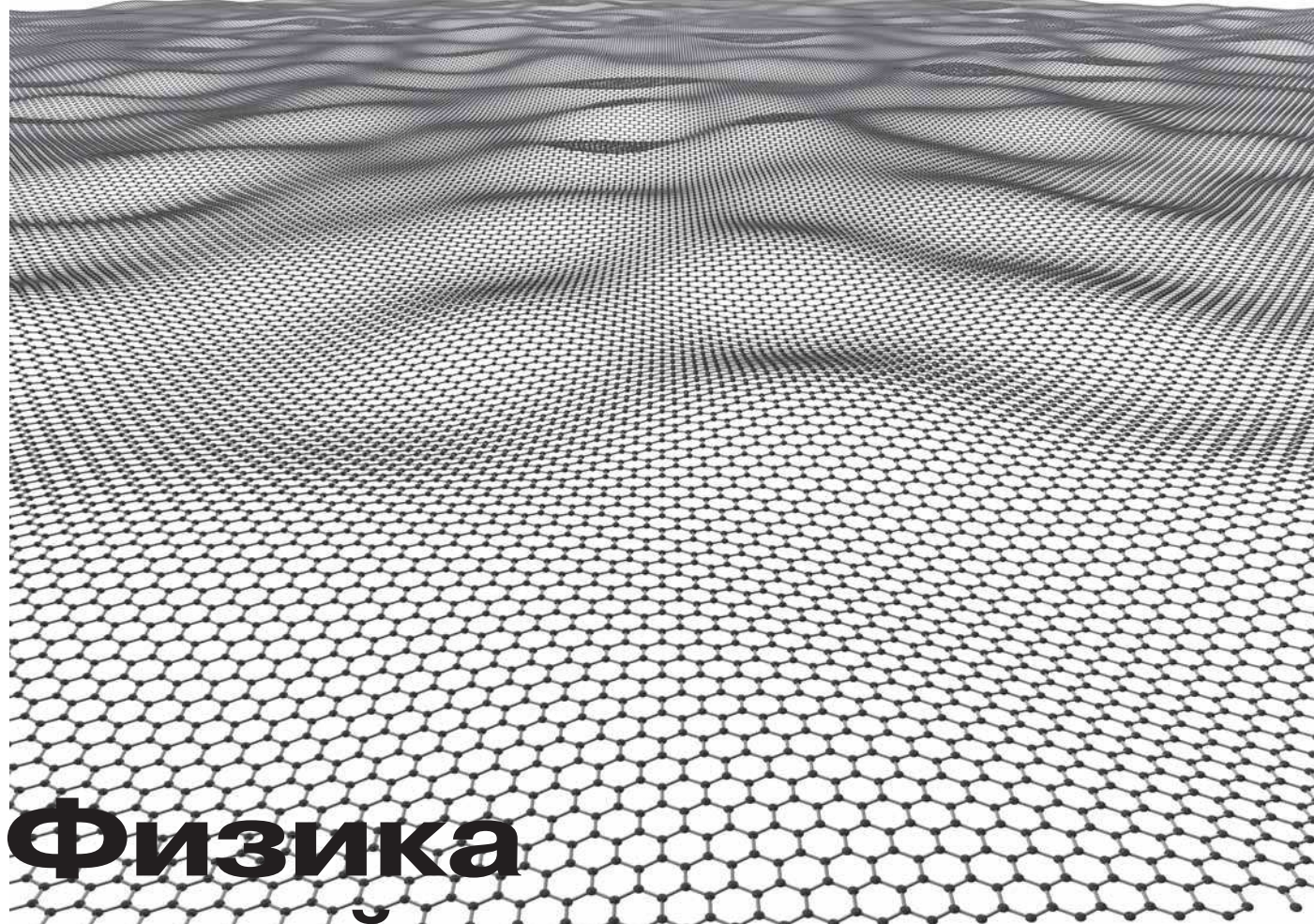




Физика в тончайшем листе

СОБЫТИЕ

Кандидат физико-математических наук
С.М.Комаров

Нобелевскую премию 2010 года по физике получили Андрей Гейм и Константин Новоселов, за работу, выполненную в Манчестерском университете.

Черноголовка — Манчестер

В 2010 году мало кто возмущается, что Нобелевский комитет присудил премию по физике не за то, не тем и не всем, кто заслужил. Практически все согласны, что именно Андрею Гейму и Константину Новоселову принадлежит главная роль в открытии принципиально нового материала — графена. Правда, во всех основополагающих статьях («Science», 2004, т.306, с.666, «Nature», 2005, т. 438, с. 197, «Proceedings of the National Academy of Science», 2005, т. 102, с. 10451) в числе соавторов есть еще и С.А.Морозов из черноголовского Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН (ИПТМ). Чтобы избежать кривотолков, приведем фразу из автореферата его докторской диссертации, защищенной в 2010 году: «Личный вклад автора состоял в непосредственном проведении большинства магнитотранспортных экспериментов, составивших основу представленных в диссертационной работе результатов... Автор, наряду с А.К.Геймом и К.С. Новоселовым, внес существенный вклад в процедуры постановки задач, анализа и интерпретации результатов». Видимо, для Нобелевского комитета этот вклад оказался несущественным.

Расскажем немного о лауреатах. Уроженец Сочи Андрей Гейм после окончания Московского физико-технического института в 1982 году получил распределение в Черноголовку.

Там он сначала работал в Институте физики твердого тела АН СССР, в котором и защитил кандидатскую диссертацию, а потом — в ИПТМ АН СССР, где занимался металлическими микроструктурами. В 1990 году, как только немного приоткрылась дверь, отделявшая страны Запада от СССР, Гейм уехал за границу и в следующие четыре года успел поработать в Англии — в университетах Ноттингема и Бата, — а затем и в Дании, в Копенгагенском университете. В 1994 году он перебрался в университет голландского Неймегена, поставил там опыт с летающей в сильном магнитном поле лягушкой (см. «Химию и жизнь», 1998, № 2), удостоился за это Игнобелевской премии, в соавторстве со своим домашним хомячком Тишей подготовил статью о левитирующем прецизионном гироскопе (см. «Physica B: Condensed Matter», 2001, т. 294–295, с. 736), принял нидерландское подданство и в 2000 году переехал в Манчестер. В 2009 году EPSRC (британский Исследовательский совет по инженерным и физическим наукам) выделил его научной группе финансирование в размере пяти миллионов фунтов стерлингов на развитие работ с графеном.

Константин Новоселов в 1997 году тоже окончил Физтех, причем с отличием. Он работал в ИПТМ РАН, где изучал гетероструктуры. Отношения Гейма с родным институтом, несмотря на эмиграцию, не прерывались, и в 1999 году Новоселов тоже начинает работать в Неймегене, а в 2001 году — в Манчестере. Позже к ним присоединился и Морозов, который работает то в Черноголовке, то в Манчестере.

На рисунке сверху: такими Янник Мейер, ныне профессор Венского университета, увидел в 2007 году рипплы на листе графена

Однажды пятничным вечером ученые собрались в лаборатории Гейма (пятничные ни к чему не обязывающие эксперименты — традиция этой лаборатории), чтобы выяснить, можно ли получить одиночный слой графита, и не просто получить, а увидеть его. Для этого ученые циркали грифелем по подложке, приклеивали скотч, аккуратно его снимали вместе с прилипшими слоями графита и снова приклеивали на подложку из оксида кремния. Считается, что именно выбор материала подложки обеспечил успех: при разглядывании в оптический микроскоп оксид кремния за счет интерференции слегка меняет свой цвет в зависимости от того, сколько слоев графита на нем находится. Как рассказывают нобелевские лауреаты в своих статьях, возможно, и до них многие аналогичным способом получали графен, но никто не мог разглядеть именно одиночный лист, а то, что разглядывали, оказывалось пусть тонким, но все же многослойным графитом. Вообще-то, самый точный метод разглядывания графена — это сканирующий зондовый микроскоп. Но с его помощью нельзя найти случайно расположенные на подложке полоски микронного размера: слишком велико у такого прибора разрешение. Зато контролировать качество, то есть пересчитывать число слоев графита в уже найденной полоске, с таким микроскопом можно.

И вот, после того как полоска из одного-единственного слоя графита была найдена, к ней удалось припаять электроды и приступить к самому главному — изучению необычных электрических свойств этого материала. За шесть лет результаты таких исследований описаны в ста с лишним научных статьях, но ученые не устают отмечать все новые и новые особенности.

Электроны и дырки

Метод механического расслоения графена оказался не главным; суть открытия (отчего и премию дали по физике) в том, что экспериментаторам впервые удалось не только поддержать в руках, но и начать исследования вещества, которое, как долго казалось, может существовать лишь в фантазиях теоретиков. Более того, будущий участник создания американской ядерной бомбы, а тогда сотрудник Манчестерского университета Рудольф Эрнст Пайерлс в 1935-м, а Л.Д.Ландау в 1937 году доказали, что дальний порядок в двумерном кристалле невозможен. Из-за флуктуаций такой кристалл неизбежно сомнется, сложится и превратится в некую трехмерную структуру. Создатели графена честно признаются, что о предсказании Ландау они не знали. К тому же все известные образцы графена либо полностью, либо частично закреплены на подложке, поэтому их нельзя рассматривать как строго двумерные системы. Однако, видимо, эффект Ландау все же проявляется: поверхность графена испещрена пузырями высотой в один нанометр — рипплами; их впервые разглядел Янник Мейер из Института исследований твердого тела им. Макса Планка при участии нынешних лауреатов и их коллег в 2007 году.

Что же касается особых электрических свойств гипотетического однослойного графита, то их рассчитал в 1947 году канадский физик-ядерщик Филипп Уоллес из лаборатории в Чалк-Ривер. В массивном графите они не проявляются, ведь уложенные стопкой плоскости из углеродных шестиугольников вступают друг с другом во взаимодействие. Чтобы стало понятно, в чем же уникальность графеновых свойств, следует погрузиться в глубины физики твердого тела. Для этого воспользуемся учебником Н.Ашкрофта и Н.Мермина.

Когда речь заходит о способности материала проводить электрический ток, всякий, кто освоил курс средней школы, скажет следующее: в металле валентные электроны обобществлены, они образуют электронный газ, и этот газ устремится в должном направлении, если приложить разность электрических потенциалов — подать напряжение. Такое представление имеет право на существование, но это самое первое, грубое приближение к реальности: модель свободных электронов в 1900 году предложил Поль Друдэ. При всей своей наглядности

модель Друдэ не смогла объяснить многие факты. Нас будет интересовать парадокс, связанный со знаком частицы, которая переносит заряд при электрическом токе.

Казалось бы, кроме отрицательно заряженных электронов в металле нет ничего, что могло бы переносить ток. Однако у физиков есть способ не угадывать знак заряда, а измерить его напрямую. Для этого служит эффект Холла: если поперек проводника с током приложить магнитное поле, то возникнет поперечная разность потенциалов. Ее знак и зависит от знака переносчиков заряда. Таким способом удалось установить, что у таких замечательных проводников, как медь, золото или серебро, ток переносят частицы с положительным зарядом, а у ничуть не худшего проводника алюминия — с отрицательным.

От многих недостатков модели Друдэ позволяет избавиться следующее по сложности приближение — полуклассическая модель динамики электронов. В ее основе лежит идея Феликса Блоха: он предложил вспомнить, что у кристалла есть кристаллическая решетка, состоящая из положительно заряженных ионов (коль скоро валентные электроны оказались оторванными от своих атомов и обобществлены). Эти ионы создают периодическое электрическое поле — периодический потенциал. Он неизбежно должен сказываться на перемещениях электронов. И действительно, согласно предложенным Блохом формулам, электроны оказываются волнами, амплитуда которых меняется с периодичностью кристаллической решетки.

У таких электронов есть строгие ограничения на энергию: они объединены в зоны с конечным набором энергетических уровней, а те, в свою очередь, отделены друг от друга щелями. И если зона заполнена, то она не способна проводить электрический ток: у движущегося электрона должна возрасти энергия, а на более высокий уровень он не перейдет, поскольку тот уже занят. Значит, всеми такими зонами можно пренебречь и рассматривать только одну — самую верхнюю, в надежде, что она заполнена не полностью. При этом самый верхний уровень энергии, на котором есть электрон, называется уровнем Ферми. Тепловое движение способно перебросить электрон с уровня ниже энергии Ферми на уровень выше нее. Этот-то электрон и будет переносить электрический ток. Однако точно такой же ток можно получить, если освободить все заполненные уровни, а на всех незаполненных разместить частицы с положительным зарядом — дырки.

Так в теории появляется фиктивная частица, которая ведет себя как реальная. Можно пользоваться фиктивными носителями заряда, дырками, или же не менее фиктивными электронами, которые кажутся просто отсутствием дырок на соответствующем уровне. Следуя далее по пути математического формализма (выкладки мы опускаем), получим, что каждой из такой частиц можно приписать еще и массу. Она не имеет никакого отношения к гравитационной или инерционной массе электрона, отчего и получила название эффективной массы. В сущности, такая масса отражает кривизну поверхности Ферми в месте ее соприкосновения (если говорить грубо) с границей элементарной ячейки решетки; она проявляется только при электромагнитных взаимодействиях и оказывается отнюдь не числом, а тензором — в разных кристаллографических направлениях масса переносчика заряда оказывается неодинаковой. А еще у нее может быть разный знак, который определяется строением кристаллической решетки. Если масса электрона отрицательна — значит, это дырка. Если масса дырки становится отрицательной — значит, это электрон.

Судьба безмассового фермиона

А если эффективная масса равна нулю? Тогда мы имеем дело с графеном. Именно отсутствие массы у носителей заряда, а также отсутствие щели между валентной зоной и зоной проводимости и оказываются его самыми главными свойствами, из-за которых экспериментаторы более 60 лет мечтали поддержать в руках такое вещество. Из этой особенности вытекают следствия.

Главное из них состоит в том, что электроны оказываются релятивистскими частицами, то есть движутся с максимально возможной для среды скоростью. Поэтому вместо уравнения Шредингера надо применять для их описания более сложное уравнение Дирака, и называют эти электроны безмассовыми дираковскими фермионами. По своим свойствам они оказываются подобными нейтрино, а сам лист графена уподобляется физическому вакууму. Например, электрическое напряжение, приложенное к подложке, на которой находится графен, может, подобно тому как сильное поле порождает в вакууме частицы и античастицы, создавать носители заряда — электроны либо дырки, что зависит лишь от знака напряжения.

Плотность таких носителей может достигать 10^{13} шт./см². Если же она падает на два порядка, то считается низкой, и тогда в графене возникают отдельные лужи, заполненные дырками и электронами. Иначе говоря, он становится близким к диэлектрику, но не совсем: у графена есть минимум электропроводности. Даже в отсутствие свободных носителей заряда она не будет меньше, чем четыре кванта электропроводности, то есть $4e^2/h$ (h — постоянная Планка). Это скорее недостаток графена, чем достоинство, — если сделать из него диод по стандартной технологии, то он всегда будет пропускать ток. Зато из плоского графена можно соорудить баллистический транзистор. В обычном диоде существует затвор, который в зависимости от приложенного напряжения пропускает или не пропускает электрический ток, и в результате возникает логический элемент, выдающий 0 или 1. В баллистическом же диоде ток идет всегда, но под действием управляющего электрода его направляют вправо или влево. Эти два состояния тоже соответствуют 0 и 1, только получаются они гораздо быстрее. Такой транзистор, если его создадут, позволит развить гораздо большие рабочие частоты микросхемы: терагерцы вместо нынешних гигагерц.

У графена очень высокая подвижность зарядов: в 16 раз больше, чем у кремния, и в пять раз, чем у германия. Однако есть мнение, что на самом деле подвижность можно увеличить еще в 10 раз, препятствуют же этому, по мнению С.В.Морозова, уже упомянутые рипплы. А чем больше подвижность, тем быстрее работает микросхема, тем меньше шум и меньше нагрев. В графене работает парадокс Калуцы, который должен проявляться в сверхсильных полях, например возникающих в черной дыре: частица преодолевает потенциальный барьер (энергетическую стенку на своем пути), высота которого выше (а не ниже, как можно подумать) критической величины. Эта величина зависит от массы, а коль скоро масса электрона в графене равна нулю, то он преодолевает барьер любой высоты, если движется перпендикулярно ему.

В графене проявляется квантовый эффект Холла (его открыл Клаус фон Клитцинг в 1980 году, а нобелевским лауреатом он стал в 1985-м; в 1998 году Даниэль Цуи, Хорст Штрёмер и Роберт Лаффлин получили свою премию за дробный квантовый эффект Холла), причем при комнатной температуре. У эффекта Холла есть характеристика — сопротивление Холла. Оно равно отношению поперечной разности потенциалов к продольному току. В сильных магнитных полях и при температуре жидкого гелия это сопротивление перестает меняться с полем непрерывно, а начинает расти скачками, кратными кванту проводимости — h/e^2 (это и есть квантовый эффект Холла). При дробном эффекте высота ступеньки составляет треть этого кванта. А у графена нашли третий тип эффекта — полупецель. Суть его в том, что сопротивление меняется на четыре величины такого кванта. Однако при нулевом поле эффект появляется и для дырок, и для электронов. Поэтому первый уровень после нулевого составляет $\pm 2h/e^2$. Сейчас полупецель квантовый эффект Холла применяют для контроля качества графенового листа: если он есть, значит, действительно имеется лишь один слой углеродных атомов — уже в бислое эффект Холла становится целочисленным.

Очень важны такие свойства графена, как прочность, химическая стойкость и прозрачность. Измерения прочности с помощью иглы зондового микроскопа показали, что из метро-

вого листа можно сделать гамак, способный выдержать вес кошки. При этом сам гамак будет весить десятые доли миллиграмма. О химической стойкости свидетельствует отсутствие изменений свойств графена при длительном хранении на воздухе. А прозрачность долго была препятствием на пути открытия графена.

Чрезвычайно интересны свойства графенового бислоя — двух слоев графена, разделенных изолятором. Прикладывая к ним различные напряжения, можно в одном слое создать электроны, а в другом — дырки. Если толщина прослойки достаточно мала, то электроны с дырками создадут пары подобно тому, как это делают электроны в сверхпроводящем состоянии. Тогда при некоторой температуре эти пары сольются в конденсат Бозе—Эйнштейна и обретут способность к сверхтекучести, то есть к сверхпроводимости. Расчеты показывают, что температура подобного перехода в чистом графене с высокой подвижностью носителей заряда приближается к комнатной. Пока что горячая сверхпроводимость графена не открыта, но теоретики дают надежду на то, что такой необычный эффект может существовать в этом материале. И не только он.

Графен и чешуйки

Графен — шестая кристаллическая модификация углерода (предыдущие пять — графит, алмаз, карбин, фуллерен, нанотрубки). Другие модификации, если не считать интересные фазы, получаемые в плазматроне (см. «Химию и жизнь», 2004, № 4), пока неизвестны человечеству. Первые две используют давно, две последние вызвали большую шумиху в научной печати, но серьезных прорывов как в научном, так и практическом плане с их помощью достигнуто не было. Благодаря уникальным электронным свойствам графен обладает большим потенциалом для практического применения, что и отмечено в решении Нобелевского комитета. Однако хорошие возможности еще не означают их практического воплощения. Более того, не исключено, что практически важным окажется как раз не графен, единичный лист из углеродных шестиугольников, а сверхтонкий графит, который состоит из нескольких таких слоев. Причина — в особенностях графеновой технологии.

Есть несколько способов изготовления графена. Первый — механическое расслоение — годится для исследователей, но никак не подходит для массового производства. А что подходит? Например, расслоение графита химическими методами. О них рассказывал на страницах «Angewante Chemie International» (2010, т. 49, DOI: 10.1002/anie.201004096) Ханс Петер Боэм из мюнхенского Университета Людвиг Максимилиана. Сырьем тут служит оксид графита, который с 30-х годов XX века получают в смеси концентрированных серной и азотной кислот. Серная кислота, проникая в межслойные пространства графита, разлагает его на отдельные слои, и получается гидросульфат графита. При его гашении хлоратом или перманганатом калия образуется гидратированный оксид графита с общей формулой $C_8O_2(OH)_2$, а выход реакции — 96%. Поначалу такое вещество называли графитовой кислотой, однако потом разобрались, что это коллоидный раствор, содержащий прозрачные и бесцветные чешуйки.

В 1932 году Ульрих Хофман измерил их толщину: она оказалась равной 0,6 нм, что в два раза больше толщины графена. Если обработать их сильным восстановителем, например гидразином или ионами Fe^{2+} , либо быстро нагреть до 200—325°C, то большинство гидроксигрупп исчезнет и получится слегка скомканный графеновый листок размером в десяток микрон. Поверхность этих чешуек отрицательно заряжена, и они не слипаются друг с другом, но образуют устойчивый золь. К сожалению, такой графен сильно загрязнен, в нем много дефектов и проводимость гораздо ниже, чем у графена, полученного механическим методом. Однако этим путем можно получить много относительно дешевого графена, и если, например, использовать его как наполнитель для композитов, то такой недостаток будет незаметен. Кстати, недавно мы рассказывали о похожем

материале — однослойном монтмориллоните, который позволяет делать прочную и газонепроницаемую упаковочную пленку (см. «Химию и жизнь», 2009, № 10).

Графен и микросхемы

Когда речь заходит об использовании графена для изготовления микросхем, то обычно говорят: этот материал толщиной в один атом — предел миниатюризации, по крайней мере в одном направлении, по толщине. Однако при этом забывают сказать, что плотность расположения транзисторов вообще-то требует миниатюризации совсем в другом направлении — по ширине. Здесь возможны трудности.

Графен в обычном состоянии — полуметалл, то есть он способен проводить электрический ток. Тем не менее, если полосу из него сделать чрезмерно узкой, он превратится в полупроводник: из-за квантово-размерных эффектов между зоной проводимости и валентной зоной возникнет щель. В разных источниках указана критическая ширина полосы от 20 до 2 нм, то есть от почти сотни до менее десяти периодов решетки графена.

Сейчас микросхемы изготавливают планарными методами — напыляя на монокристалл кремния транзисторы и соединяя их проводниками. Напылять графен пока что не умеют, а вот выращивать его научились давно: в 1975 году голландец А. Дж. ван Бомель с коллегами из лаборатории компании «Philips» в Эйндховене показал, что слои графита можно получить из карбида кремния, испаряя атомы последнего при нагреве до 1080—1320°C (см. «Surface Science», 1975, т. 48, с. 463). Добиться образования одного слоя углеродных атомов нелегко, но можно. Во всяком случае, Уолт де Хеер из Технологического института Джорджии овладел этим способом и пытается выращивать графеновые схемы на монокристаллах карбида кремния.

К сожалению, сами монокристаллы SiC выращивать очень непросто. Их размер исчисляется миллиметрами, что несравнимо с кристаллами кремния диаметром в десятки сантиметров. Отсюда следует: для того чтобы достигнуть той же плотности транзисторов, которая сейчас есть у кремниевых микросхем, нужно научиться выращивать большие монокристаллы карбида кремния (несбыточная мечта многих материаловедов), либо уменьшить ширину штрихов раз в десять. Сейчас самый передовой процесс обеспечивает ширину 9 нм. Десятикратное уменьшение дает 0,1 нм. Это в три раза меньше параметра решетки графена. Но и 9 нм для графена плохо: он станет полупроводником, и тогда графеновые транзисторы придется соединять проводниками из другого материала, в которых подвижность носителей заряда окажется далекой от рекордов. Значит, по плотности расположения транзисторов графен конкурировать с кремнием никак не сможет. Видимо, выигрыш получится не в увеличении плотности транзисторов, а в повышении их быстродействия. А достаточен ли он будет, чтобы пожертвовать многомиллиардными вложениями в существующую технологию? Ответ на этот вопрос совсем не очевиден. Однако работы по изготовлению графеновых микросхем идут.

Например, де Хеер («Nature Nanotechnology», 2010, т. 5, с. 727) хочет за один раз выращивать из графена на карбиде кремния и проводники, и полупроводники. Это логично — не будет контактов, и подвижность носителей заряда во всей схеме станет одинаково высокой. Для этого нужны полоски графена разной ширины. Чтобы их получить, ученый решил делать микросхему не вдоль поверхности монокристалла SiC, а поперек: вытравить бороздки разной глубины и, воспользовавшись тем обстоятельством, что скорость испарения кремния зависит от ориентации кристаллографической плоскости, получить графен только на гранях бороздок. При большой глубине рос проводник, при малой — полупроводник, и всего на площадке 0,24 см² поместилось 10 тысяч транзисторов. Для сравнения: площадь процессора Intel Core Duo составляет 90,6 мм², а средняя плотность размещения транзисторов — 1,7 млн. на квадратный миллиметр. При таких параметрах графеновой микросхеме уготована ниша специфического устройства отнюдь не массового назначения.

Огромный лист графена

У графена есть еще три перспективных качества: прозрачность, высокая прочность и химическая стойкость. Однако ими же обладает и сверхтонкий графит, находящийся с графеном в отдаленном родстве. А пригодятся эти свойства для изготовления прозрачных электродов жидкокристаллических дисплеев, в том числе гибких, и солнечных электростанций. Такой электрод действительно способен обеспечить прорыв. Впрочем, большие листы тончайшего, но прочного как сталь материала найдут применение не только в электронике, но и в конструировании одежды, и в изготовлении космических кораблей (о подробностях фантасты рассказывали уже не один десяток раз).

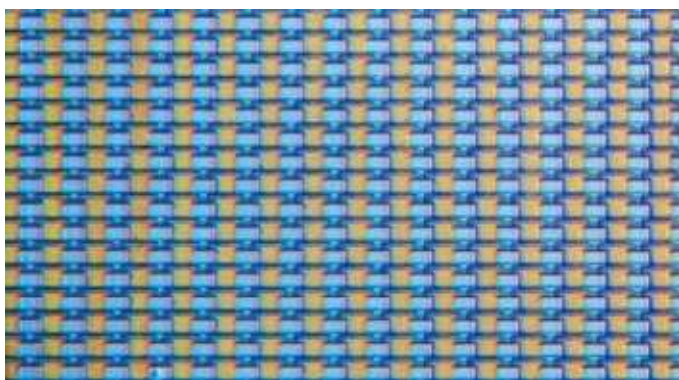
До недавнего времени рассуждать о таком использовании графена можно было в общем-то скорее теоретически: делать большие графеновые листы никто не умел. Впрочем, и с помощью маленьких чешуек в Черноголовке, как пишет С.А. Морозов в своей диссертации, успешно создали прототип ячейки жидкокристаллического дисплея на графеновом электроде. Однако в 2009 году вышло целых три статьи о выращивании огромных, почти что метрового размера, листов материала, похожего на графен.

Специалистам, которые работают с новыми углеродными формами, известно, что для получения нанотрубок или фуллеренов, надо взять частицы никеля и поместить их в атмосферу углерода. Как правило, берут наночастицы и впрыскивают их в реактор CVD — от английского «химическое осаждение из пара», — где метан разлагается на водород и углерод (см. «Химию и жизнь», 2007, № 8). Ситуация изменилась в 2007 году, когда исследователи из МГУ им. М.В. Ломоносова во главе с А.Н. Образцовым, который работает и в финском университете Йёнсюу, поместили в подобный реактор массивный лист никеля и осадили на нем тонкий — толщиной 1,5 нм, то есть состоящий из пяти графеновых слоев, — графит с высокой степенью порядка в расположении атомов («Carbon», 2007, т. 45, № 10).

В 2009 году сразу три независимые группы — одна, во главе с Бью Хи Хоном, из корейского университета Санкьюкван и две из США, Кун Цзин с коллегами из Массачусетского технологического института и Чэн Юн из Университета Пердью, — сделали примерно то же, только углерод не осаждали на листе никеля, а растворяли в нем. При снижении температуры растворимость углерода в металле всегда падает, и он стремится или создать химическое соединение с карбидобразующими элементами (обычно это вольфрам, молибден, ниобий), или выделиться на свободной поверхности. Это свойство металлургии издавна применяют для поверхностного упрочнения — цементации стали. Тщательно выбирая концентрацию растворенного углерода, скорость охлаждения и температуру его окончания, на поверхности металла можно вырастить и тонкую пленку чистого графита. После растворения никеля остается пусть слегка скомканный, но большой лист материала, который по свойствам очень похож на графен. Так, Бью Хи Хон с коллегами («Nature», 2009, т. 457, с. 706) получил на выращенном им графите полупрозрачный квантовый эффект Холла; прозрачность же была 80%. Правда, подвижность носителей заряда оказалась в пять с лишним раз меньше, чем в опытах Гейма, Новоселова и Морозова. Но для электрода дисплея особо большая подвижность может и не пригодиться.

Уже в 2010 году та же группа сообщила о новом успехе — создании пленки шириной 74 см с прозрачностью 97% («Nature Nanotechnology», 2010, т. 5, с. 574). Наложив друг на друга четыре таких пленки, исследователи сделали электрод с прозрачностью 90%, который по сопротивлению и прозрачности превосходит электроды из оксида индия-олова, ныне используемые в каждом жидкокристаллическом дисплее. В конце концов корейцы собрали работоспособный сенсорный дисплей, выдерживающий большие механические нагрузки.

Как видно, для такого способа использования не обязательно иметь лист настоящего графена. По словам А.Е. Образцова, в широких пленках встречаются и участки графена, и участки с графитом, состоящим из нескольких слоев. Добиться же од-



Графеновая микросхема де Хеера состоит из 10 тысяч транзисторов

нородности структуры пока что никому не удалось. Кроме того, поскольку никелевая подложка представляет собой поликристалл, графеновые домены несколько разориентированы друг относительно друга. Если же получилось несколько слоев, то решетки таких доменов могут сильно развернуться относительно соседей.

Считается, что свойства широких графеновых пленок удастся улучшить, если использовать подложки из монокристаллов. И тут отечественные материаловеды могут сказать свое слово. Издавна в наших институтах, таких, как Всесоюзный институт авиационных материалов (ВИАМ) или ЦНИИ тяжелого машиностроения, да и не только там, умели выращивать монокристаллические турбинные лопатки метрового размера. Материалом же для них служат высоколегированные никелиевые сверхсплавы. Выращивать монокристалл из чистого никеля гораздо проще, поэтому технология не потребует существенного измене-

ния. Да и сверхсплав, в котором выделяются регулярно расположенные с периодом в десятки или сотни микрон частицы упрочняющей фазы Ni_3Al , тоже пригодится: в монокристаллической подложке можно создать периодически меняющиеся напряжения; они снимут часть напряжения в растущем графеновом листе и улучшат его качество.

Более того, совсем не обязательно использовать массивные подложки. В ЦНИИчермете им. И.П.Бардина в свое время была разработана технология прокатки монокристаллов молибдена в фольгу. Выращивая графен на никелевой монокристаллической фольге, можно значительно уменьшить время последующего растворения такой подложки. Пофантазируем еще и напомним, что наряду с цементацией металлурги применяют и нитроцементацию, когда на поверхности детали растет покрытие из карбидов с нитридами. Возможно, добавка аммиака в CVD-реактор позволит создать графен, легированный азотом. Электродом он вряд ли послужит, но может пригодиться для чего-то другого.

Когда после присуждения премии Гейму предложили войти в научный совет Сколково, он ответил, что концепция «дайте человеку мешок золота, и он поедет куда угодно» кажется ему странной. Действительно, для того чтобы освоить технологию производства тончайшего графита, не надо строить наукоград в чистом поле (отобранном у селекционеров) и приглашать туда ученых со всего света. Практичнее по-хозяйски обойтись с богатствами, доставшимися от советского времени.



ИНФОРМАЦИЯ

РЕШЕНИЕ, ПРИНЯТОЕ В ПОЛЬЗУ ТОЧНОСТИ...

ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КАТАЛИЗАТОРОВ



2004

КАТАЛИТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПРОЦЕССОВ НЕИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ РАБОТЫ ПОД ДАВЛЕНИЕМ



2008

МОНОЦИКЛОВАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ (ДО 150 ATM)



2005

УСТАНОВКА ТЕРМОСТАТИЧЕСКОГО СМЕСИВАНИЯ КАТАЛИЗАТОРОВ КРЕКИНГА



2009

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ КАТАЛИЗАТОРОВ МЕТОДОМ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПРОБЫ

Для исследования каталитических свойств зернистых катализаторов в различных процессах с газовыми и парогазовыми реакционными смесями при атмосферном давлении и в условиях повышенных давлений

ЭФФЕКТИВНО ИСПОЛЬЗУЮТСЯ:

- КАК НАДЕЖНОЕ И ОПЕРАТИВНОЕ СРЕДСТВО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА
- ПРИ ПРОВЕДЕНИИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ НОВЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ И ИЗУЧЕНИЮ КИНЕТИКИ КАТАЛИТИЧЕСКИХ
- ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОЙ АКТИВНОСТИ ВЫПУЩЕННЫХ, ИЗ ПРОМЫШЛЕННОГО АППАРАТА, ОБРАЗЦОВ КАТАЛИЗАТОРА
- ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА РАБОТЫ КАТАЛИЗАТОРОВ
- ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕЗАКТИВАЦИИ КАТАЛИЗАТОРОВ И СПОСОБОВ ИХ РЕГЕНЕРАЦИИ
- ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИХ РАБОТ В УНИВЕРСИТЕТАХ И КОЛЛЕДЖАХ ХИМИЧЕСКОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО