

## ГРАФЕН И ОБЛАСТИ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

<sup>1</sup>Рахмонов Турдимухаммад Тухтаматович,

<sup>2</sup>Камилов Шерзод Хошимович,

<sup>3</sup>Тешабоева Дилбар Рустам кизи

<sup>1</sup>Ташкентский университет прикладных наук

<sup>2</sup>Национальный университет Узбекистана

<sup>3</sup>Ташкентский государственный педагогический университет

t.rakhmonov@mail.ru

<https://doi.org/10.5281/zenodo.13353597>

### Аннотация:

В данной обзорной статье приведены материалы исследований, проведенных различными авторами по развитию использования графена в электронике. При этом представлены сведения его применения в различных областях.

### Ключевые слова:

Графен, графеновая решётка, микроэлектроника, высокочастотный транзистор, флэш-память, суперконденсатор, дисплеи, датчик

### ВВЕДЕНИЯ

Графен был экспериментально обнаружен в 2004 г. двумя английскими учеными российского происхождения-Андреем Геймом и Константином Новосёловым, за что они вскоре получили Нобелевскую премию по физике [1], Графен представляет собой слой атомов углерода, соединенных в гексагональную двумерную кристаллическую решетку. Это, по сути, пленка углерода толщиной в один атом, имеющая строго упорядоченную кристаллическую структуру. Графен можно считать развернутой в плоскость одностенной нанотрубкой или двумерным фуллереном, или же отдельно взятым атомарным слоем из множества таких слоев, составляющих монокристалл пиролитического графита.

Слой графита толщиной в один атом обладает рядом ценных свойств: отличается высокой стабильностью, в т.ч. и при комнатной температуре, а также высокой тепло и электропроводностью. Подвижность электронов в графене в 10-20 раз выше, чем в арсениде галлия. Из этого материала можно создавать чипы, пригодные для работы на терагерцовых частотах. Хотя монослой графита обладают такой же подвижностью носителей зарядов при комнатной температуре, как и нанотрубки, однако для него, в общем случае, применима обычная, отработанная годами планарная технология. К тому же, благодаря двумерной структуре управляющий ток может быть легко увеличен за счет изменения ширины проводящего канала.

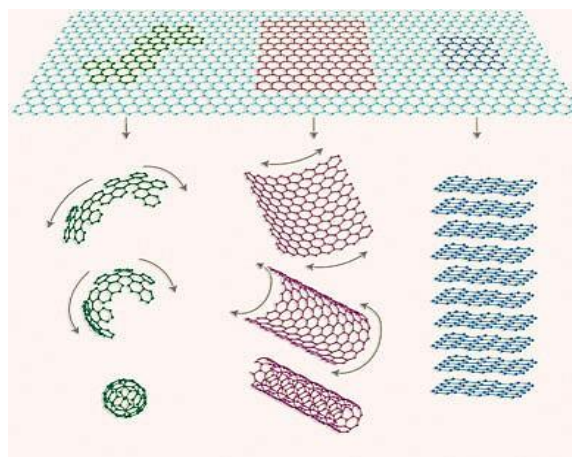


Рис.1. Структура графена

Графен как проводник и полупроводник

На пути создания графеновой электроники остается еще много препятствий, в т.ч. невозможность выращивания больших графеновых пластин, высокая стоимость материала и трудности с управлением его проводимостью. В частности, еще недостаточно разработаны способы получения полупроводников из графена - до сих пор графен и его производные известны только в виде проводников и изоляторов.

Недавно был получен полупроводниковый материал на основе графена, в котором атомы кислорода заключены в гексагональную структуру графена. По замыслу исследователей, в ходе нагрева оксида графена в вакууме должен был выделиться кислород и получится многослойный графен. Однако при повышении температуры атомы углерода и кислорода стали выстраиваться в упорядоченную структуру монооксида графена, не существующего в естественном виде.

Полученный материал обладает полупроводниковыми свойствами и имеет широкие перспективы применения в производстве электроники. Меняя температуру нагрева, исследователи получили четыре новых материала, которые были отнесены к категории ГМО. В настоящее время определяется устойчивость монооксида графена и возможность масштабировать этот материал для производства [2].

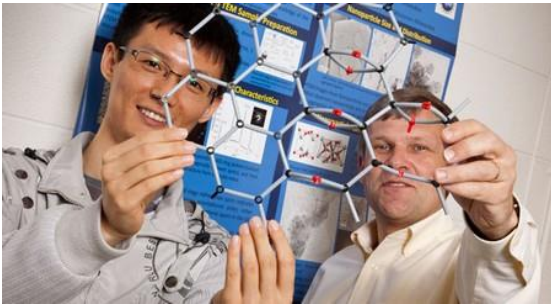


Рис.2. Исследователи демонстрируют атомную структуру монооксида графена

Ранее было открыто другое интересное свойство графена, которое заключается в том, что определяющую роль в формировании свойств графена играет материал, на котором он выращивается. В частности, если подложку, на которой будет выращена структура, активировать кислородом, то полученный лист графена будет обладать свойствами полупроводника, если водородом - то свойствами металла. «Варьируя химический состав подложки, мы можем управлять природой графена, наделяя его свойствами полупроводника или металла», - сообщил Сарож Наяк (Saroj Nayak), профессор кафедры физики и астрономии Ренсселарского политехнического института.

### Управление током в графене: нитрид бора может стать ключом к графеновой микроэлектронике

Графен - самый тонкий в мире материал. Почти единственным на сегодняшний день принципиальным препятствием для его применения является невозможность управления электронным потоком по графену. Например, до сих пор не удалось найти способ остановить ток в графене: на атомарном уровне работают законы квантовой механики, которые сильно отличаются от тех, что действуют на макроуровне. Электроны в слое графена проходят сквозь препятствия (т. н. туннельный эффект, применяемый также в

некоторых радиоэлектронных приборах), а не отскакивают от них, как это происходит в макромире. Недавно было обнаружено, что при наложении слоя графена на слой нитрида бора возникает новая гексагональная структура, которая определяет путь прохождения электронов по образцу [3].

SIMPLE BINARY SWITCH

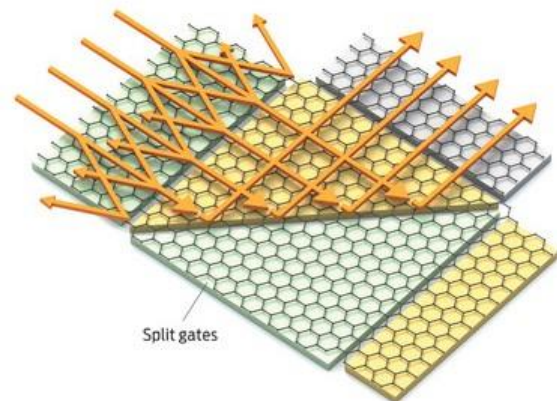


Рис.3. Один из способов создания графенового двоичного триггера. Квадратная графеновая ячейка разбивается на два треугольных участка. Электроны отражаются, когда напряжения имеют разную полярность, и проходят, когда напряжения одинаковы

Этот факт может стать ключом к созданию нового типа электронных устройств, отличающихся малым размером и низким энергопотреблением. Из-за этой особенности контролировать распространение электронов по слою очень сложно. Недавние исследования показали, что при наложении пленки нитрида бора на слой графена удается задержать некоторые электроны. Это первый шаг на пути решения проблемы.

Нитрид бора имеет сходную с графеном структуру, однако является диэлектриком. Пленки из нитрида бора можно использовать также для улучшения электрических свойств графена. Они предотвращают флуктуации электронного заряда. Если менять угол между кристаллическими решетками, количество электронов, которые не могут проходить сквозь решетку, увеличивается. Коэффициент задержания зависит от размера гексагонального рисунка, который возникает при угловом смещении одного из слоев (аналогичный эффект - возникновение муарового рисунка при наложении линейчатых структур). По сути, этот

рисунок является картой электрического потенциала.

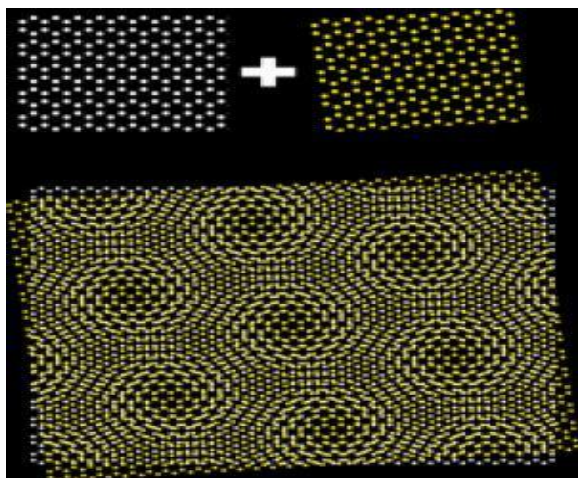


Рис.4.Формирование гексагональной структуры при наложении нитрида бора на графен

В настоящее время идет процесс изучения различных графеновых структур с помощью сканирующего туннельного микроскопа, который позволяет получить изображение сверхрешетки и измерить ее размер. Если гексагональный рисунок слишком мелкий, образец отбраковывается. Примерно 10-20% образцов показывают желаемый эффект. Если данный процесс удастся автоматизировать, будет создана графеновая микроэлектроника.

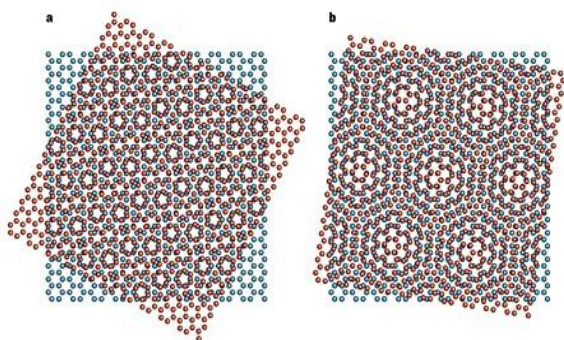


Рис.5. Размер рисунка в зависимости от угла наложения: а – слишком мелкий, б – правильный

### Псевдомагнитные свойства графена

Группа физиков из Университета в Арканзасе ведет разработки в несколько ином ключе. Они предлагают управлять потоком электронов с помощью изменения механического напряжения в материале.

Было замечено, что если приложить к графеновой пленке механическое усилие, ее электрические свойства изменятся так, как будто материал поместили в магнитное поле. Чтобы использовать данное свойство, необходимо научиться контролировать механическое напряжение.

Исследователи из Университета в Арканзасе провели следующий эксперимент. Они натянули графеновые мембраны на тонкие квадратные рамки и просканировали поверхность графена туннельным микроскопом с помощью постоянного тока. В сканирующем туннельном микроскопе для создания карты рельефа поверхности используется электрический ток очень малой величины. Чтобы поддерживать ток на постоянном уровне в процессе сканирования рельефа поверхности, микроскоп данного типа меняет напряжение на кончике туннельного зонда, когда он передвигается вверх-вниз. Было замечено, что при этом форма мембраны также изменялась - мембрана изгибалась и стремилась приблизиться к щупу. Форма мембраны изменялась в зависимости от заряда между щупом и мембраной. Изменяя напряжение на щупе, можно управлять механическим напряжением мембраны.

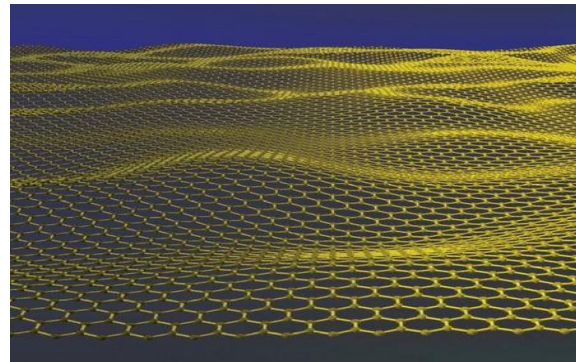


Рис.6. В свободном состоянии графеновые мембраны имеют бугристую форму. Это является препятствием для их применения в электронных устройствах, поскольку на изломах проводимость мембраны резко падает

Для более полного понимания этого свойства было проведено исследование теоретической системы, содержащей графеновые мембраны. Ученые сопоставили величину механического напряжения и рассчитали расположение щупа микроскопа относительно мембраны. Оказалось, что взаимодействие между мембраной и щупом зависит от расположения щупа. По этим данным можно рассчитать псевдо-магнитное поле для заданного напряжения и механического усилия.

Из-за того, что мембрана ограничена квадратной рамкой, напряженность поля меняется с положительной на отрицательную. Для создания неосциллирующего поля требуется изготовить треугольную ячейку. Возможно, именно она позволит найти способ управлять псевдомагнитными свойствами графена.

### Примеры применения графена

В настоящее время в области применения графена ведутся разработки в следующих направлениях:

1). Высоочастотные транзисторы. Подвижность электронов в графене гораздо больше, чем в кремнии, поэтому цифровые элементы из графена обеспечивают более высокую частоту работы. Некоторые компании уже заявляли об успехах в этой области. Так, транзисторы IBM работают на частоте 26 ГГц и имеют размер около 240 нм. Поскольку между размерами транзистора и его производительностью существует обратная зависимость, увеличение рабочей частоты достигается за счет уменьшения его размеров.

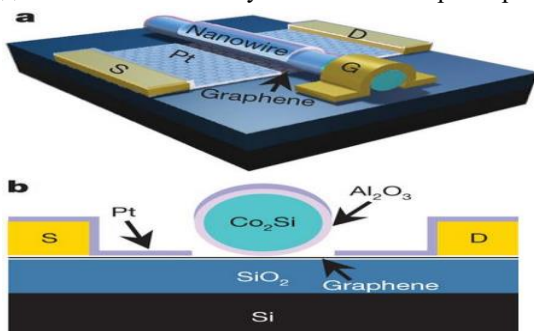


Рис.7.Строение графенового транзистора

Микросхемы памяти. Прототип нового типа запоминающего устройства состоит всего из 10 атомов графена. Во время лабораторных тестов группе профессора Джеймса Тура из американского Университета Райс удалось создать кремниевые модули, на которых были размещены 10 атомарных слоев графена. В итоге графеновый слой получил толщину около 5 нм. Исследователи говорят, что в новых экспериментальных модулях базовые ячейки хранения информации примерно в 40 раз меньше ячеек, используемых в самых современных 20-нм модулях NAND-памяти. Данная технология потенциально способна во много раз увеличить емкость модулей памяти. Кроме того, данные запоминающие устройства способны выдерживать сильное радиационное излучение и температуру до 200°C, сохраняя всю информацию [4].

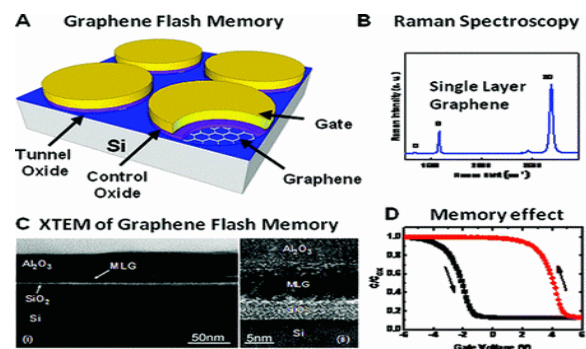


Рис.8. Ячейка флэш-памяти на основе графена

Еще одно преимущество разработки заключается в беспрецедентной экономичности расхода энергии. Для хранения данных модули памяти используют два исходных состояния — нейтральное (выключенное) и заряженное (включенное). Для того, чтобы закодировать 1 бит информации в графеновых модулях требуется в миллион раз меньше энергии, чем для кодирования того же бита в кремниевых чипах [5].

2). Электроды для суперконденсаторов. Проводимость графеновых электродов превышает 1700 См/м, тогда как у электродов на активированном угле она составляет лишь 10–100 См/м. Благодаря высокой механической прочности LSG-электроды могут использоваться в суперконденсаторах без связующих элементов или токоприемников, что упрощает конструкцию и снижает себестоимость изготовления суперконденсаторов.

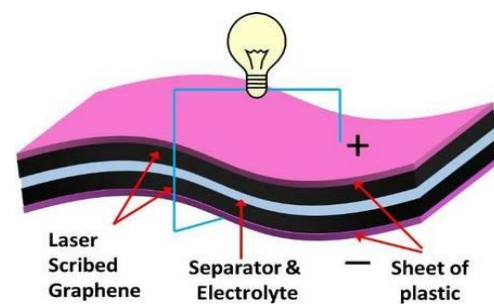


Рис.6. Графеновый суперконденсатор (ионистор)

Исследователи из Калифорнийского университета Лос-Анджелеса и Калифорнийского института наносистем (California NanoSystems Institute) продемонстрировали высокопроизводительные электрохимические конденсаторы на основе графена, которые сохраняют превосходные электрохимические

параметры при больших механических нагрузках [6].

Устройства, изготовленные с использованием гравированных лазером графеновых электродов, характеризуются очень высокой плотностью энергии в разных электролитах, высокой плотностью мощности и поцикловой стабильностью. Более того, эти суперконденсаторы сохраняют отличные электрохимические свойства при больших механических нагрузках, благодаря чему их можно будет применять в мощных и гибких электронных устройствах.

3). Недорогие дисплеи для портативных устройств. Графен можно использовать вместо ИТО (оксида индия-олова) в электродах для OLED-дисплеев. Во-первых, это позволяет снизить стоимость дисплея, а во-вторых, упрощает его утилизацию за счет прекращения использования металлических элементов.

Кроме того, было установлено, что графен пропускает до 98% света. Это значительно выше показателя пропускания лучших материалов из ИТО (82-85%). Графен обладает высокой электропроводностью, что позволяет использовать его для создания прозрачных электродов, управляющих поляризацией и состоянием жидких кристаллов.

Другая группа исследователей недавно установила, что несколько слоёв графена, нагретые при температуре 300-400 С в присутствии порошкового хлорида железа ( $FeCl_3$ ) приводит к интеркаляции слоёв графена и хлорида железа.

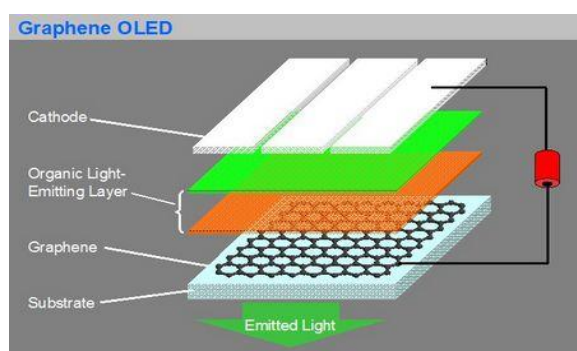


Рис.10. Дисплей, изготовленный с применением графена

Электроны из хлорида железа увеличивают число носителей заряда в слоях графена, а в результате чего поверхностное сопротивление слоя падает до 8,8 Ом на квадрат при видимой прозрачности материала 84%. Новый материал имеет хорошую долговременную и температурную

стабильность и во много раз лучше по характеристикам, чем сравнимые слои ИТО: при том же поверхностном сопротивлении последний имеет прозрачность лишь 75%, а при той же прозрачности - сопротивление в 40 Ом на квадрат [6].

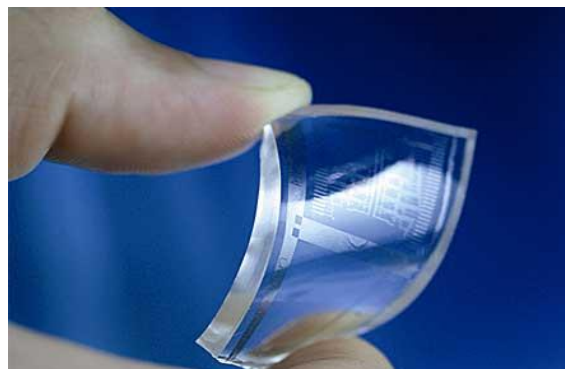


Рис.11. Гибкое прозрачное устройство отображения (дисплей с печатной платой) станет возможным изготовить на основе графена.

4). Аккумуляторы для автомобилей на водородном топливе. С помощью графеновых пленок можно увеличить энергию связи атомов углерода. Это позволит увеличить емкость, либо уменьшить вес аккумуляторов.

5). Датчики для диагностики заболеваний. В основе работы этих датчиков лежит тот факт, что молекулы, чувствительные к некоторым болезням, присоединяются к атомам углерода в графеновом слое. В датчике используется графен, молекулы ДНК и флуоресцентные молекулы. Флуоресцентные молекулы соединяются с одиночной ДНК, которая в свою очередь связывается с графеном. Когда другая одиночная молекула ДНК связывается с ДНК, присоединенной к слою графена, и формируется двойная ДНК, которая свободно передвигается по графену, увеличивая уровень излучения [7].

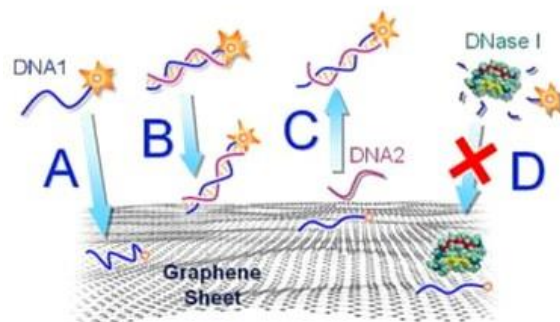


Рис.12. Принцип распознавания поврежденных ДНК

6). Охлаждение электронных схем. Недавно созданный композитный материал на основе графена и меди нашел применение в качестве наиболее эффективного и недорогого средства охлаждения электронных устройств. Теплопроводность композита составляет 460 Вт/(м·К), тогда как у меди она равна 380 Вт/(м·К).

Композит осаждается на охлаждаемую поверхность электрохимическим способом в виде пленки толщиной 200 мкм. Уже разработана схема переоснащения оборудования для изготовления медно-графенового теплоотвода.

7). Элементы с малым удельным весом и высокой прочностью. Добавление в эпоксидный композит графена обеспечивает более высокую удельную прочность элементов, поскольку графен прочно связывается с молекулами полимеров.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной обзорной статье приведены материалы исследований, проведенных различными авторами по развитию использования графена. При этом коротко отмечены и проанализированы возможности использования графена в различных областях..

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S. V., Grigorieva I. V., Firsov A. A. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films // Science. 2004. Vol. 306, p. 666-669.
- [2] Графен / А. Г. Алексенко. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. - 168 с.
- [3] First Graphene Integrated Circuit IBM researchers take next step in building graphene-based electronics By Neil Savage / June 2011.
- [4] Юдинцев В. «Наноэлектроника стремительно набирает силу» // Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2009. С.82.
- [5] Tim J. Booth, Peter Blake, Rahul R. Nair, Da Jiang, Ernie W. Hill, Ursel Bangert, Andrew Bleloch, Mhairi Gass, Kostya S. Novoselov, M. I. Katsnelson and A. K. Geim: Macroscopic Graphene Membranes and Their Extraordinary Stiffness, Nano Lett., 2008, 8 (8), p. 2442-2446.
- [6] Philippe Tassin, Thomas Koschny, Maria Kafesaki and Costas M. Soukoulis. A comparison of graphene, superconductors and metals as conductors for metamaterials and plasmonics. Nature photonics, published online 4 March 2012, www.nature.com/naturephotonics.
- [7] Pumera M. Graphene in biosensing, Review, Materialstoday. July-August. 2011. Vol. 14, № 7-8, p. 308-315.