

IT-байки: На ближних подступах к эре графеновой электроники

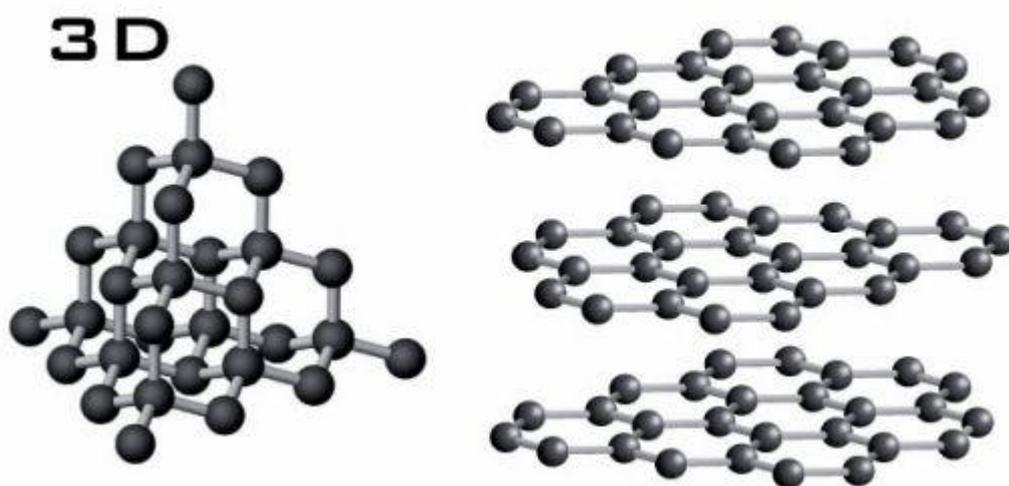
Автор: Владимир Романченко

Дата: 10/05/2009

Пожалуй, имеются все основания для того, чтобы считать графен самым удивительным материалом нашего времени. Теоретически предсказанный ещё в 1947 году, графен достаточно длительное время не могли получить на практике, и лишь в 2004 году группа российских и британских учёных впервые добилась успеха. Существовая в реальных образцах каких-то пять лет, графен успел "отметиться" в качестве перспективного материала для множества прикладных приложений будущего. О существовании графена нынче знают даже школьники, а в научной и популярной периодике в последнее время упоминания о графене встречается чуть ли не чаще чем о других углеродных структурах - алмазах, графите и карбине.

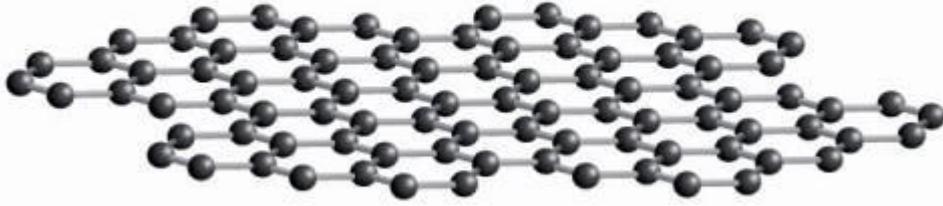
В различных материалах раздела "IT-байки" мы уже неоднократно обращались к определению графена и описанию его ключевых свойств. Напомню: графен – это планарная (2-мерная) гексагональная кристаллическая решётка, состоящая из атомов углерода. Говоря проще, графен – это углеродная 6-гранная ("сотовая") решётка толщиной в один атом; вроде среза графита одноатомной толщины. Решётка - именно 6-гранная, ибо в случае нарушения этого правила плоская 2-мерная структура графена обязательно свернётся в нечто другое, вроде углеродной нанотрубки или даже фуллерена.

Алмаз, графит



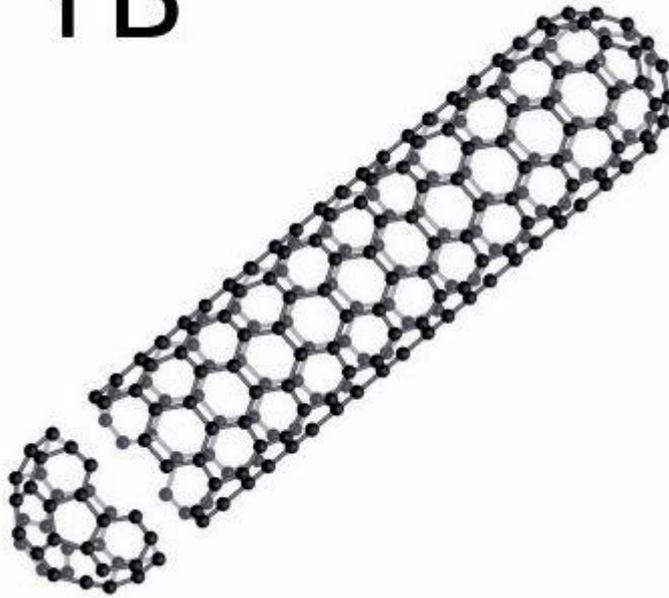
Графен

2D



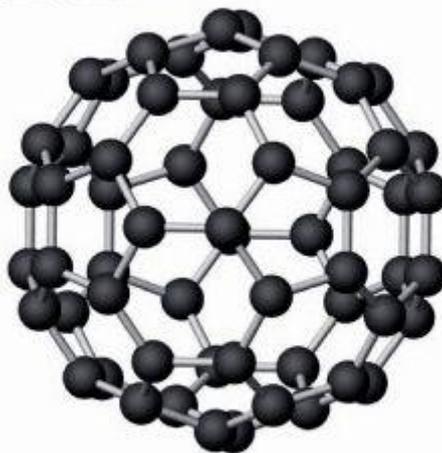
Графитовая нанотрубка

1D



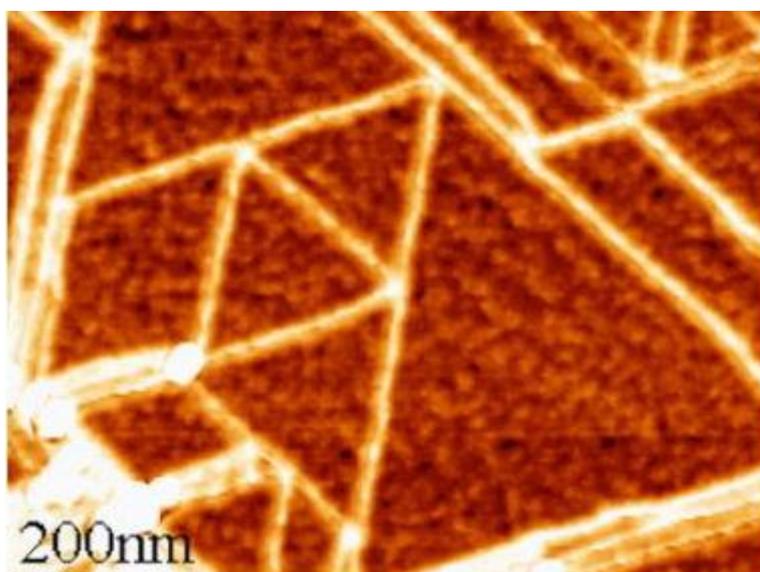
Фуллерен

0D



Сочетание физических и химических свойств графена уникально, именно благодаря этим свойствам учёные забрасывают нас заманчивыми перспективами применения графена в самых невероятных приложениях. К примеру, в силу одноатомной толщины чистый графен совершенно прозрачен и при этом является отличным проводником с высокой подвижностью носителей тока при комнатной температуре. Благодаря этому имеется множество проектов изготовления прозрачных графеновых электродов – например, для светодиодов или солнечных батарей.

Эксперименты с графеном и его производными доказали возможность получения на практике любых типов полупроводников и в последнее время всё говорят о том, что именно графен придёт на смену кремнию в нанoeлектронике следующего поколения. Более того, именно графеном, как более качественным проводником тока и отличным проводником тепла также собираются заменять медные проводники в микросхемах будущего. Графену также предсказывают великое будущее в качестве основы элементов памяти и даже накопителей электрической энергии – суперконденсаторов и батарей питания. Да что там, разговоры нынче идут даже о том, что графен станет в будущем основой квантовой электроники.



Интересно также отметить, что графен, как и его ближайший родственник – алмаз, очень крепок, по последним данным – в 200 раз крепче чем сталь, что также даёт определённые преимущества при изготовлении различных элементов полупроводниковых чипов, даже таких экзотических как нанoeлектромеханические мембраны для сверхчувствительных сенсоров.

О возможностях графена можно говорить много, поскольку на изучение его свойств нынче средств не жалеют. Не проходит и недели, чтобы учёные коллективы планеты не сообщили о ряде новых открытий свойств графена и о возможных способах его применения в самых различных прикладных областях. Однако сегодня мы рассмотрим лишь те новости, которые имеют потенциальное отношение к будущему полупроводниковой промышленности. Именно в прикладном аспекте. Разумеется, обнаружить и исследовать необычные свойства нового материала – это замечательно, но нас интересует не только путь открытия от лаборатории до массового производства (который может тянуться десятилетиями, а порой и вовсе ничем не заканчиваться), но также вероятные сроки прихода новых технологий на производственные линии фабрик.

Что бы ни говорили о близких перспективах создания готовых чипов на базе графеновых полупроводников, в настоящее время приходится признать очевидный факт: до сих пор нет качественной практической методики получения графеновых поверхностей большой площади – приемлемой для практического производства. Только на картинке всё выглядит просто: раз, мол, графит, условно говоря, состоит из 2-мерных графеновых структур, почему бы не научиться "лущить" графеновые "плёнки" непосредственно из графита. Увы, если бы всё было так просто – взять кусок графита и "настрогать ножиком" пластинки толщиной в один атом, графен был бы получен на практике не пять лет назад, а значительно раньше.

Однако даже найдя способ получения мелких "чешуек" графена, вряд ли можно говорить о преодолении проблемы и начале эпохи графеновой электроники. Это учёным достаточно полудюжины таких чешуек для двух лет экспериментов; массовое производство интересует поточный и по возможности недорогой метод получения исходного материала высокой чистоты.

Один из методов массового производства графена недавно разработан группой учёных Массачусетского технологического института (Massachusetts Institute of Technology) под руководством профессора Джинг Конга (Jing Kong). По предварительным данным исследований, для получения большого количества листов графена подходит классический метод химического осаждения углерода из распылённого газообразного состояния.

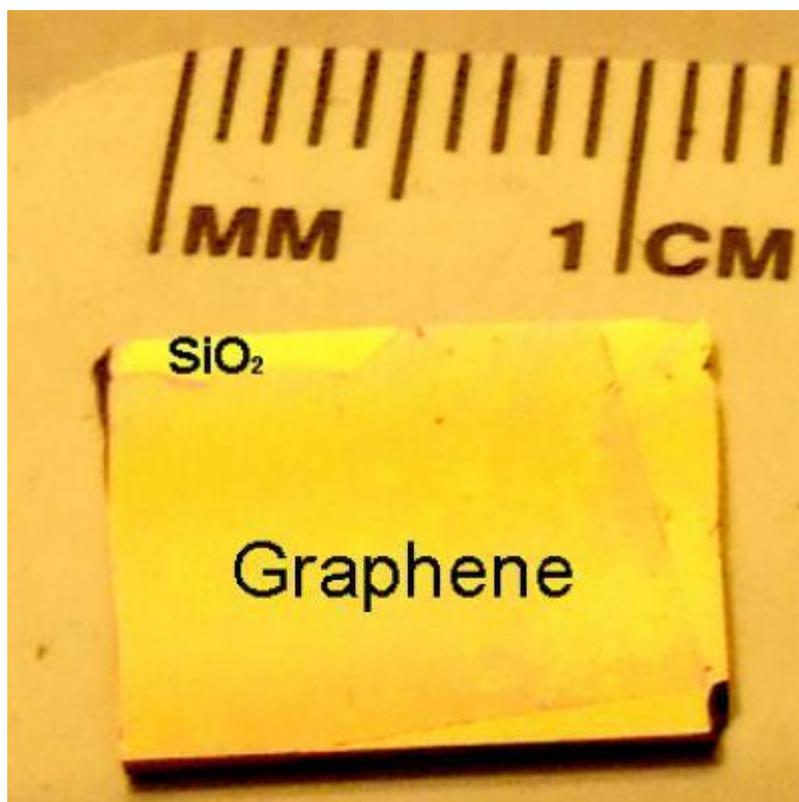
Для получения графена в лаборатории профессора Конга используется оборудование, схожее с применяемым в обычном полупроводниковом производстве. По её словам, метод недорог и вполне пригоден для коммерческого внедрения, разве что для специфических приложений – например, для производства чипов, установку придётся доработать для повышения качества и однородности получаемых на выходе листов графена. Тем не менее, уже в нынешнем виде установка вполне годится для получения графена для таких приложений как электроды солнечных батарей.

Ещё дальше в направлении получения графеновых изделий, готовых для коммерциализации, продвинулся коллектив учёных из Техасского университета в Остине (The University of Texas at Austin). В своей работе "Large-Area Synthesis of High-Quality and Uniform Graphene Films on Copper Foils" (Масштабный синтез высококачественных и однородных графеновых плёнок на медной фольге), опубликованной на днях в журнале Science Express, учёные рассказали об успешном получении графеновых плёнок, перенесённых на обычную кремниевую пластину с верхним слоем диоксида кремния.



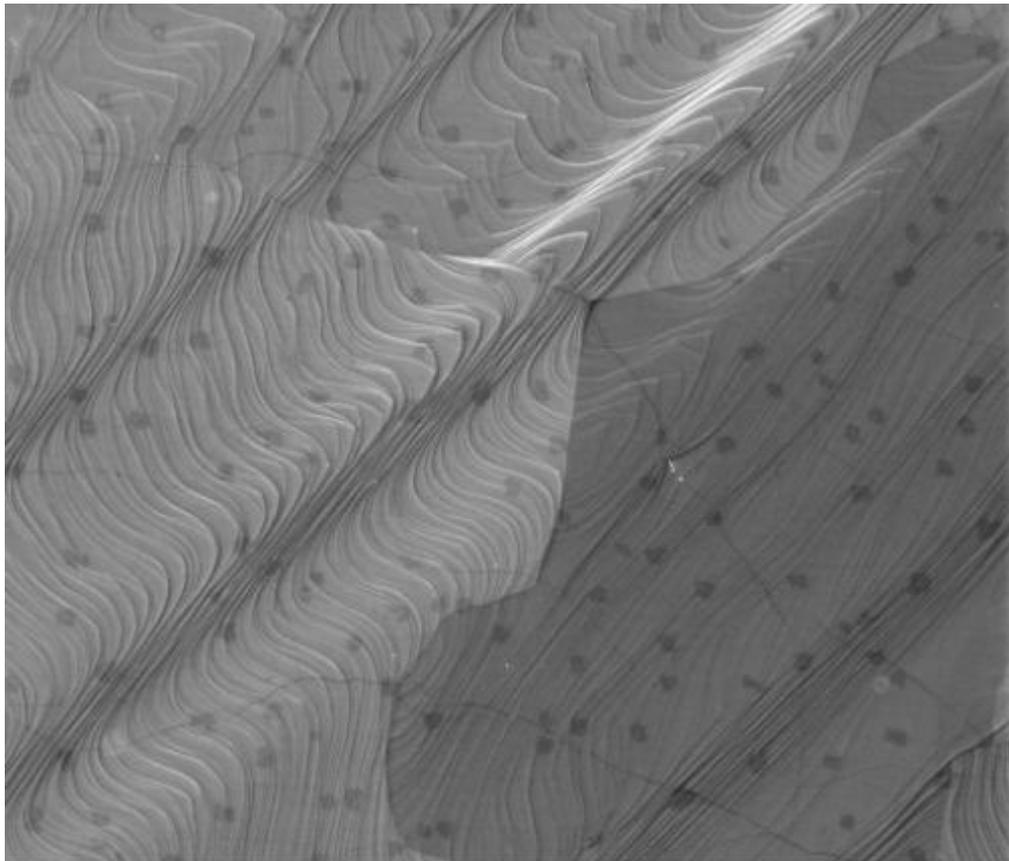
Именно синтез графена на кремниевых подложках методами, совместимыми с традиционными технологическими процессами полупроводниковой индустрии многие учёные считают основой будущего нанoeлектроники. В своей работе учёные из

Техасского университета в сотрудничестве со специалистами из компании Texas Instruments выращивали графеновые пластины площадью 10 x 10 мм (!) на медной фольге, однако, по словам учёных, размер графеновых пластин теоретически ограничен лишь возможностями использовавшегося оборудования, а именно обжиговой печи.

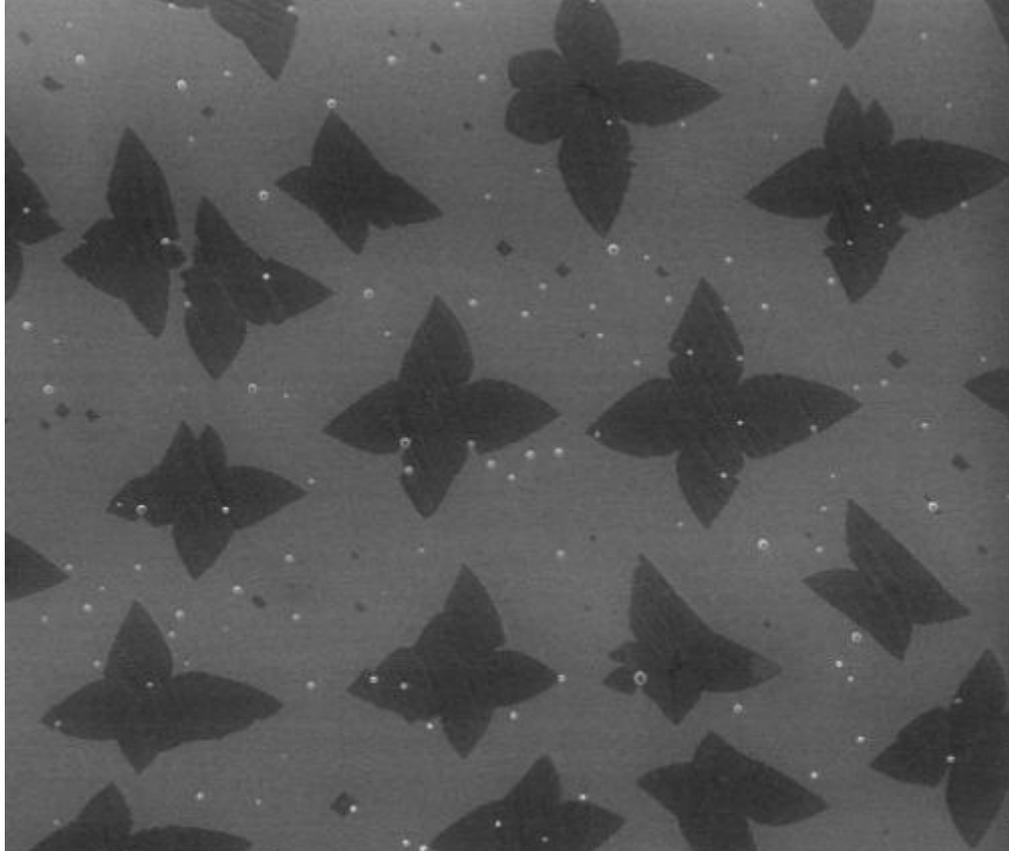


Полученные в результате экспериментов образцы площадью 1 квадратный сантиметр почти полностью покрыты слоем мономолекулярного графена; лишь малая площадь – менее 5%, покрыта двухслойными и трёхслойными "напластованиями". Используя полученные графеновые пластины, учёные смогли создать 2-затворные полевые транзисторы с находящимся сверху затвором, электрически изолированным от графена тончайшим слоем окиси алюминия. Определение подвижности носителей полученных таким образом транзисторов показало результаты, значительно более высокие нежели у традиционных кремниевых полупроводников.

Снимки электронного микроскопа: медная фольга, покрытая графеном.



HV	WD	mode	det	spot	HFW	mag	40 μ m
20.00 kV	11.0 mm	SE	ETD	6.0	99.5 μ m	3 000 x	

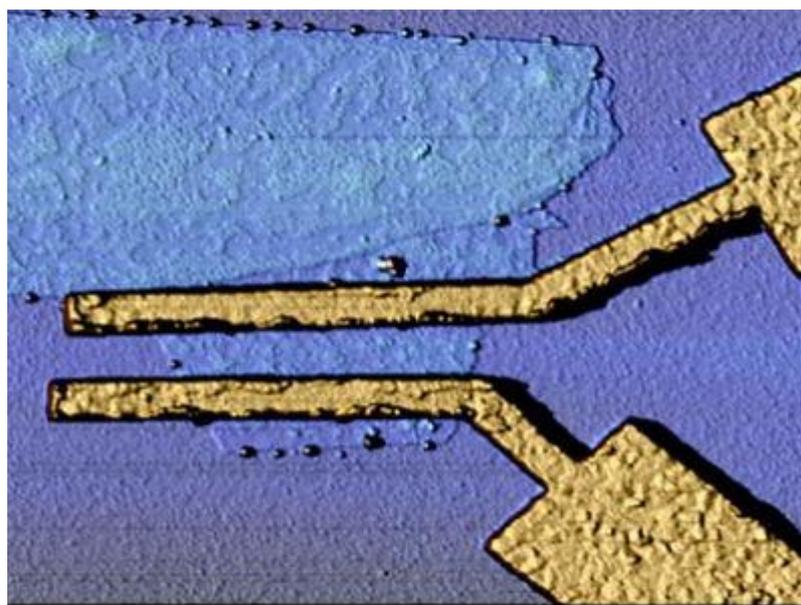


HV	pressure	mag	vac mode	spot	WD	5 μ m
30.00 kV	5.64e-6 Torr	10 000 x	High vacuum	6.0	14.9 mm	

Для выращивания графена на медной фольге использовалась методика химического осаждения из газовой фазы в парах метана и водорода. Растворимость углерода в меди при этом очень низка, и это также способствует формированию плёнок мономолекулярного графена на поликристаллических медных подложках значительной площади. С учётом того факта, что в настоящее время тонкоплёночная медь на кремниевых подложках находит всё более широкое применение в полупроводниковой индустрии, учёные видят в разработанной ими методике большой потенциал для создания высококачественных графеновых плёнок на любых современных кремниевых пластинах, вплоть до 300-миллиметровых.

Забавный термин - "графеновая электроника", хотя, с каких-то пор он перестал казаться мне таким уж экзотическим". Увы, проблемы графеновой электроники, препятствующие появлению графеновых микросхем "уже завтра", многочисленны, и не исчерпываются вопросами получения графеновых пластин большой площади.

Так, до сих пор не существовало практичного способа получения полевых графеновых транзисторов так называемого "n-типа", где носителями заряда выступают электроны (в отличие от транзисторов р-типа, где носителями являются так называемые "дырки"). В то время как методика производства графеновых транзисторов р-типа давным-давно отработана, создание графеновых полупроводников n-типа столкнулось с рядом трудностей. Между тем, без любого из этих типов транзисторов невозможно создание комплементарной логики (КМОП, CMOS), на которой строится почти вся современная цифровая и значительная часть аналоговой электроники. Некоторые надежды даёт изобретение графана – вещества, производного от графена, оказавшегося в отличие от него диэлектриком (см. наш материал [IT-байки: Графан - сын графена, дедушка электроники будущего](#)), однако в области исследования свойств графана, судя по имеющейся на сегодняшний день информации, поле непаханое, и говорить о каких-то практических перспективах сегодня затруднительно.



Однако совсем недавно обнаружился прорыв и в области создания графеновых транзисторов n-типа, о чём команда учёных из Университета Стэнфорда (Stanford University), Университета Флориды (University of Florida) и Ливерморской национальной

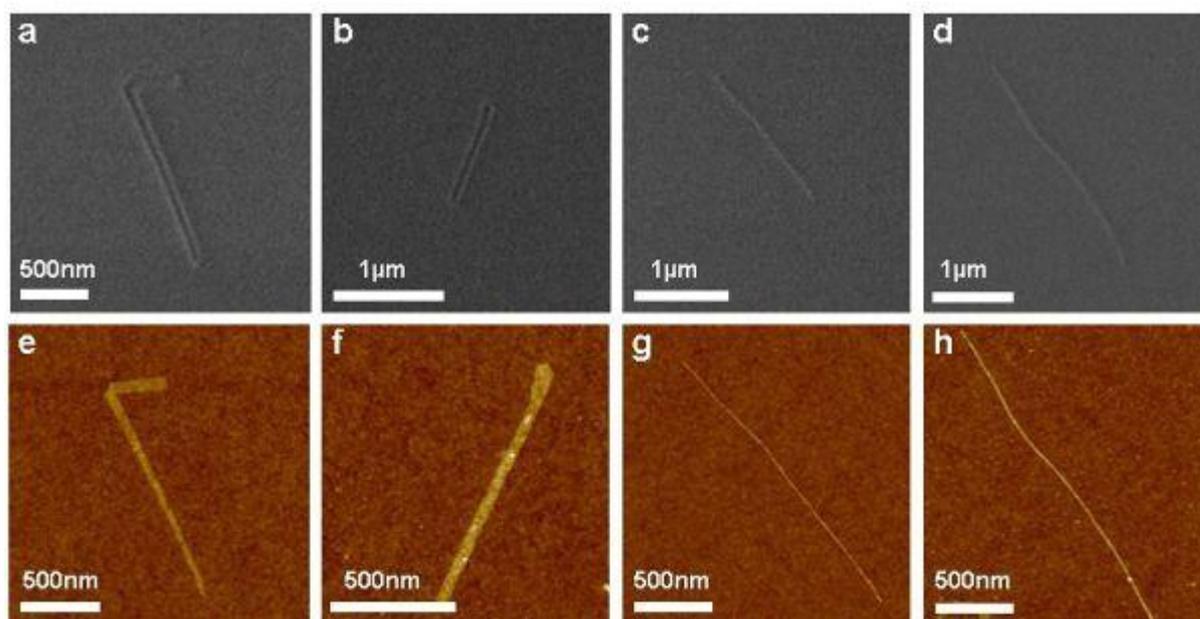
лаборатории имени Лоуренса (Lawrence Livermore National Laboratory) уведомляет в последнем выпуске журнала Science.

В своей работе учёные рассказали об успешном создании, моделировании и тестировании полевого графенового транзистора n-типа с применением так называемых "нанолент" графена – графеновых "нанополосок" шириной в несколько нанометров и толщиной всё в тот же единственный атом.

Процесс создания графенового транзистора n-типа включает размещение графена на кремниевой 300 мм подложке с предварительно размеченными металлическими маркерами; с применением электронно-лучевой литографии для нанесения затвора и истока/стока.

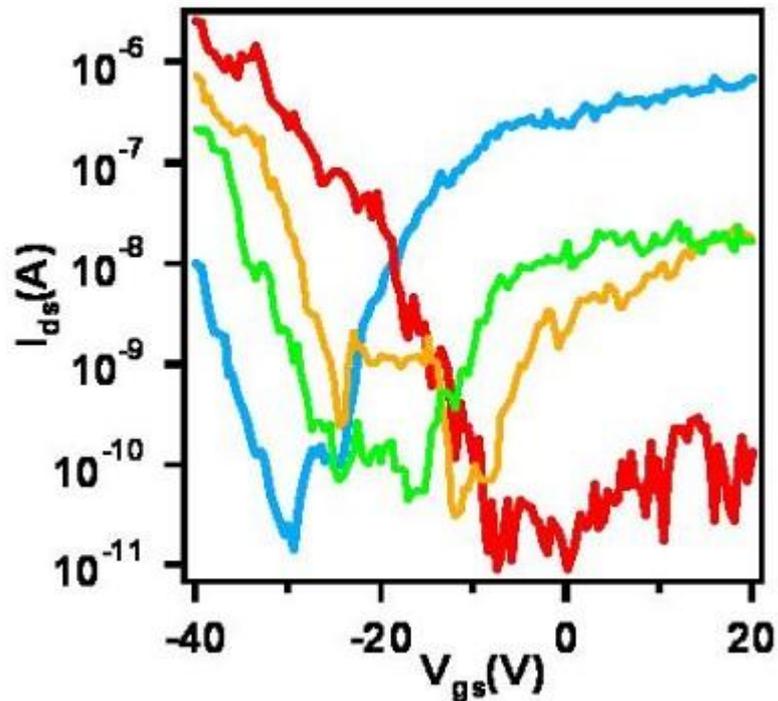
Первоначально изготавливается так называемый GNR-FET (graphene nanoribbon FET, graphene nanoribbon field-effect transistor – графеновый наноленточный полевой транзистор) p-типа, с подавленной проводимостью n-канала.

Снимки графеновой наноленты на кремниевой подложке сканирующим электронным микроскопом (SEM, сверху) и соответствующие снимки сканирующим атомно-силовым микроскопом (AFM).



Последующее нагревание образца рамановским лазером в вакууме, в парах аммиака, позволило изменить свойства транзистора до n-типа, при этом измерения характеристик полученного в результате n-GNR-FET транзистора при комнатной температуре показали такой же ток потребления, режимы переключения и крутизну характеристики как исходный транзистор p-типа. Более того, связи атомов азота и углерода, возникающие в процессе обработки по краям ленты, позволяют получать более ровные края наноленты, что также является ключевым фактором для создания быстрых транзисторов.

GNR-FET транзистор с затвором менее 10 нм: I_{ds} - V_{gs} кривые в вакууме (красный), после вакуумного обжига (оранжевый), после обработки в парах аммиака (зелёный) и после вакуумного обжига в парах аммиака (голубой).



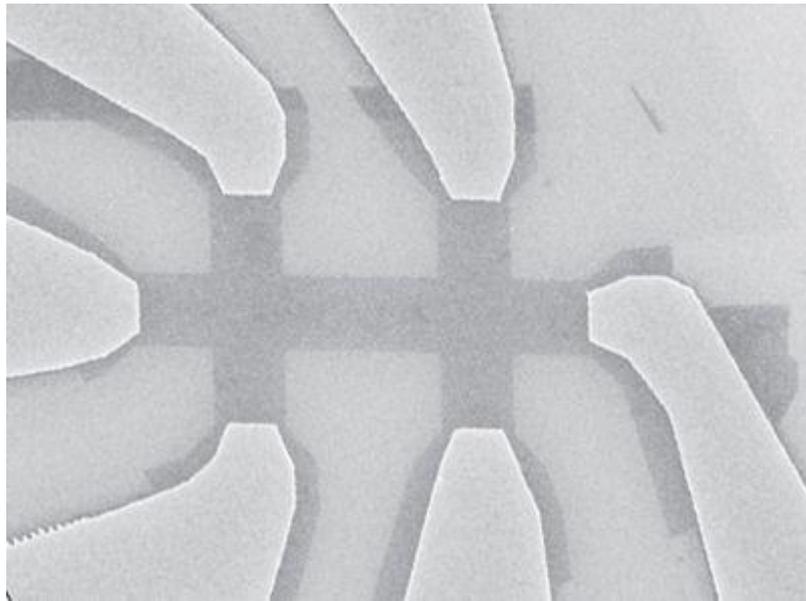
К сожалению, эту работу пока что нельзя назвать близкой к коммерциализации. Сами учёные говорят о том, что исследования в этом направлении лишь в самом начале и до появления пригодных для производства методик предстоит решить целый список промежуточных вопросов.

Как видите, несмотря на то, что последние новости "графеновой электроники" несут позитивный многообещающий контекст, до внедрения всех этих разработок в производство в ближайшее время и речи быть не может.

Получается, на сегодняшний день альтернатив традиционному кремниевому CMOS-техпроцессу, увы нет, и даже лучшим разработкам требуется не один год до коммерциализации. Кремний же, в свою очередь, "на всех парах" стремительно приближается к своему физическому ограничению – 5 нм, достижение которых уже само по себе под вопросом, а уж о преодолении этого рубежа и речи не идёт – см. нашу публикацию [IT-Байки: Электроника-2020 – жизнь после смерти кремния](#).

Получается, что "на всё про всё" у разработчиков графеновой электроники остаётся ещё десяток лет, чтобы довести свои труды до воплощения в реальные фабрики.

Успеют ли? Посмотрим. А если не успеют – пусть пеняют на себя. Как говорится, свято место пусто не бывает, придумаем что-нибудь ещё.



Ссылки по теме:

- [Nature](#)
- [University of Florida](#)
- [University of Texas](#)