

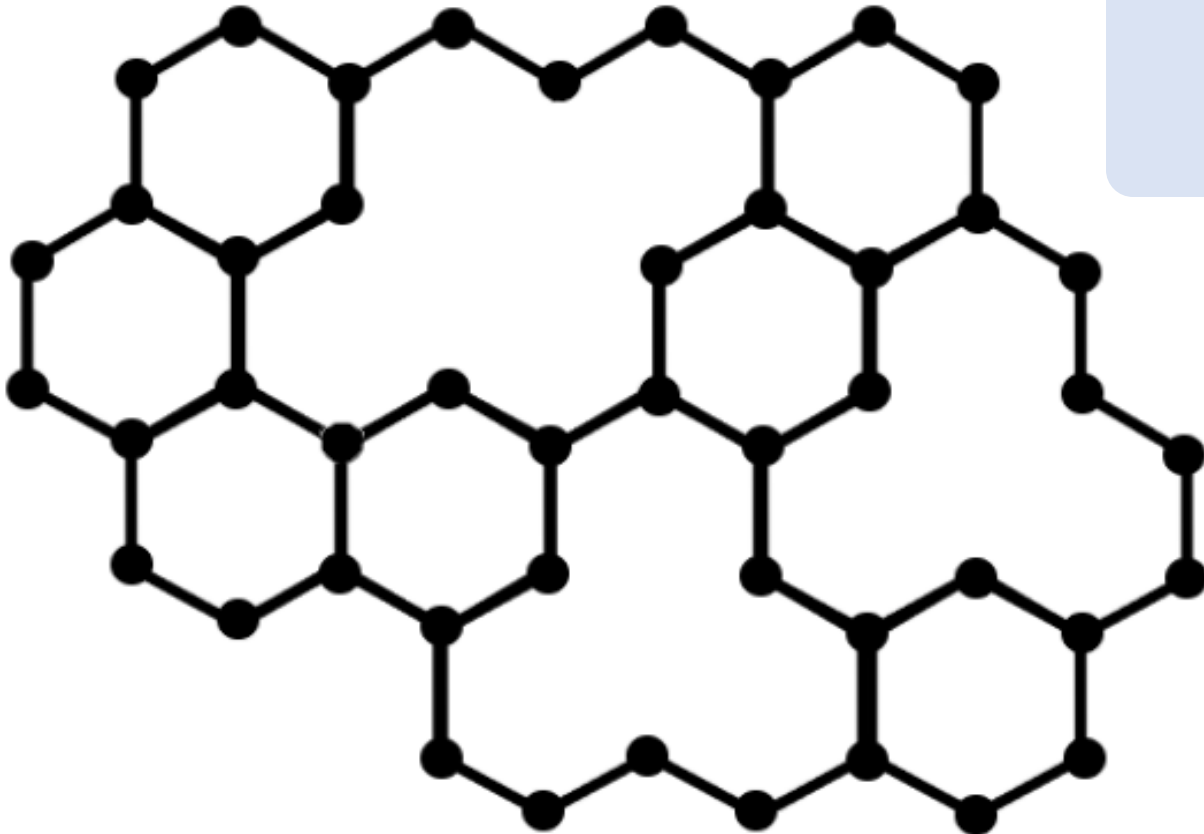
Изготовление перфорированного однослойного графена с использованием реакции Будуара

**Мальгин Кирилл Элманович,
Д. В. Красников, А. Г. Насибулин**

Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

Перфорированный графен

Структура перфорированного графена



Свойства

Ненулевая запрещенная зона

Большая площадь поверхности

Большее число химически активных сторон



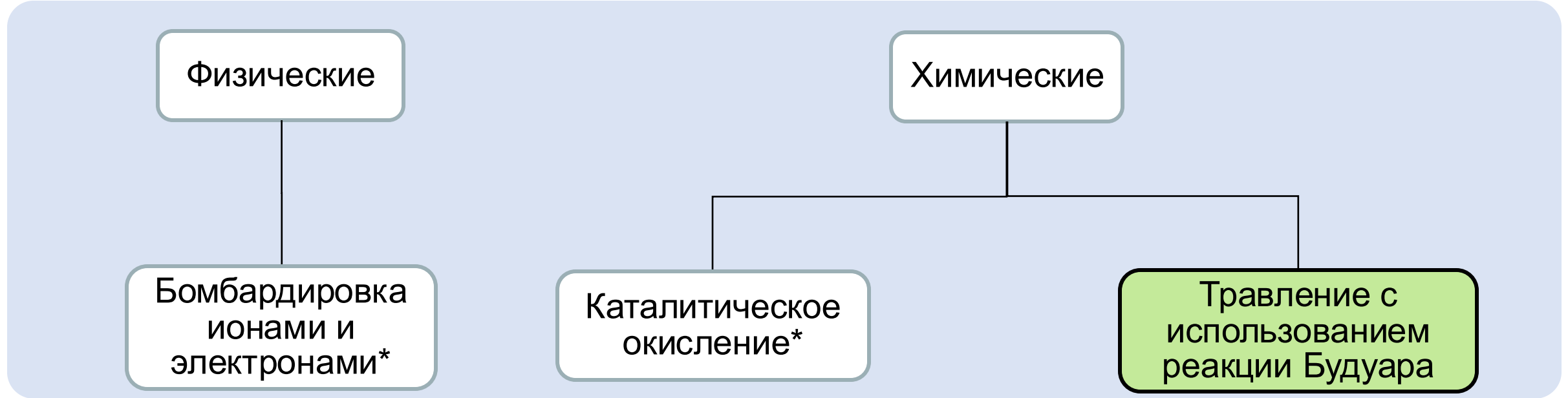
Применения

Полевые транзисторы

Биосенсоры

Газовые сенсоры

Методы синтеза



Преимущества

- Высокая точность паттерна перфораций
- Разнообразие получаемых площадей 1-1000 нм

Недостатки

- Ограниченные размеры образцов
 - *ex-situ* метод

Преимущества

- Разнообразие получаемых площадей 1-1000 нм
- Образцы большой площади

Недостатки

- Низкая точность паттерна перфораций
 - *ex-situ* метод
- Необходимость удаления катализатора после синтеза

Преимущества

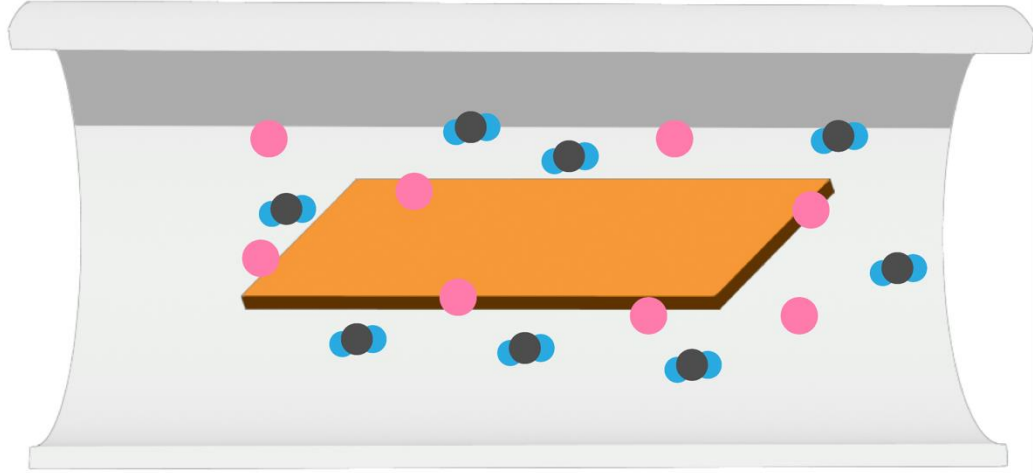
- одностадийный *in-situ* метод
 - Легкая масштабируемость
- Образцы большой площади
- Контролируемая плотность паттерна и средней площади перфораций

Недостатки

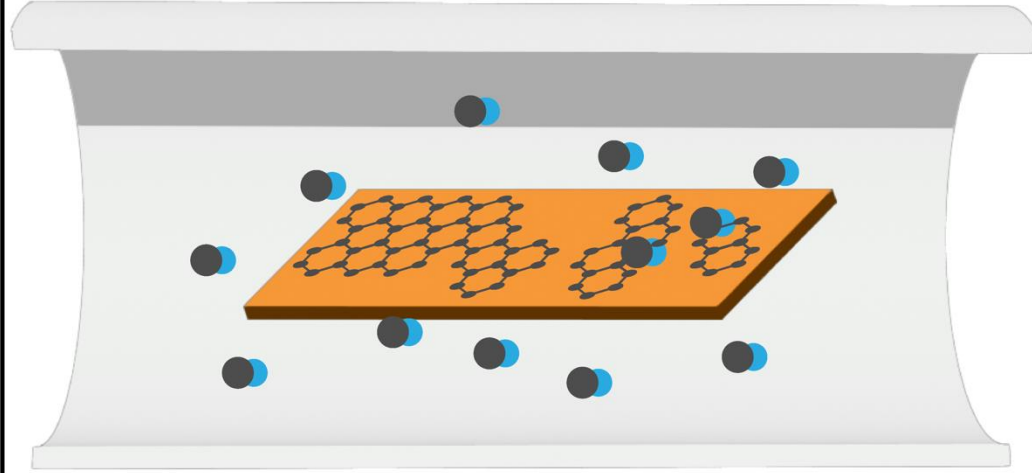
- Невозможно контролировать паттерн точно

Метод синтеза

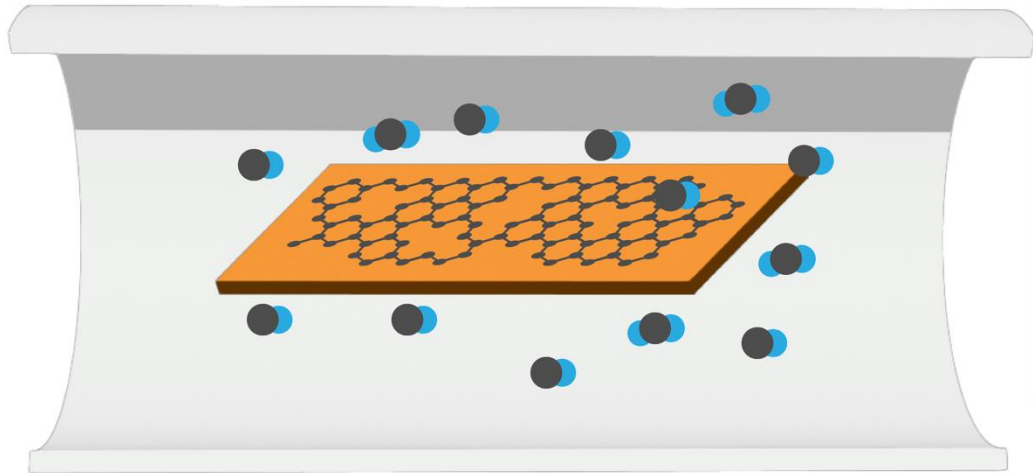
A) 1000°C, Ar 1 l/min, CO₂ 100 ml/min, 10 minutes annealing



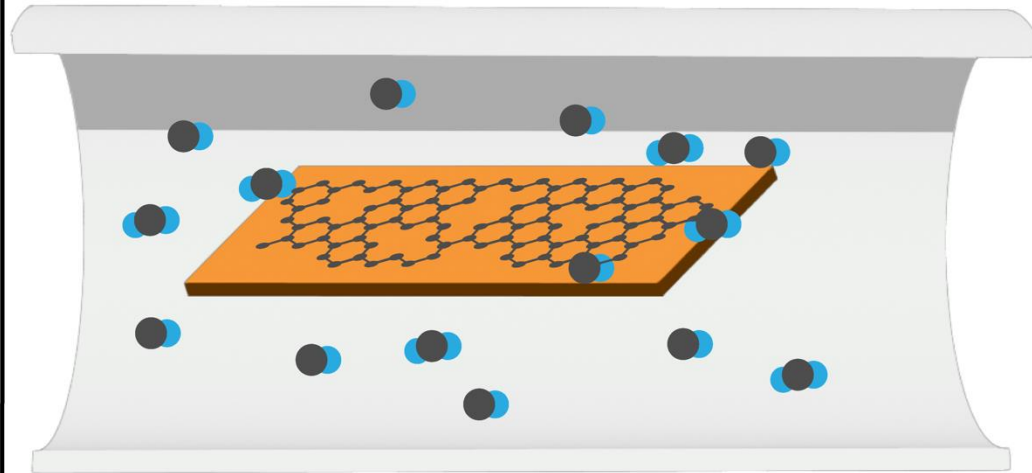
B) 1000°C, CO 3 l/min, 15 minutes Gr growth



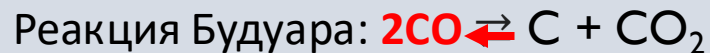
C) 1000°C, CO 3 l/min, CO₂ 2%, 30-600 seconds of etching



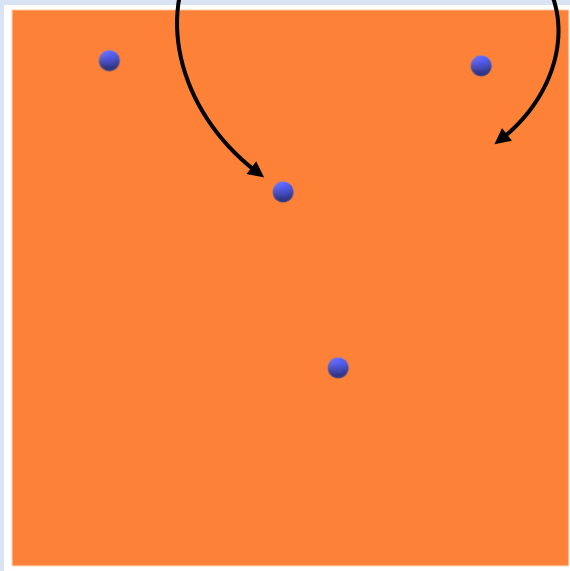
D) 100°C, CO 3 l/min, CO₂ 2%, 5 minutes of stabilization



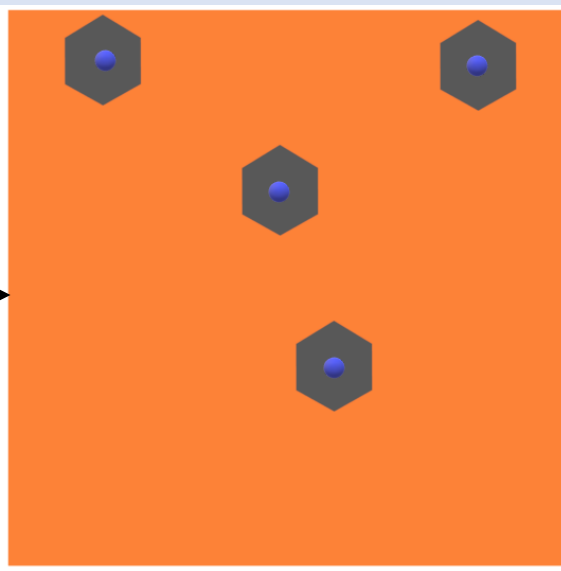
Реакция Будуара



Центр нуклеации
Медная подложка



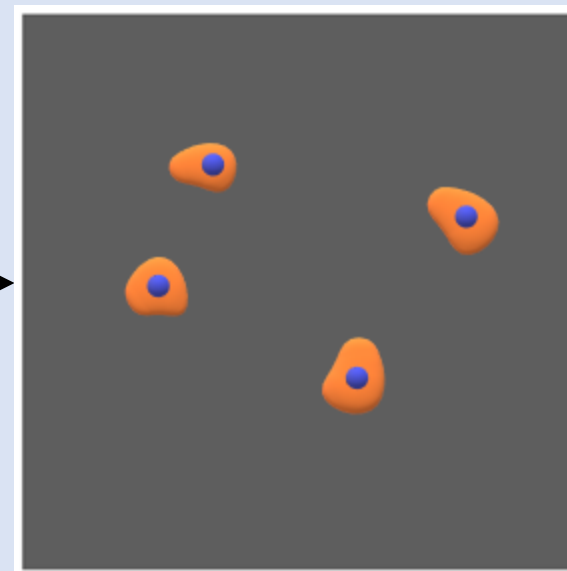
Рост островков
графена



Формирование
пленки графена



Травление



Центры нуклеации
снижают энергетический
барьер протекания
химической реакции*.

Введение CO_2 в камеру
реактора обращает
реакцию Будуара вспять.

Концентрация CO₂

Константа равновесия химической реакции:

$$K_P = \frac{\bar{P}_{CO_2}}{(\bar{P}_{CO})^2} = \exp\left(-\frac{\Delta G}{RT}\right),$$

Изменение энергии Гиббса:

$$\Delta_f G_T = \Delta_f H_T - T\Delta_f S_T,$$

Полная энтальпия образования для реакции Будуара:

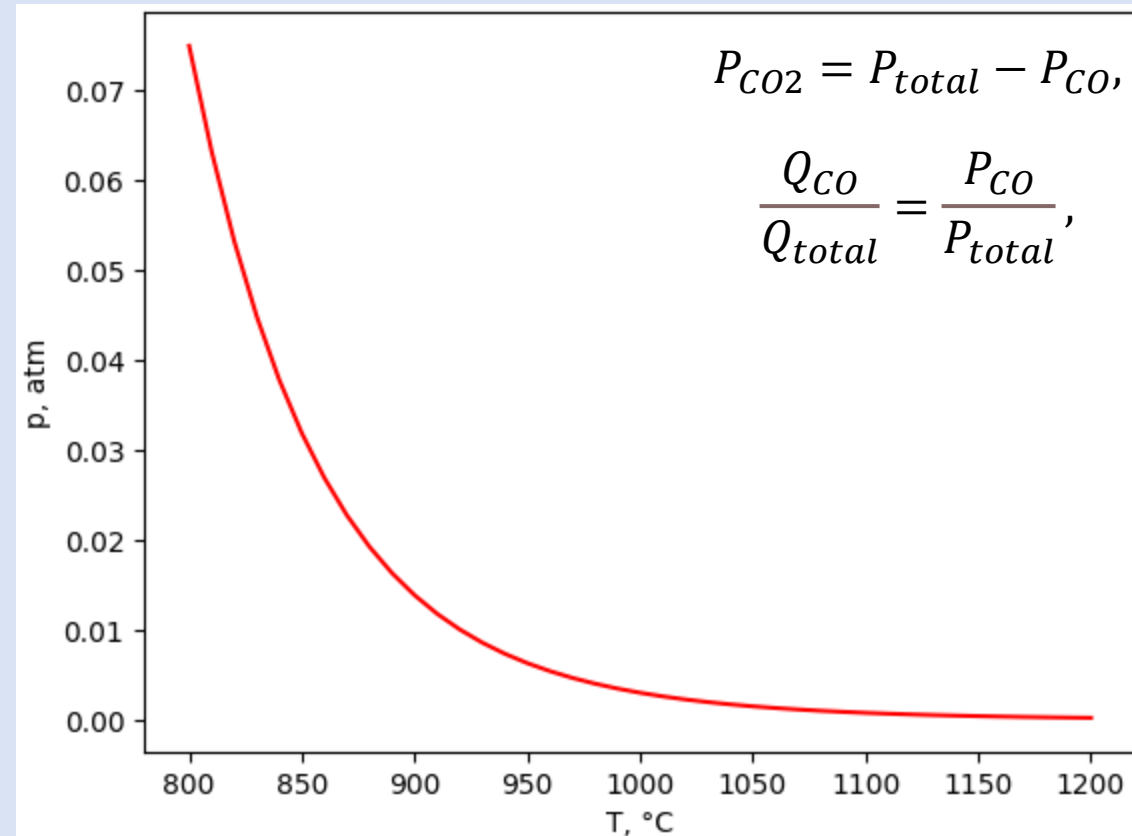
$$\Delta_f H_T = \Delta_f H_{CO_2} + \Delta_f H_C - \Delta_f H_{CO},$$

Энтальпия образования углерода [*]:

$$\Delta_f H_C = \int_{298}^T C_p(T) dT,$$

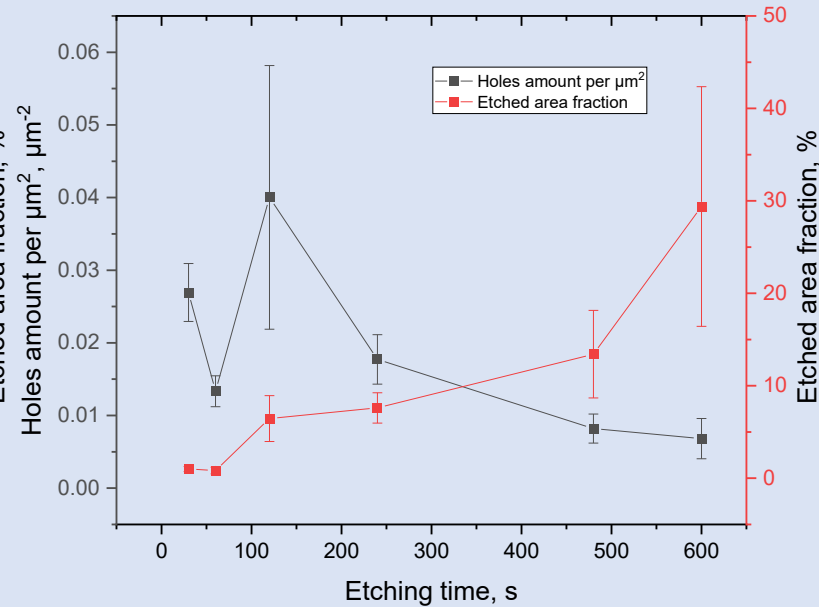
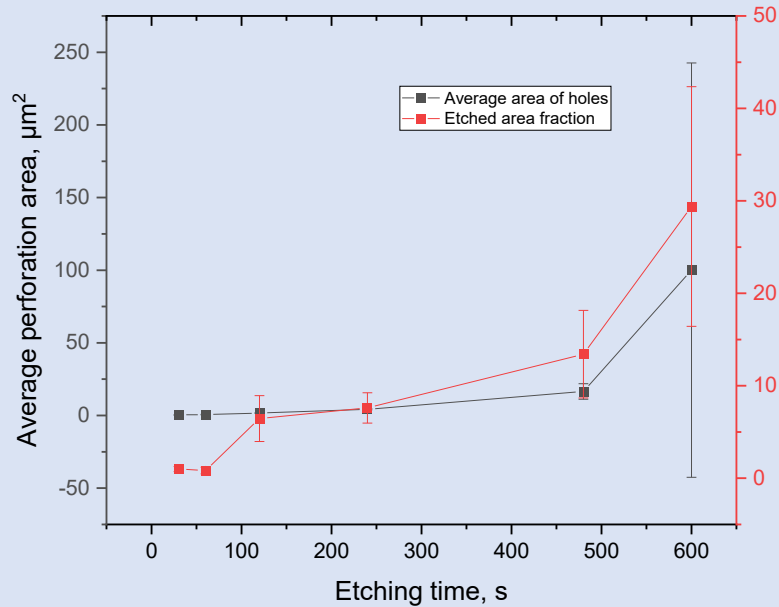
Изобарная теплоемкость:

$$C_p = 0.630375 - 1.60535 * 10^{-5}T - 225.861T^{-1} + 3100.10T^{-2} - 910737 * T^{-3} - 9.64607 * 10^7 T^{-4}.$$

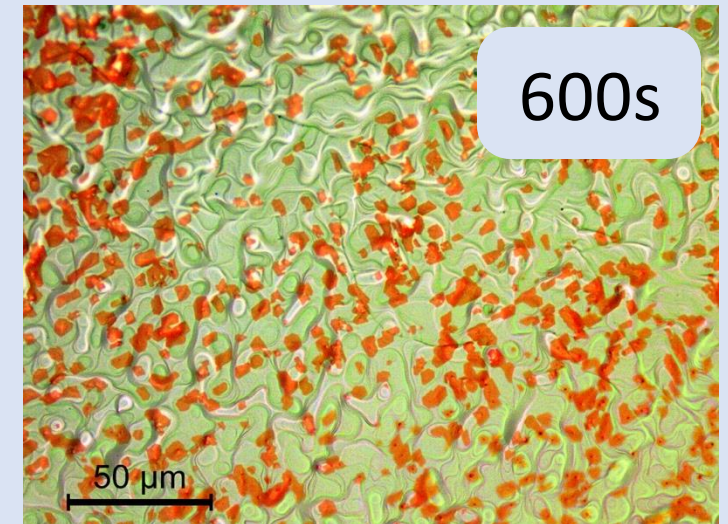
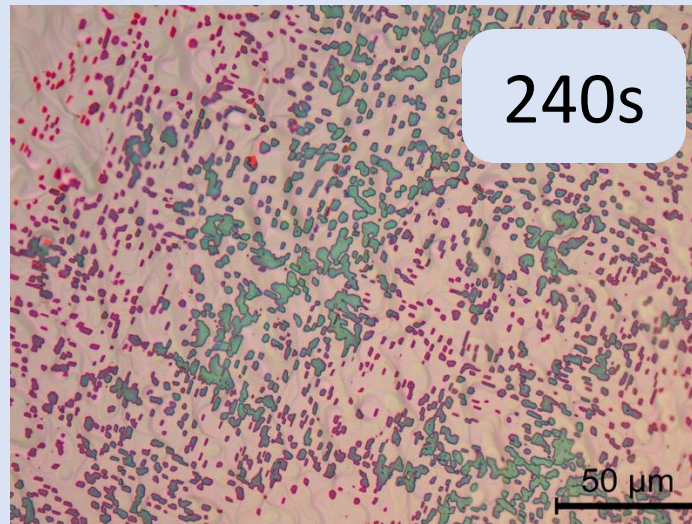
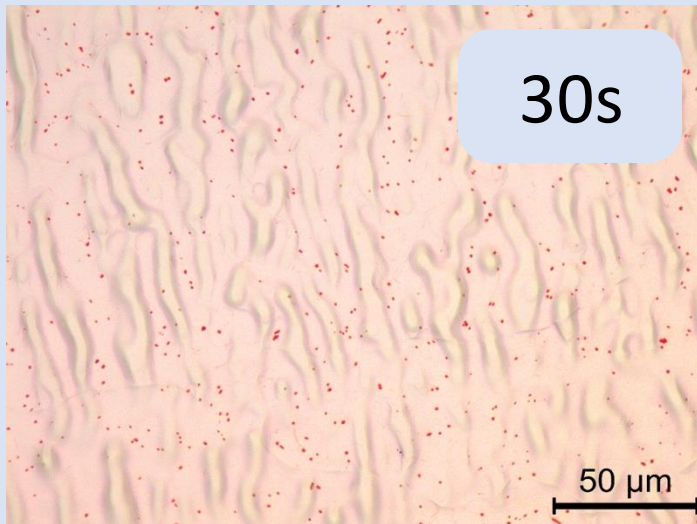


Зависимость равновесного парциального давления CO₂ от температуры

Изменение морфологии образцов

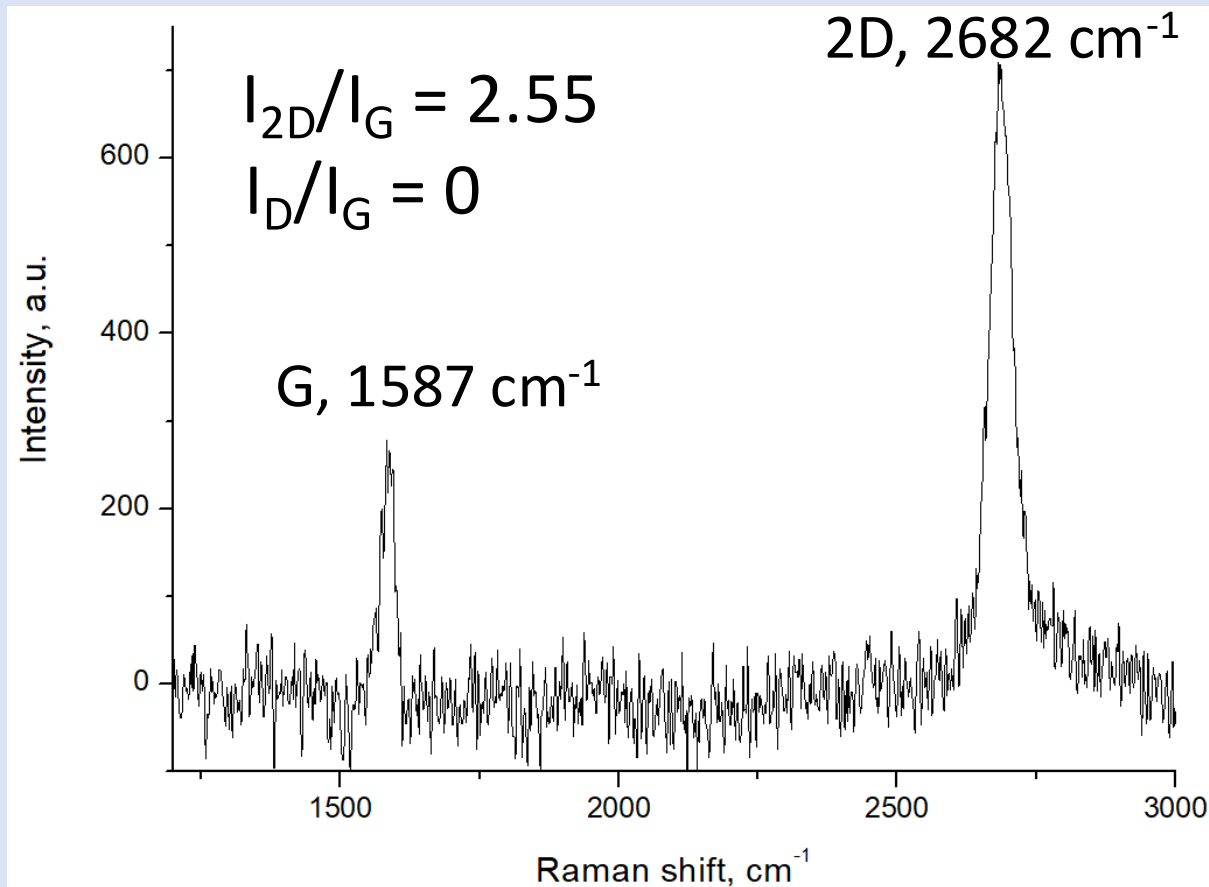


Увеличение времени травления при постоянной концентрации CO_2 показывает последовательный рост числа перфораций и их средней площади.

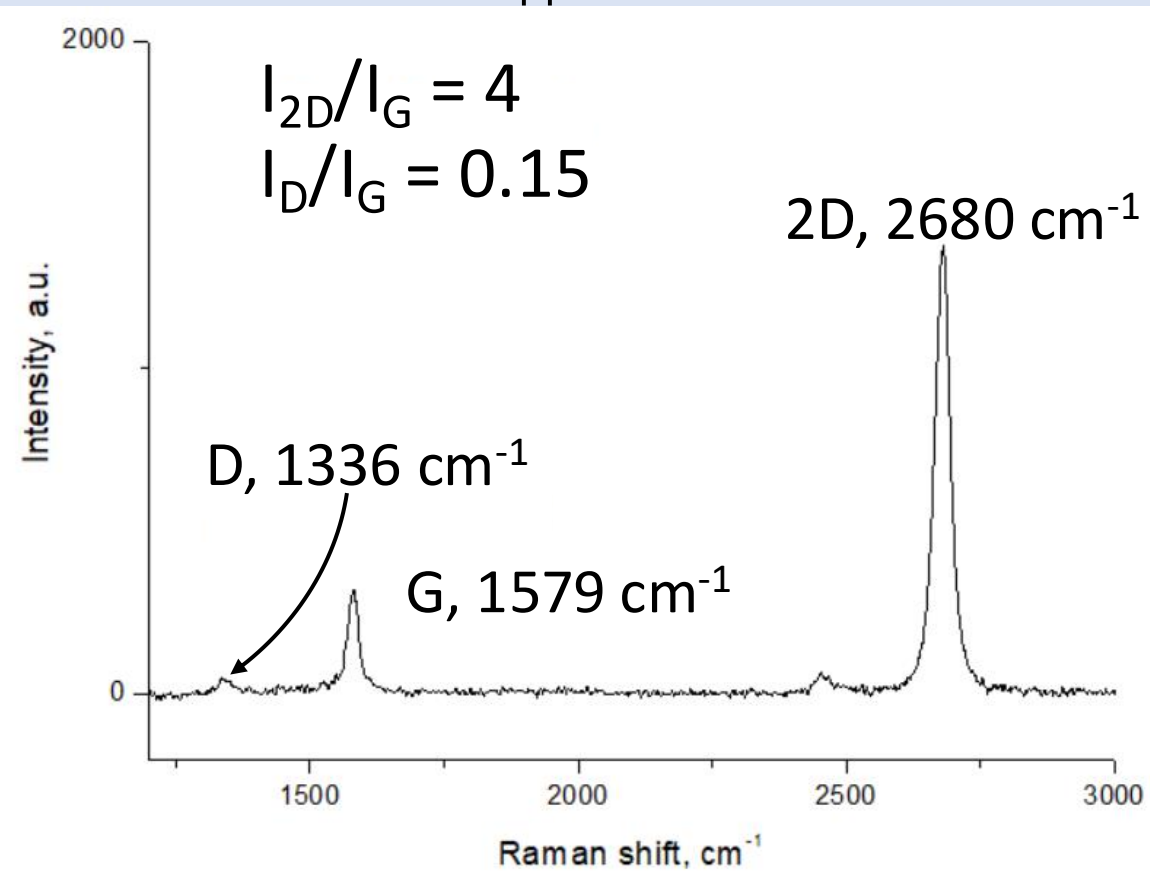


КР-спектроскопия

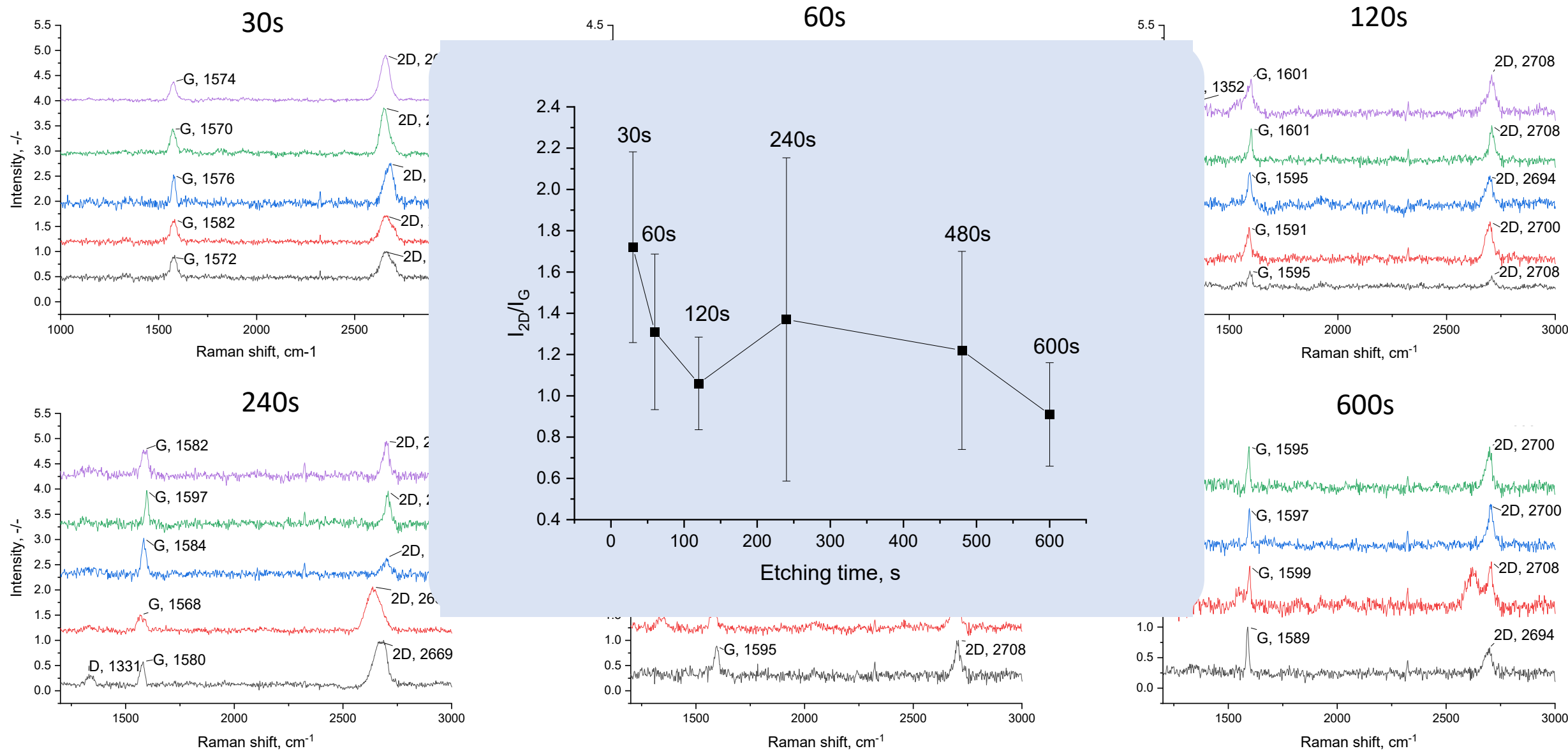
Однослойный графен на медной подложке



Перфорированный графен на кремниевой подложке



КР-спектроскопия



Заключение

- Разработан протокол синтеза однослойного перфорированного графена с использованием реакции Будуара;
- Определены основные метрики для отслеживания изменений морфологии материала – доля протравленной площади образца, средняя площадь перфораций, количество перфораций на единицу площади;
- Проанализирована зависимость морфологии получаемых образцов в зависимости от времени травления.

Планы развития работы

- Отследить влияние изменения температуры синтеза и концентрации CO_2 на получаемые образцы;
- Проанализировать проводимость образцов в зависимости от различных условий синтеза;
- Разработать и создать полевой транзистор на основе полученных образцов.

Благодарность

Благодарю участников и организаторов конференции «Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение (GRS-2025)» за то, что это выступление стало ВОЗМОЖНЫМ.

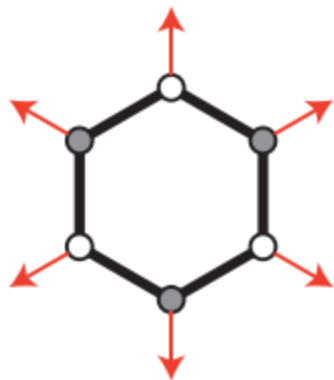
Спасибо за внимание!

Контактная информация:

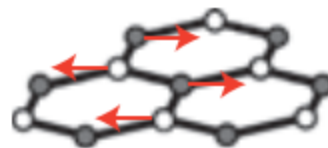
E-mail: Kirill.Malgin@skoltech.ru

Telegram: [@KirillMalgin](https://www.instagram.com/KirillMalgin)

КР-спектроскопия графена



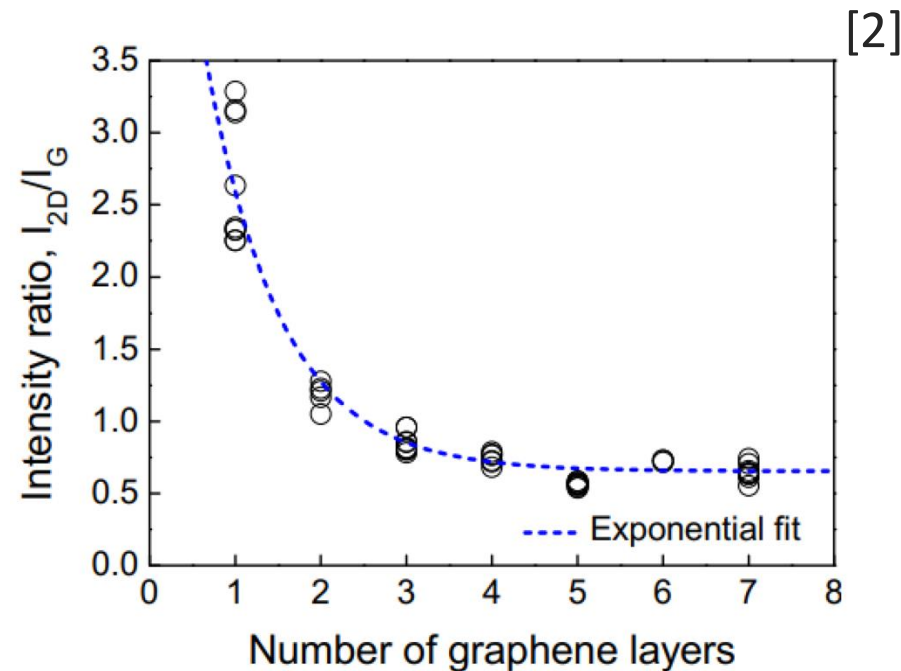
D-пик возникает вследствие «дышащей моды» углеродного кольца и требует наличия дефектов для активации.



G-пик связан с колебаниями пар атомов углерода при растяжении в плоскости.

[1]

2D-пик (обертон D-пика) возникает в результате процесса, в котором сохранение импульса обеспечивается двумя фононами с противоположными волновыми векторами.



Экспериментальная установка

Манипулятор

Внешние источники Ar, CO и CO₂

Холодная зона реактора

Горячая зона реактора

