain and Cognitive Sciences, Picower Institute for Learning and Memory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA; Bio Electron Microscopy Laboratory, School of Life Sciences, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland; Medical Innovation Center, Kyoto University Graduate School of Medicine, Sakyo-ku, Kyoto, Japan; Department of Neurochemistry, Graduate School of Medicine, The University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan. *Science*, 22 Jun 2018: Vol. 360, Issue 6395, pp. 1349-1354. DOI: 10.1126/science.aao0862.

<http://science.sciencemag.org/content/360/6395/1349>

6. ***Clementine M. Boutry, Yukitoshi Kaizawa, Bob C. Schroeder, Alex Chortos, Anaïs Legrand, Zhen Wang, James Chang, Paige Fox & Zhenan Bao.*** **A stretchable and biodegradable strain and pressure sensor for orthopaedic application.**

Source: Department of Chemical Engineering, Stanford University, Stanford, CA, USA; Division of Plastic & Reconstructive Surgery, Stanford University Medical Center, Veterans Affairs Palo Alto, Palo Alto, CA, USA; Department of Chemistry, University College London, London, UK. *Nature Electronics*, volume 1, pages 314–321 (2018).

<https://www.nature.com/articles/s41928-018-0071-7>

7. ***Peter Clarke.*** **Researchers Develop Dissolvable Memristor.** Source: two Chinese universities, the Cavendish Laboratory at Cambridge University and the University of Bolton in the UK. *EETimes*, London, May, 2nd, 2016.

[https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1329584&":](https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1329584&)

8. ***Xingli He, Jian Zhang, Wenbo Wang, Weipeng Xuan, Xiaozhi Wang, Qilong Zhang, Charles G. Smith, and Jikui Luo*** **. Transient Resistive Switching Devices Made from Egg Albumen Dielectrics and Dissolvable Electrodes**

. Source: College of Information Science and Electronic Engineering and Department of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, China; College of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, China; Cavendish Laboratory, University of Cambridge, JJ Thomson Avenue, Cambridge, United Kingdom; Institute of Material Research & Innovation, University of Bolton, Deane Road, Bolton, United Kingdom. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016, 8 (17), pp 10954–10960. DOI: 10.1021/acsami.5b10414. April 7th, 2016.

<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsami.5b10414>

1. **Dexter Johnson. Combining Nanowires and Memristors Could Lead to Brain-like Computing.** Source: Centre for Research on Adaptive Nanostructures and Nanodevices (CRANN) at Trinity College in Dublin. IEEE Spectrum, Nanoclast / Semiconductors / Nanotechnology, April 4th, 2013.

<https://spectrum.ieee.org/nanoclast/semiconductors/nanotechnology/combining-nanowires-and-memristors-could-lead-to-brainlike-computing>

1. **Dexter Johnson. New Memristors Could Usher in Bionic Brains.** Source: the Royal Melbourne Institute of Technology (RMIT) in Australia. IEEE Spectrum, Nanoclast / Semiconductors / Memory, May 14th, 2015.

2. **Hussein Nili, Sumeet Walia, Ahmad Esmailzadeh Kandjani, Rajesh Ramanathan, Philipp Gutruf, Taimur Ahmed, Sivacarendran Balendhran, Vipul Bansal, Dmitri B. Strukov, Omid Kavehei, Madhu Bhaskaran, Sharath Sriram. Donor Induced Performance Tuning of Amorphous SrTiO**

³
Memristive Nanodevices: Multistate Resistive Switching and Mechanical Tunability. Source: Royal Melbourne Institute of Technology (RMIT) in Australia. Advanced Functional Materials, April 14th, 2015.

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adfm.201501019>

3. **Andrew Silver. New Memristor Circuit Mimics Synapses in the Brain.** Source: University of Massachusetts. IEEE Spectrum, September 29th, 2016.
<https://spectrum.ieee.org/the-human-os/semiconductors/memory/mimicking-the-synapses-of-the-brain>

4. **Zhongrui Wang, Saumil Joshi, Sergey E. Savel'ev, Hao Jiang, Rivu Midya, Peng Lin, Miao Hu, Ning Ge, John Paul Strachan, Zhiyong Li, Qing Wu, Mark Barnell, Geng-Lin Li, Huolin L. Xin, R. Stanley Williams, Qiangfei Xia & J. Joshua Yang. Memristors with diffusive dynamics as synaptic emulators for neuromorphic computing.** Source: Department of Electrical and Computer Engineering, University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts, USA; Department of Physics, Loughborough University, Loughborough LE11 3TU, UK; Hewlett Packard Labs, Palo Alto, California, USA; Air Force Research Lab, Information Directorate, Rome, New York, USA; Biology Department, University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts, USA; Center for Functional Nanomaterials, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, USA. Nature Materials, volume 16, pages 101–108 (2017). DOI

<https://doi.org/10.1038/nmat4756>

September 26th, 2016.

<https://www.nature.com/articles/nmat4756>

5. **Brian Wang. Memristor memory with 128 states created for next generation computer memory and brainlike chips.**

Source: University of Southampton.
January 25, 2018.

Source: University of
Next Big Future,

<https://www.nextbigfuture.com/2018/01/memristor-memory-with-128-states-created-for-next-generation-computer-memory-and-brainlike-chips.html>

6. **Scientists develop new technology standard that could shape the future of electronics design.**

News by University of Southampton, 25 January 2018. <https://www.southampton.ac.uk/news/2018/01/memristors-breakthrough.page>

7. **Spyros Stathopoulos, Ali Khat, Maria Trapatseli, Simone Cortese, Alexantrou Serb, Iliia Valov & Themis Prodromakis. Multibit memory operation of metal-oxide bi-layer memristors.**

Source: Department of Electronics and Computer Science, Faculty of Physical Science and Engineering, University of Southampton, University Road, SO17 1BJ, Southampton, United Kingdom; Forschungszentrum Jülich, Wilhelm-Johnen-Straße, 52428, Jülich, Germany. Scientific Reports, volume 7, Article number: 17532 (2017), December 13th, 2017.

<https://www.nature.com/articles/s41598-017-17785-1>

8. **'Memtransistor' brings world closer to brain-like computing.** Source: Northwestern University. Phis.org, Nanotechnology / Nanophysics, February 21, 2018.

<https://phys.org/news/2018-02-memtransistor-world-closer-brain-like.html>

9. **Vinod K. Sangwan, Hong-Sub Lee, Hadallia Bergeron, Itamar Balla, Megan E. Beck, Kan-Sheng Chen & Mark C. Hersam. Multi-terminal memtransistors from polycrystalline monolayer molybdenum disulfide.**

Source: Department of Materials Science and Engineering, Northwestern University, Evanston, Illinois, USA; Department of Chemistry, Northwestern University, Evanston, Illinois, USA; Department of Electrical Engineering and Computer Science, Northwestern University, Evanston, Illinois, USA. Nature, volume 554, pages 500–504 (22 February 2018).

10. **Neuro Chip Records Brain Cell Activity.** Source: University of Calgary. Medical Press, October 20th, 2016.

<https://medicalxpress.com/news/2016-10-neuro-chip-brain-cell.html>

11. **Pierre Wijdenes, Hasan Ali, Ryden Armstrong, Wali Zaidi, Colin Dalton & Naweed I. Syed. A novel bio-mimicking, planar nano-edge microelectrode enables enhanced long-term neural recording.**

Source: Biomedical Engineering Graduate Program, University of Calgary, Calgary, Canada; Department of Electrical and Computer Engineering, University of Calgary, Calgary, Canada; Hotchkiss Brain Institute, University of Calgary, Calgary, Canada; Alberta Children's Hospital Research Institute, University of Calgary, Calgary,

Canada. Nature, Scientific Reports, volume 6, Article number: 34553 (2016). October 12th, 2016. DOI <https://doi.org/10.1038/srep34553> <https://www.nature.com/articles/srep34553>

12. **Tanya Lewis, Staff Writer. Eternal Sunshine of the Bionic Mind: Prosthesis Could Restore Memory.** Source: Theodore Berger, University of Southern California. Live Science, June 20th, 2013. <https://www.livescience.com/37582-prosthetic-device-could-restore-memory.html>

13. **Eliza Strickland. New Startup Aims to Commercialize a Brain Prosthetic to Improve Memory.** Source: Theodore Berger, Center for Neural Engineering at the University of Southern California, Bryan Johnson, Kernel. IEEE Spectrum, Aug 16th, 2016. <https://spectrum.ieee.org/the-human-os/biomedical/bionics/new-startup-aims-to-commercialize-a-brain-prosthetic-to-improve-memory>

14. **Alexandra Ossola. Artificial Neurons Could Replace Some Real Ones In Your Brain.** Popular Science, June 29th, 2015. <https://www.popsci.com/these-artificial-neurons-work-organic-ones>

15. **B.Daniel, T.Simon, Karin C.Larsson, David Nilsson, Gustav Burström, Dagmar Galter, Magnus Berggren, Agneta Richter-Dahlfors.** **An organic electronic biomimetic neuron enables auto-regulated neuromodulation.** Source: Swedish Medical Nanoscience Center, Karolinska Institutet, Stockholm, Sweden; Department of Neuroscience, Karolinska Institutet, Stockholm, Sweden; Laboratory of Organic Electronics, Department of Science and Technology, ITN, Linköping University, Norrköping, Sweden; Acreo Swedish ICT AB, Norrköping, Sweden. Biosensors and Bioelectronics, Volume 71, Pages 359-364, September 15th, 2015.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2015.04.058>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956566315300610>

1. **Artificial synapse rivals biological ones in energy consumption.** Source: Pohang University of Science & Technology (POSTECH). Science Advances, June 20th, 2016.

<https://www.sciencedaily.com/releases/2016/06/160620100319.htm>

1. **W. Xu, S.-Y. Min, H. Hwang, T.-W. Lee. Organic core-sheath nanowire artificial synapses with femtojoule energy consumption**

. Source: Dept. of Materials Science and Engineering at Pohang University of Science & Technology (POSTECH). Science Advances, 2016; 2 (6): e1501326 DOI:

10.1126/sciadv.1501326

<http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.1501326>



UNIVERSITY FOR NATIONAL AND WORLD ECONOMY
DEPARTMENT OF MANAGEMENT
BULGARIA ACADEMIC SIMULATION AND GAMING ASSOCIATION
FRIDAY NIGHT SEMINAR CLUB



CERTIFICATE OF PARTICIPATION

This certificate proves that within the sessions of the INTERNATIONAL & INTERDISCIPLINARY SCIENTIFIC CONFERENCE "VANGUARD SCIENTIFIC INSTRUMENTS IN MANAGEMENT" 2018 (VSIIM-18), held from 11 September 2018 – 16 September 2018 in Ravda, Bulgaria, the paper "СЕТТЛЕРЕТИКА - 2018: НАНОНЕЙРОТЕХНОЛОГИИ (Обзор публикации новостей науки и высоких технологий за период 2010 - 2018 г. г.)" delivered by Коримарук Хи Илларионович, was presented. The paper will be proposed to Editorial board for possible publication in the e-journal "VANGUARD SCIENTIFIC INSTRUMENTS IN MANAGEMENT" (ISSN 1314-0582).

Angel Manchev, Prof., Ph. D., Eng.
Organizational committee chair
Editorial board chair