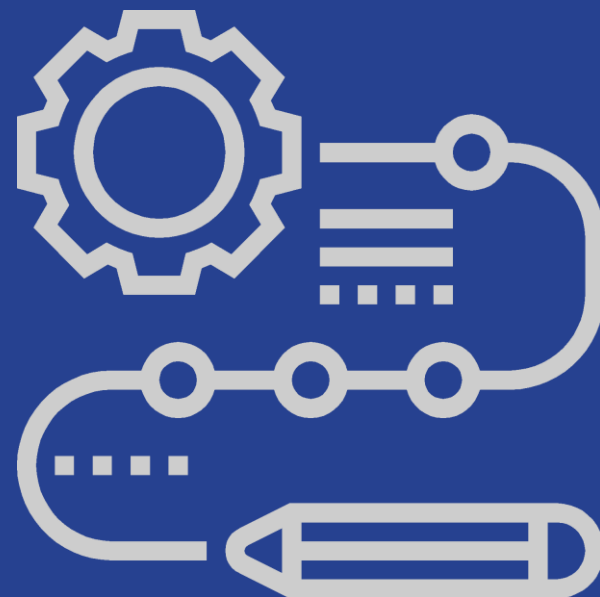


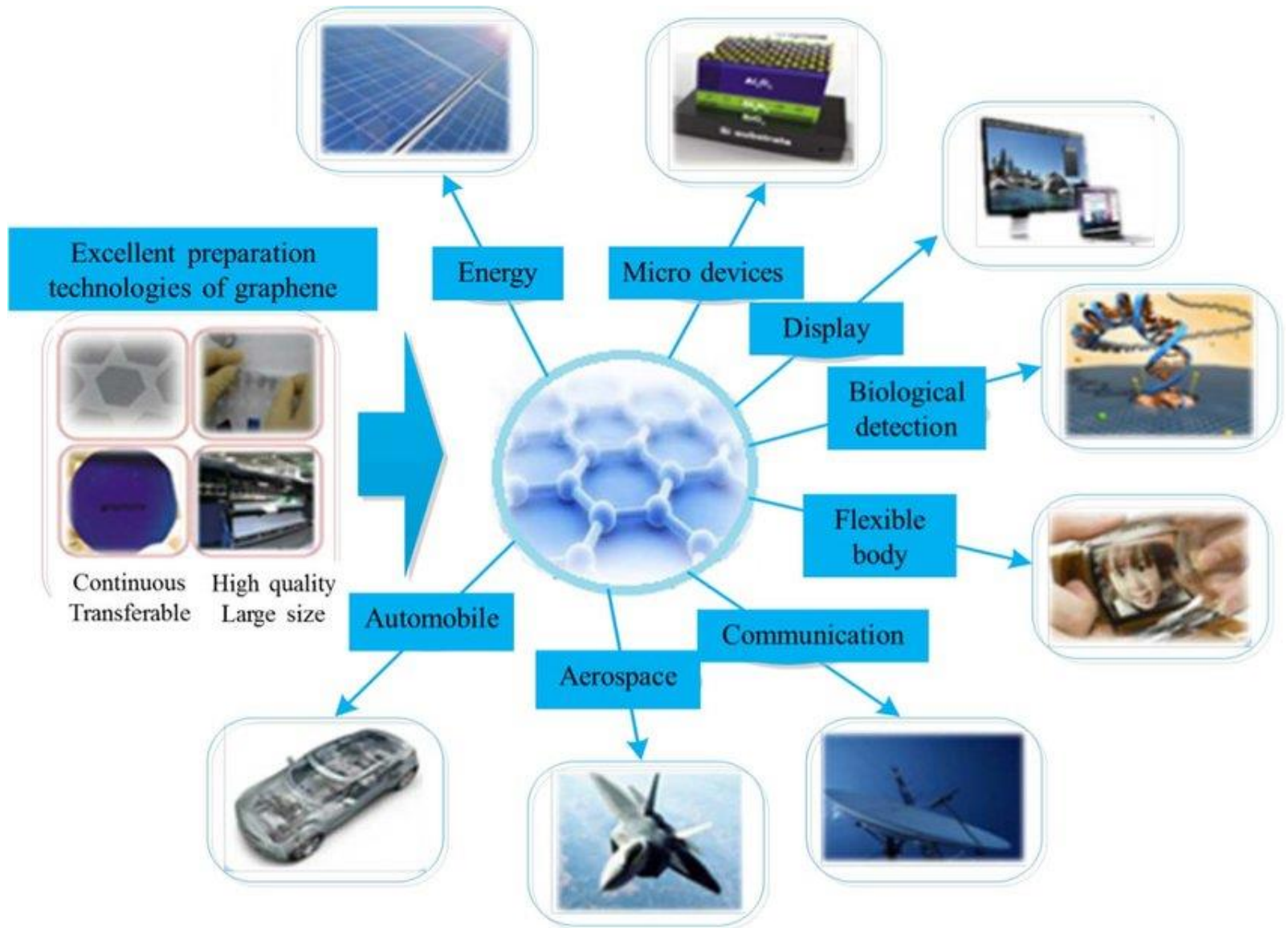
# Графен: применение

# План

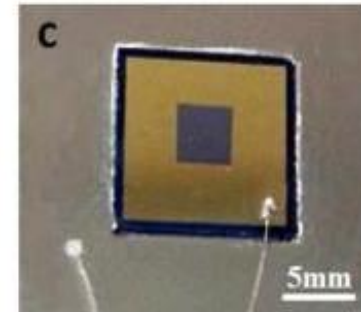
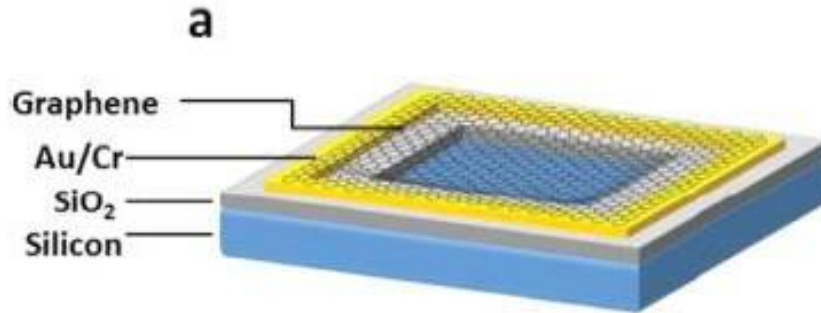
- Перспективы
- Фотоника и оптоэлектроника
- Электроника
- Газовые сенсоры
- Водородная энергетика
- Композиты



# Перспективы



# Фотоника и оптоэлектроника



Солнечный элемент (фотоэлемент, фотоэлектрический преобразователь – ФЭП) – это полупроводниковый прибор, который служит для преобразования световой энергии в электрическую.

Графен поглощает свет в диапазоне от УФ до терагерцовой области, следовательно, фотоприемники на его основе могут работать в чрезвычайно широком диапазоне длин волн.

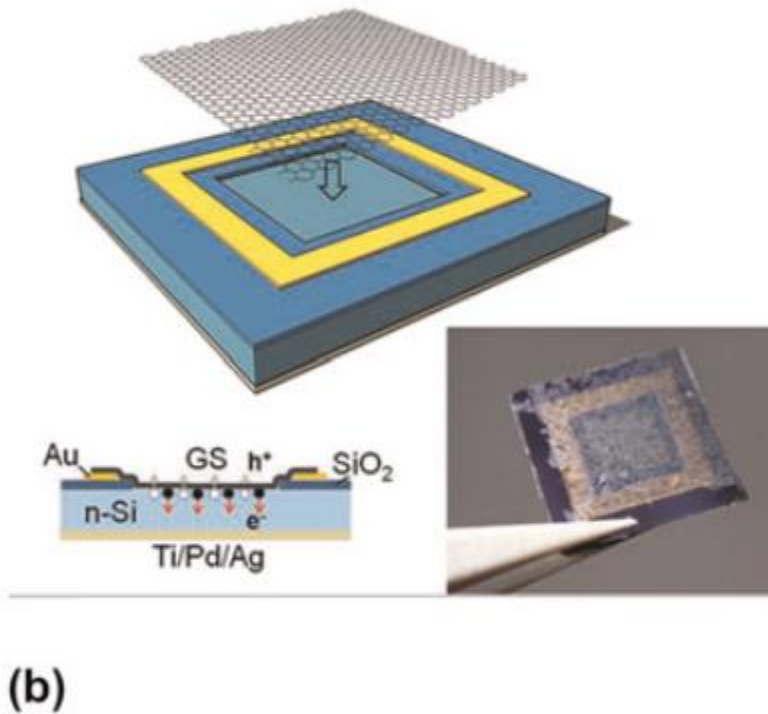
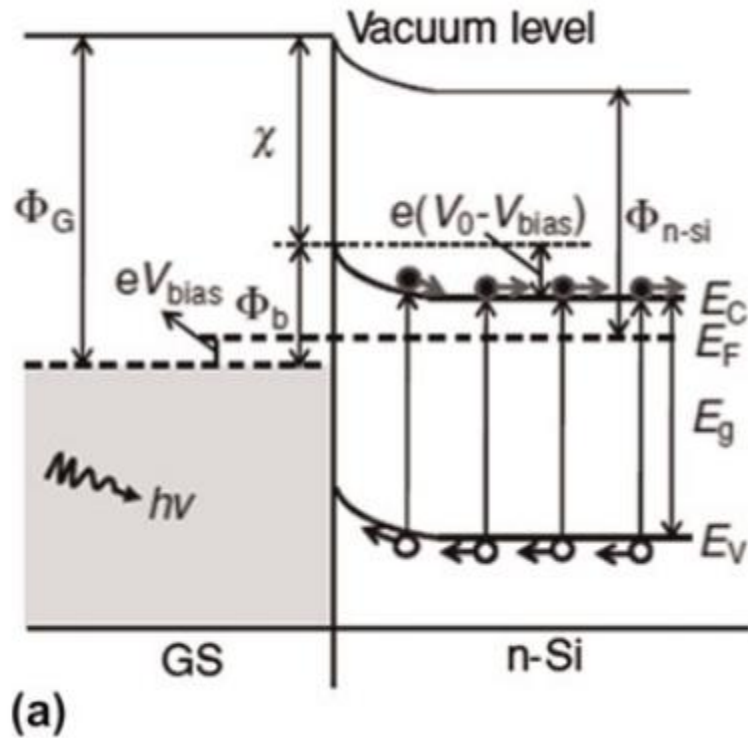
Еще одним полезным оптическим свойством графена является насыщение оптического поглощения (явление уменьшения поглощения света при увеличении его интенсивности).

# Фотоника и оптоэлектроника

- Использование прозрачных проводящих пленок на основе графена в качестве анода твердотельного солнечного элемента;
- Графеновые покрытия, которые повышают КПД солнечного элемента;
- Создание обратного электрода на основе оксида графена;
- Создание фотодетекторов на основе графена;
- Создание гибких панелей для сенсорного дисплея;
- Применение графеновых насыщенных поглотителей для генерации сверхбыстрого импульса в лазерных резонаторах.

## Солнечные батареи

[Li et al, 2010]



Зонная диаграмма перехода Шоттки в системе графен/n-Si; (б) схематическая иллюстрация процесса изготовления солнечной батареи графен/n-Si

# Электроника

Создание p-n переходов, p-n-p переходов с изолированным верхним затвором;

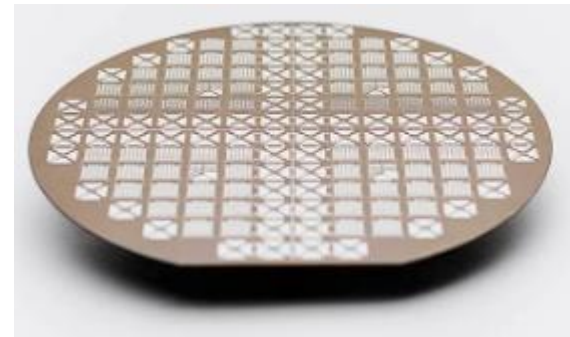
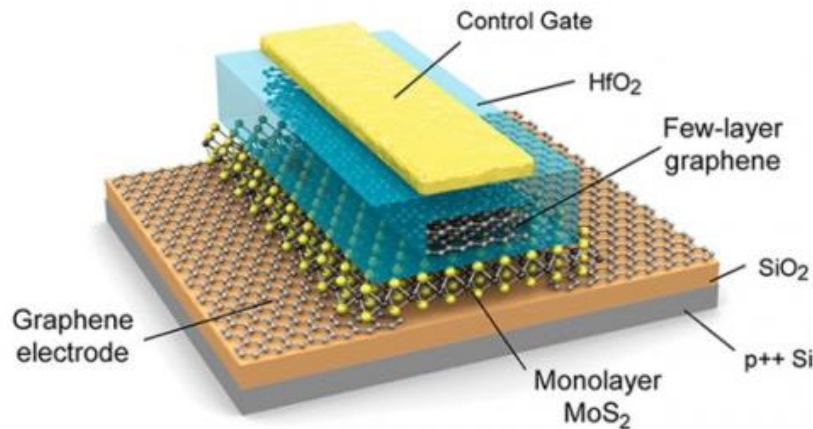
Создание полевого транзистора со сверхдлинными каналами (0,33 мм);

Создание радиочастотных транзисторов;

Использование в экстремальных условиях (транзистор, работающий при 4K), например в открытом космосе;

Создание частотных смесителей;

# Транзисторы



**Транзисторы** — полупроводниковые приборы, предназначенные для усиления, генерирования и преобразования электрических колебаний.

В отличие от обычных транзисторов, изготовленных из полупроводников с определенной шириной запрещенной зоны, в графеновом транзисторе всегда имеется остаточная проводимость. Это является критическим фактором, определяющим роль графена в современной электронике, поэтому много усилий направлено на то, чтобы создать запрещенную зону в структуре графена.



# Полевой транзистор

Сильная зависимость тока от индуцированного поля привела исследователей к мысли создать газовый сенсор на основе графенового полевого транзистора. Когда молекула адсорбируется на поверхности графена, локальное изменение концентрации носителей вызывает делокализацию двумерного электронного газа, которую можно определить с помощью транзистора. Такие устройства обладают высокой чувствительностью и пределом обнаружения на уровне  $10^{-9}$  (ppb). Полевые транзисторы на основе чистого графена имеют меньшую чувствительность по сравнению с датчиками на основе модифицированной графеновой пленки.

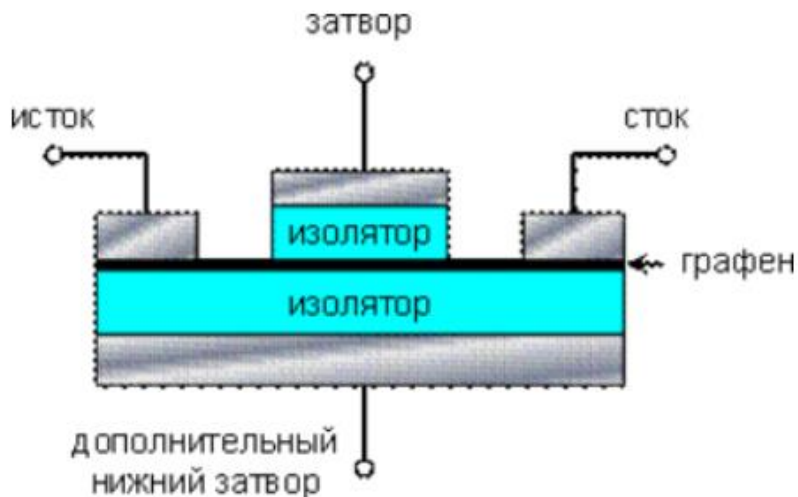
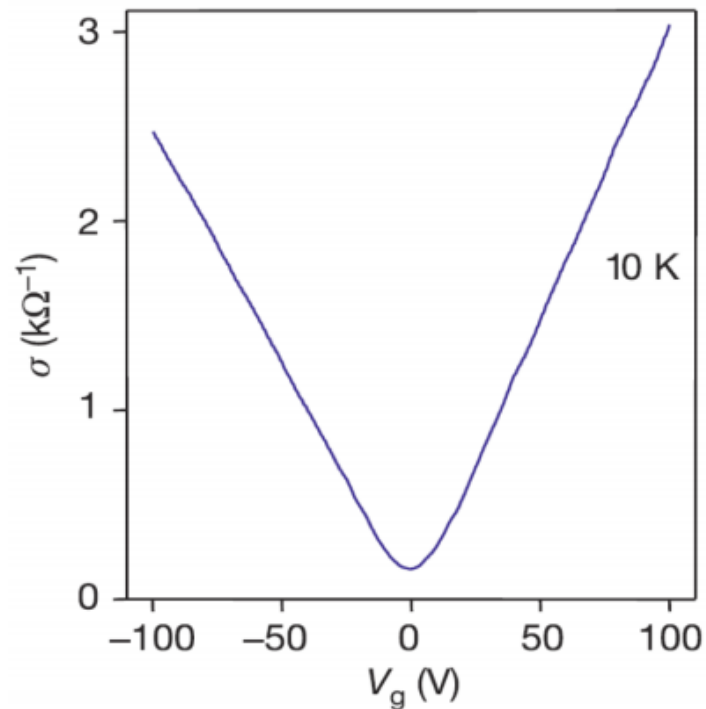


Схема устройства простейшего полевого транзистора на основе графена. Лист графена служит каналом, соединяющим исток и сток, в то время как затворные электроды служат для управления концентрацией носителей в графене и, следовательно, и его проводимостью.

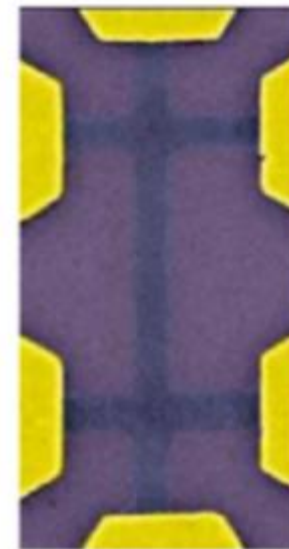
# Полевой транзистор



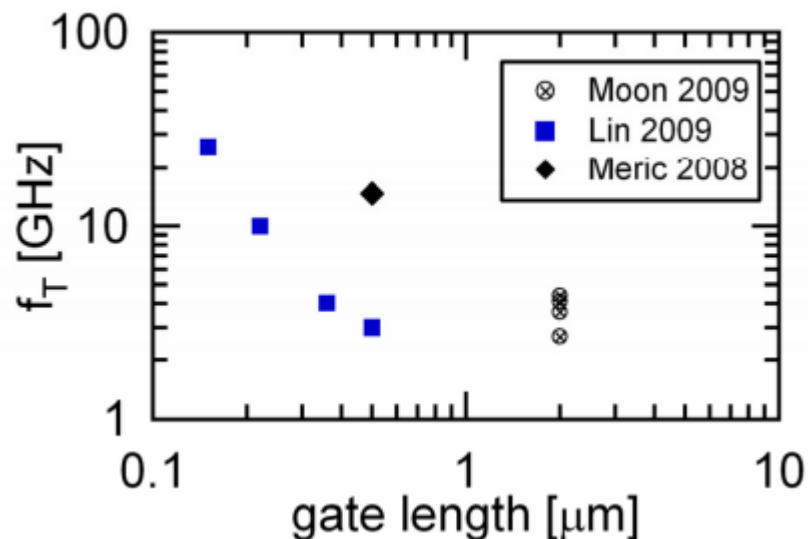
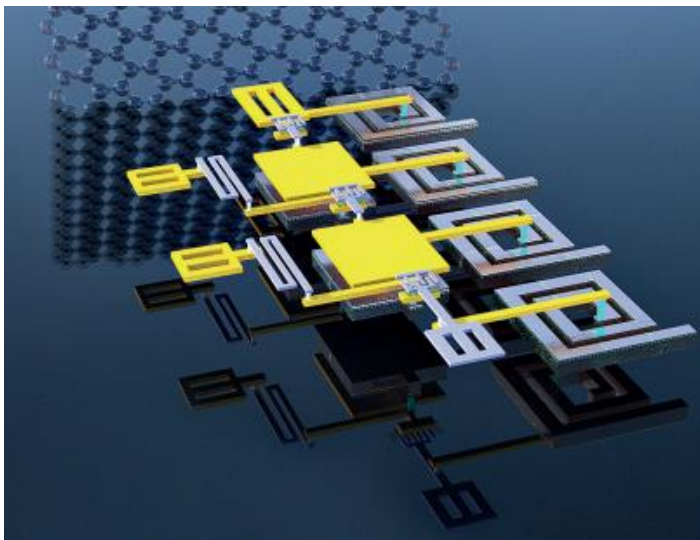
Благодаря уникальной зонной структуре, носители в графене биполярны, и их транспорт можно контролировать с помощью затвора электрического поля.

Зависимость проводимости канала от напряжения на затворе.  $\sigma = ne\mu$ ,  $\mu$  - подвижность носителей заряда (в графене при комнатной температуре  $2 \times 10^5 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ),  $n$  - число носителей,  $e$  - заряд носителей.

Графеновый полевой транзистор (FET) может иметь нанометровые размеры. Вид графенового транзистора под электронным микроскопом.

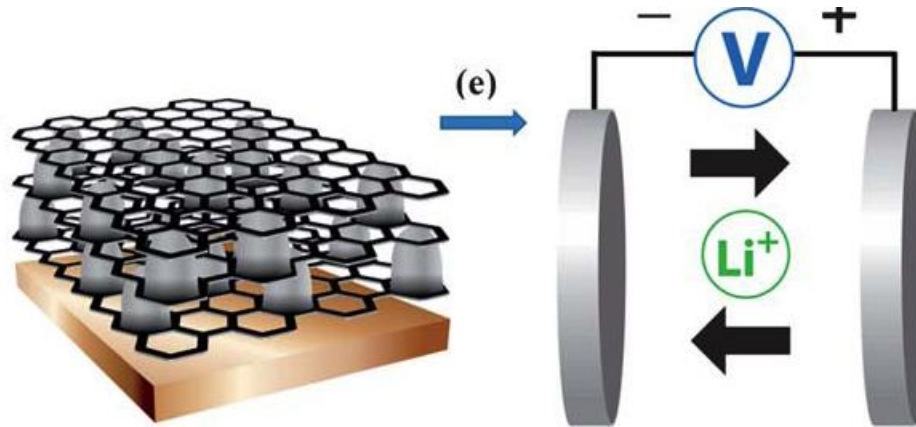


# Радиочастотные транзисторы (РЧТ)



Ключевым показателем производительности для РЧТ является частота отсечки ( $f_T$ ). Первые подобные устройства создавались на основе графена, синтезированного путем термического разложения карбида кремния. В 2010 году создали транзистор с  $f_T = 100$  ГГц. В дальнейшем, удалось достичь значения  $f_T$  в 300 ГГц при длине канала, равной 40 нм.

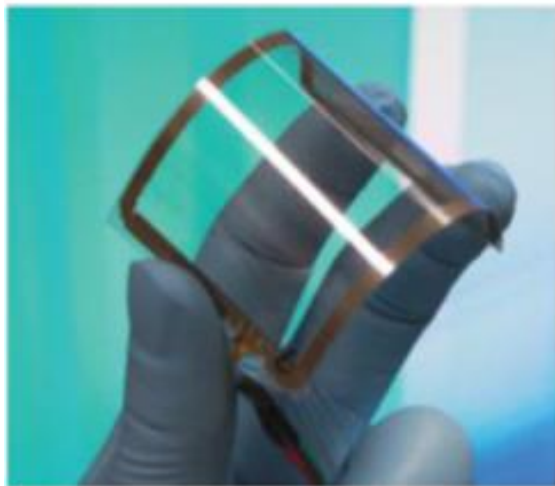
# Электроды литий-ионных батарей



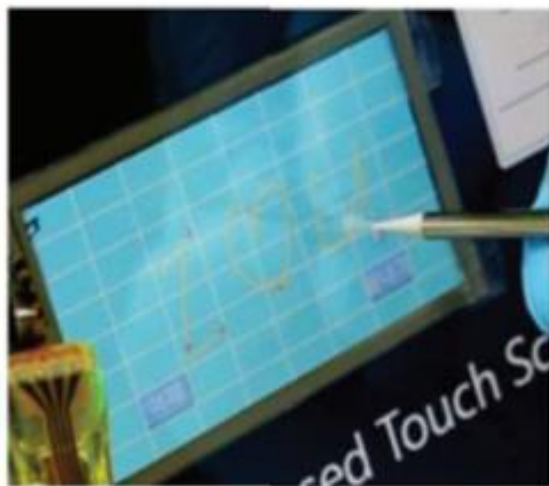
Литий-ионный аккумулятор (Li-ion) — тип электрического аккумулятора, который широко распространён в современной бытовой электронной технике и находит своё применение в качестве источника энергии в электромобилях и накопителях энергии в энергетических системах.

В связи с высоким теоретическим значением удельной поверхности ( $2630 \text{ м}^2/\text{г}$ ) графен является перспективным материалом для электродов в литий-ионных батареях. При использовании графена в качестве электродов, емкость батареи составляет до  $784 \text{ мА/г}$  после 15 циклов. Такой хороший результат объясняется наличием краевых дефектов, на которых происходят дополнительные процессы зарядки.

# Гибкая электроника



(B)

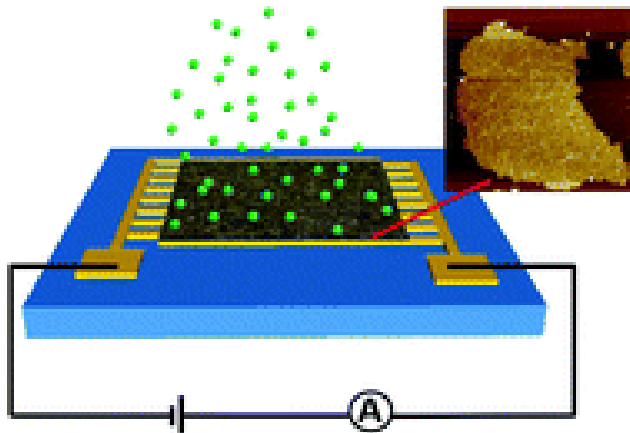


(A)



Создание гибких устройств подразумевает определенный вид растягиваемого полимера, модифицированного до проводника электричества. Один из главных барьеров для гибкой электроники – это разработка гнущихся батарей с растягиваемыми схемами. Замена жестких кремниевых пластин на гибкие подложки может открыть новые горизонты в электронной индустрии.

# Газочувствительные сенсоры



**Газовый сенсор** (англ. **gas detector** или **gas sensor**) - устройство, с помощью которого можно измерять величину концентрации или выявлять присутствие отдельных компонентов газовых смесей.

Графен является перспективным материалом для обнаружения молекул различных газов, а также биологических веществ. Перенос заряда между графеном и адсорбированными молекулами обусловлен химическим взаимодействием между ними, вследствие чего изменяется уровень Ферми, плотность носителей и сопротивление. Сенсорные свойства пленок зависят от наличия на их поверхности различных функциональных групп. Также известно, что эффективность сенсоров можно повысить за счет увеличения площади их поверхности

# Газочувствительные сенсоры

- Идеальный газовый сенсор должен быть способным определять единичный атом или молекулу. Графен (или ОГ) может иметь такую способность благодаря своей хорошо развитой поверхности. В принципе, сенсор на основе графена может определять как единичную молекулу, так и высокие концентрации.

- Электронные и механические свойства графена могут быть успешно использованы для преобразования сенсорного сигнала.

Функционализация графена полимерами, металлами и другими агентами создает возможность взаимодействия со специфичными молекулами, значительно повышая селективность сенсора.

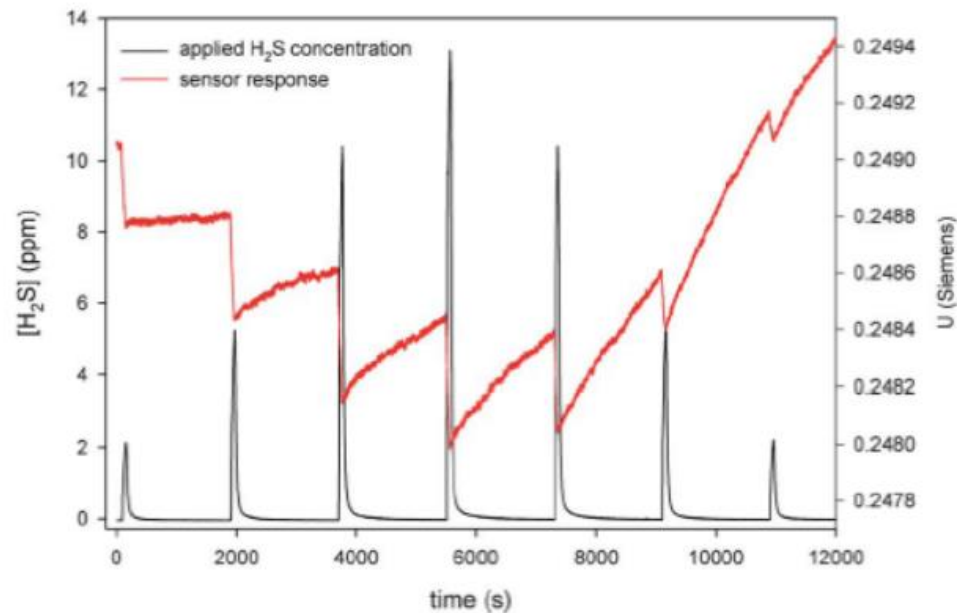
- В перспективе графен может быть более эффективным химическим датчиком по сравнению с устройствами, изготовленными из обычных полупроводников, т.к. за счет отсутствия в нем запрещенной зоны даже небольшое изменение химического потенциала обеспечивает возникновение активного донорного или акцепторного уровня.

- Монокристаллы графена могут быть использованы для изготовления четырехзондового устройства, что позволит избежать влияния сопротивления контактов, а также увеличить предел обнаружения.

- В отличие от УНТ, транспортные свойства графена более стабильны благодаря его механической прочности. Производство графена и ОГ является более экономичным процессом, чем получение УНТ.

# Газочувствительные сенсоры

Типичная рабочая характеристика графенового газового сенсора



Ранее была продемонстрирована чувствительность графена к молекулам  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ . Графеновая пленка регистрировала на сверхнизкие концентрации различных газов менее 1 ppb (part per billion)



# Водородная энергетика

Одним из основных препятствий для применения водорода в качестве универсального и экологически чистого топлива является отсутствие эффективных способов его аккумулирования.

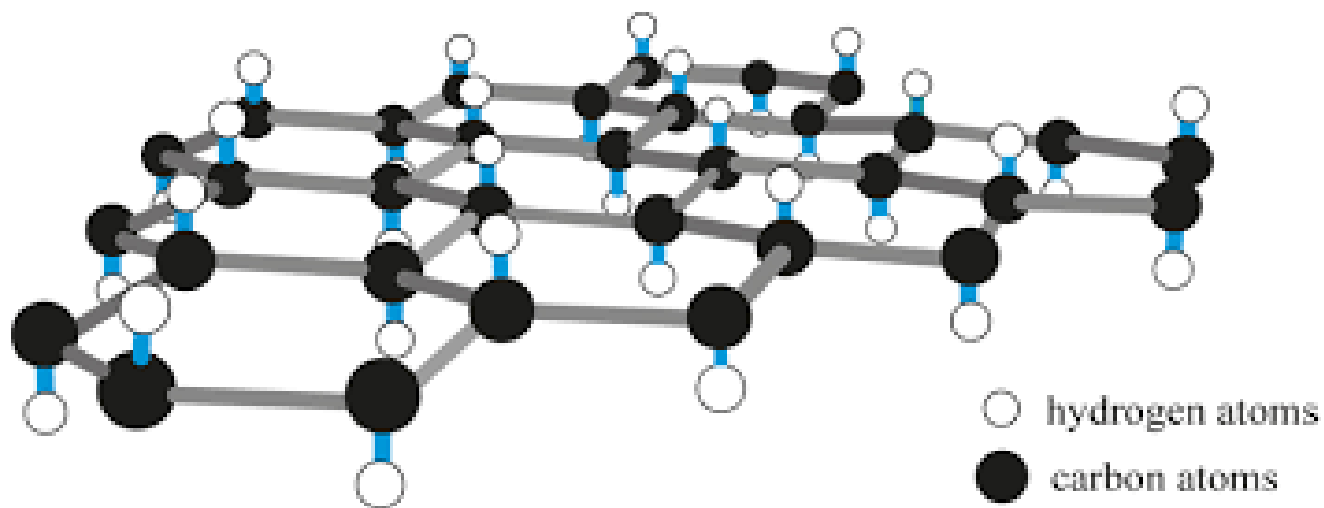
К настоящему моменту решить задачу обратимой физической сорбции водорода при комнатной температуре таким образом, чтобы запасаемое количество водорода было достаточным для его эффективного практического применения, не удалось.

Три основных аспекта, которые необходимо учитывать при разработке эффективных носителей водорода:

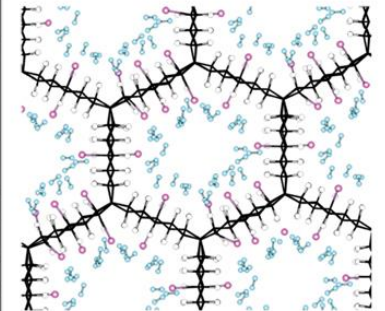
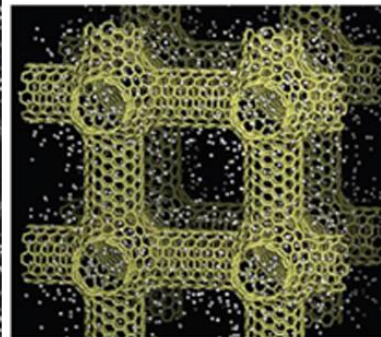
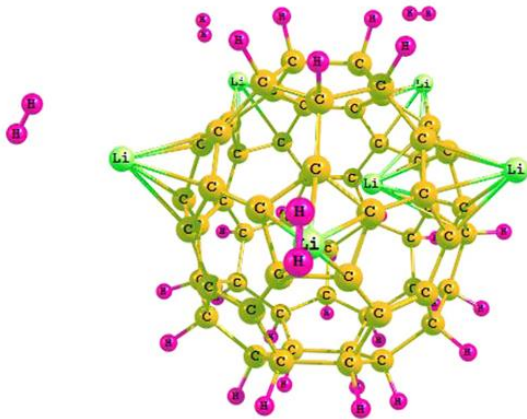
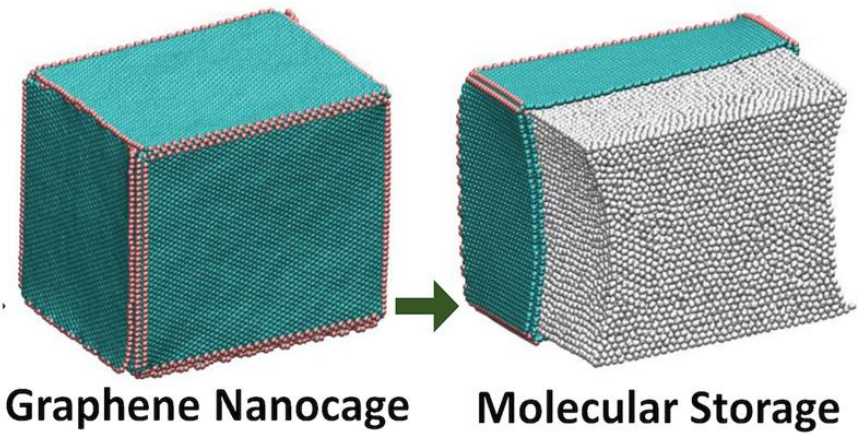
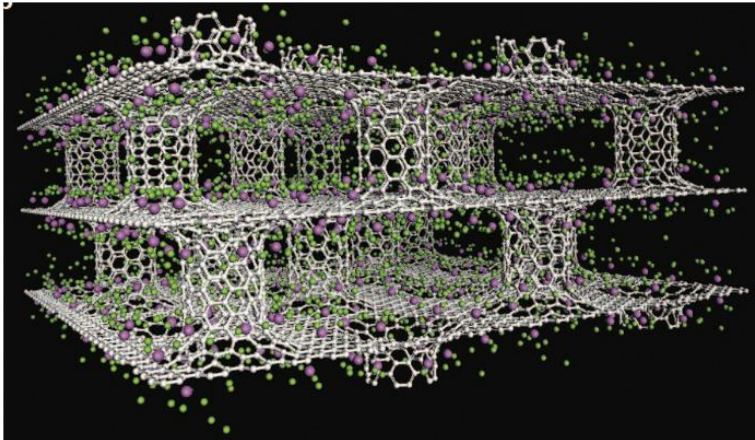
- (а) емкость накопления,
- (б) стабильность и безопасность при хранении водорода,
- (в) кинетика наводороживания/разводороживания.

# Водородная энергетика: графан

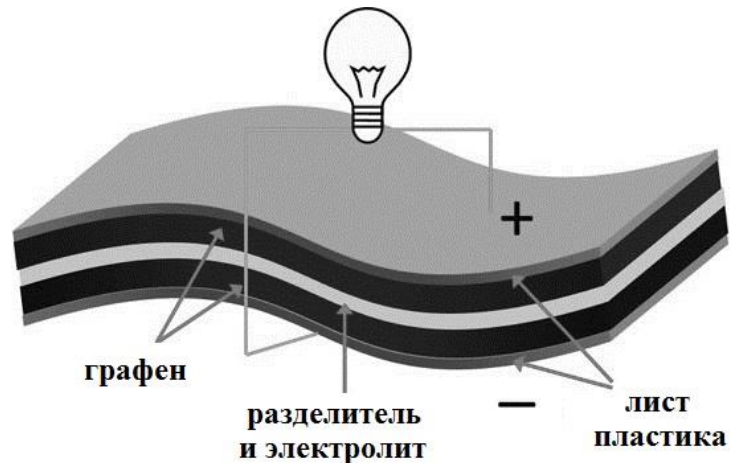
Максимальная гравиметрическая плотность может быть получена для графена со степенью химической абсорбции 8,3% ( $1/12$ ), что соответствует формированию полностью насыщенного листа графена со стехиометрией 1:1 для С:Н, который получил название графан. Атомы водорода присоединяются к углеродной структуре как сверху, так и снизу листа графена.



# Водородная энергетика



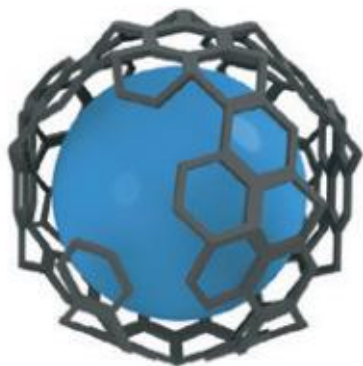
# Суперконденсаторы



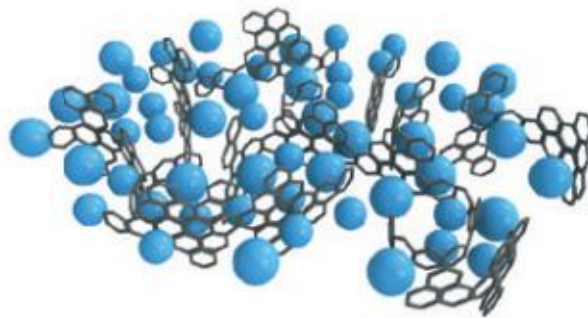
Суперконденсатор – это новый тип энергоемких конденсаторов с плотностью энергии в 10 раз выше, чем в традиционных конденсаторах, и мощностью импульсного разряда до 10 раз выше мощности аккумуляторных батарей. Суперконденсатор представляет собой молекулярный накопитель энергии и вызывает большой интерес как инструмент для накопления и сохранения энергии, имеющий большую мощность, быстрый процесс зарядки и уникальную циклическую устойчивость. Суперконденсаторы обеспечивают хорошее совмещение с литий-ионными батареями в устройствах, в которых требуется одновременно высокая энергия (литий-ионные батареи) и высокая мощность (суперконденсаторы), тем самым увеличивая напряжение пробоя, расширяя эффективность использования электрической энергии и увеличивая время жизни батареи.

# Композиты

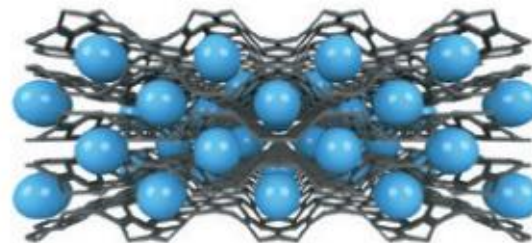
Encapsulated



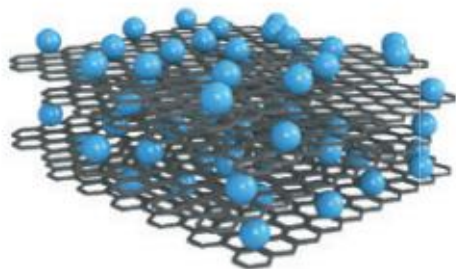
Mixed



Wrapped



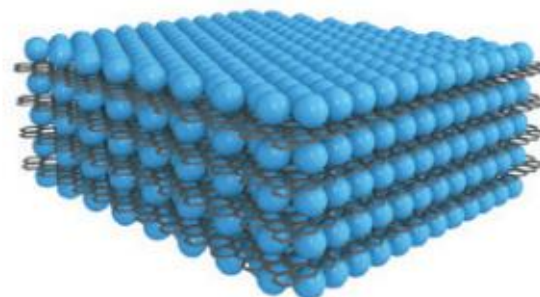
Anchored



Sandwich-like

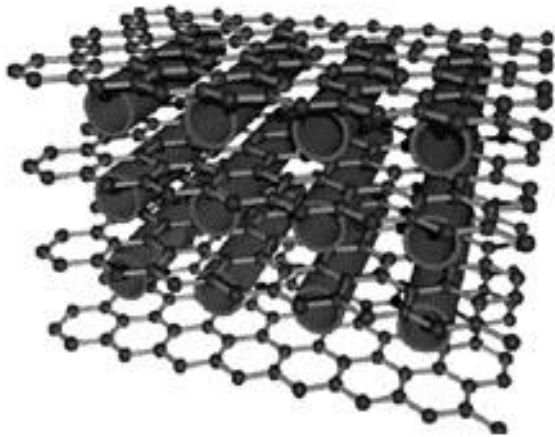


Layered

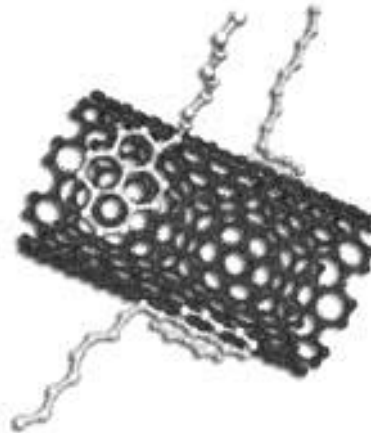




# Углеродные композиты



(a)



(б)



(в)

Различные виды композитов на основе УНТ: (a) композит графен/УНТ; (б) УНТ, объединенная с цепочкой ароматического соединения; (в) УНТ, обернутая полимерной лентой.

# Ссылки

[http://www.ipmt-hpm.ac.ru/upload/diss\\_sedlovets.pdf](http://www.ipmt-hpm.ac.ru/upload/diss_sedlovets.pdf)

<http://lemma-company.ru/wp-content/uploads/2015/09/%D0%9A%D0%BE%D0%BF%D0%B8%D1%8F-%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F-003-%D0%93%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B5%D0%BD-%D0%BE%D0%B1%D0%B7%D0%BE%D1%80.pdf>

[https://vk.com/doc-106704051\\_536675657](https://vk.com/doc-106704051_536675657)