

Учёные разложили по полочкам двухслойный графен

 mipt.ru/news/uchyeny_e_razlozhili_po_polochkam_dvukhsloynnyy_grafen

Группа учёных из Института физико-химических исследований RIKEN (Япония), ИТПЭ РАН, МФТИ, Всероссийского НИИ автоматики и Мичиганского университета (США) систематизировала информацию о двухслойном графене — перспективном для электроники и оптики материале. Статья [опубликована](#) в журнале Physics Reports.

Графеновый бум

Развитие микроэлектроники тесно связано с поиском новых материалов и принципов работы транзисторов. Особое внимание инженеров и учёных привлекает графен — материал, обладающий необычными механическими, электрическими и оптическими свойствами. «Графеновый бум» стартовал в 2004 году, с выходом [статьи](#) Константина Новосёлова и Андрея Гейма, опубликованной в журнале Science. На сегодняшний день графену посвящено более 10 тыс. публикаций и более тысячи патентов.

Одной из интересных модификаций графена является двухслойный графен. Он быстро набирает популярность. Только в 2014–2015 годах двухслойному графену было посвящено более тысячи статей. Разобраться в таком количестве экспериментальных фактов, теорий и гипотез — непростая задача, помочь справиться с которой призваны обзорные статьи. Обзоры играют особую роль в научном процессе: в отличие от оригинальных работ, представляющих на суд общественности исследования отдельных авторов или авторских коллективов, обзорные статьи описывают состояние области в целом, выявляя актуальные тренды и задачи и предлагая ориентиры в море библиографии. Изучение обзорных статей экономит учёным по всему миру огромное количество человеко-часов, ускоряя процесс передачи и восприятия научной информации, способствуя таким образом прогрессу науки. Это отмечает **Александр Рожков**, один из соавторов обзора, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории № 1 Института теоретической и прикладной электродинамики РАН, сотрудник [кафедры](#) электродинамики сложных систем и нанофотоники МФТИ: «Для создания обзора по двухслойному графену авторский коллектив потратил два года, перебирая и систематизируя все самые существенные опубликованные результаты, как экспериментальные, так и теоретические. Результатом этих усилий стала статья, цитирующая около 450 научных работ, посвящённых как собственно двухслойному графену, так и вспомогательным темам. На текущий момент это наиболее полный обзор данной области и по объёму процитированной литературы, и по охвату тематик».

Почему два лучше, чем один?

Одна из причин привлекательности графена — высокая подвижность носителей заряда, в десятки раз больше, чем у кремния — основного материала микроэлектроники. Электроны и дырки (места для электронов) в графене легко и быстро перемещаются под действием внешнего электрического поля. Но транзистор, построенный на однослойном графене, невозможно эффективно «закрыть». Это связано с тем, что у графена нет запрещённой зоны (запрещённых энергетических состояний для электронов), а значит, через него всегда будет течь ток.

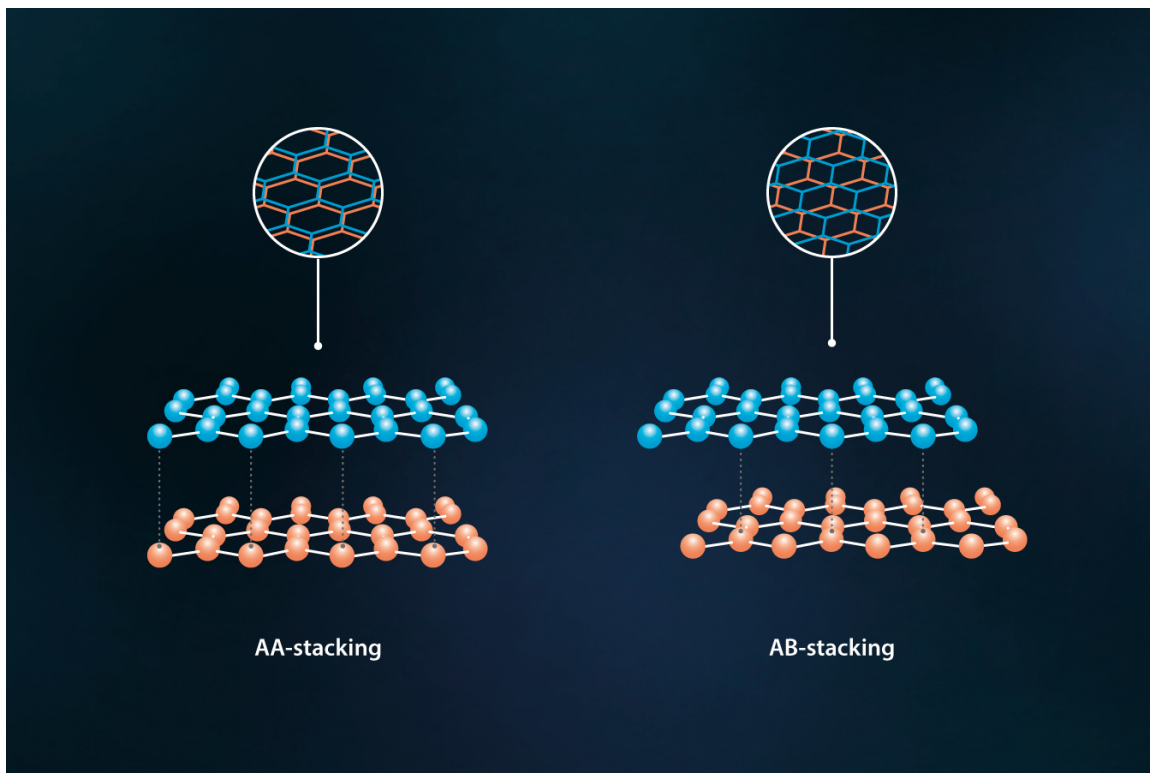


Рис. 1. Двухслойный графен. Тип AA — узлы кристаллической решётки слоёв графена находятся точно друг под другом. Тип AB — второй слой графена развёрнут на 60° относительно первого.

Основным преимуществом двухслойного графена является возможность локально создавать запрещённую зону и управлять её величиной, прикладывая разность потенциалов перпендикулярно слоям. Это значит, что на его основе может быть построено **новое поколение транзисторов**, обладающее лучшими быстродействием и энергоэффективностью, что особенно важно для создания портативных устройств, работающих на аккумуляторах. Кроме того, «настройка» запрещённой зоны расширяет возможности применения в оптоэлектронике и датчиках.

Но говорить о революции в микроэлектронике ещё рано. Получить качественные образцы двухслойного графена намного сложнее, чем однослойного, при этом электрические свойства двухслойного графена (например, подвижность) существенно зависят от качества и точности совмещения слоёв. Существует три основных типа: AA — узлы кристаллической решётки слоёв графена находятся точно друг под другом, AB — второй слой графена развёрнут на 60° относительно первого (см. рис. 1) и подкрученный — слои повернуты на произвольный угол. И каждый из них обладает своими особенностями, которые необходимо изучить.

Графеновое будущее

К настоящему моменту научное сообщество уже «переварило» большое количество теоретических идей и концепций раннего этапа. Предсказания, сформулированные ещё в дографеновую эпоху (80–90-е годы прошлого века), а также на начальных стадиях «графенового бума», были проверены экспериментально в последнее десятилетие благодаря бурному развитию графеновой экспериментальной науки. Сейчас графен ищет своё место в прикладных областях. Новые задачи возникают и в фундаментальной (не имеющей непосредственного и очевидного прикладного значения)

физике графеновых систем. Например, остаётся актуальным вопрос о влиянии межэлектронного отталкивания на свойства графеновых систем. В этой связи обсуждаются достаточно новые для физики твёрдого тела концепции, такие как маргинальная жидкость Ферми или топологически упорядоченные состояния.

Авторы статьи занимаются изучением двухслойного графена около шести лет. За это время они внесли свой вклад в понимание его электронной структуры. В частности, ими проведен анализ возможного спонтанного нарушения симметрии в графене типа AA (теоретически предсказано, что электронная подсистема в AA-графене неустойчива), указана возможность возникновения антиферромагнетизма и пространственно-неоднородных состояний, а также исследовались одноэлектронные энергетические уровни подкрученного графена в зависимости от угла поворота и числа атомов в суперячейке (периодической структуре с большим количеством атомов, которая получается за счёт небольшого поворота атомных плоскостей относительно друг друга, см. рис. 2).

Артём Сбойчаков, соавтор обзора, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории № 1 ИТПЭ РАН, прокомментировал: «*Вообще системы с муаром, и подкрученный графен в частности, обладают весьма богатой физикой, прежде всего, из-за их сложной структуры. При этом на сегодняшний день некоторые моменты, например эффекты электрон-электронного взаимодействия, остаются непроработанными. Поэтому в ближайшее время можно ожидать много интересных открытий в этой области исследований*».

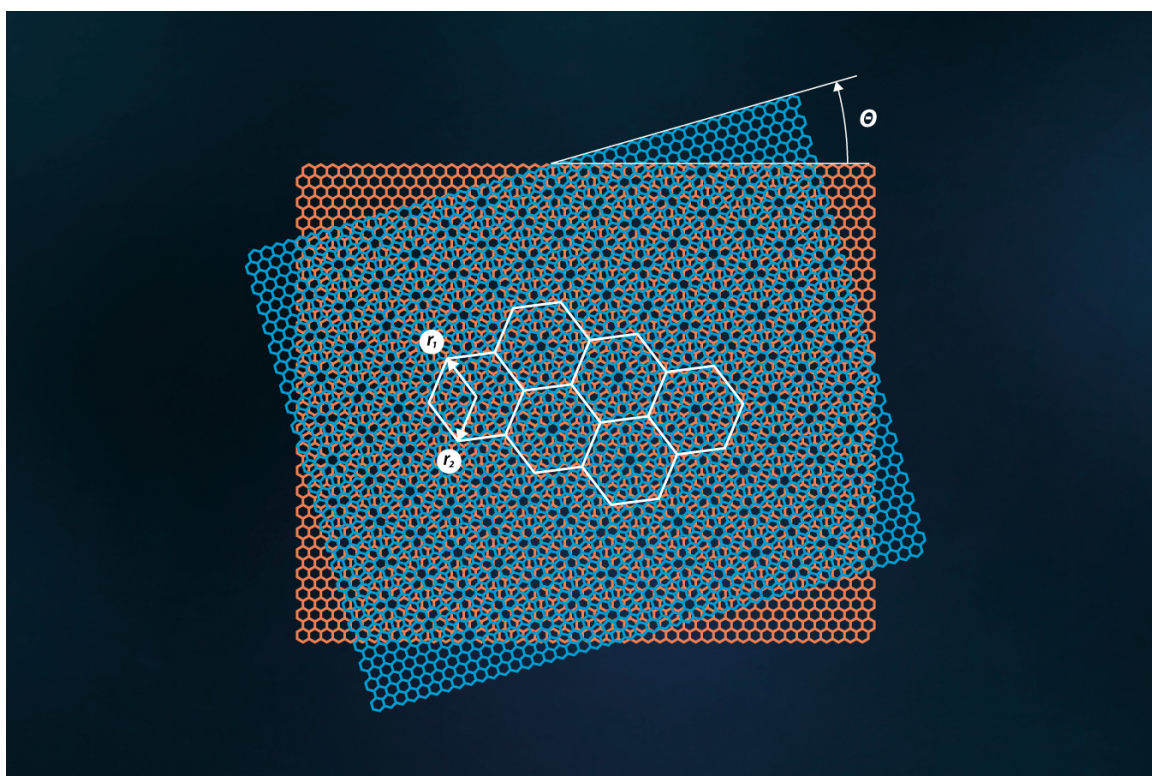


Рис. 2. Третий тип двухслойного графена — подкрученный. Белым цветом выделены границы суперячеек (ячеек муара).

В свою очередь, **Александр Рахманов**, соавтор обзора, профессор МФТИ, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией № 1 ИТПЭ РАН, отметил: «У нашего коллектива есть серьёзный опыт теоретической работы в области учёта эффектов электрон-электронного взаимодействия. Сейчас, помимо чисто аналитических методов, ответы на многие интересные теоретические вопросы удаётся получить благодаря компьютерным средствам исследований, роль которых сейчас чрезвычайно высока. И Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН (базовый для кафедры электродинамики сложных систем и нанофотоники при ФПФЭ МФТИ), и Институт физико-химических исследований RIKEN в Японии — два основных учреждения, где работают представители авторского коллектива, — располагают весьма значительными вычислительными ресурсами, что даёт возможность производить серьёзные численные исследования. Резюмируя как собственный опыт исследовательской работы, так и впечатления, полученные в процессе работы над обзором, можно предполагать, что графен и системы на его основе будут оставаться источником научного вдохновения для многих исследователей: и теоретиков, и экспериментаторов — на годы вперёд».