



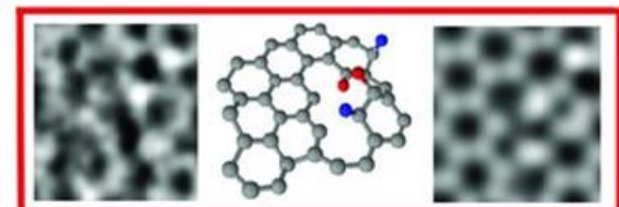
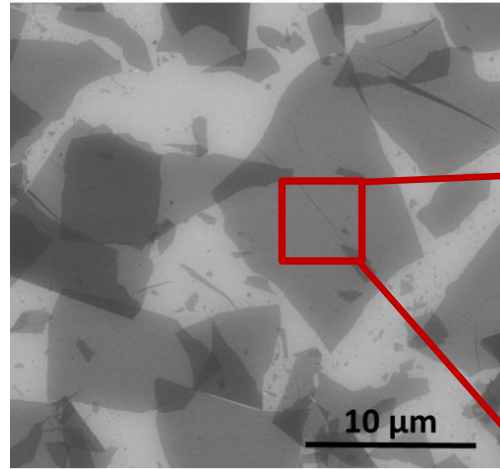
# **Синтез и применение материалов на основе оксида графена**

**А.М. Димиев**

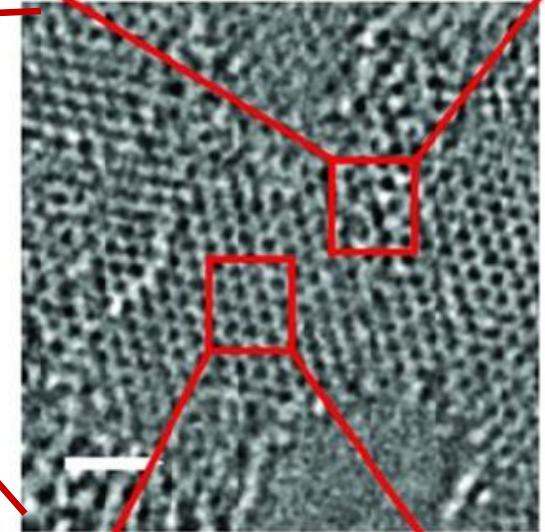
**Казанский Федеральный Университет**

*Доклад на конференции «ГРАФЕН И РОДСТВЕННЫЕ СТРУКТУРЫ:  
СИНТЕЗ, ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ»  
24-26 августа 2025 года, Тамбов*

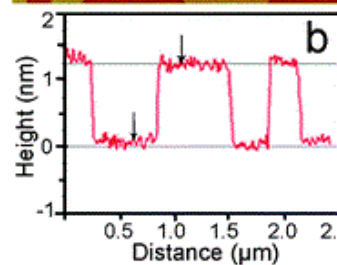
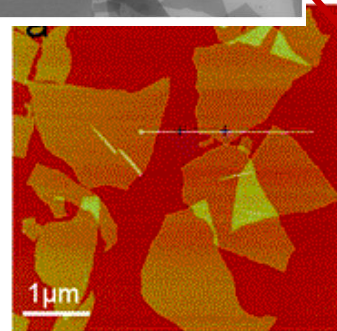
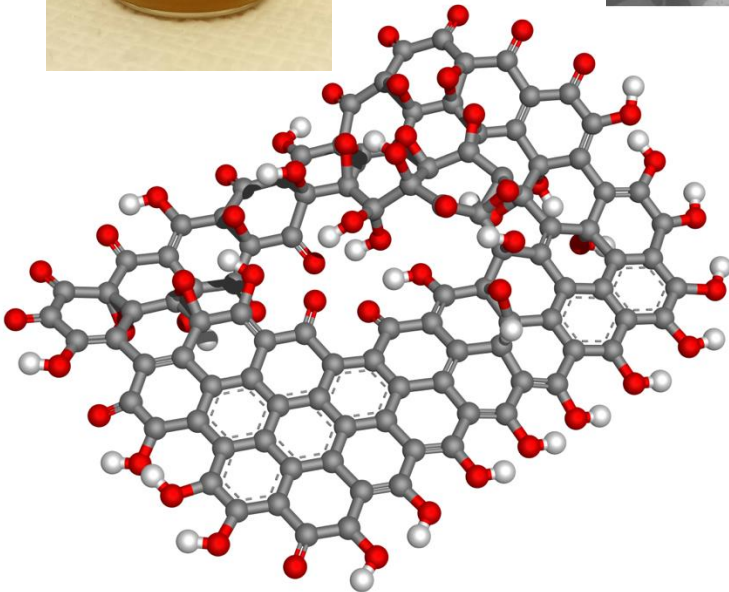
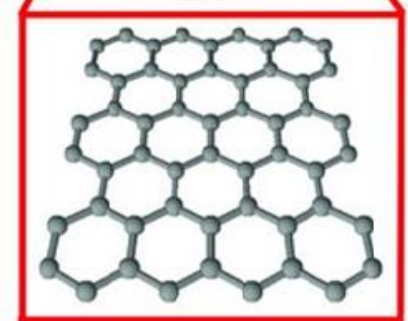
# Оксид графена. Введение



A.



B.



- В водных растворах расслаивается до состояния одноатомных листов;
- Состоит из чередующихся графеновых и окисленных доменов;
- Содержит множество кислородных групп.

# Информация от ИИ

## В строительстве

### •Повышение прочности:

Добавление оксида графена в цементные растворы значительно увеличивает прочность и трещиностойкость материала.

### •Композитные материалы:

Используется для создания многофункциональных материалов с улучшенными механическими свойствами.

## •В энергетике и электронике

### •Энергоаккумулирующие устройства:

Применяется для модернизации электродов в суперконденсаторах и аккумуляторах, повышая их емкость и срок службы.

### •Солнечные батареи:

Способен повысить КПД солнечных батарей.

### •Проводящие покрытия и чернила:

Используется для создания прозрачных токопроводящих покрытий и электропроводящих чернил для печатной электроники.

## •В биомедицине

### •Доставка лекарств:

### •Биосенсоры:

### •Антибактериальные свойства:

## Разное

### •Функциональные покрытия:

Добавляется в лакокрасочные материалы для придания антикоррозионных, антимикробных, гидрофобных и антистатических свойств.

### •Упаковочные материалы:

Улучшает механические свойства и придает антимикробные свойства натуральным упаковочным материалам.

## В очистке воды

•**Фильтры и мембраны:** Благодаря двумерной структуре, оксид графена является эффективным фильтром, пропускающим молекулы воды и задерживающим другие примеси.

## Что будет рассмотрено на данной лекции

- Источники хранения и преобразования энергии
- Полимерные композиционные материалы
- Катализ и водородные топливные элементы

# Применение ОГ в источниках хранения и преобразования энергии

- Суперконденсаторы
- Литий-ионные аккумуляторы

# Суперконденсаторы

Занимают среднее положение между конденсаторами и аккумуляторами

**Плюсы:** Высокая удельная мощность ( $\sim 10 \text{ kW/kg}$ ), высокая стабильность (долговечность), быстрый отклик на приложенную нагрузку.

**Минусы:** Низкая плотность энергии (низкое количество электрического заряда сохраняемого в единице объема).

## Два типа по механизму работы:

- 1) Ионистор: емкость двойного электрического слоя,
- 2) Псевдо-конденсаторы: Электрохимические реакции в приэлектродном слое.

1) Для высокой емкости электроды должны иметь высокую поверхность и хорошую проводимость для быстроты заряда-разряда.

**Восстановленный оксид графена (ВОГ) и другие углеродные наноматериалы**

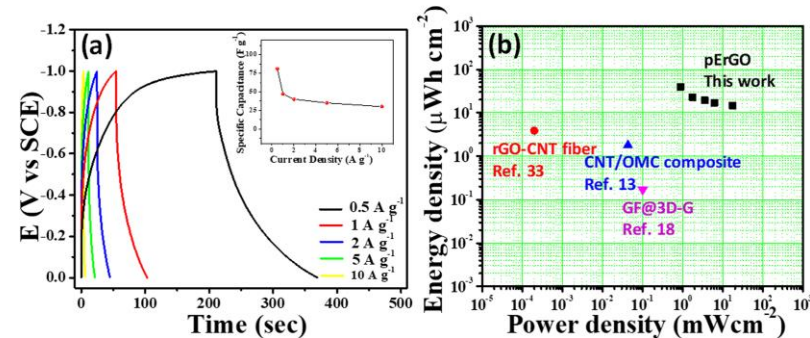
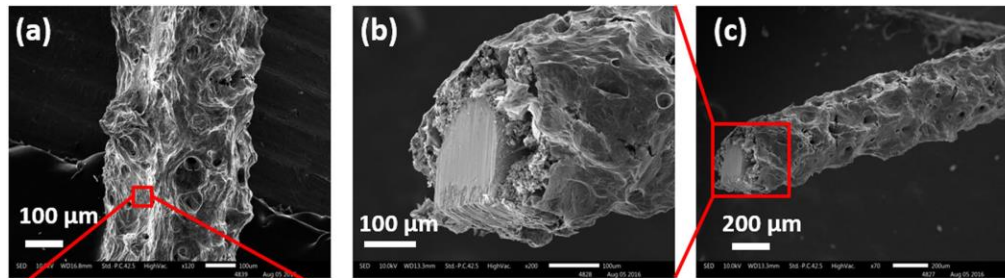
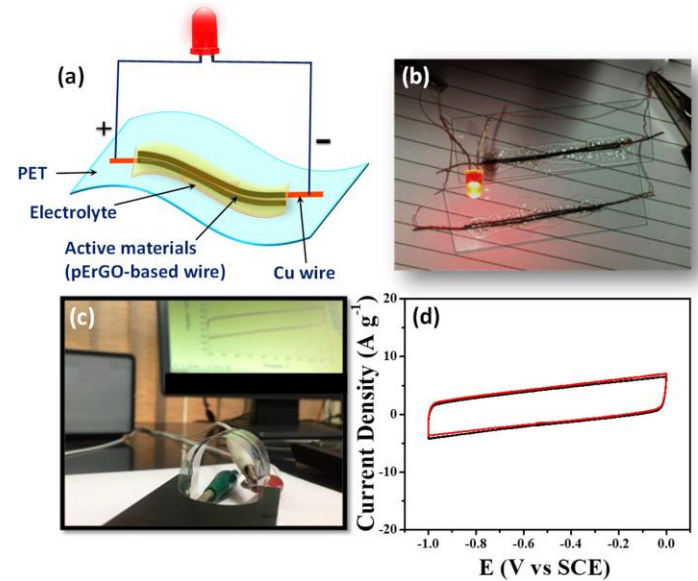
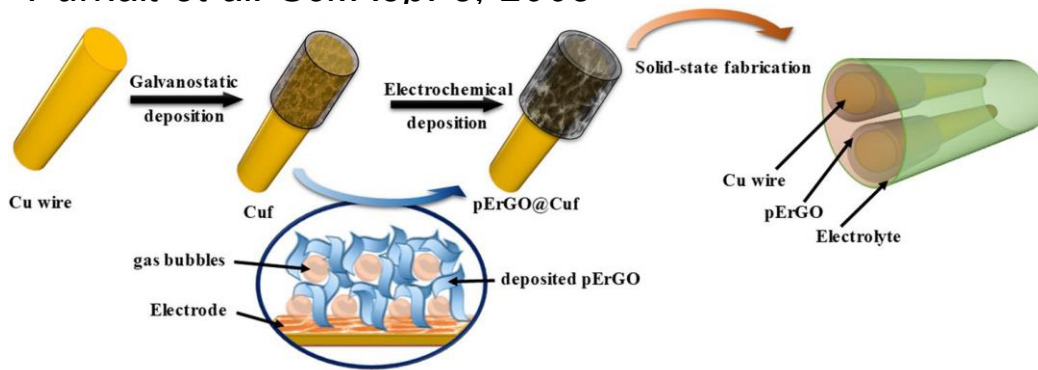
2) В приэлектродном слое происходит химическая реакция с участием электро-активных ионов и молекул.

**Композиты ВОГ с проводящими полимерами и металлами**

# Суперконденсаторы

High-performance flexible supercapacitors based on electrochemically tailored three-dimensional reduced graphene oxide networks.

*Purkait et al. Sci.Rep. 8, 2008*



- Specific capacitance ( $C_{sp}$ )  $81 \pm 3 \text{ F g}^{-1}$  at  $0.5 \text{ A g}^{-1}$  with polyvinyl alcohol/ $\text{H}_3\text{PO}_4$  gel electrolyte.
- The  $C_{sp}$  per unit length and area are calculated as  $40.5 \text{ mF cm}^{-1}$  and  $283.5 \text{ mF cm}^{-2}$ , respectively.
- The shape of the voltammogram retained up to high scan rate of  $100 \text{ V s}^{-1}$ .
- High charge-discharge cycling stability, with 94.5%
- $C_{sp}$  retained after 5000 cycles at  $5 \text{ A g}^{-1}$ .
- Energy density of  $11.25 \text{ W h kg}^{-1}$ ; Power density of  $5 \text{ kW kg}^{-1}$



# Литий-ионные аккумуляторы. Катод

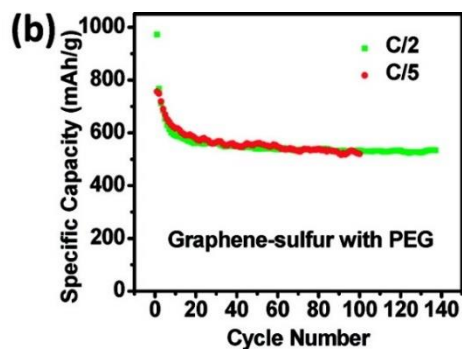
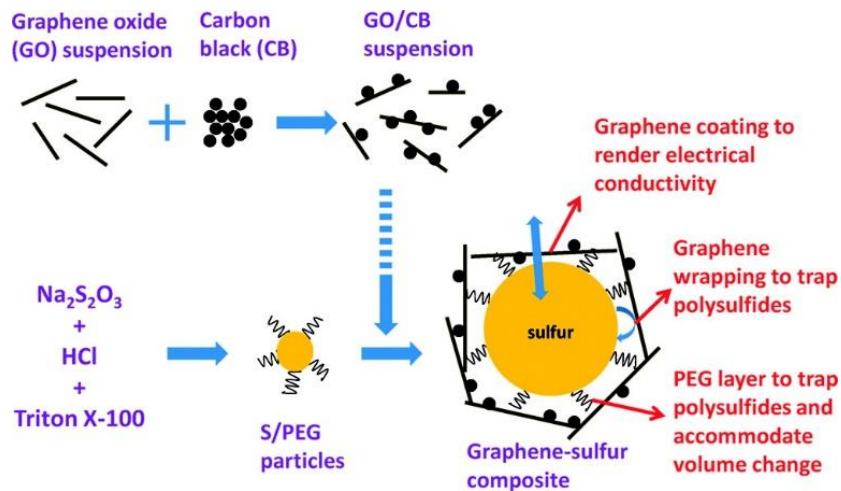
## Традиционный аккумулятор:

Анод: Графит,  $\text{LiC}_6$ . Теоретическая емкость: **372**  $\text{mA}\cdot\text{ч}/\text{г}$ .

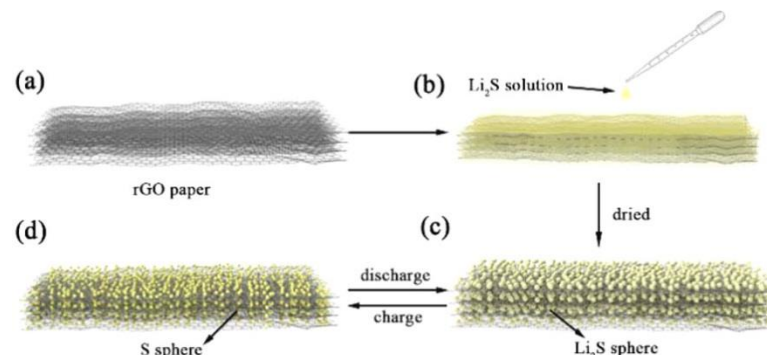
Катод:  $\text{LiCoO}_2$  Практическая емкость: **140**  $\text{mA}\cdot\text{ч}/\text{г}$ .

**Li-S катод имеет теоретическую емкость  $\sim 1400$   $\text{mA}\cdot\text{ч}/\text{г}$ .**

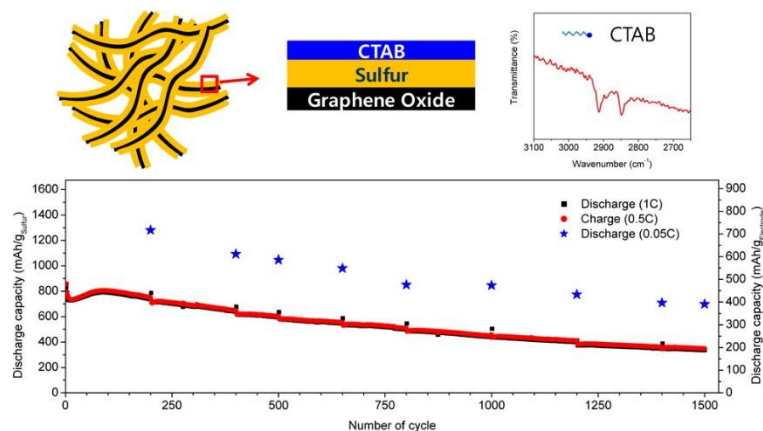
Минусы: сера растворяется и вытекает.  
ОГ используется для инкапсуляции серы



Wang et al., Nano Lett 2011, 11, 2644-2647



Wang et al., Nano Lett 2015, 15, 1796-1802



Song et al., Nano Lett 2013, 13, 5891-5899



# Литий-ионные аккумуляторы. Анод

- Кремний является одним из наиболее перспективных материалов для анода.
- Емкость кремния  $3579 \text{ мА} \cdot \text{ч/г}$  почти в 10 раз выше чем у графитового анода (372).
- Емкость композита Si с ОГ:  $>2500 \text{ мА} \cdot \text{ч/г}$ ; материал сохраняет 80% емкости после 1000 циклов.

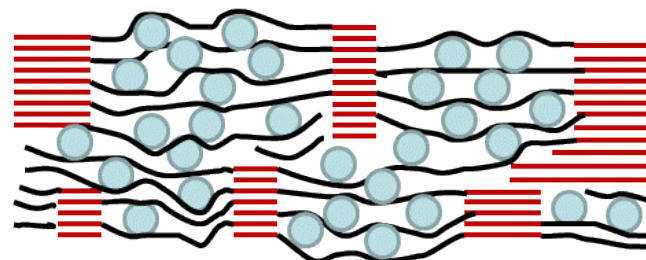


Наиболее емкий аккумулятор на рынке

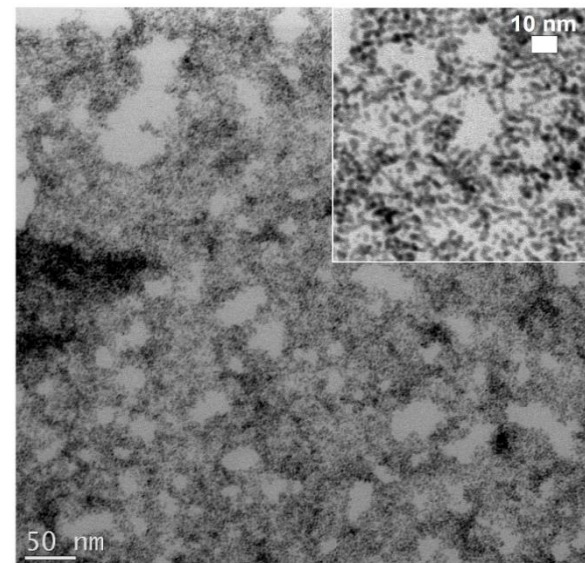
Аккумулятор 18650 с рекордным  $3.8 \text{ А} \cdot \text{ч}$  ( $800 \text{ Вт} \cdot \text{ч/л}$ ),  
Увеличение в плотности энергии на 17.3%.

## Si-Node Systems

Northwestern University,  
Prof. Mark Hersam



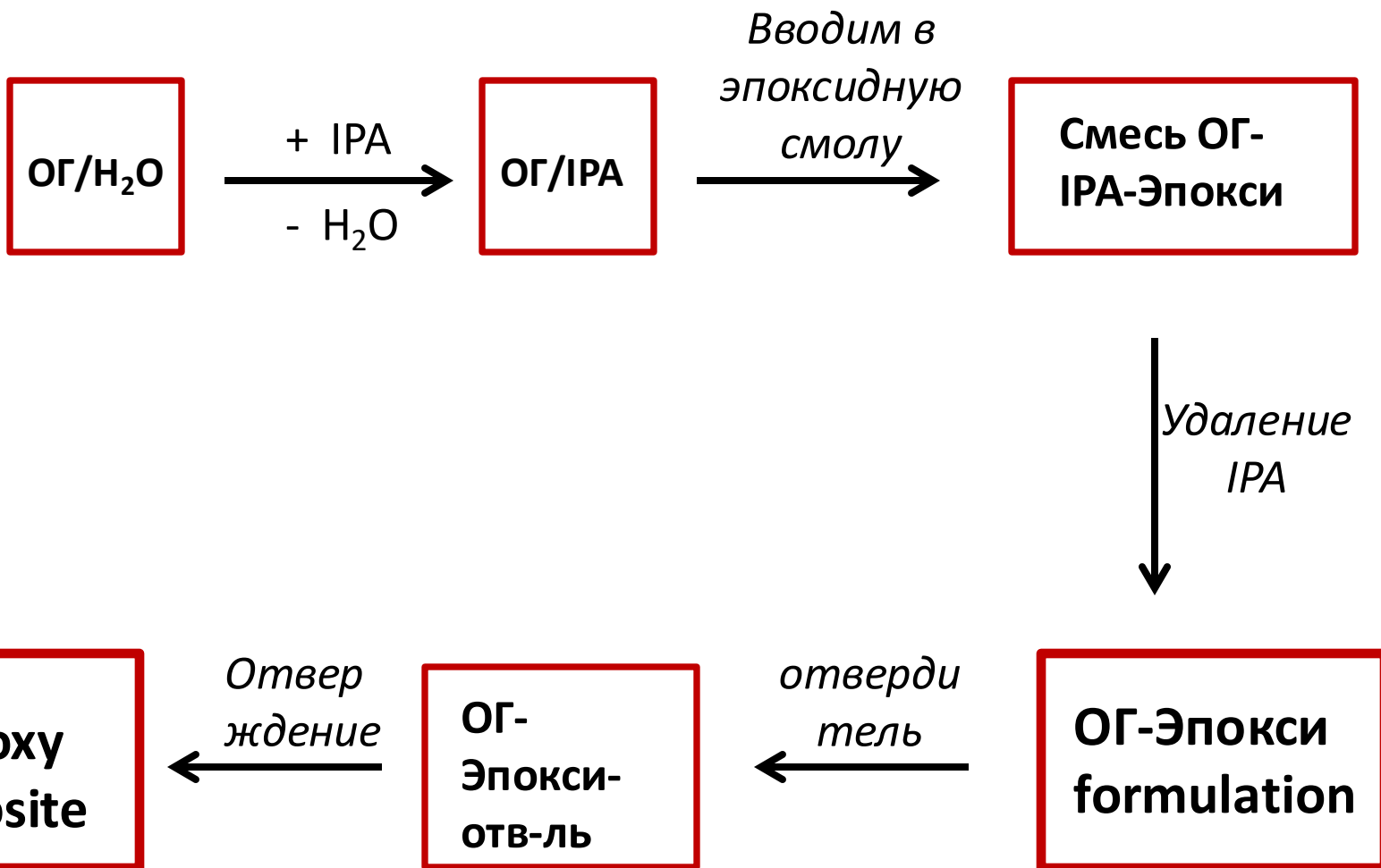
*Lee et al., Chem Comm. 2010, 46, 2025-2027*



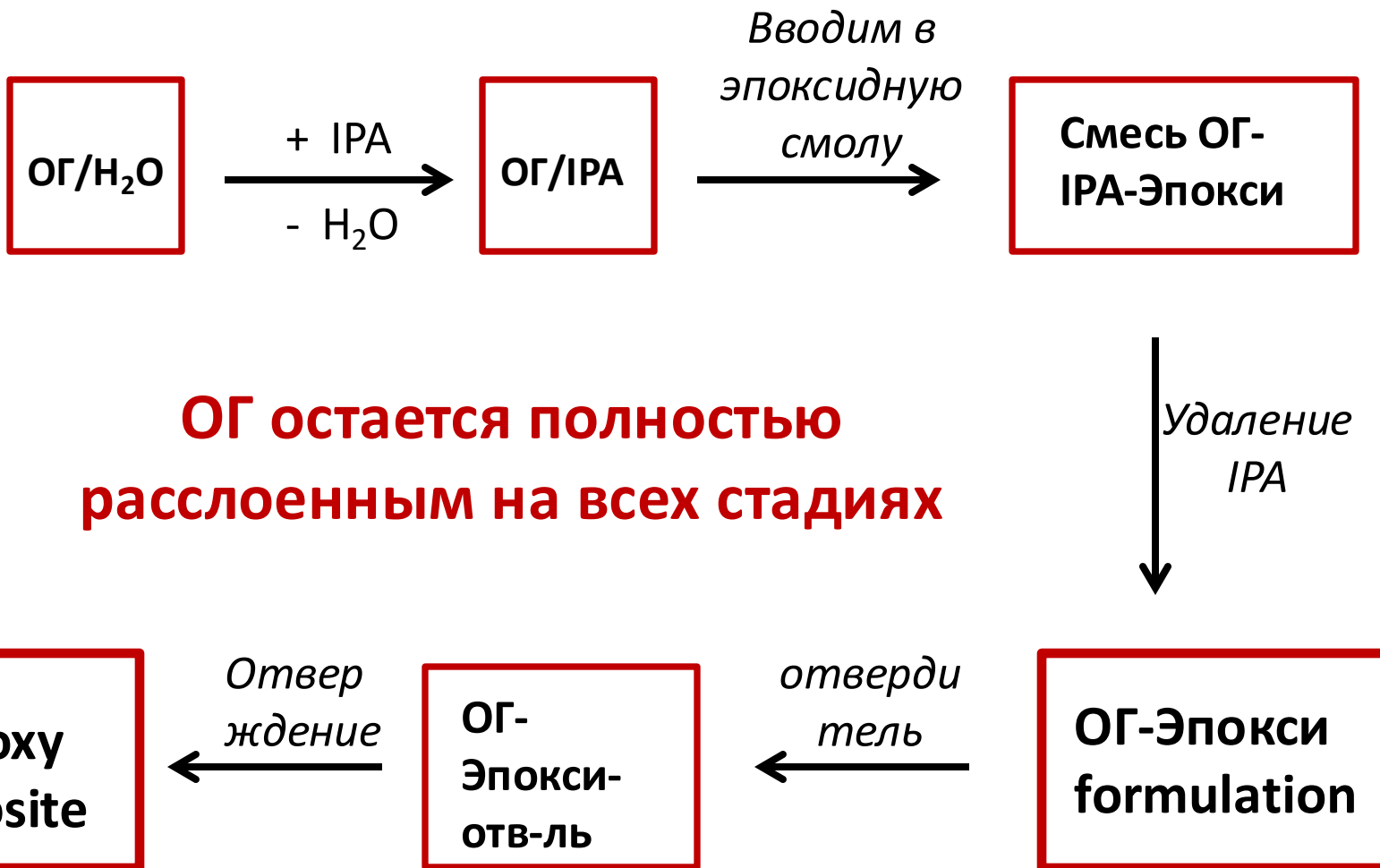
*Zhao et al., Adv. En. Mater. 2011, 1, 1079-1084*

**Композиты эпоксидная смола – оксид графена**

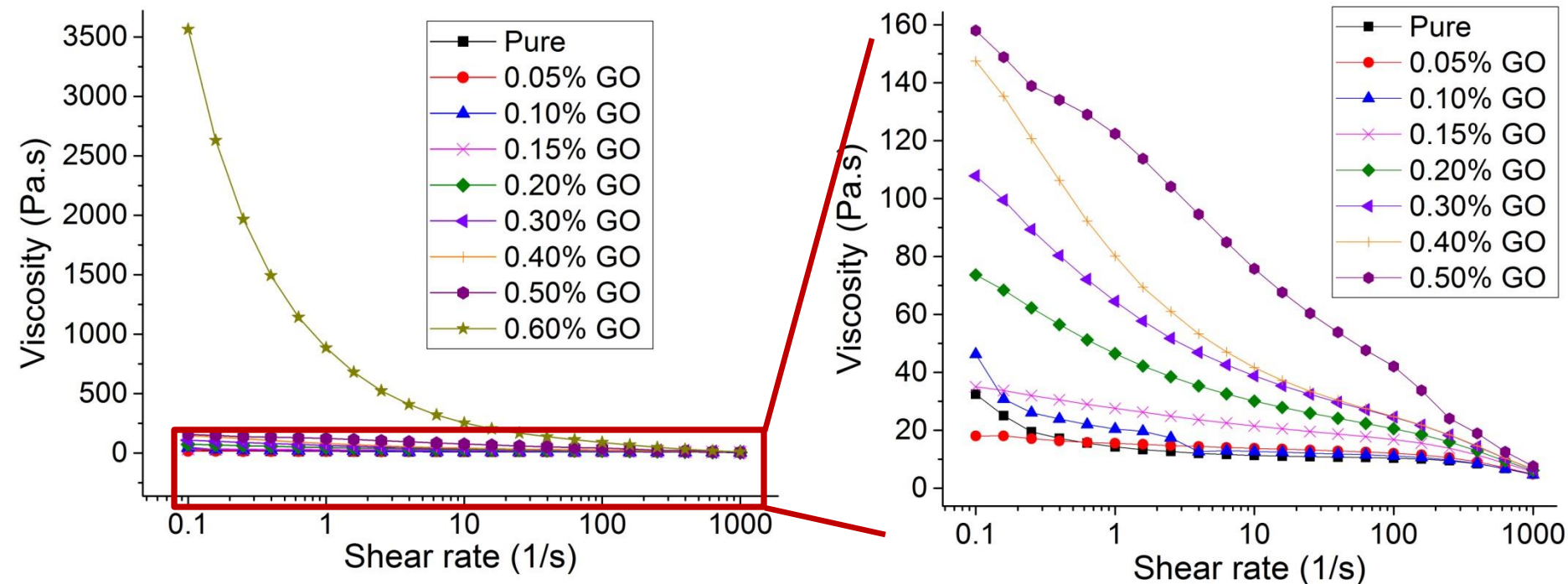
# Новый способ внедрения ОГ в эпоксидную смолу



# Новый способ изготовления: эпоксидная смола – оксид графена



# Rheological Properties of GO/Epoxy Formulations



Увеличение вязкости на 263%, 387%, и 529% при добавлении 0.2%, 0.3%, и 0.4% ОГ. При 0.6% состав превращается в пасту.

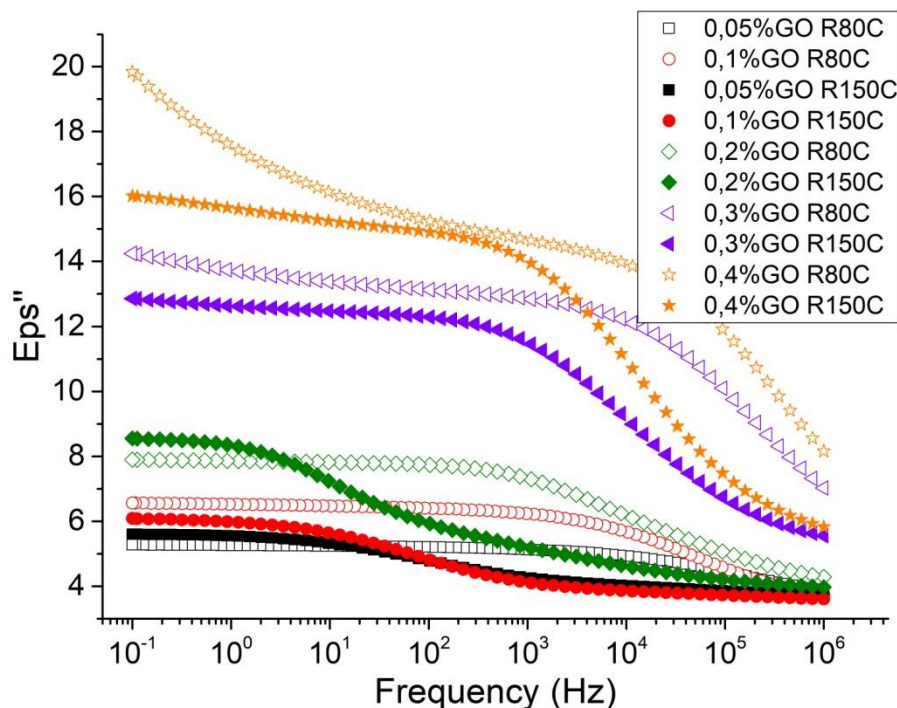
В литературных работах, *Valles et al. J Polym. Sci. Part B* **2016**, 54, 281-291, добавление 0.5% и 1.0% ОГ не влияет на вязкость; добавление 2.0% и 3.0% ОГ увеличивает вязкость всего на 25% и 59%.

**Высокая вязкость является показателем высокой степени расслоенности ОГ в смоле.**

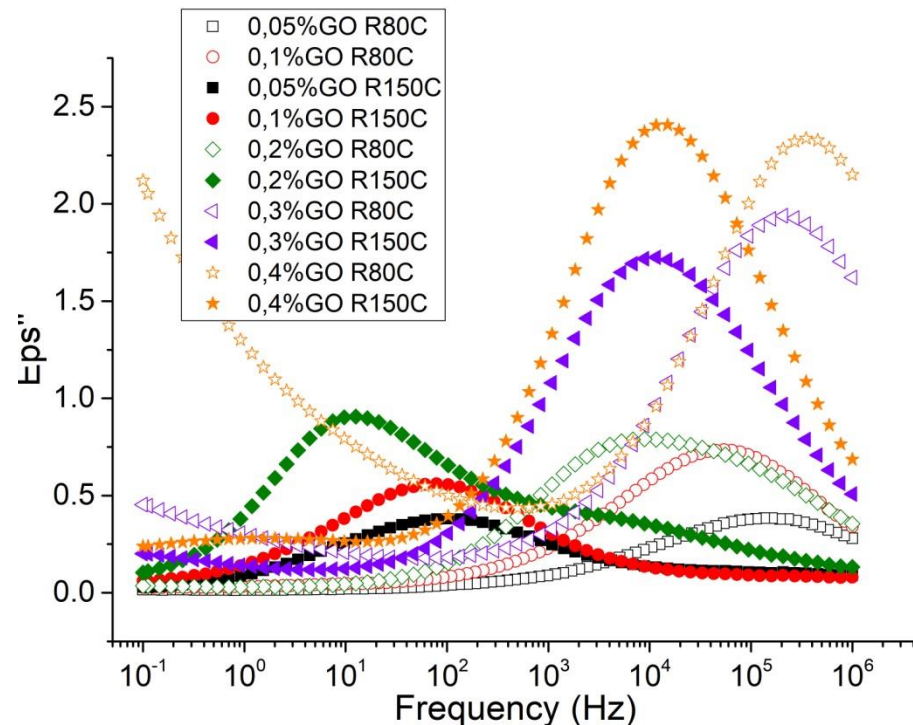
**Использование: Композиты эпоксидная смола – углеволокно (препреги)**

# Диэлектрическая проницаемость. ВОГ-Эпокси

## Действительная часть



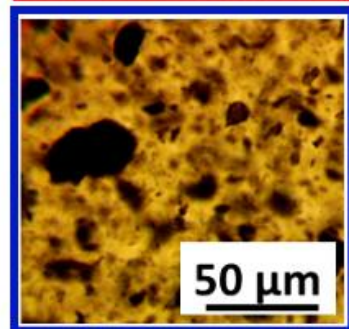
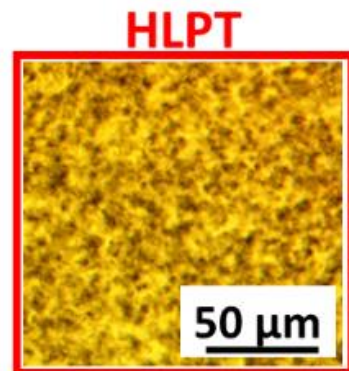
## Мнимая часть



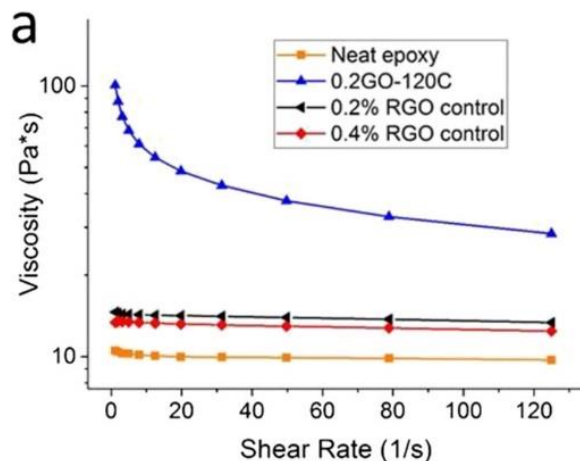
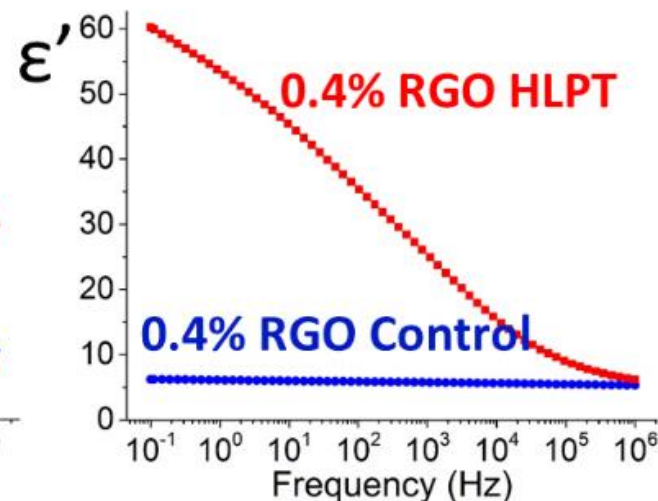
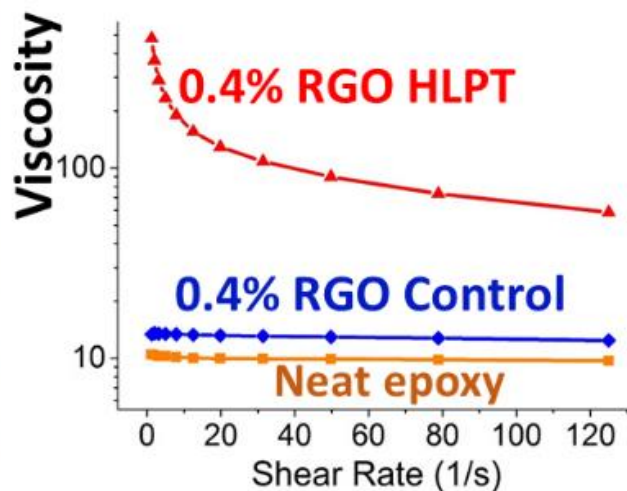
- Диэлектрическая проницаемость относительно невысокая ввиду низкой электрической проводимости ВОГ.
- Ведет себя как проводящий полимер, а не как композит.



# Контрольный эксперимент. 0.2% ВОГ

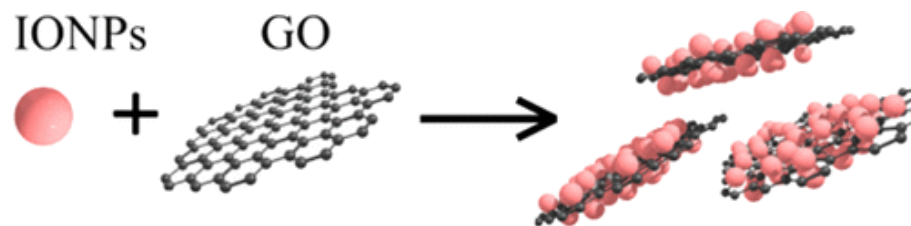


**Control**



## Магнето-оптические свойства

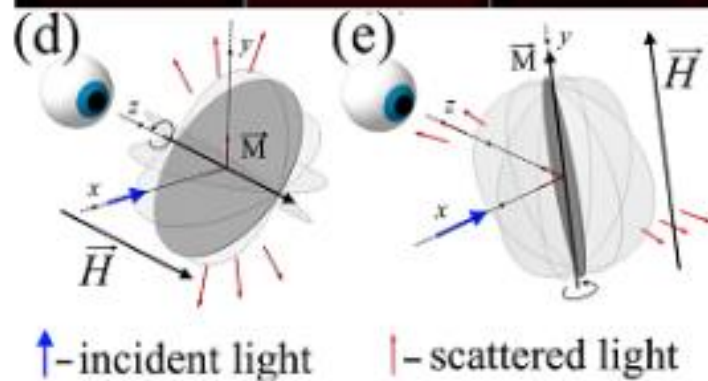
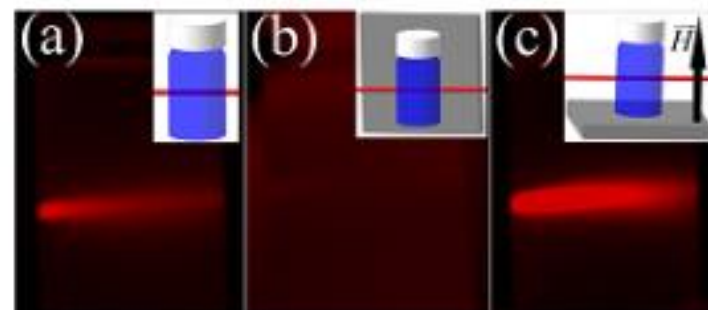
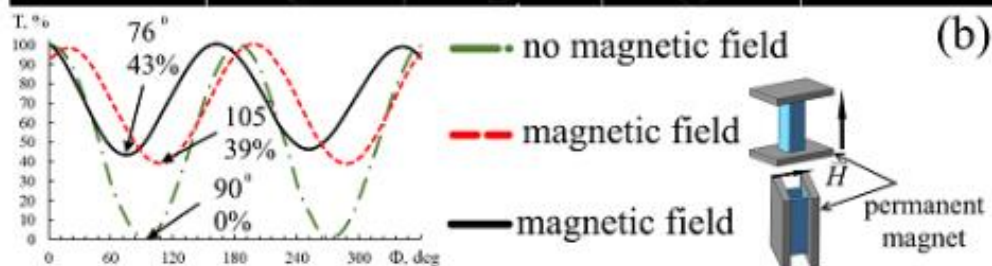
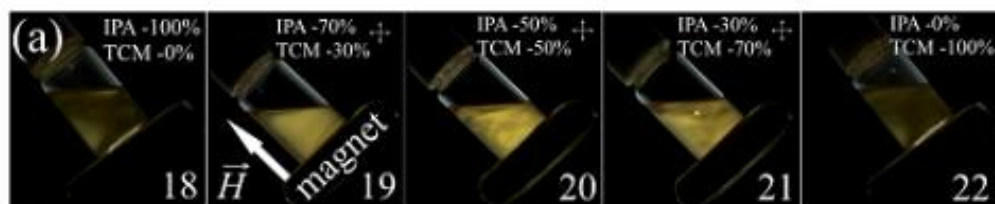
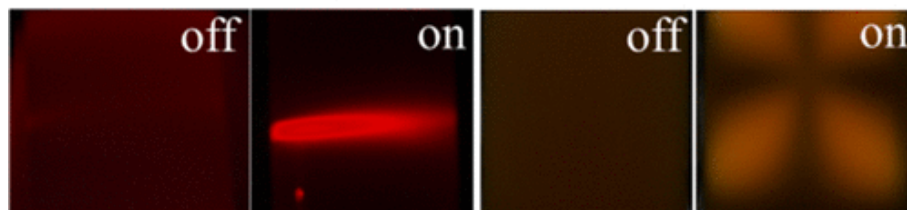
## Управляем оптическими свойствами жидкостей



## Magneto-Optical Switch

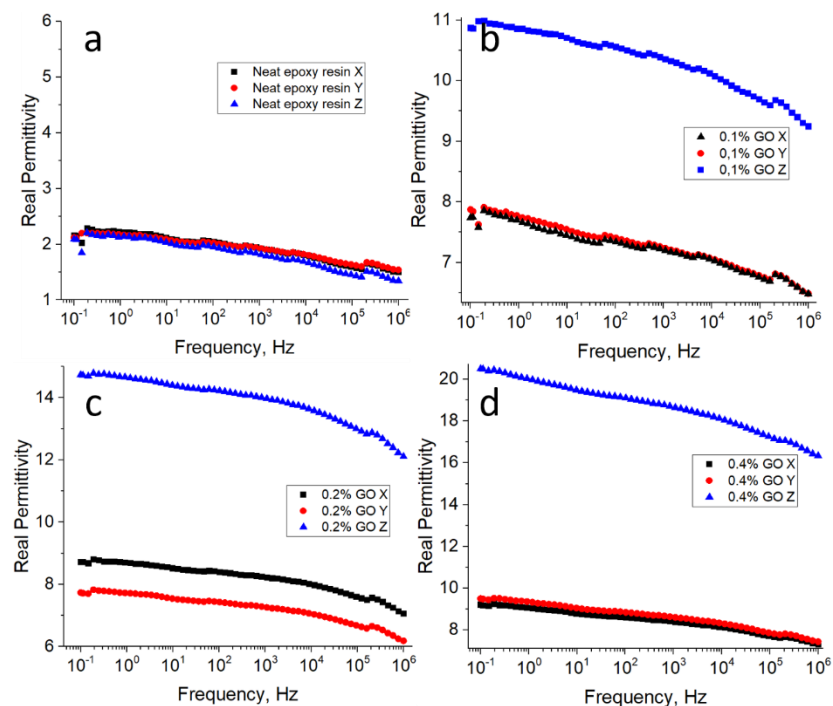
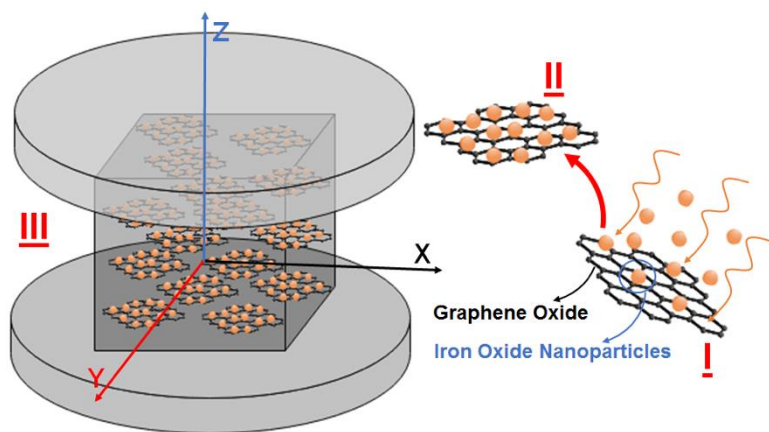
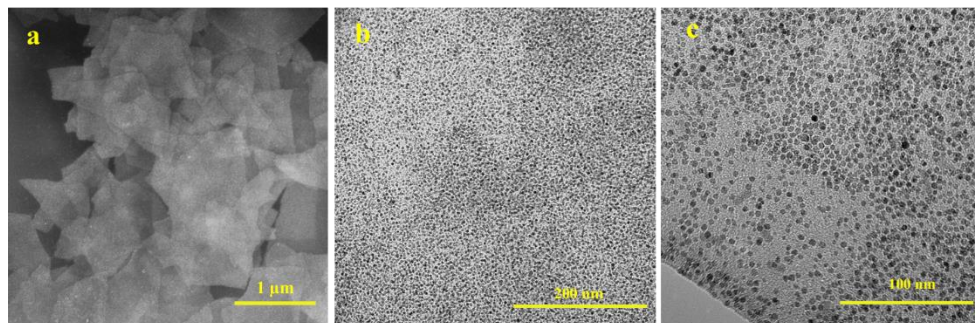
## Scattering

## Transmission



# Магнито-диэлектрические свойства

Управляем диэлектрическими свойствами твердых  
КОМПОЗИТОВ



Диэлектрические свойства в направлении Z значительно выше чем в двух других.

**Катализ: Водородные топливные элементы**



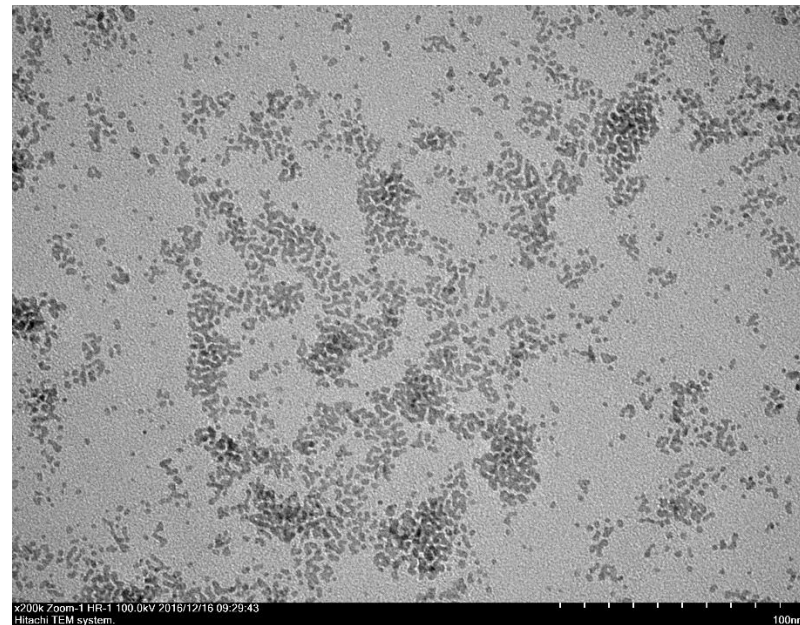
# Различная морфология композитов ВОГ-Металл

Состояние металла можно варьировать от одиночных атомов до наночастиц

**ВОГ-Ni**

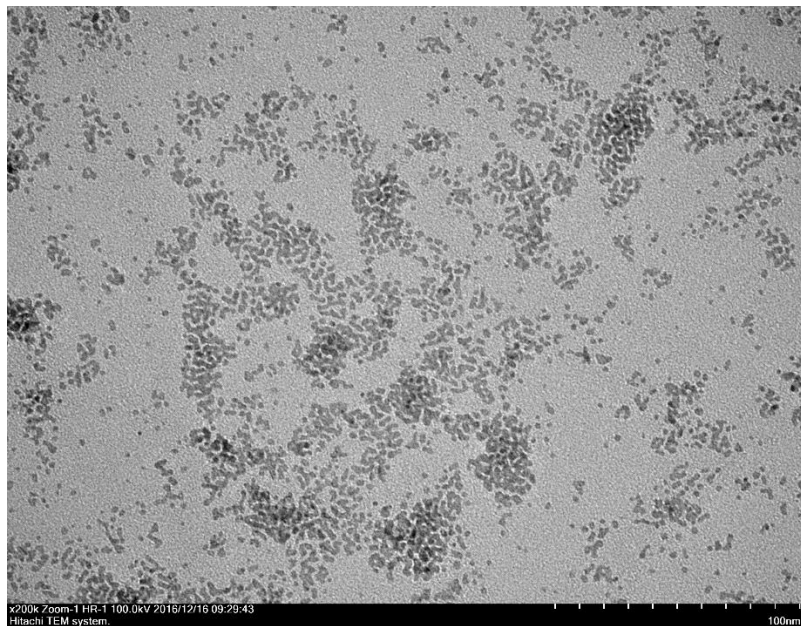


**ВОГ-Pd**

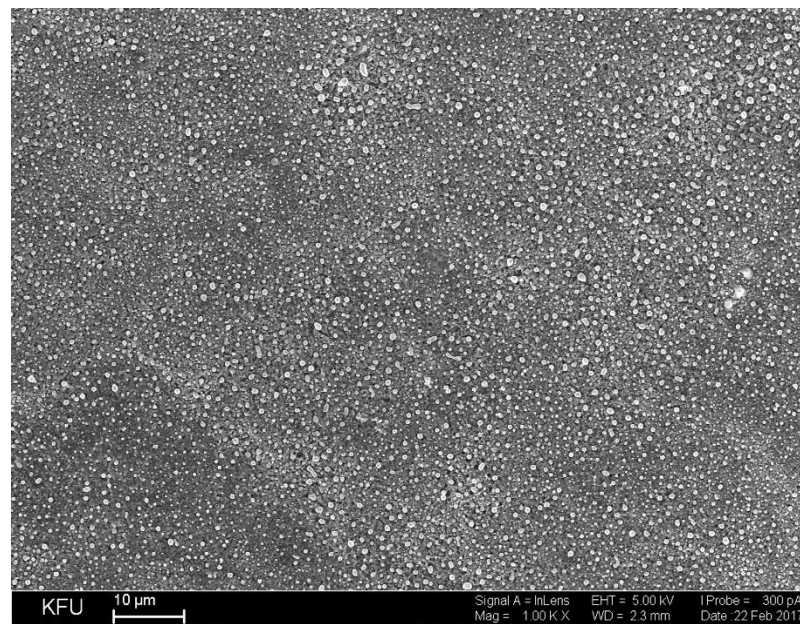


# Различная морфология композитов ВОГ-Металл

ВОГ-Pd

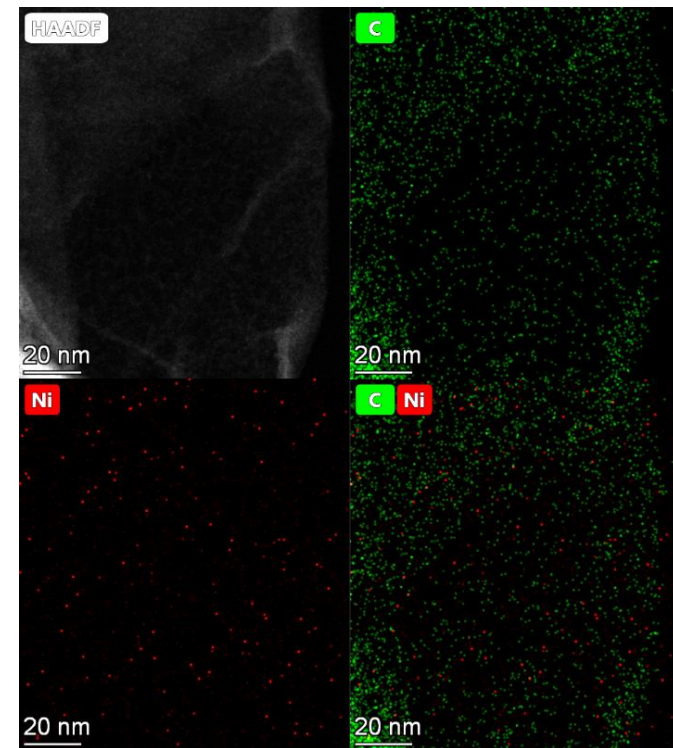
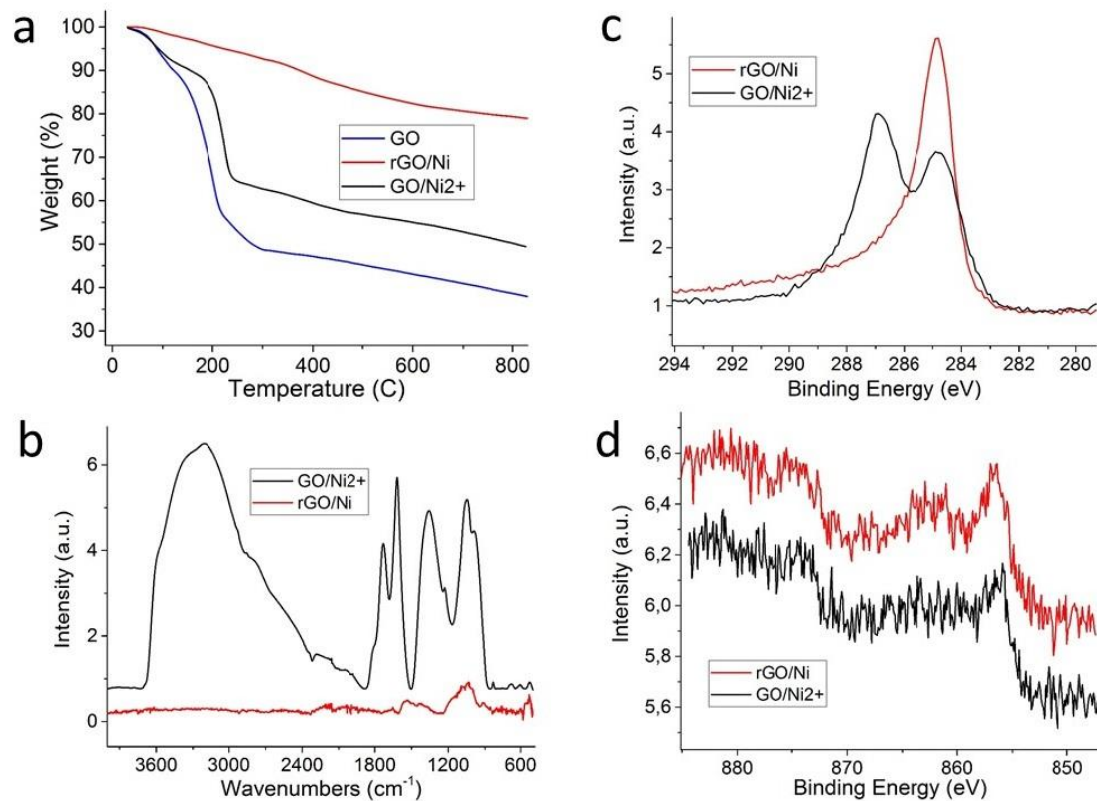


ВОГ-Pd после отжига



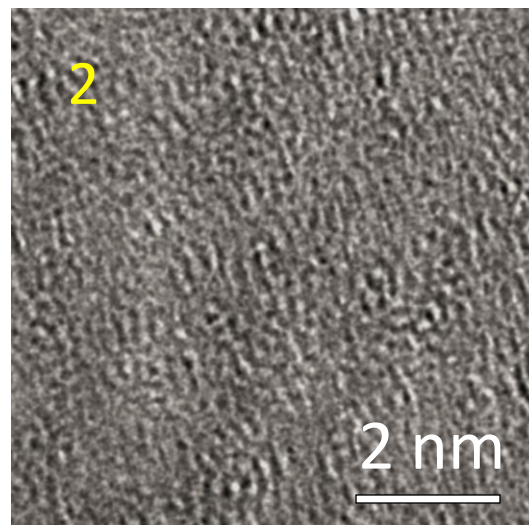
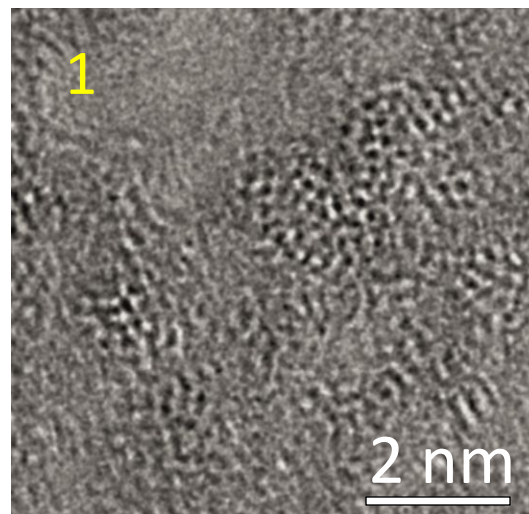
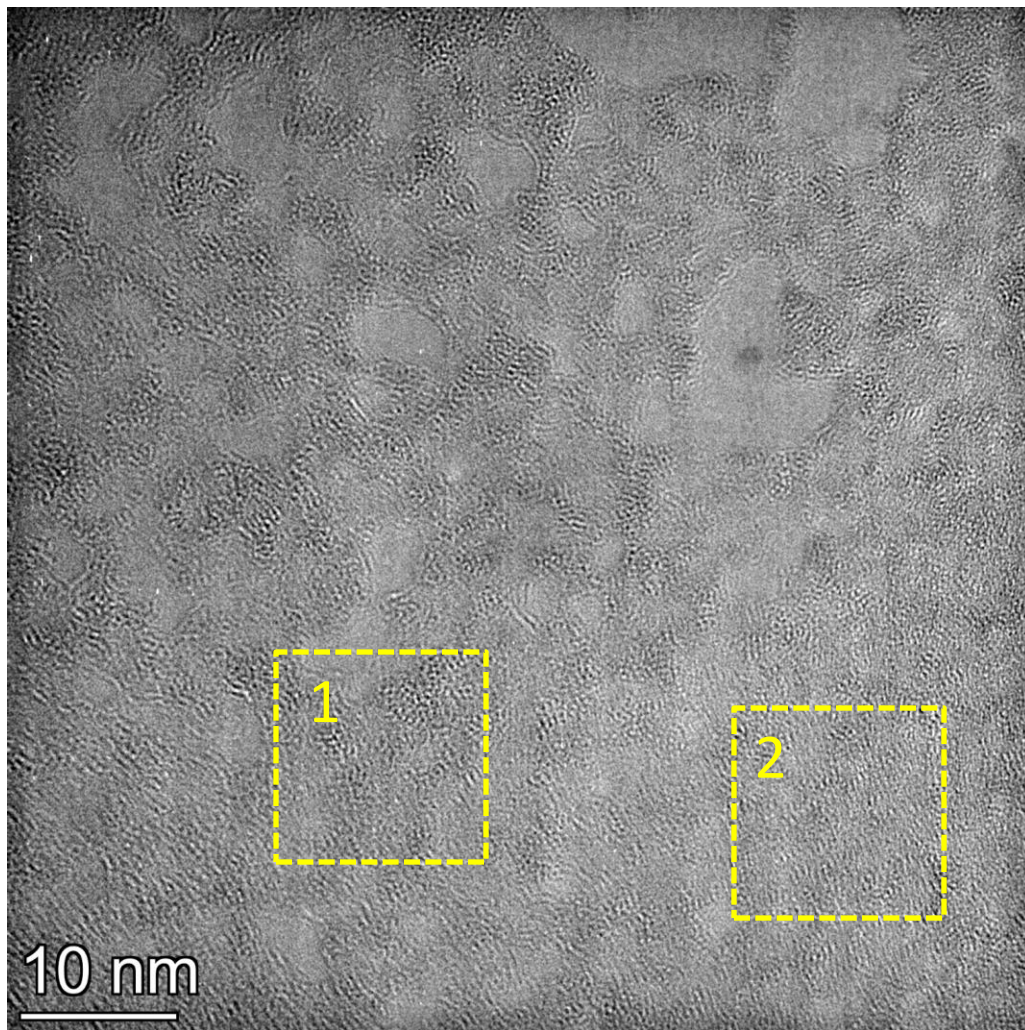


# BOF-Ni



- Отсутствие наночастиц

# ВГО-Ni. HRTEM

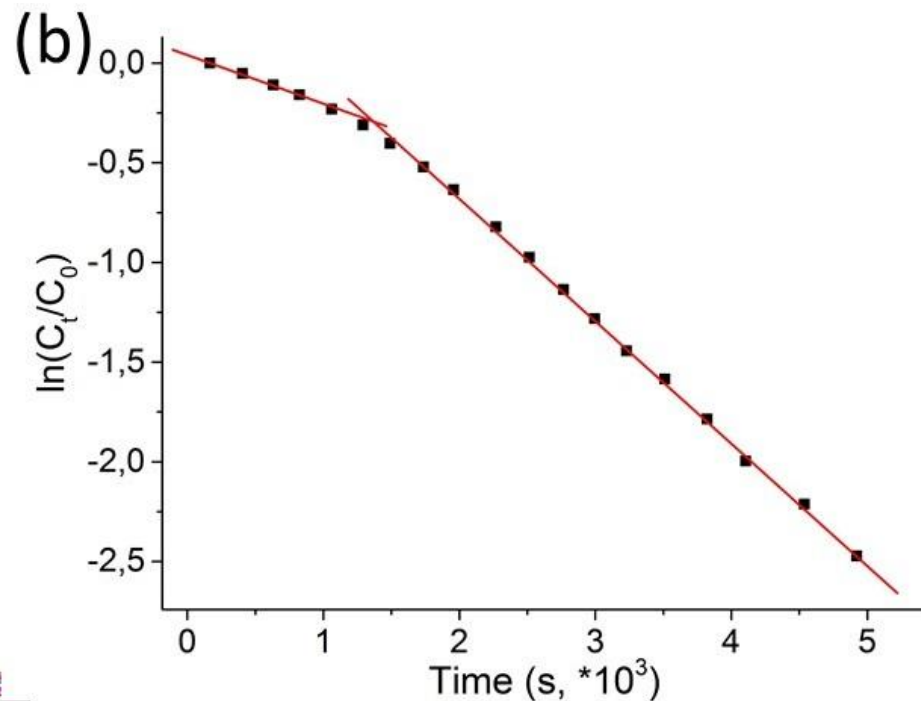
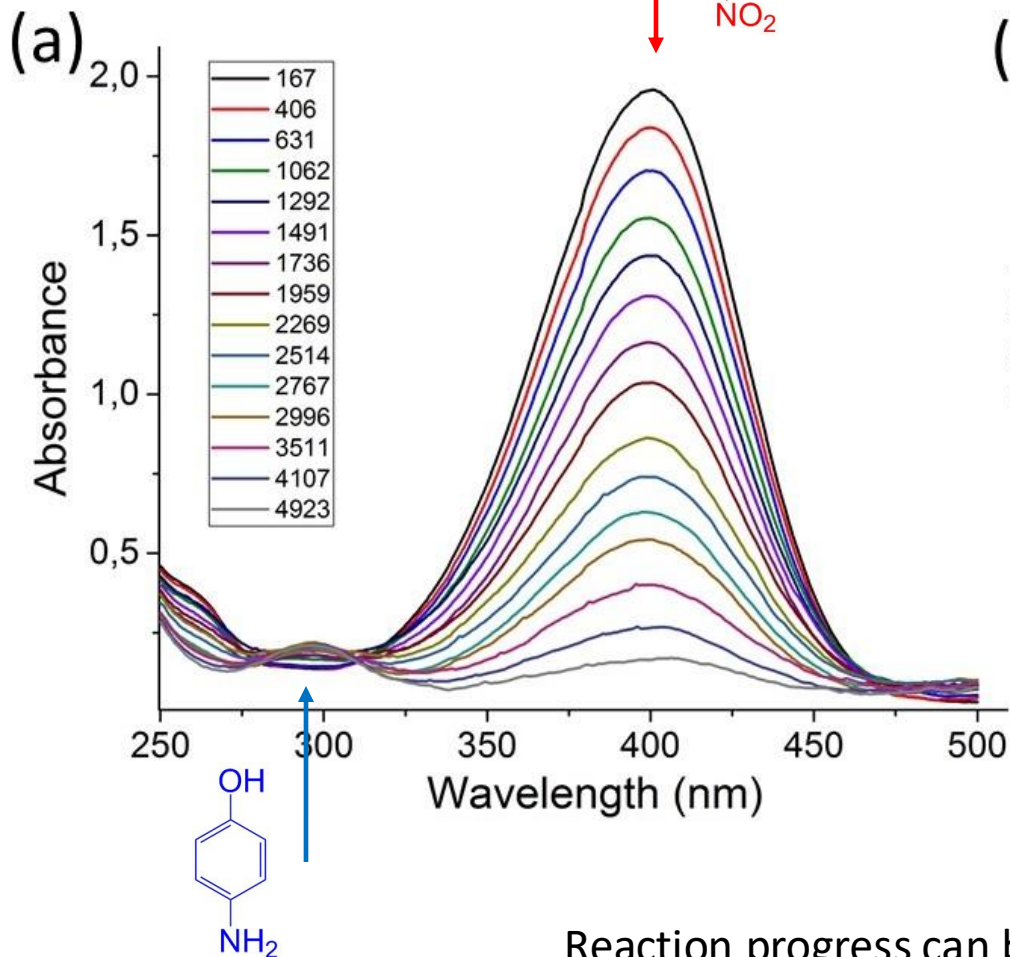


- Отсутствие наночастиц.
- **Вывод:** Ni присутствует в виде отдельных атомов-ионов.



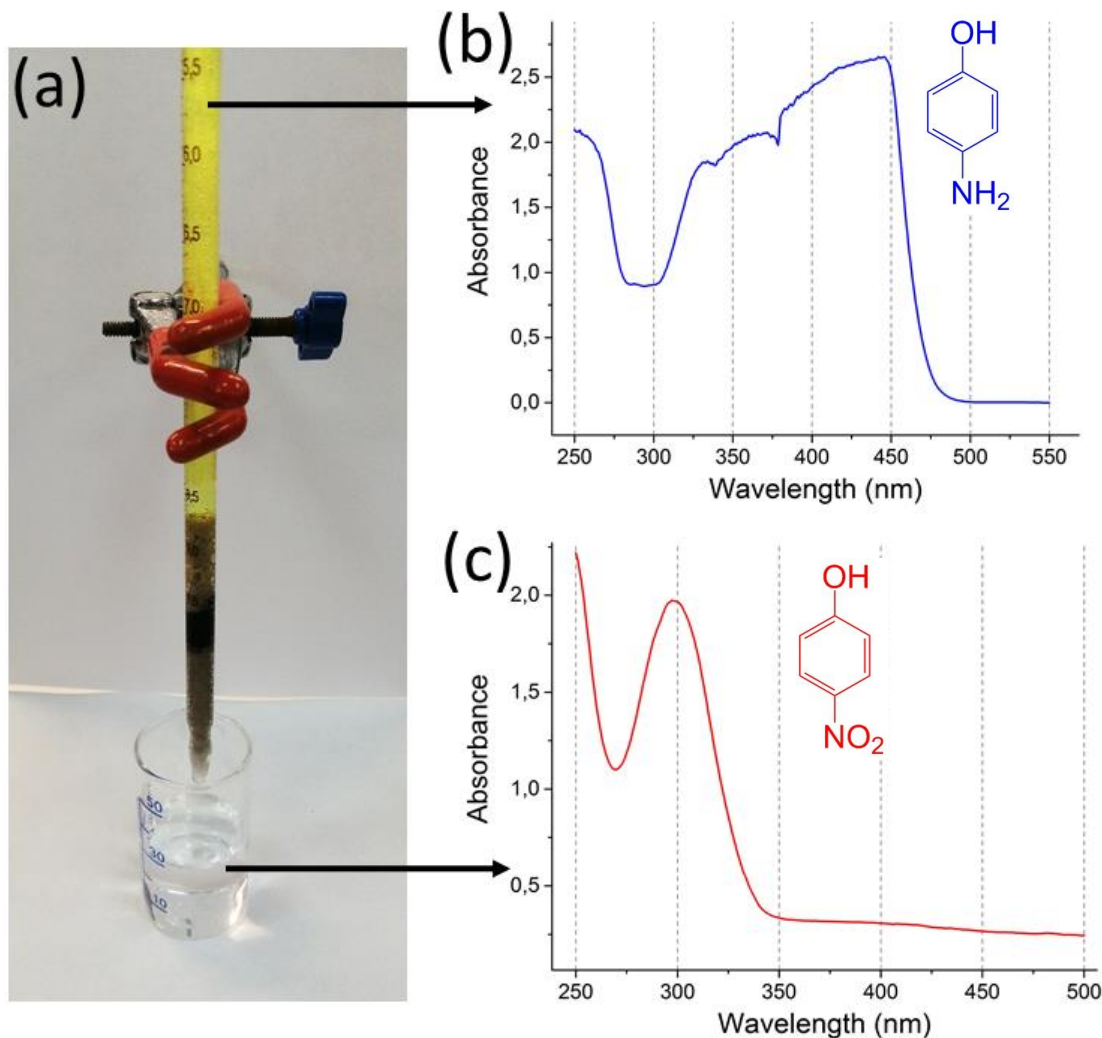
# RGO-Ni. Catalysis.

## Reaction in a beaker



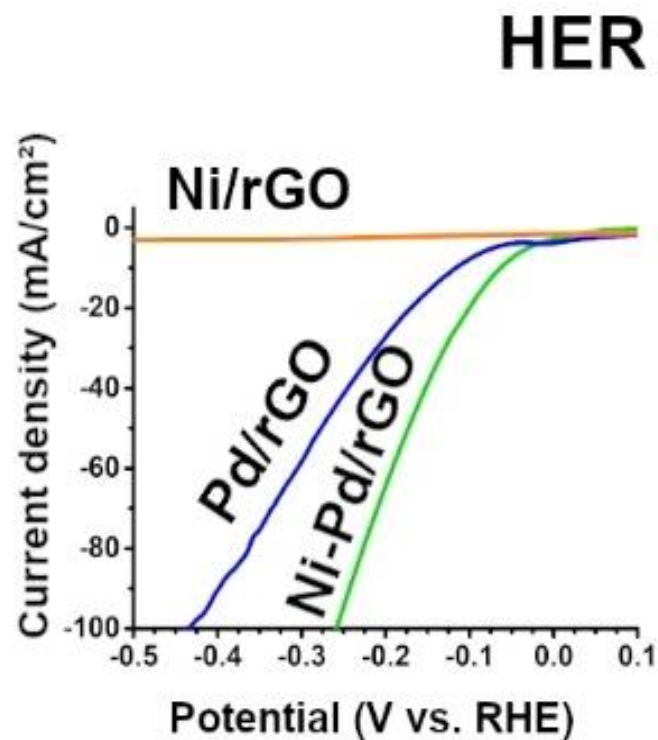
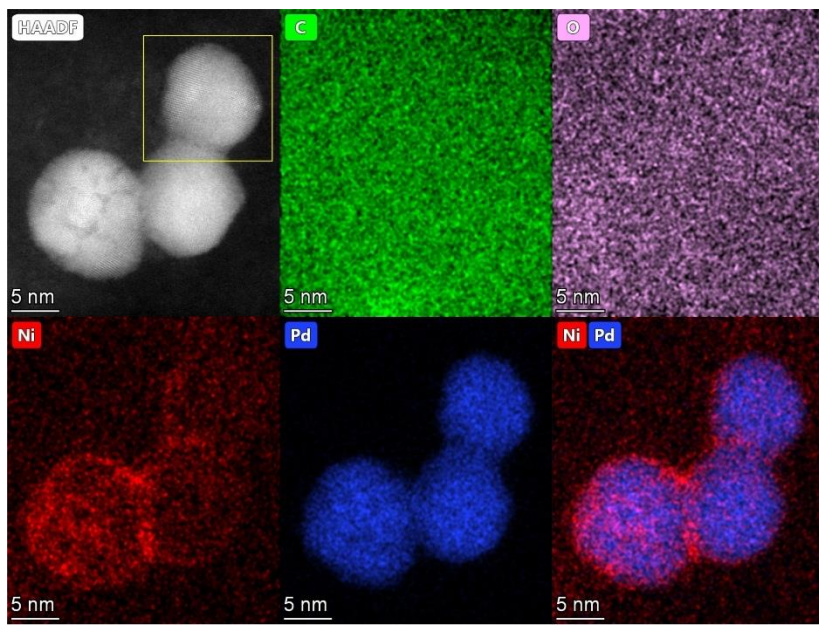
Reaction progress can be monitored by UV-Vis spectroscopy  
Excess of  $\text{NaBH}_4$ : pseudo first order reaction  
Heterogeneous catalysis. Reaction is controlled by diffusion of reactants/products. The actual reaction might be instantaneous.

# Катализ. Проточный реактор



- Катализ на отдельных атомах никеля
- Эффективный катализатор восстановления п-нитрофенола.

# BOГ/Ni-Pd



- Данные композиты хорошо работают как катализаторы для реакции восстановления кислорода в водородных топливных элементах мембранного типа.
- Частичная или полная замена Pt в катализаторах.

**Спасибо за внимание!**