

IT-байки: Электроника будущего - бумажная, органическая, фотонная?

Автор: [Владимир Романченко](#)

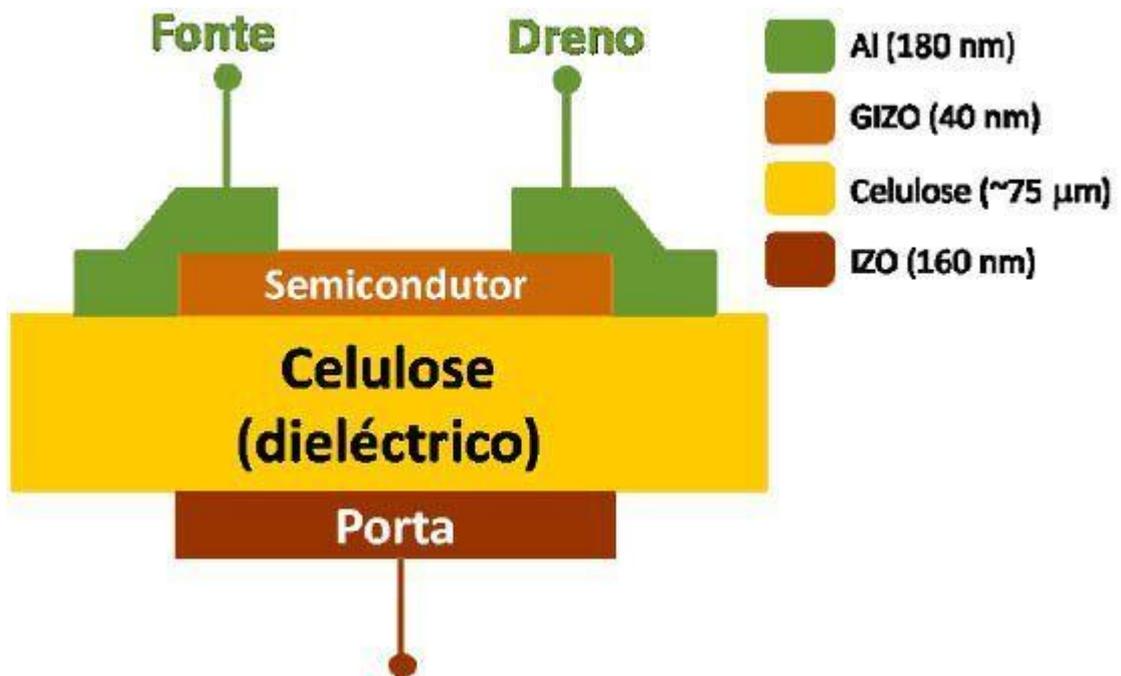
Дата: 30/11/2008

Размышляли ли вы о том, какими станут компьютеры через десяток-другой лет? В погоне за ростом производительности наших вычислительных систем, миниатюризацией и снижением энергопотребления, мы представляем себе самые диковинные гаджеты Будущего – встроенные в куртку, очки, часы, домашнего робота-андроида, любимое кресло или автомобиль.

Гораздо реже мы задумываемся о начинке грядущей электроники. Микроэлектроника превращается в наноэлектронику, и славно, кремний по-прежнему остаётся основой любого электронного чипа.

Однако на деле может оказаться, что Компьютер Будущего будет состоять совсем не из кремниевых полупроводников. А, например, из... бумажных. Или из фотонных. Или вообще из гибкой полужидкой органики. Малореальная экзотика? Да как сказать. Несколько примеров последних научных разработок, которые собраны в сегодняшней публикации, призваны продемонстрировать тот факт, что в нашем сегодняшнем мире любая экзотика и фантастика совсем неожиданно может оказаться реальностью уже завтра. Как говорится в одной старинной программе, откиньтесь на спинку кресла.

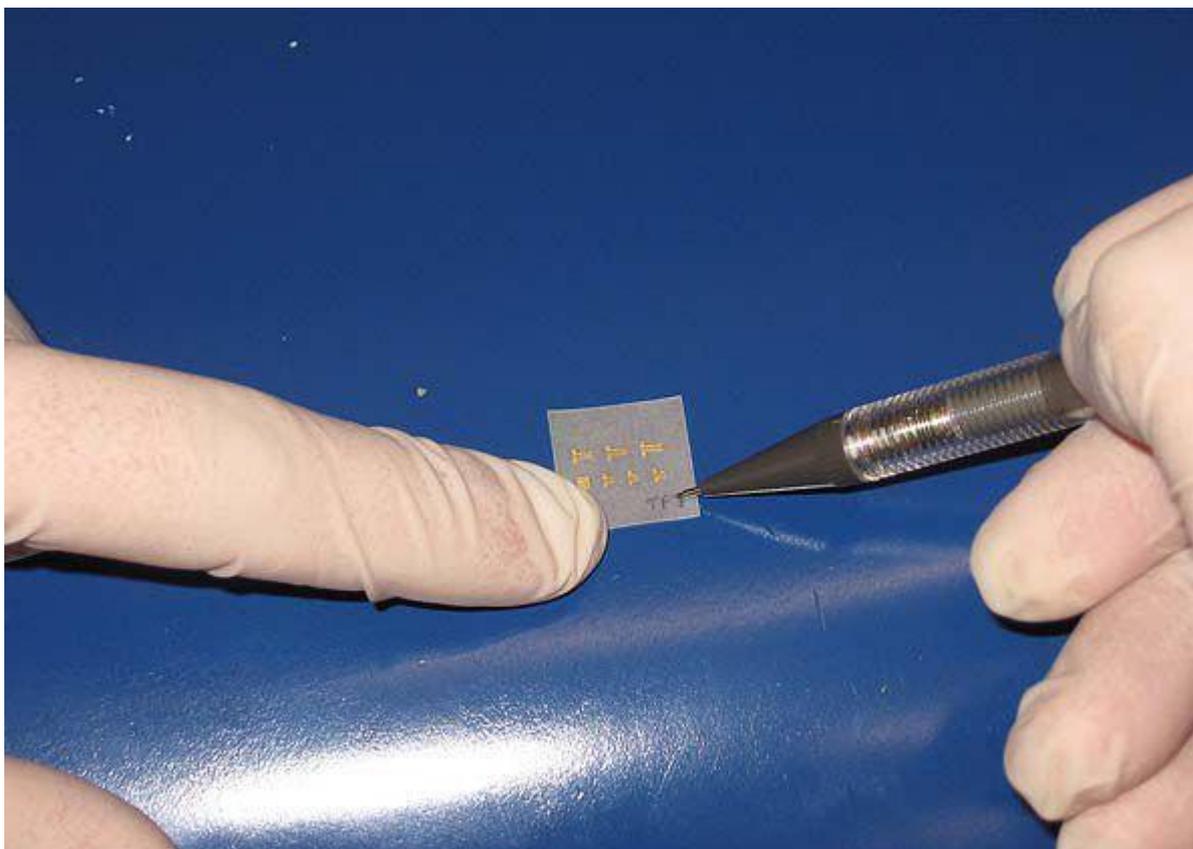
Мы уже давно перестали удивляться применению самой разнообразной органики в составе полупроводниковых устройств. Взять те же дисплеи и телевизоры на базе органических светоизлучающих диодов (OLED, Organic light-emitting Diode). Но удивительная вещь даже по нашим диковинным временам - это память из... бумаги. С точки зрения практичности бумага очень интересна в качестве носителя для производства полупроводниковой памяти хотя бы тем, что производится без особых специфических требований при комнатной температуре, она лёгкая и недорогая. Именно из бумаги предложили делать чипы учёные из Нового Лиссабонского университета (CEMOP UNINOVA, the New University of Lisbon), Технологического ядерного института (The Technology & Nuclear Institute), Университета Авьеро (University of Aveiro) и Университета Альгарве (The University of Algarve). Изложение практической реализации этой идеи описано в статье **Write-erase and read paper memory transistor**, опубликованной в одном из последних выпусков журнала Applied Physics Letters.



Бумага, используемая для создания "бумажной памяти", представляет собой волокна древесины сосны и полиэстера, смешанные вместе и закреплённые ионообменным композитом. Далее с помощью магнетронного распыления на полученный носитель с двух сторон наносится окись цинка с примесью галлия и индия. В результате получается тонкоплёночный полупроводниковый транзистор, где бумага играет роль подложки и одновременно слоя "бумажного" диэлектрика. Пороговое напряжение такого ZnO-TFT полевого транзистора составляет порядка 19В, а дрейфовая подвижность достаточно высока – до 28 см²/В*с (см²/Vs, сантиметров в квадрате на вольт-секунду), при этом размах напряжения управления затвором составляет 1,39В на декаду и соответствующее коэффициент переключения - 3x10⁵.

Интересно также заметить, что светопропускание такого материала (включая свойства подложки) составляет порядка 80% в видимой части спектра. Иными словами, полупроводниковая бумага ещё и практически прозрачна.

Вот такое замечательное оптоэлектронное устройство на базе полупроводникового нанокompозита - с достаточно низкой ценой, высокой подвижностью поля, и главное, работоспособное при комнатной температуре, вполне может стать основой для создания следующего поколения гибкой, и, при желании, почти невидимой электроники. Итогом проекта может стать получение патента на базовые модули схемотехники – логические инвертирующие элементы, генераторы, универсальные логические вентили (NAND и NOR), которые лягут в основу электроники будущего - органической электроники, где ключевые элементы транзисторов – сток, исток, затвор, диэлектрик, канал, выполнены на базе органики.



Однако и это ещё не всё. Учёные подчёркивают, что уникальным замечательным свойством разработанной ими полупроводниковой бумаги является способность хранить информацию "послойно". Скажем, для записи первого слоя данных на бумагу подаётся пять вольт, для стирания этого слоя – минус пять вольт, для записи следующего слоя – десять вольт. Что интересно, в следующий раз при подаче минус пяти вольт для стирания первого слоя второй слой информации затронут не будет.

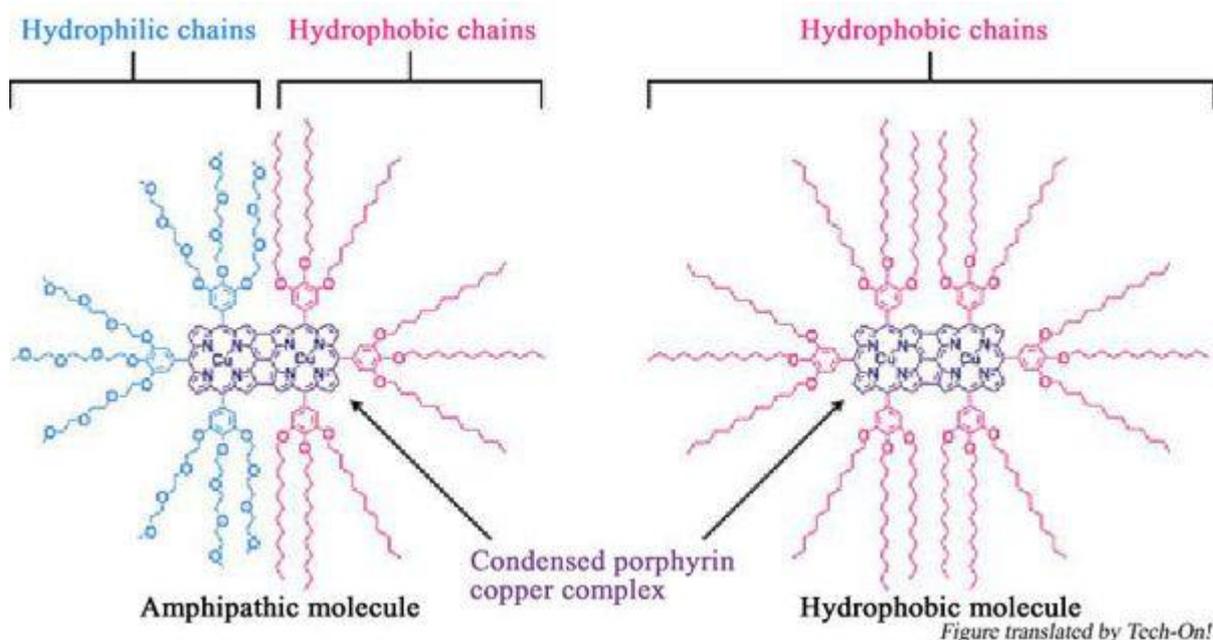
Интригующая технология, не правда ли? "Нафаршировать" лист бумаги привычного формата А4 полупроводниками, записывать на него гигабайты данных, а будет мало – взять следующий листочек, и так – стопочкой до петабайтов. Можно пойти дальше и объединить "бумажную память" с "электронными чернилами – вот вам недорогие гибкие электронные книги с сенсорным экраном, где текст сопровождается множеством статических и динамических картинок. Да мало ли что можно придумать с таким интересным носителем информации, особенно с учётом того что он практически прозрачен...

Что ж, самое время разбавить дифирамбы ложкой дёгтя. В данном случае таких ложек будет несколько, и все они – от несовершенства нынешнего уровня технологии. Увы, пока что современным бумажным транзисторам ещё далеко до миниатюризации. Помимо этого, на данный момент максимальное время хранения информации на электронной бумаге составляет всего лишь немногим более полутора лет. По мнению изобретателей, для доведения технологии до коммерческого внедрения понадобится ещё примерно пять-шесть лет. Однако уже сейчас совершенно уверены в успехе: "У нас есть бумажный транзистор; мы смогли сделать из него память. У нас есть всё необходимое для достижения успеха".

Кстати отметить, создание действительно производительной электроники с использованием органических полупроводников – дело достаточно непростое, над этим бьются многие лаборатории и научные коллективы мира. Основная проблема заключается в том, что органические полупроводники, обладающие при комнатной температуре жидкокристаллическим состоянием, хоть и способны формировать достаточно большие по площади тонкоплёночные структуры, но при этом их возможность переноса электронного заряда значительно ниже нежели у кристаллических материалов. Иными словами, проводимость классических органических полупроводников недостаточно хороша по причине произвольного ненаправленного перемещения электронов.

Совсем недавно прорыв на этом фронте обеспечили японские учёные из Токийского университета Рикен (Riken, the University of Tokyo) и Японского института исследований синхротронного излучения (Japan Synchrotron Radiation Research Institute, JASRI). Японским исследователям удалось разработать органический жидкокристаллический полупроводник с подвижностью носителей на уровне $0,27 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, что практически в десять раз превышает лучшие показатели "классических" органических полупроводников.

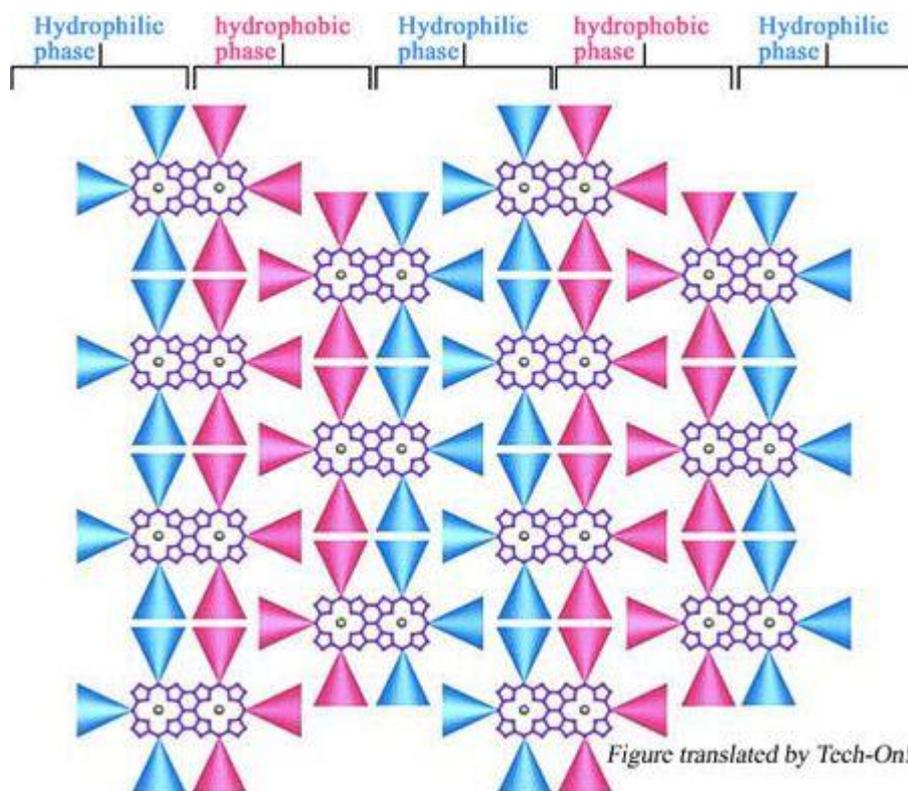
Для этого учёные избрали в качестве молекулярной основы специфическое комплексное соединение "конденсированный медь-порфири́н" (condensed porphyrin copper complex), сформированное из хлорофиллоподобных структур. Связи в этих молекулах, ответственные за перенос электронов, гораздо сильнее, нежели у большинства известных органических полупроводников. С помощью технологии комбинирования молекулы вещества были объединены с гидрофильными цепями с одной стороны и гидрофобными с другой стороны. Нагрев получившегося соединения до 120°C и охлаждение до комнатной температуры в течение часа позволил молекулам самопроизвольно сформировать специфические структуры в виде колонн, и в результате получился материал в жидкокристаллическом состоянии при комнатной температуре.



Молекулярная структура амфипатического комплексного соединения "конденсированный медь-порфи́рин" (слева); он же после обработки (справа)

Анализ получившейся структуры с помощью высокоинтенсивной рентгеновской установки показал, что гидрофильные и гидрофобные цепи собрались вместе, чередуясь с разносом по фазе с интервалом в 3-4 нм. Главный же эффект заключается в том, что полученные в результате молекулы амфифильного (полужидкого, полутвёрдого) вещества

обладают более упорядоченной структурой нежели обычные органические полупроводники, что обеспечивает более высокую подвижность электронов непосредственно при комнатной температуре. Физическое тестирование полученного органического полупроводника дало достаточно стабильные результаты в диапазоне температур от -17°C to 99°C , и, что примечательно, наиболее высокая подвижность электронов была зарегистрирована при температуре $+16^{\circ}\text{C}$.



Двухмерная модель расположения амфипатических молекул

Что даёт эта технология на перспективу? Очень многое. Уже сейчас учёные говорят о том, что амфифильные свойства нового органического полупроводника в сочетании с высокой подвижностью носителей позволит создавать гибкие и лёгкие органические тонкоплёночные солнечные батареи, ЖК-дисплеи и другую органическую электронику с гораздо большей эффективностью и меньшей себестоимостью. Более того, за счёт способности нового органического полупроводника более эффективно поглощать свет видимого спектра, КПД солнечных батарей нового типа также ожидается чрезвычайно высоким.



Осталось всего-ничего, дождаться момента выхода технологии из стен лабораторий в производственные цеха. Впрочем, с этим японские учёные обещают не затягивать.

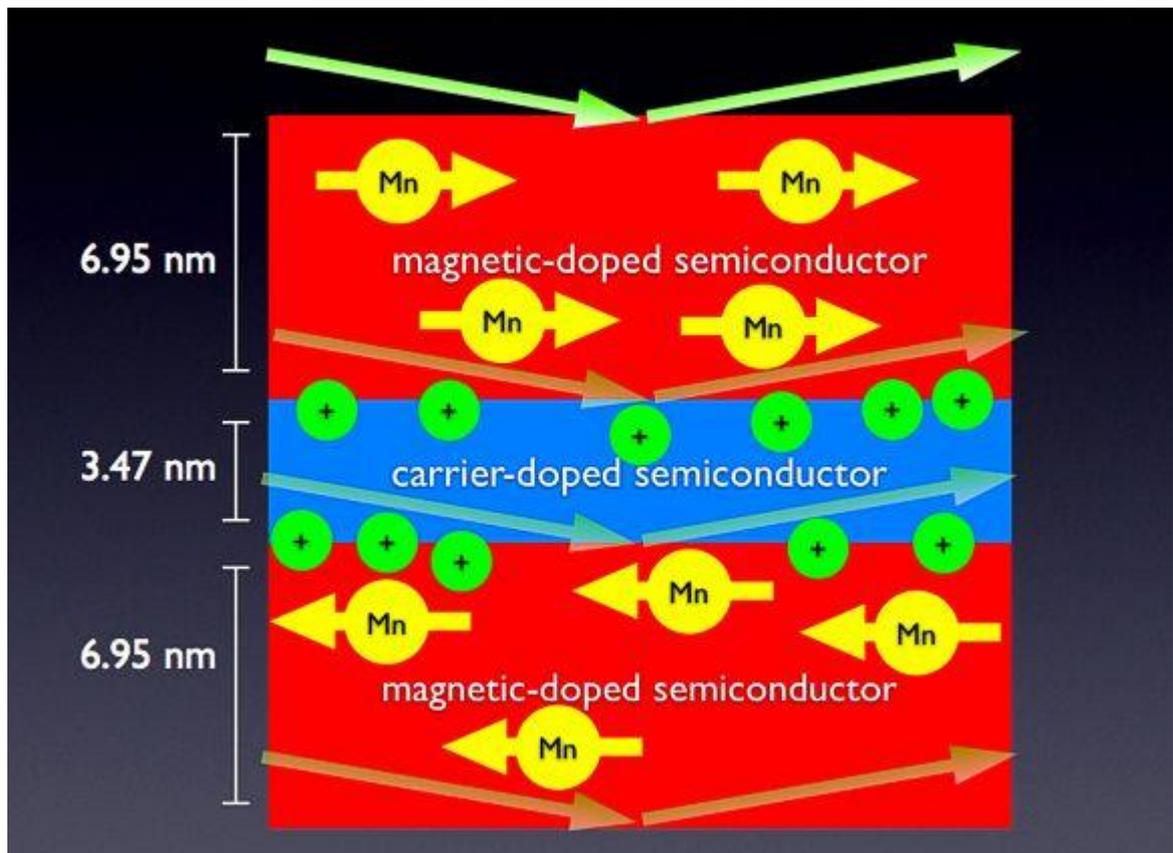
А вот ещё одна интересная идея – о полупроводниках-магнитах. Учёным из Центра нейтронных исследований (Center for Neutron Research) при Национальном институте стандартов и технологий США (National Institute of Standards and Technology, NIST) впервые на практике удалось подтвердить теорию магнетизма полупроводников. Значимость этого открытия для будущего такова, что когда открытие будет доведено до коммерциализации, однажды мы проснёмся в совершенно ином мире сверхминиатюрных и быстрых гаджетов. Магнитные полупроводники, будучи запущенными в массовое производство, потенциально могут вытеснить как современные накопители на жёстких дисках и флэш-памяти, так и современные вычислительные и логические чипы, став универсальным решением для хранения данных и одновременно с этим для проведения быстрых вычислений на базе встроенной магнитной логики, контролируемой электрическими полями.

И вот почему.

Все современные накопители данных, выпускаемые в настоящее время, используют магнитные свойства исключительно металлов. Все эти устройства приспособлены исключительно для хранения данных, при этом использование магнитных свойств не обходится без «посредника» между ним и полупроводниковой вычислительной схемой. Эту роль выполняют магнитные головки для записи и чтения, что значительным образом тормозит обработку данных и производительность всей системы в целом.

Практические исследования выше упомянутой группы учёных подтвердили труды физиков-теоретиков, предсказавших возможность наличия у тонкослойных магнитных полупроводников дополнительного свойства, известного в научной среде под названием "антиферромагнитное сцепление" (или "антиферромагнитное спаривание" - antiferromagnetic coupling, но в этом тексте пусть будет "сцепление"). Так называют явление, при котором тонкий слой магнитного материала спонтанно меняет ориентацию своего магнитного поля на противоположную относительно следующего параллельно расположенного магнитного слоя.

Кстати сказать, открытие антиферромагнитного сцепления в металлах стало основой Нобелевской премии по физике за 2007 год. И лишь совсем недавно удалось выяснить, что теоретические выкладки на эту тему совершенно справедливы и в отношении полупроводниковых материалов.



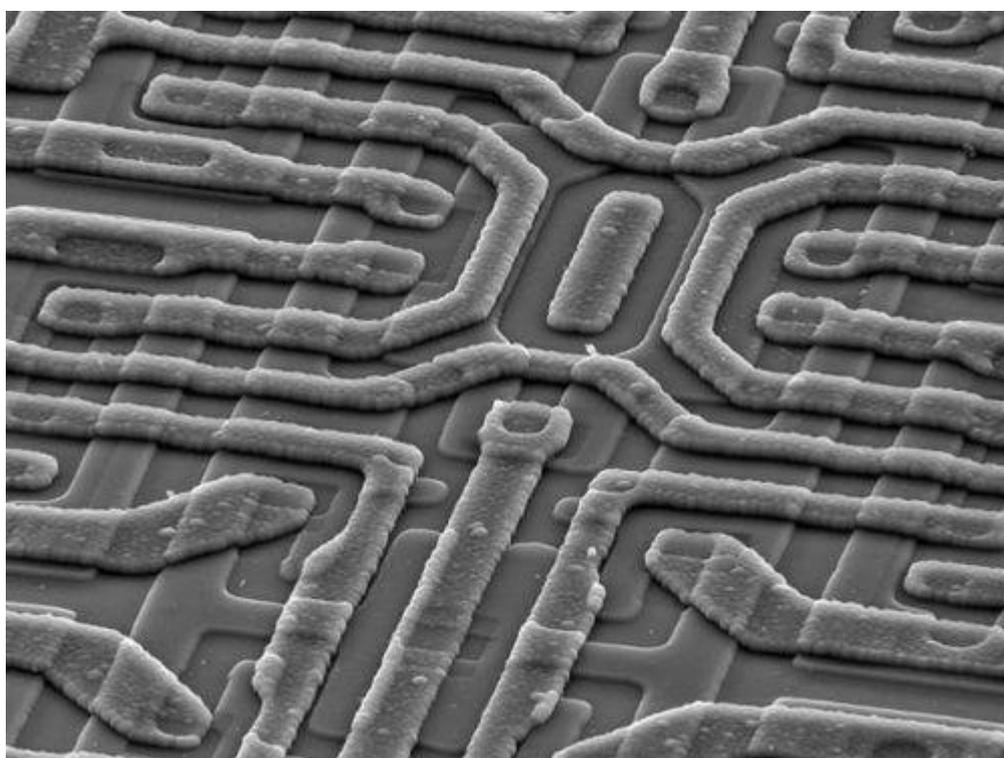
Для изучения свойств многослойного магнитного полупроводника учёные из NIST использовали технику так называемой поляризационной нейтронной рефлектометрии (polarized neutron reflectometry). Суть технологии сводится к облучению исследуемого материала пучком нейтронов и изучению отражённой информации. Благодаря свойству нейтронов легко проникать во все слои исследуемого материала, а также благодаря их магнитным свойствам, отражённые нейтроны дают возможность изучить магнитные свойства каждого слоя исследуемого материала. В условиях низких температур и слабых магнитных полей количество поляризованных нейтронов однозначно подтверждает наличие встречно-параллельной магнитной ориентации соседних слоёв. При увеличении силы магнитного поля нейтронная рефлектометрия чётко индицирует параллельную ориентацию всех слоёв.

В настоящее время полупроводниковым магнитным материалом с наиболее подробно исследованными свойствами является арсенид галлия (GaAs, gallium arsenide) с присадками «магнитных» атомов марганца (Mn, manganese), замещающими в кристаллической решётке GaAs некоторые атомы галлия. С ним и экспериментировали учёные. Теоретиками была предсказана такая ситуация, когда многослойный материал из двух тончайших слоёв полупроводника, разделённый слоем немагнитного диэлектрика, с правильно подобранными электрическими параметрами и толщиной слоёв, сможет продемонстрировать эффект антиферромагнитного сцепления. Мысль о возможности антиферромагнитного сцепления была подтверждена на практике с использованием выше упомянутого многослойного полупроводникового GaMnAs материала.

Таким образом, возможность переключать с помощью магнитного поля намагниченность одного из слоёв полупроводника в одно из устойчивых положений достигнута на практике. Плюс-минус, да-нет – вот и готов базовый логический элемент логики будущего, который, к тому же, способен хранить информацию теоретически неограниченное время. Благодаря этому появляется возможность создания на практике

так называемой «спинотронной» (spintronic) логики, управляемой не только традиционным электрическим полем, но также с помощью воздействия магнитных полей. Таким образом, на перспективу открывается уникальный шанс использования полупроводников с магнитными свойствами не только для хранения данных, но также для обработки данных в составе полнофункциональных микросхем на базе спинтронной логики.

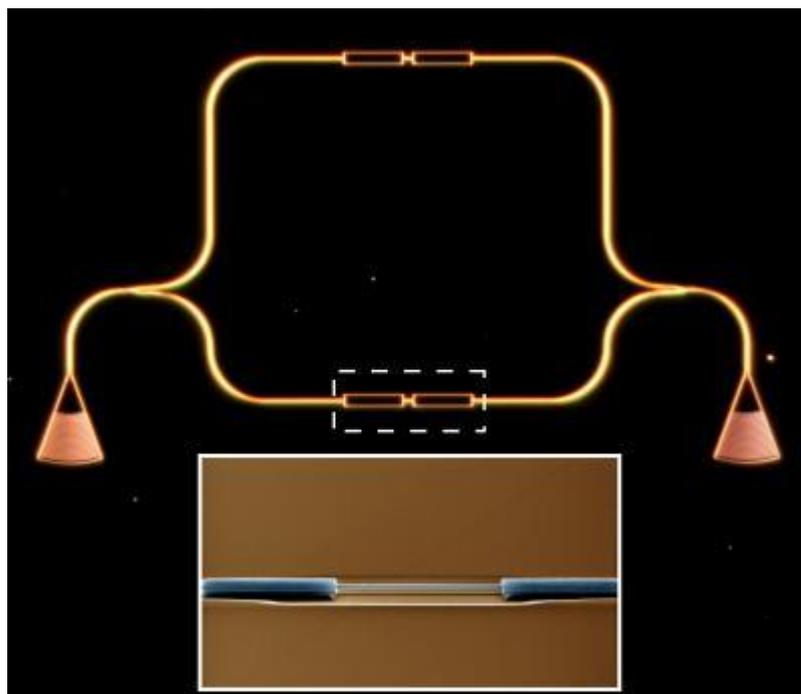
Увы, к сожалению, ожидать "магнитную электронику" на прилавках пока рано. Дело в том, что эффект антиферромагнитного сцепления в полупроводниках наблюдается пока только при температуре порядка 30К (-243°C), и до комнатных температур ещё ой как далеко. Впрочем, учёные-практики не унывают и с помощью уже полученных результатов намерены, что называется, "убить двух зайцев". Во-первых, теперь можно тщательно изучить уже полученный эффект, а во-вторых, дать физикам-теоретикам дополнительную пищу для размышлений – теперь, окрылённые подтверждением своих догадок, они имеют возможность углубиться в изучение этого вопроса и разобраться в том, как на практике добиться эффекта антиферромагнитного сцепления в полупроводниках при комнатной температуре.



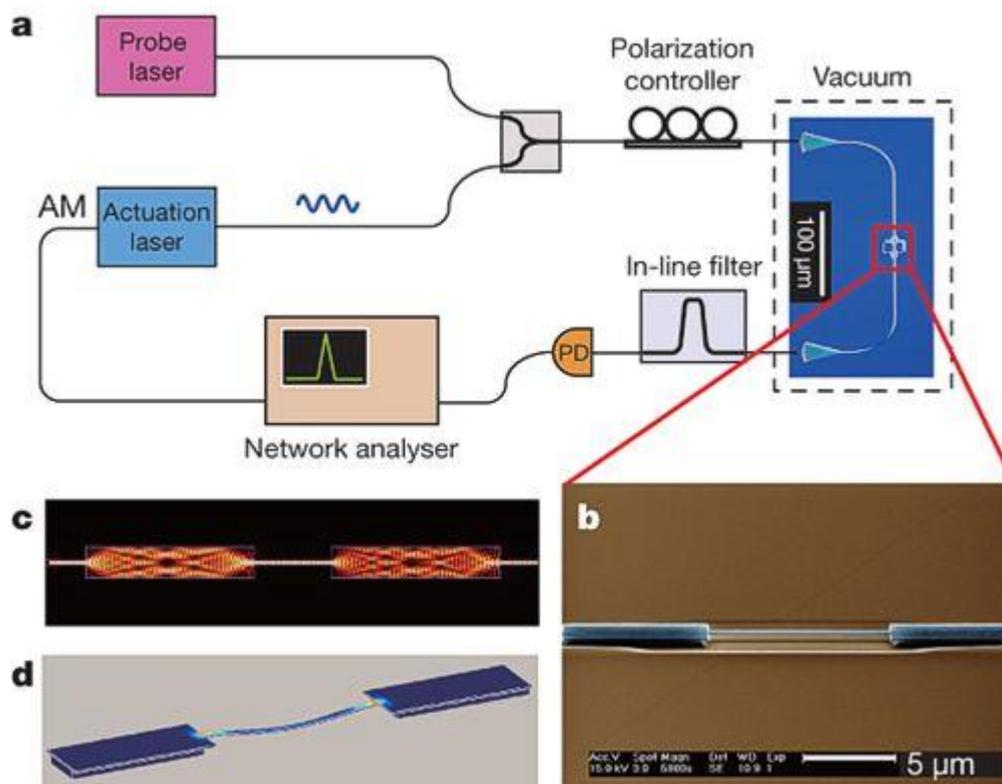
А "на посошок" сегодня будет совсем уж фантастическая история про... фотонные микросхемы. Полагаю, все наши читатели, так или иначе, сталкивались с фантастическими идеями использования так называемого "солнечного ветра" для путешествий между планетами, звёздными системами, а то и галактиками. Мол, выныриваем на земной орбите, натягиваем невесомый многокилометровый парус, и используем давление солнечной радиации – "солнечного ветра", в качестве движущей силы для космического парусника.

Романтично, но, увы, в реальной жизни применимо мало. И даже если на пляже вам показалось что солнце вот-вот "продавит" вам дырку в спине – не обольщайтесь, спина облезет от радиации, но не от солнечного ветра. Определённое давление эта радиация,

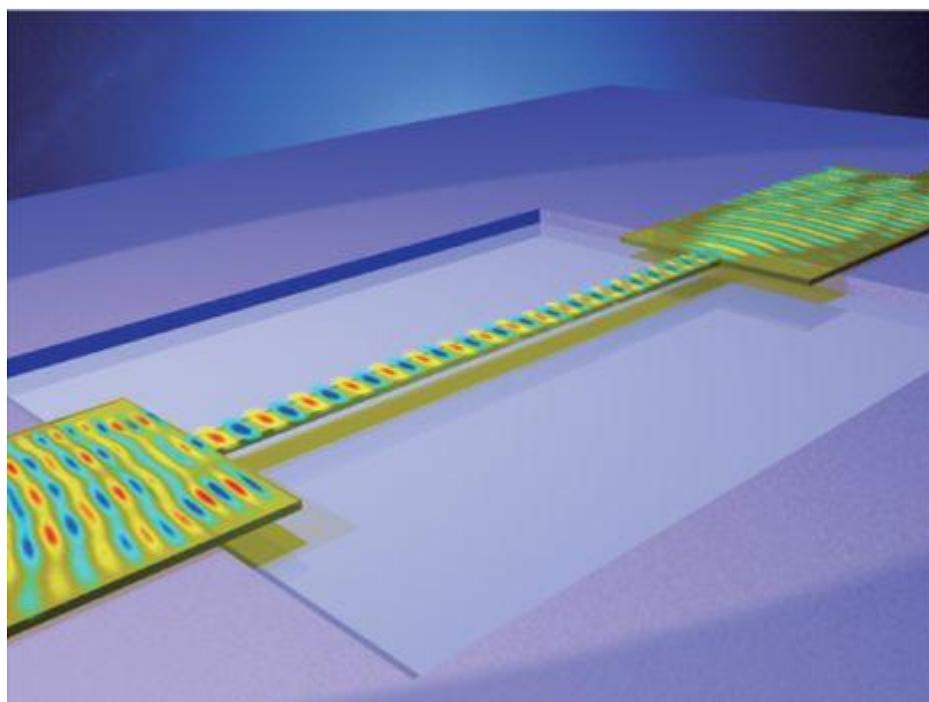
безусловно, производит, но не столь существенное чтобы надавить и сдвинуть что-то с места – по крайней мере, если речь не идёт о циклопических масштабах.



Совсем другое дело, когда речь заходит о масштабах, измеряемых нанометрами. Оказывается, силы "фотонного ветра" более чем достаточно для функционирования механизмов с наномасштабами. На практике эту идею подтвердили учёные из Школы инженерных и прикладных наук при Йельском университете (Yale School of Engineering & Applied Science). Своей работой учёные открыли путь новому классу полупроводниковых устройств, управляемых силой света. В будущем такая электроника сможет привести к появлению высокопроизводительных вычислительных систем и сверхбыстрых телекоммуникационных устройств с мизерным потреблением энергии, сверхчувствительных датчиков и к появлению совершенно неизведанного нынче класса устройств, представить которые нам нынче попросту не хватит воображения. Изобретение, появившееся на стыке двух новых физических дисциплин – нанофотоники и наномеханики, позволит в перспективе встраивать сверхмалые оптические и механические элементы непосредственно в полупроводниковые микросхемы.

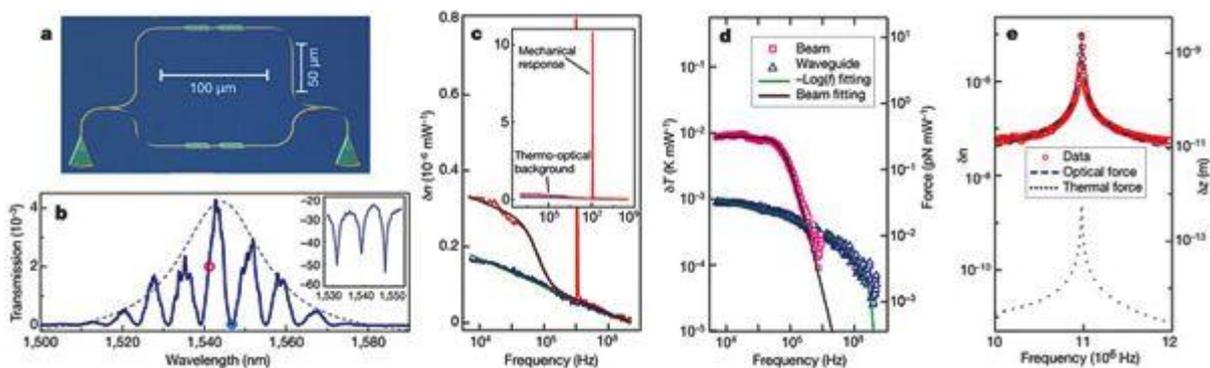


В процессе проведения экспериментов учёным из Йеля удалось обнаружить и "запрять" силу оптических потоков в интегрированных кремниво-фотонных микросхемах для активации встроенного наномеханического резонатора. Наномеханическое устройство – этакий автономный волновод, управляемый потоком света, выводит данные через микроконтакт на диэлектрической подложке.



Использование света позволяет создавать оптические компоненты наномеханических систем непосредственно на CMOS-платформах, работающих на высоких частотах и органично интегрированных в классические электронные схемы. Разумеется, когда речь идёт о потоках фотонов, используемых в качестве "оптической силы", энергия таких

пучков света достаточно высока – в миллионы раз сильнее, чем сила прямого солнечного света. Впрочем, речь идёт о практически точечных источниках "концентрированного" света, световоды с которыми учёные предлагают "разводить" в чипе по аналогии с контактными и соединительными дорожками электронных схем.



В настоящее время учёные говорят уже о сотнях различных нанометровых оптико-механических элементов, каждый из которых функционирует вполне надёжно. В дальнейших исследованиях разработчики нового класса нанометровых оптико-механических полупроводниковых устройств намерены уделять большее внимание механическим узлам этих систем.

Так какими же они будут в действительности, микросхемы будущего? Кремниевыми, бумажными, органическими, полужидкими, жидкокристаллическими или вовсе фотонно-механическими? Скорее всего, и теми, и другими, и третьими, и неизвестно ещё какими, пока не придуманными десятками. Пройдёт совсем немного времени, и в нынешних десятках и сотнях гигабайт нам попросту станет тесно, а искусственные интеллекты и гаджеты будущего потребуют многих гигафлопсов вычислительной мощности при милливаттном энергопотреблении. И электроника к тому времени станет совсем иной, да и мы уже будем совсем другими...

Источники:

- [National Institute of Standards and Technology \(NIST\)](#)
- [The Nature](#)
- [Applied Physics Letters](#)
- [Centro de Ingestigacao de Materiais at Faculdade de Ciencias e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa](#)
- [Tech-On](#)
- [Yale University](#)