

О двухмерной формы углерода - графене замолвим мы слово

Академик Олег Фиговский

Графен - один из наиболее перспективных и востребованных высокотехнологичных материалов. В настоящее время основным направлением использования графена является производство высокоэффективных систем накопления энергии - литиевых батарей и суперконденсаторов. Такие системы широко применяются в самых различных отраслях, от производства носимых цифровых устройств до автомобильной промышленности и зеленой энергетики. Особенно востребованы суперконденсаторы на основе графена, способные быстро накапливать и отдавать большие объемы энергии. По состоянию на 2022 год суммарный объем мирового рынка графена оценивается в \$865 млн. Рынок растет исключительно высокими темпами, в среднем на 19,4% в год. Основные производства графена сконцентрированы сейчас в странах Европы и в США. Также на рынке присутствует большое число компаний малого и среднего бизнеса из стран Юго-Восточной Азии

После открытия графена (двухмерной формы углерода) обнаружены более десяти веществ со схожей структурой (гексагональный нитрид бора, GaN и AlN, диалкогениды переходных металлов и др.). Их физико химические свойства имеют огромный практический потенциал и частично уже используются в композиционных материалах, защитных покрытиях, биомедицинских датчиках, фармацевтике и еще примерно 40 отраслях. Изучение 2D веществ позволило открыть много важных и неожиданных явлений, а всеобщий интерес к таким системам подтверждается присуждением двух Нобелевских премий за последнее десятилетие: в 2010 г. Гейму и Новоселову за исследование графена и в 2016 г. Костерлицу и Таулесу за теорию топологических фазовых переходов (теория Березинского Костерлица Таулеса), важной составной частью которой является теория плавления двумерных кристаллических систем. В частности, графен представляет собой двумерный металл, в котором электронный спектр имеет линейную дисперсию и описывается безмассовым дираковским гамильтонианом. Высокоскоростной транспорт электронов и их высокая подвижность ($2,5 \cdot 10^5 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) делают графен привлекательным материалом для наноэлектроники, в особенности для высокочастотных применений. Его оптические (оптическое поглощение одним слоем $\approx 2,3\%$), термические (коэффициент теплопроводности 3000–5000 Вт·м⁻¹·К⁻¹) и механические свойства (модуль Юнга 10^{12} Па, собственная прочность на разрыв $\sim 1,3 \cdot 10^{11}$ Па) привлекательны для микро и наномеханических систем, тонкопленочных транзисторов, прозрачных и проводящих композитов и электродов, гибкой и печатаемой оптоэлектроники и фотоники. Большая удельная площадь поверхности (до 2400 м²/г), химическая чистота (до 99,999%) и возможность изменения свойств присоединением различных функциональных молекул делают графен и его популярные производные — оксид графена и фторид графена — перспективными материалами для биотехнологии и медицины.

На этом фоне особо привлекательными выглядят создание и использование ферромагнитного графена. Это особый вид графена, который обладает свойствами ферромагнетизма, то есть способен сохранять намагниченность даже в отсутствие внешнего магнитного поля. Благодаря своей намагниченности он позволит хранить больше информации на меньшей площади и создавать более компактные и быстрые электронные устройства. Ученые из Красноярского научного центра СО РАН с коллегами из Санкт-Петербурга, Новосибирска и Москвы получили стабильный ферромагнитный графен, добавив к нему атомы магнитных металлов [1]. Новый материал проявляет ферромагнитные свойства при комнатной температуре. Авторы исследования подчеркивают, что это важный шаг в развитии спинтроники — области, занимающейся изучением и применением спиновых свойств электронов для хранения, передачи и обработки информации.

Специалисты вырастили графен на подложке из карбида кремния методом термического разложения. Затем они внедрили в графен атомы магнитных металлов — железа и кобальта и изучили характеристики новой системы. Внедрение железа и кобальта в графен позволило создать материал, который обладает ферромагнитными свойствами, то есть поддерживает намагниченность даже в отсутствие внешнего магнитного поля. Особенность нового композита оказалась еще и в том, что он сохраняет это свойство при комнатной температуре. Такой материал может быть использован без необходимости в дополнительном охлаждении. «Мы показали, что графен на подложках из карбида кремния с добавлением магнитных металлов может проявлять ферромагнитные свойства при комнатной температуре. Это открывает новые возможности для хранения, передачи и обработки информации, создания новых типов запоминающих устройств, процессоров и коммуникационных систем. Результаты исследования также важны для понимания фундаментальных физических процессов, в частности, магнитных явлений, происходящих в графене и других двумерных материалах. Эти знания помогут в создании более сложных систем с уникальными физическими свойствами», — рассказал Антон Тарасов, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией радиоспектроскопии и спиновой электроники Института физики им. Киренского СО РАН.

Ученые определили особенности термической устойчивости новых 2D-материалов, аналогов природного минерала валлериита, и научились их контролировать, добавляя в состав примеси металлов [2]. Это позволит расширить потенциальные области применения нового класса двумерных сульфидно-гидроксидных синтетических материалов, например, использовать для получения высокотемпературной сверхпроводимости. Двумерные материалы, такие как графен, привлекают большое внимание благодаря своим уникальным свойствам, которые могут найти применение в электронике, катализаторах, сенсорах, биомедицине и других областях. Недавно ученые Красноярского научного центра СО РАН разработали новый метод синтеза двумерных свободных от примесных фаз наночешуек синтетического валлериита и точилинита. Такие чешуйки состоят примерно из дюжины сложенных друг на друга монослоев сульфидов и гидроксидов. Полученные синтетические минералы были выделены в новое семейство 2D-материалов с многообещающими, но пока еще почти неизученными физическими и химическими свойствами. Чтобы понять специфику поведения новых 2D-материалов на основе валлериита, ученые из Красноярского научного центра СО РАН провели исследование термической стабильности и реакционной способности синтетических образцов слоистых материалов, аналогов природного минерала валлериита, представленных «наночешуйками». Эксперименты проводились в искусственно созданных атмосферах: окислительной – с избытком кислорода, и инертной.

Исследование термической стабильности валлериитоподобных материалов показало, что можно несколько регулировать характеристики за счет изменения состава слоев. Например, добавка алюминия в гидроксидный слой валлериита повышает его стабильность и эффективно препятствует окислению. Она также снижает содержание железа в гидроксидной части и уменьшает способность материала проводить тепло. Это, в свою очередь, замедляет химические реакции, протекающие с поглощением тепла, и наоборот ускоряет реакции, при которых тепло выделяется. Например, присутствие алюминия повышает температуры протекания процесса дегидроксилирования – удаления гидроксильных групп из вещества, до температуры около 500 градусов Цельсия. «Ранее нами были успешно разработаны гидротермальные методики получения двумерных сульфидно-гидроксидных материалов, аналогов природных минералов валлериита и точилинита. В отличие от формирования указанных минералов в природных условиях, синтез в лаборатории позволяет тонко управлять составом и строением слоев таких материалов, что открывает широкие возможности их практического использования. Устойчивость материала к действию температуры является важной характеристикой, определяющей области его дальнейшего применения. Поэтому мы рассмотрели границы термической устойчивости синтетических двумерных материалов с добавленным литием и алюминием в окислительной и инертной атмосферах. Мы выяснили, что, например, в инертной атмосфере процесс деградации материала начинается при температурах свыше 400°C, а до указанной температуры материал достаточно стабилен», — рассказал Роман Борисов, кандидат химических наук, научный сотрудник Института химии и химической технологии СО РАН.

На создание и изучение свойств двумерных слоисто-гидроксидных материалов ученых первоначально натолкнули существующие в природе минералы – точилинит и валлериит, которые в больших количествах встречается в Норильском медно-никелевом рудном месторождении, но остаются невовлеченными в промышленную переработку из-за недостаточного понимания строения и свойств. Изучение синтетических материалов может также помочь в создании основ для вовлечения указанных минералов в переработку. «Мы выяснили некоторые специфические характеристики 2D-слоистых структур, например, примеси алюминия и

лития в гидроксидных слоях изменяют характеристики материала. Информация о стабильности и реакциях валлериитов при повышенных температурах необходима для многих потенциальных применений; кроме того, это необходимо для понимания основ химии двумерных слоистых материалов и имеет практическое значение для обогащения полезных ископаемых и металлургии. Результаты этого исследования проливают свет на химическую реакционную способность 2D-материалов семейства валлериита и открывают путь для настройки их характеристик, в том числе в новых приложениях, где важно термическое поведение. Понимание особенностей структуры, электронных свойств и реакционной способности материалов группы валлериита может заложить основы для получения высокотемпературной сверхпроводимости», — заключил кандидат химических наук старший научный сотрудник Института химии и химической технологии СО РАН Максим Лихацкий.

Ученые из Пенсильванского университета (США) разработали устройство из графенового нанокompозитного материала, которое может определять уровень глюкозы в поте в течение трех недель, одновременно отслеживая температуру тела и уровень pH [3]. Новый датчик представляет собой пластырь, ширина которого примерно в два раза превышает ширину почтовой марки. Он крепится к коже клейкой лентой и может передавать собранные данные по беспроводной сети на компьютер или мобильное устройство для оценки уровня глюкозы в реальном времени. Команда встроила в устройство электроды из графена, модифицированного лазером (LIG). С помощью лазерной обработки ученые создали сплав из нанокompозитных материалов на основе углерода и сплавов серебра и золота — металлов с высокой проводимостью, которые, к тому же, устойчивы к окислению. Материал, нагретый с помощью простой лазерной обработки, также противостоит агломерации — то есть наночастицы не собираются в кластеры, ограничивая площадь поверхности материала. Датчик, обработанный лазером, теряет только 9% своей чувствительности к глюкозе в течение трех недель. Для сравнения: немодифицированный датчик теряет чувствительность на 20%. Устройство позволяет калибровать измерения уровня глюкозы на основе колебаний pH пота и температуры тела в результате таких действий, как физические упражнения и прием пищи.

Исследователи из Пенсильванского университета разработали упрощенную модель, которая имитирует, как вкус влияет на то, что мы едим, в зависимости от потребностей и желаний [4]. Система состоит из датчиков «электронного языка» и модели вкусовой зоны коры головного мозга. Вкусовые рецепторы языка человека преобразуют химические данные в электрические импульсы. Эти сигналы передаются через нейроны во вкусовую зону коры головного мозга, где сложная сеть нейронов формирует восприятие вкуса. Исследователи разработали упрощенную биомиметическую версию этого процесса из двумерных материалов толщиной от одного до нескольких атомов. Искусственные вкусовые рецепторы состоят из крошечных электронных датчиков на основе графена, хемитранзисторов, которые обнаруживают газы или химические молекулы. В другой части схемы используются мемтранзисторы — транзисторы, запоминающие прошлые сигналы, изготовленные из дисульфида молибдена. Свойства двух разных 2D-материалов дополняют друг друга, образуя искусственную вкусовую систему. Например, обнаружив ионы натрия, система «почувствует» соленый вкус, говорят авторы исследования.

Этот процесс универсален, чтобы его можно было применить ко всем пяти основным вкусовым профилям: сладкому, соленому, кислому, горькому и умами. По словам разработчиков, такая роботизированная вкусовая система имеет многообещающие потенциальные применения: от диет, основанных на эмоциональном интеллекте, для похудения до персонализированных предложений еды в ресторанах. Предстоящая цель исследовательской группы — расширить вкусовый диапазон электронного языка. Мы пытаемся создать массивы графеновых устройств, чтобы имитировать около 10 000 вкусовых рецепторов нашего языка, каждый из которых немного отличается от других, что позволяет нам различать тонкие различия во вкусах, — Саптарши Дас, соавтор исследования. Исследователи полагают, что эта концепция вкусового эмоционального интеллекта в системе ИИ будет транслироваться на другие чувства, такие как визуальный, звуковой, тактильный и обонятельный эмоциональный интеллект, чтобы помочь в разработке настоящей роботизированной системы, работающей как человеческий мозг.

Китайские ученые экспериментально обнаружили топологические фононы в графене. Чтобы исследовать фононные спектры во всей двумерной зоне Бриллюэна, они использовали метод электронной микроскопии с высоким разрешением характеристических потерь энергии электронов [5]. Фононы играют важную роль в тепловых, механических и электронных свойствах кристаллических материалов. При этом особый интерес представляют топологические фононные состояния, возникающие на пересечении фононных ветвей с различными параметрами. Эксперименты по изучению таких состояний начали проводить достаточно недавно. В двумерных материалах топологические фононные состояния ранее не наблюдались из-за высокого необходимого разрешения по энергии от 0,1 до 10 миллиэлектронвольт. Такого разрешения по энергии практически невозможно достичь при изучении фононных состояний традиционными методами — при помощи неупругого рассеяния рентгеновских лучей или нейтронов. Это существенно усложняет экспериментальное изучение топологических фононных состояний по сравнению с аналогичными состояниями для электронов. При этом топологические состояния электронов в двумерных материалах приводят к неожиданным свойствам. Ли Цзяде (Jiade Li) с коллегами из Национальной лаборатории физики конденсированных сред в Пекине и ряда других китайских институтов использовали для исследования фононных структур в графене метод электронной микроскопии высокого разрешения по характеристическим потерям энергии электронов.

Исследователи из Национальной лаборатории Ок-Риджа Министерства энергетики США изобрели покрытие, которое может значительно уменьшить трение в обычных несущих системах с движущимися частями, от приводов транспортных средств до ветряных и гидротурбин. В основе разработки — поврежденные углеродные нанотрубки. Многостенные углеродные нанотрубки покрывают сталь, отталкивают коррозионную влагу и служат резервуаром для смазки, объясняют разработчики. Для изготовления покрытия исследователи нагревают диск из нержавеющей стали, чтобы на поверхности образовались частицы оксида металла. Затем они используют химическое осаждение из паровой фазы, чтобы ввести углерод. Оксиды металла «сшивают» углерод, атом за атомом, формируя крошечные трубчатые структуры. Новые нанотрубки не обеспечивают смазывающую способность до тех пор, пока не будут повреждены. Углеродные нанотрубки разрушаются при трении, но становятся новым объектом. Эти сломанные углеродные нанотрубки представляют собой кусочки графена. Они размазываются по поверхности и соединяются с областью контакта, становясь тем, что мы называем трибо-пленкой, покрытием, образующимся в процессе, — Цзюнь Цюй, соавтор исследования. Исследователи отмечают, что если обе контактирующие поверхности покрываются частицами, то при движении происходит трение графена о графен. Последний компонент — небольшое количество смазывающего масла. Без него трение слишком агрессивно удаляет углеродные нанотрубки и покрытие не может сформироваться. Анализ показал, что использование такой смазочной поверхности снижает коэффициент трения до 0,001, намного ниже порогового значения сверхсмазывающей способности материалов. При этом свойства сохранялись при испытаниях более чем на 500 000 циклов трения, при непрерывном скольжении в течение трех часов, одного и двенадцати дней.

Взяв за основу высококачественный графен, ученые из Университета Манчестера преобразовали его в состояние плазмы из быстро движущихся «фермионов Дирака», которые проявляли удивительно высокую подвижность несмотря на постоянное рассеивание. Свойства высокой подвижности и нейтральности дираковской плазмы стали существенно важными компонентами огромного магнетосопротивления, «За последние 10 лет электронные свойства графеновых устройств существенно улучшились, и все устремились искать новые феномены при низких температурах жидкого гелия, игнорируя то, что происходит в условиях окружающей среды. Это, пожалуй, не так удивительно, потому что чем холоднее образец, тем интереснее становится его поведение. Мы решили включить тепло и внезапно обнаружили целую россыпь неожиданных феноменов», — сказал Алексей Бердюгин, один из авторов статьи, вышедшей в Nature. Вдобавок к рекордному магнетосопротивлению исследователи обнаружили, что при повышенных температурах нейтральный графен становится так называемым странным металлом. Это класс материалов, у которых рассеяние электронов становится чрезвычайно быстрым. Поведение странных металлов плохо изучено и остается загадкой. Исследование манчестерской команды добавляет новые вопросы. В частности, графен проявляет огромное линейное магнетосопротивление в полях выше нескольких Тл, и это слабо зависит от температуры. Такое магнетосопротивление в сильном поле, опять же, достигает рекордных значений. Феномен линейного магнетосопротивления оставался загадкой на протяжении ста с лишним лет, с тех пор как его впервые наблюдали ученые. Новое исследование британских ученых раскрывает важные нюансы причин появления эффекта странных металлов и линейного магнетосопротивления.

Бестопливные электрогенераторы для электроснабжения частного дома, квартиры и даже небольшого промышленного предприятия, например тепличного хозяйства, можно будет приобрести в магазине, как, например, стиральную машину. Нашу мобильность обеспечивают электромобили, которым не нужна зарядка от централизованных линий электропередач. Насколько реалистична эта картина и есть ли шанс на воплощение подобных представлений в жизнь? Воплощение этих идей в жизнь – это утопия или закономерный результат научно-технологического развития человечества? Готово ли общество к таким кардинальным переменам, когда ты садишься за руль электромобиля, и тебе не нужно беспокоиться, что аккумуляторная батарея разрядится, и электромобиль встанет в «чистом поле»? Бестопливные технологии получили сегодня определено уникальный шанс на внедрение, так как пришло их время. Ресурсопотребляющие страны стремятся избавиться от зависимости в покупках энергоресурсов, предпочитая повышать эффективность своих экономик за счёт внедрения бестопливных технологий, и одна из главных ролей в этом процессе принадлежит наноматериалам. Солнечную энергетику и ветрогенерацию тоже следует отнести к бестопливным технологиям. Однако данные технологии отличаются нестабильностью выработки электроэнергии. Так выработка ветровых электростанций (ВЭС) в Евросоюзе 1.04.23 превышала 30% в общем объеме электрогенерации, а уже 5.04.23 опустилась до 6,8%, следует из данных ассоциации Wind Europe. Такая нестабильность электрогенерации предполагает необходимость иметь маневренные мощности, что увеличивает капитальные затраты и повышает тарифы энергопотребления для потребителей.

Однако, уже начали появляться технологии, относящиеся к гарантированным источникам электроснабжения и генерирующим электроэнергию в базовом режиме вне зависимости от погодных условий. Среди таких наиболее перспективными считаются технологии, связанные с генерацией электроэнергии под воздействием излучений невидимого спектра, так как именно мощность излучения невидимого спектра стабильна днём и ночью и не зависит от погодных условий. Кроме того, эти излучения обладают большой проникающей способностью, что не требует особых условий для размещения электрогенерирующего оборудования в отличие, например, от солнечных панелей. «Собрать» электроэнергию от энергетических полей – задача архисложная. Именно поэтому после смерти сербского учёного Никола Теслы решить эту задачу или хотя бы повторить его эксперименты учёным не удавалось, хотя не последнюю роль в блокировании развития подобных технологий оказывают силы, не заинтересованные в их существовании и промышленном внедрении. В интернете можно найти множество подобных примеров. Настоящий прорыв в разработке способов получения электроэнергии под воздействием энергетических полей излучений невидимого спектра произошел несколько лет назад. Получение и исследование свойств наноматериала графена дало возможность компании [Neutrino Energy Group](#) создать материал, позволивший преобразовывать энергию окружающих полей излучений в электрический ток.

Наноматериал состоит из чередующихся слоев графена и легированного кремния. Графен (углерод) относится к 4 -ой группе периодической системы химических элементов Менделеева и имеет 4 ковалентных связей. Поэтому в качестве материала для пластин, между которыми размещается слой графена, был выбран кремний, который также относится к этой же группе. Удельная проводимость графена близка к удельной проводимости таких металлов, как медь, но кремний относится к классу полупроводников. Для создания в кремнии электронной или электропроводности n-типа кремний допирован элементами 5 или 6 группы периодической системы Менделеева [7]. Электрический ток, генерируемый наноматериалом, наносимым на металлическую подложку, является постоянным. В наноматериале графеновые волны каждого слоя одинаково воздействуют на обе кремниевые пластины, между которыми располагается слой графена, и по закону Ленца электродвижущая сила индукции в замкнутом контуре равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока через поверхность, поэтому заряженные частицы должны направляться в обе стороны, но они направляются только в одну сторону. Для получения такого эффекта учёные компании Neutrino Energy Group наносили плёночные покрытия из легирующих элементов в каждом слое, которые создают p-n переход, обеспечивающий эффект плёночного диода, пропускающий электрический ток только в одном направлении и блокирующий прохождение электрического тока в другом направлении. В настоящее время с пластины размером 200x300 мм учёные могут стабильно получать напряжение 1.5 В и силу тока 2.0 А.

Графен является уникальным материалом, относясь к 2D материалам. Однако, его поведение можно описать только в трехвекторной системе координат. Из-за шестигранной кристаллической решетки тепловое движение атомов и удары нейтрино, имеющих массу о ядро атомов графена, приводят к появлению микровибраций графена. Именно механизм микровибраций и является тем механизмом, который позволяет генерировать электрический ток. Графен (углерод) имеет порядковый номер 12 в периодической системе химических элементов, поэтому ядро атома является одним из самых лёгких, что определяет более выраженный эффект при столкновении нейтрино, имеющих массу, с ядрами атомов графена, а значит усиливают амплитуду и частоту колебаний «графеновой» волны. В настоящее время компания Neutrino Energy Group совместно с индийскими партнёрами адаптирует «технология для создания корпуса электромобиля, который будет заряжать аккумуляторную батарею и создавать тяговую силу. Причём электрогенерация будет происходить как в движении, так и при стоянке электромобиля днём и ночью. По плану на разработку самозаряжающегося электромобиля отводится 3 года. Анализируя актуальную ситуацию на рынке бестопливной электрогенерации, можно сделать вывод, что первые шаги в развитии экологичной и безопасной энергетики сделаны, и мир постепенно готов принять те изменения, которые принесет с собой внедрение новых «чистых» прогрессивных энерготехнологий.

Австралийские ученые разработали для новых датчиков специальную структуру с трехмерным рисунком, которая не зависит от липких проводящих гелей и позволяет измерять электрическую активность мозга даже среди волос и изгибов головы. Врачи контролируют электрические сигналы мозга с помощью электроэнцефалографии (ЭЭГ), при которой специальные электроды либо имплантируют, либо размещают на поверхности головы. ЭЭГ помогает диагностировать неврологические расстройства, а также ее можно включить в интерфейсы, которые используют мозговые волны для управления внешним устройством – например, протезом, роботом или даже видеоигрой. В большинстве неинвазивных вариантов используются «мокрые» датчики, которые наклеиваются на голову с помощью липкого геля. Он может раздражать кожу головы и иногда вызывать аллергические реакции. В качестве альтернативы исследователи разрабатывают «сухие» датчики, для которых не требуются гели, но до сих пор ни один из них не работал так же хорошо, как «мокрый».

Подходящий материал для такого датчика – графен. Однако он слишком плоский и поэтому не может надежно крепиться к голове человека с ее неровными изгибами. В этой работе ученые попробовали придать графену объем [8]. Они создали несколько трехмерных структур с графеновым покрытием различной формы, каждую – толщиной около 10 мкм. Из протестированных форм шестиугольный узор лучше всего работал на волнистой, покрытой волосами поверхности затылочной области – месте у основания головы, где расположена зрительная кора головного мозга. Команда включила восемь таких датчиков в эластичную повязку на голову, которая удерживала их на затылке. В сочетании с гарнитурой дополненной реальности, отображающей визуальные подсказки, электроды могли определять подсказку, а затем работать с компьютером, чтобы превращать сигналы в команды, которые управляли движением четвероногого робота – полностью без помощи рук. Несмотря на то, что новые электроды еще не работали так же хорошо, как «мокрые», эта работа представляет собой первый шаг к разработке надежных, легко внедряемых «сухих» датчиков, которые помогут расширить применение интерфейсов «мозг-машина».

Бездефектный графен непроницаем для всех атомов и ионов в естественных условиях окружающей среды. Но обладает высокой проницаемостью для протонов — ядер атомов водорода. Исследователи Массачусетского технологического института объяснили причину проницаемости 2D-кристаллов, таких как графен, для протонов и на этой основе разработали новый метод производства мембран для водородной энергетики. Прогноз мирового рынка графена [9] на период исследования 2018 – 2028. Размер рынка (2023) USD 0,79 млрд долларов США. Размер рынка (2028) USD 4,84 млрд долларов США CAGR(2023 - 2028) 43.64 %. Разработка монокристаллических графеновых листов в качестве заменителя медной фольги и растущее использование графена в сенсорных экранах, вероятно, послужат возможностями для изучаемого рынка. На Азиатско-Тихоокеанский регион приходится самая высокая доля рынка, и ожидается, что он будет доминировать на рынке в течение прогнозируемого периода.

References

1. [Sergei O. Filnoy, Dmitry A. Estyunin ... Room Temperature Ferromagnetism in Graphene/SiC\(0001\) System Intercalated by Fe and Co. Rapid Research Letters Early View. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pssr.202300336>](#)

2. Maxim N. Likhatski, Roman V. Borisov ... Specificity of the Thermal and Reactivity of Two-Dimensional Layered Cu–Fe Sulfide-Mg-Based Hydroxide Compounds (Valleriites). *ACS Omega* 2023, 8, 39, 36109–36117
3. Fanaz Lorestari, Xianze Zhang ... A Highly Sensitive and Long-Term Stable Wearable Patch for Continuous Analysis of 4 in Sweat. *Advanced Functional Materials Early View* <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adfm.202306117>
4. Subir Ghosh, Andrew Pannone ... An all 2D bio-inspired gustatory circuit for mimicking physiology and psychology of feeding behavior. *Nature Communications* volume 14, 021 (2023)
5. Jade Li, Jiangxu Li ... **Direct Observation of Topological Phonons in Graphene** *Phys. Rev. Lett.* 131, 116602 – 2023
6. Chanaka Kumara, Michael J. Lance ... Macroscale superlubricity by a sacrificial carbon nanotube coating. *Materials Today Nano*, Volume 21, March 2023, 100297.
7. Patent № EP3265850A1. Neutrino Deutschland GmbH.
8. Shaikh Nayeem Faisal, Tien-Thong Nguyen Do ... Noninvasive Sensors for Brain–Machine Interfaces Based on Micropatterned Epitaxial Graphene. *ACS Appl. Nano Mater.* 2023, 6, 7, 5440–5447.
9. <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/graphene-market>