

«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронно-вычислительных средств»



Полевой транзистор на основе графена

Руководитель квалификационной работы

Власов Андрей Игоревич
зам. зав. каф. ИУ4, к.т.н. доцент

Консультант по квалификационной работе

Кононенко Олег Викторович
к.ф.-м.н. ИПТМ РАН

Студент

Волкова Яна Борисова
студент группы ИУ4-85Б

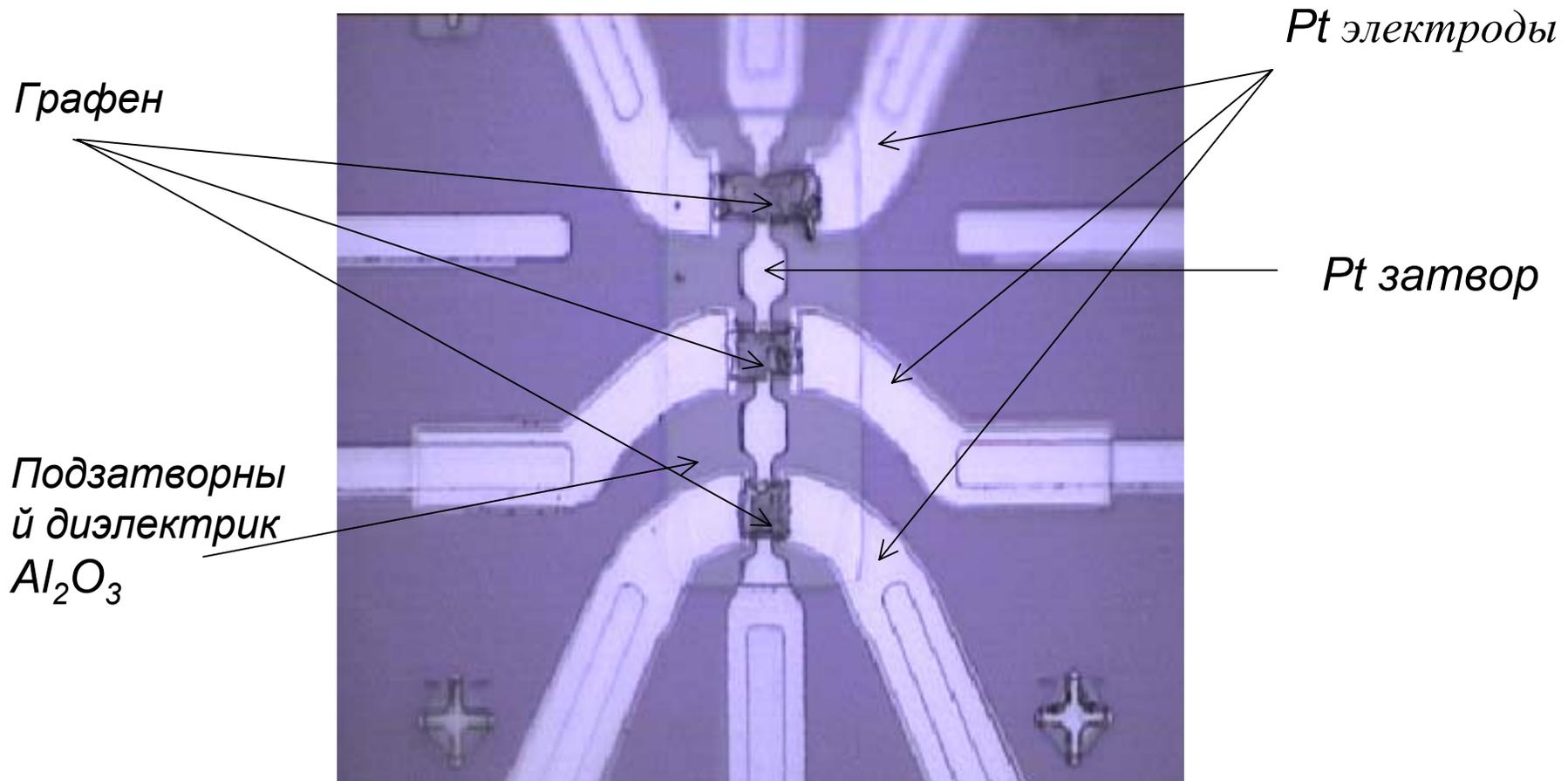
Москва, 2012

Цель работы – разработка методики анализа графеновых транзисторных структур методами спектроскопии комбинационного рассеяния света, методами АСМ, и четырех зондовым методом ван дер Пау, для оценки технологической операции CVD роста графенового канала полевого транзистора.

Решаемые задачи:

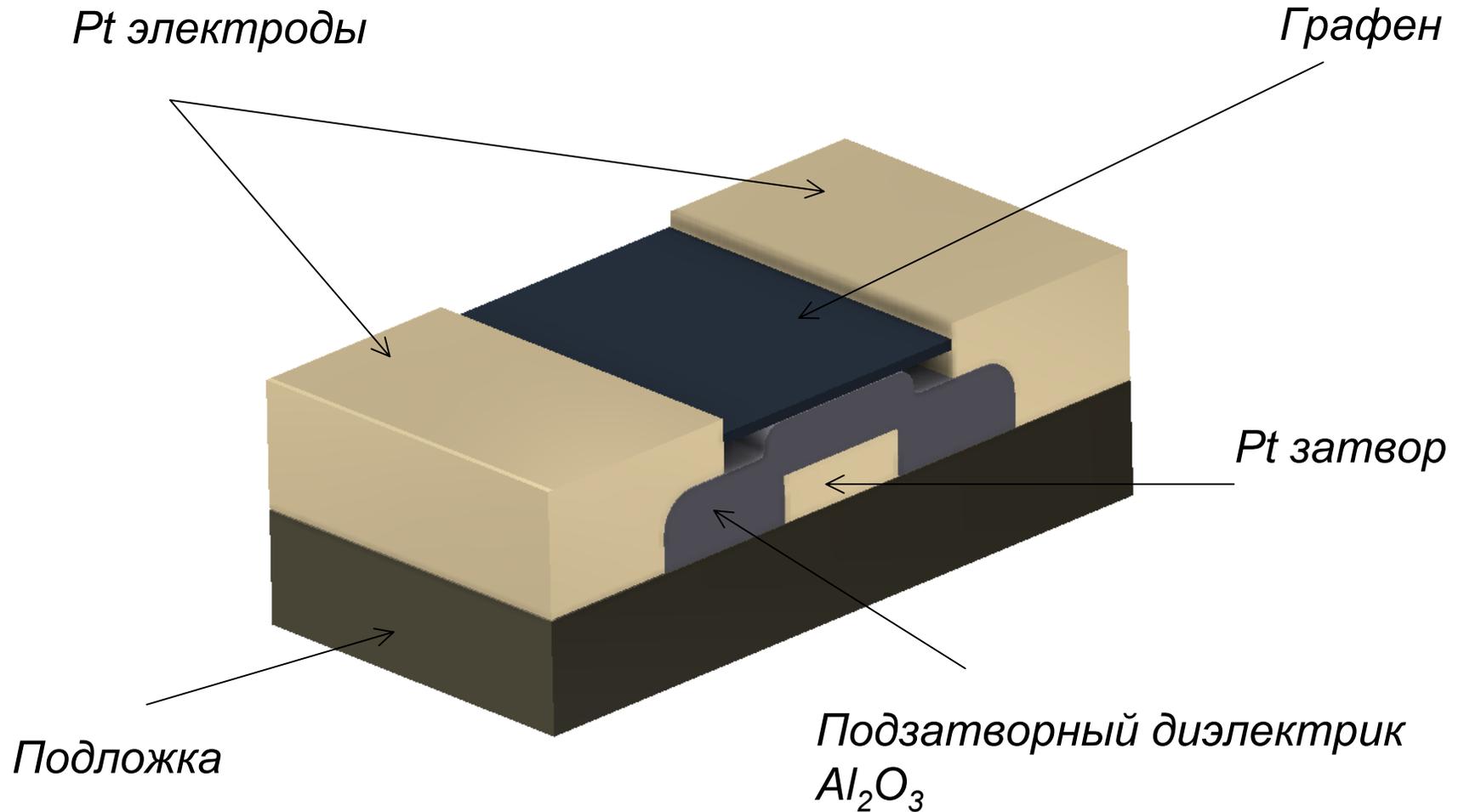
1. Проанализировать особенности исследуемой технологии, CVD роста углеродных sp^2 наноструктур.
2. Изготовить тестовые графеновые структуры и полевой транзистор на основе плёнок графена по методу «lift off».
3. Характеризовать плёнки графена методом спектроскопии КРС и методами АСМ, а так же четырех зондовым методом ван дер Пау.
4. Разработать алгоритмы анализа графеного канала полевого транзистора, основываясь на результатах анализа тестовых графеновых структур.

Полевой транзистор на основе графена



Микрофотография опытного образца графенового транзистора (x100),
изготовлен на базе ИПТМ г. Черноголовка

Модель топологии полевого транзистора



Формирование графена

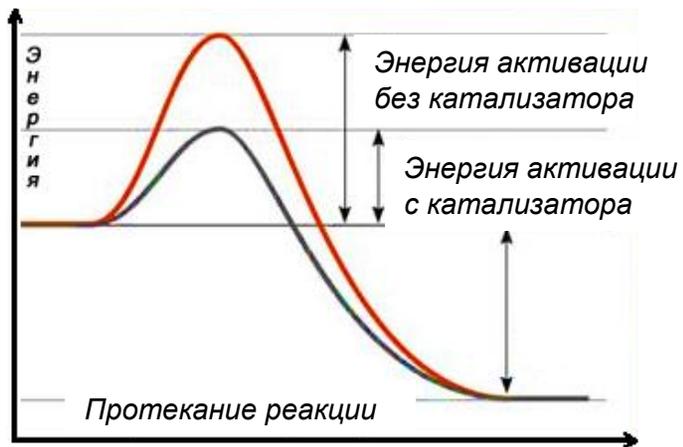
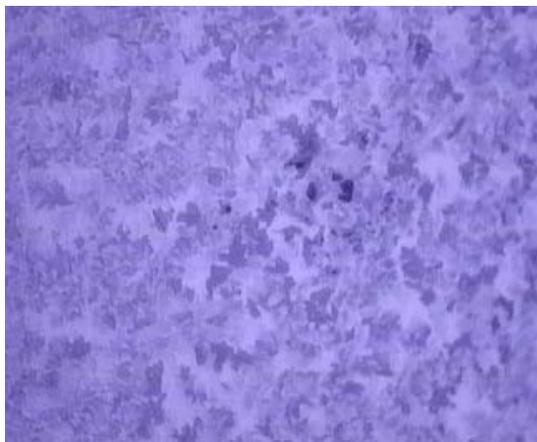
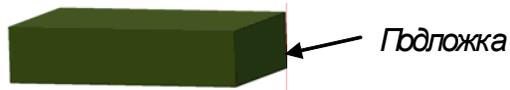


График взаимосвязи энергии активации от наличия катализатора

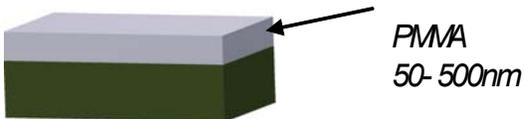


Микрофотография центров роста графена, x100

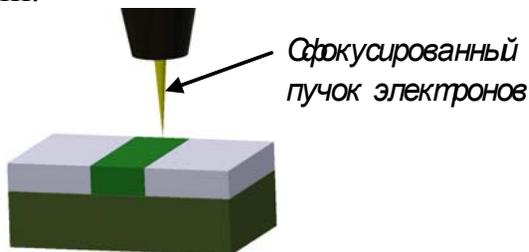
I.



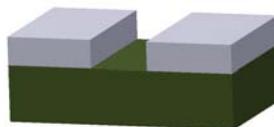
II.



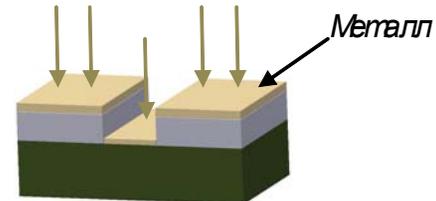
III.



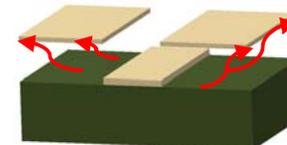
IV.



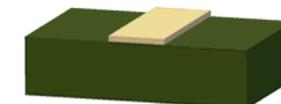
V.



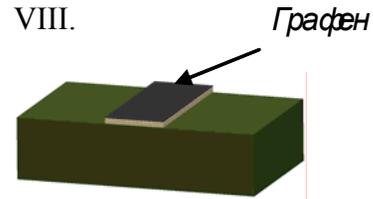
VI.



VII.



VIII.



Высоковакуумная установка CVD роста графена



- I. Подложки помещаются в кварцевый контейнер диаметром 28 мм,
- II. Достигается давление 10^{-6} Торр
- III. Подается температура синтеза графена (850 – 1000 °C)
- IV. В контейнер напускается ацетилен до давления 0,2 Торр.

- V. Производится синтез графена от 5 сек до 5 мин,
- VI. Восстанавливается давление в контейнере 10^{-6} Торр
- VII. Производится охлаждение контейнера.

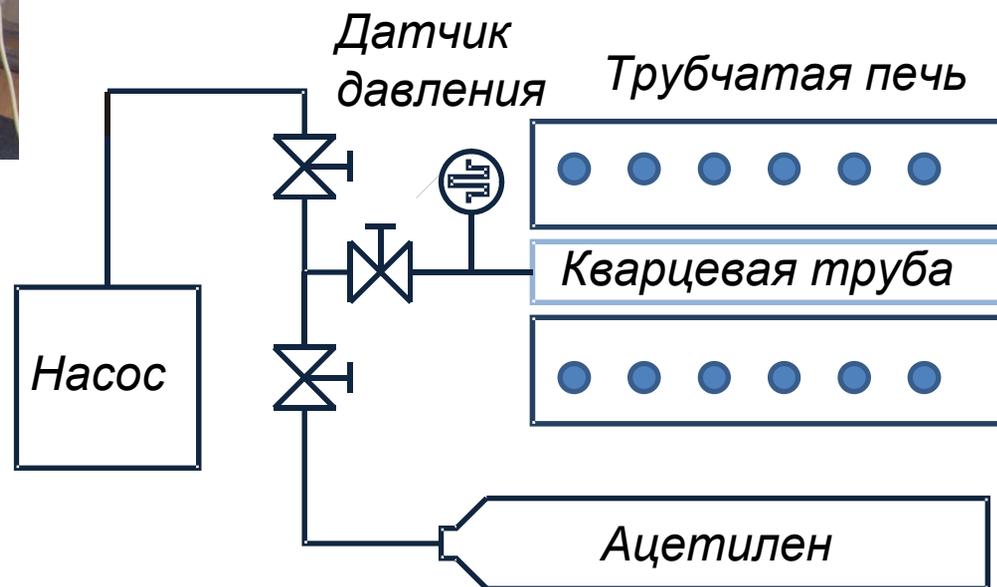
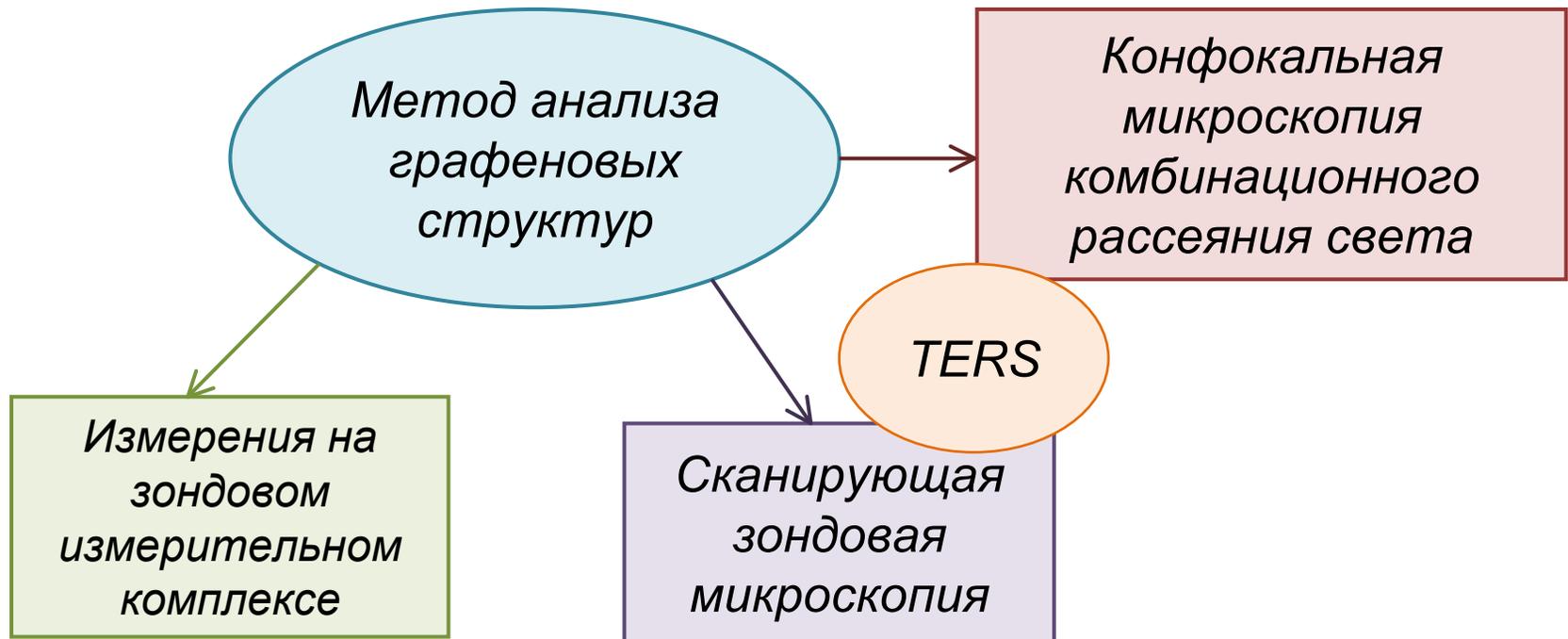
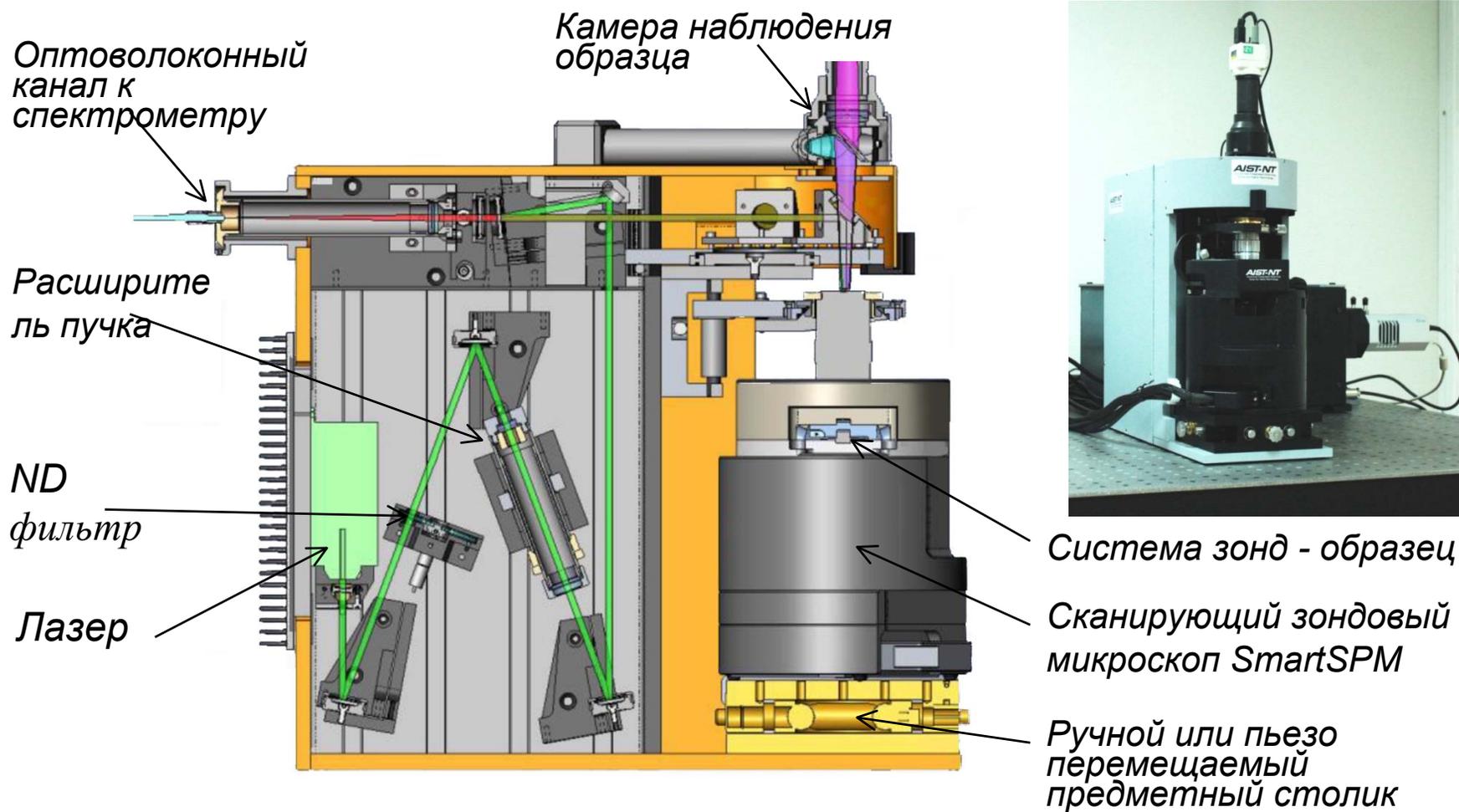


Схема методики анализа графеновых структур



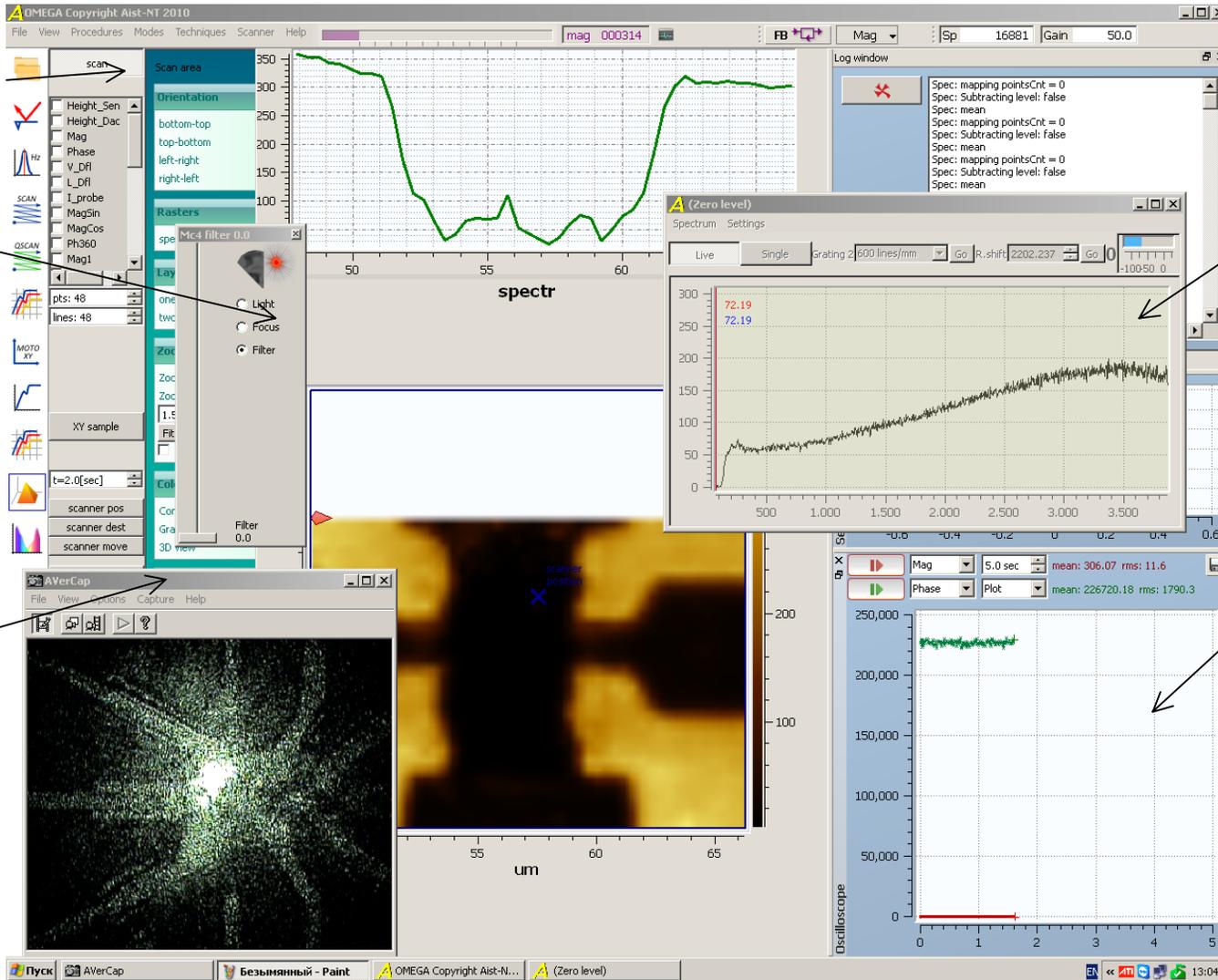
Методы анализа микро- и нано- структур твердотельной наноэлектроники

Общий вид измерительного комплекса



Спектральный блок – схема и общий вид измерительного блока SmartRaman-АБМ

Сканирование образца



SCAN –
запуск
сканирования

Управление
светом,
фокусом,
фильтрами
Оптической
системы
комплекса

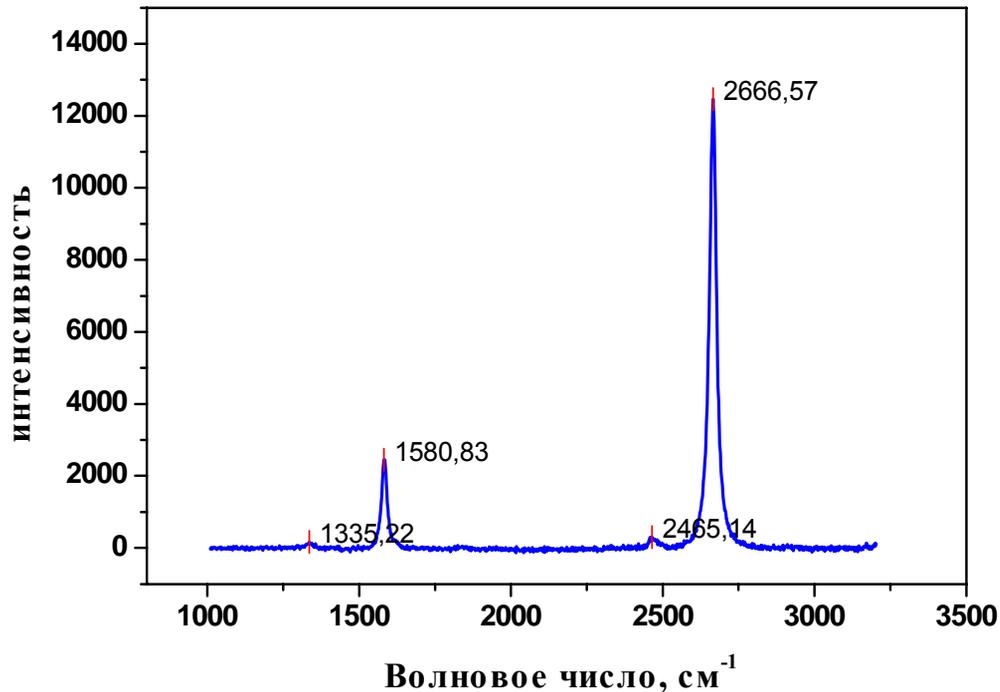
Вид с камеры
со x100
объектива

Окно
регистрации
спектров

Осциллограф

Общий вид программы управления измерительным комплексом AIST_NT

Спектры КРС графена, синтезированного на сплошной плёнке катализатора



Отношение пиков $G'/G > 2$ указывает на монослойность графена.

Пик D отвечает за дефекты в графене.

Незначительная интенсивность пика D говорит о хорошем качестве графена.

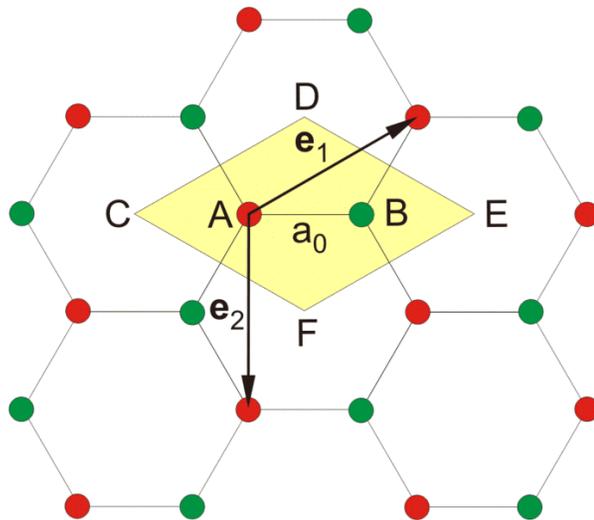
D	1335,22	I=168,34542
G	1580,83	I=2451,17734
G'	2666,57	I=12465,0334

$$G' / G = 5.09$$

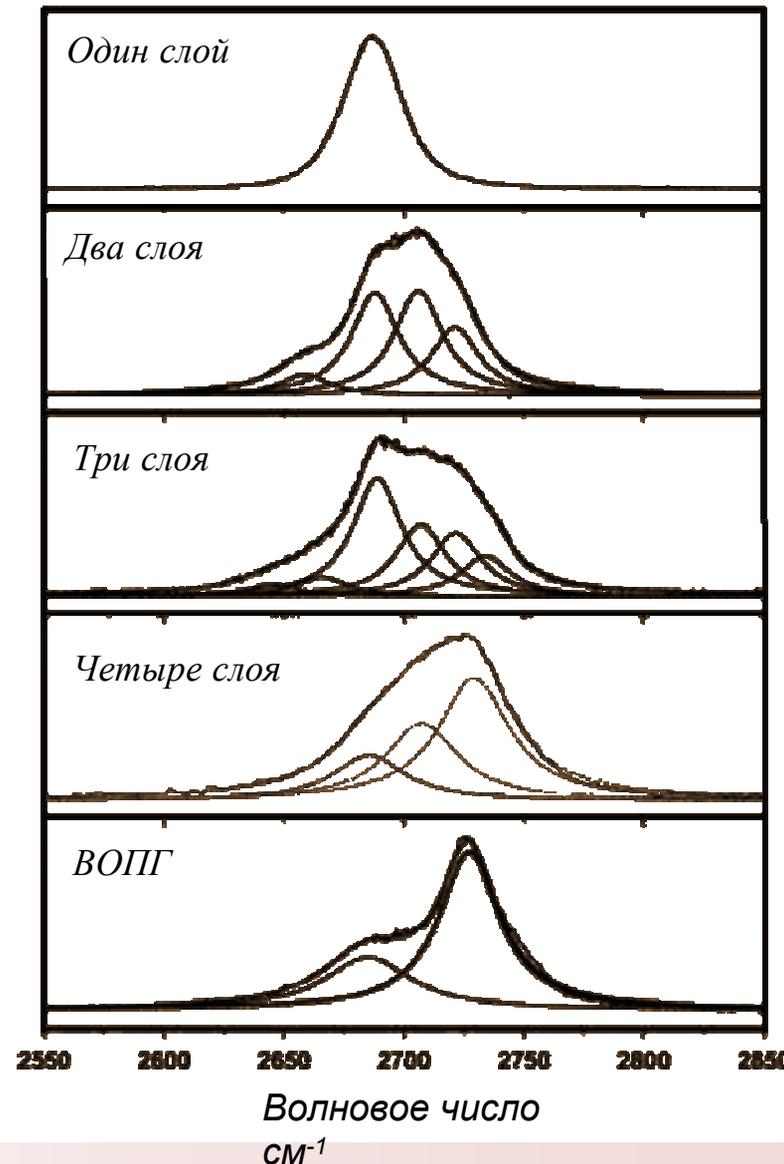
Общие сведения о графене

Графен является двумерным кристаллом, состоящим из одиночного слоя атомов углерода, собранных в гексагональную решётку.

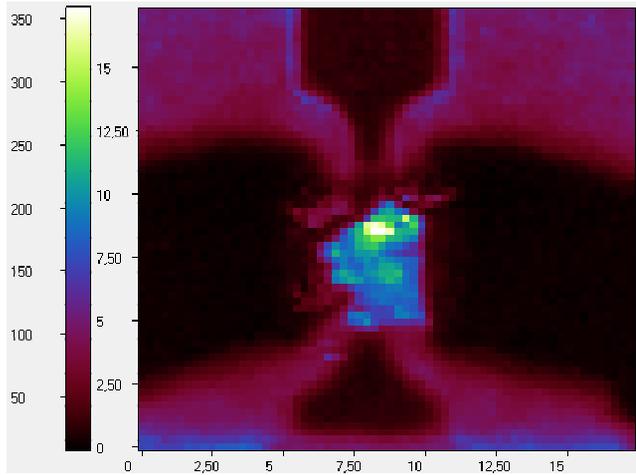
Два вектора, определяют элементарную ячейку (желтый ромб), содержащие два атома А и В.



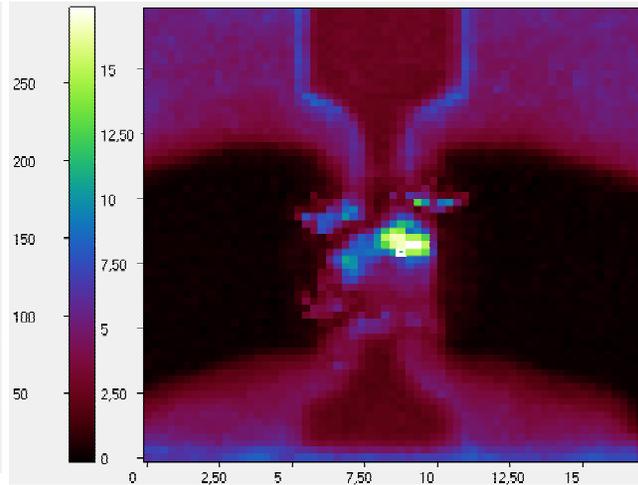
- теплопроводность $5000 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, в 2,5 раз чем у алмаза
- подвижность носителей заряда при комнатной температуре составляет $20 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$; (кремния $0,15 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$)
- удельное сопротивление около $1.0 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, на 35% меньше, чем у меди



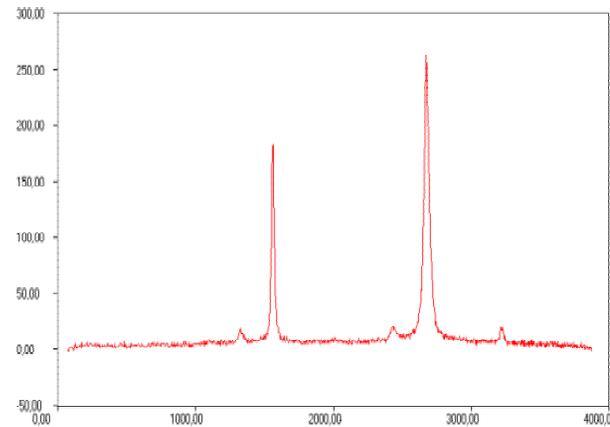
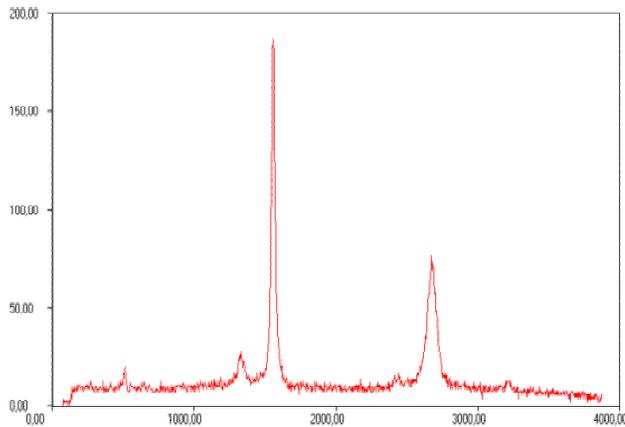
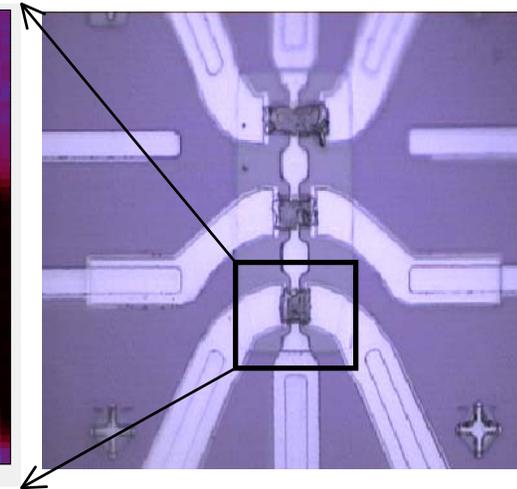
Спектральное КРС картирование



Пик G

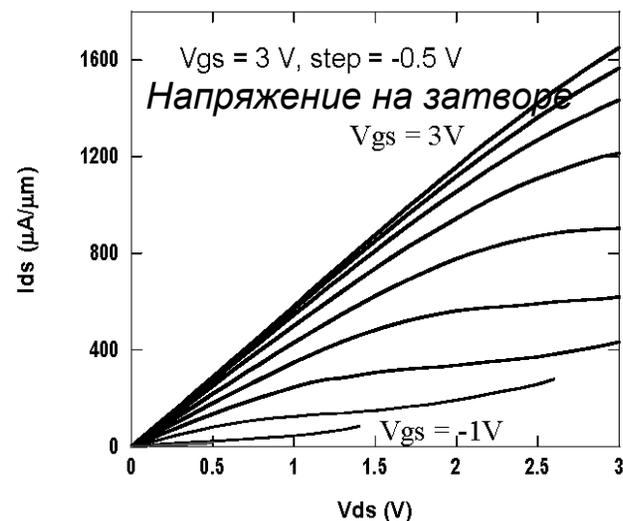
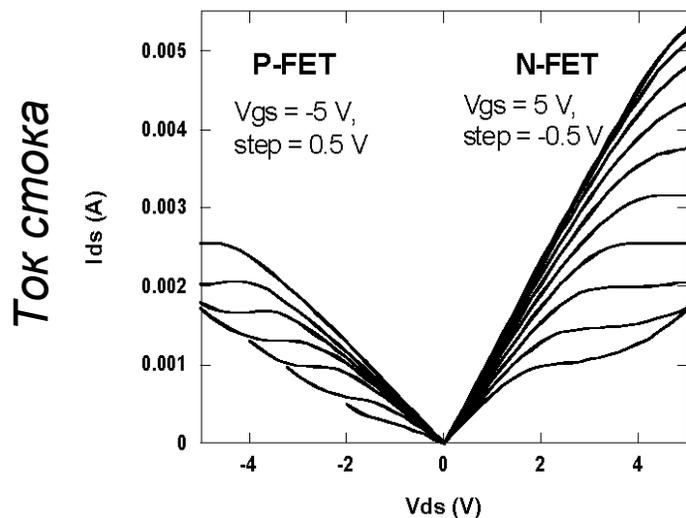
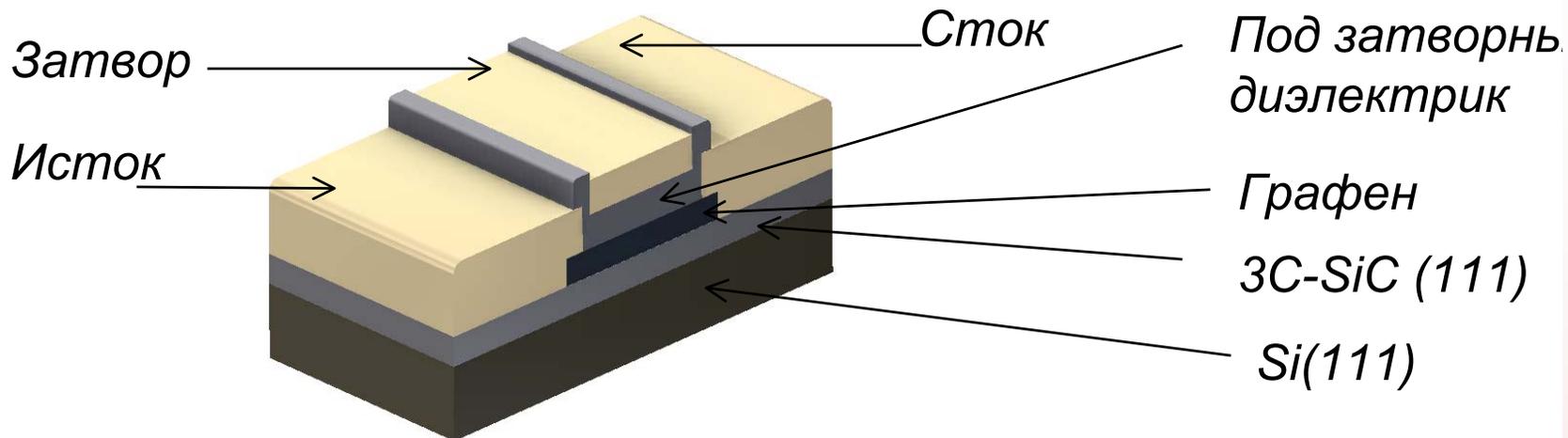


Пик G'



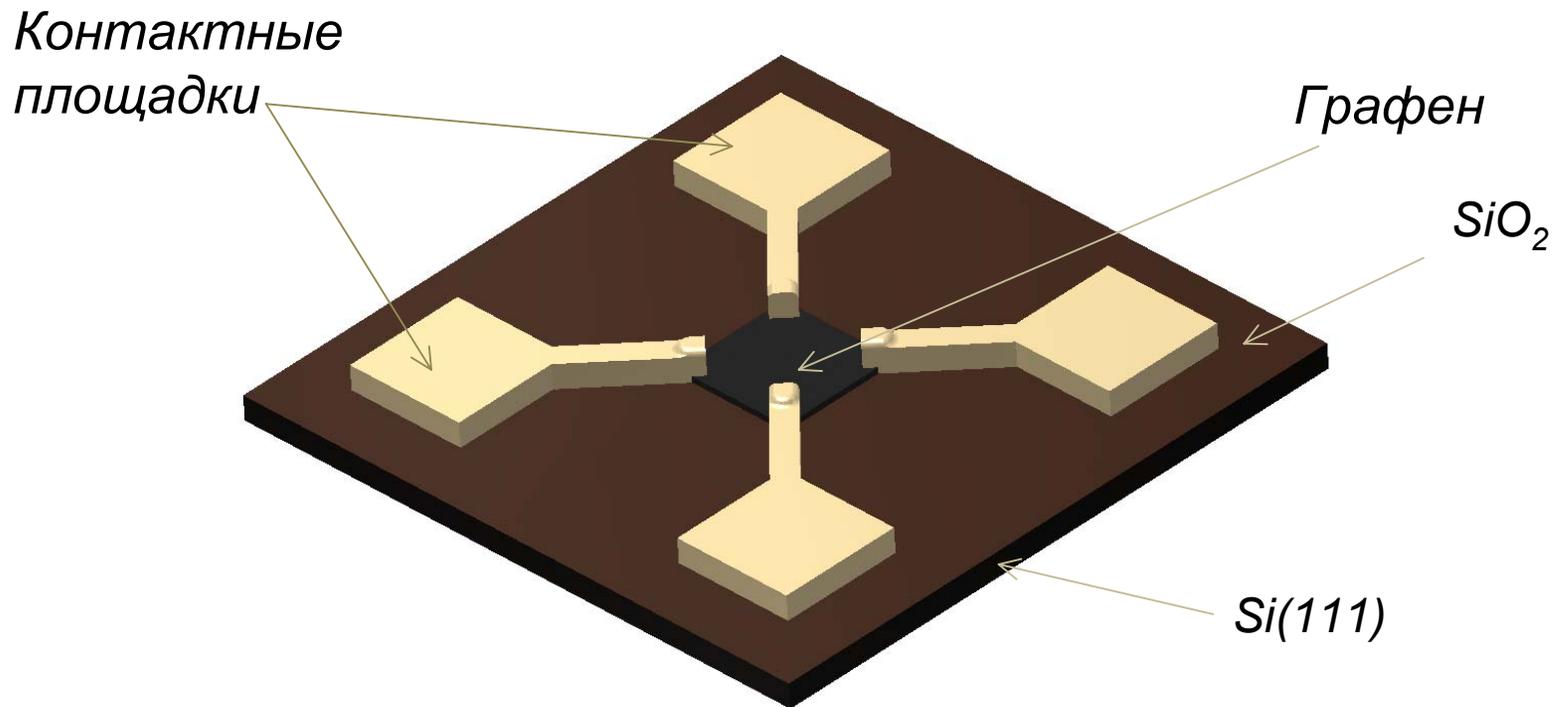
Рамановские спектры снятые с транзисторных структур указывают на **сплошную графеновую плёнку** в канале транзистора, которая состоит из двух и более слоёв графена.

Дальнейшее развитие топологии



Вольт - амперные характеристики графенового транзистора

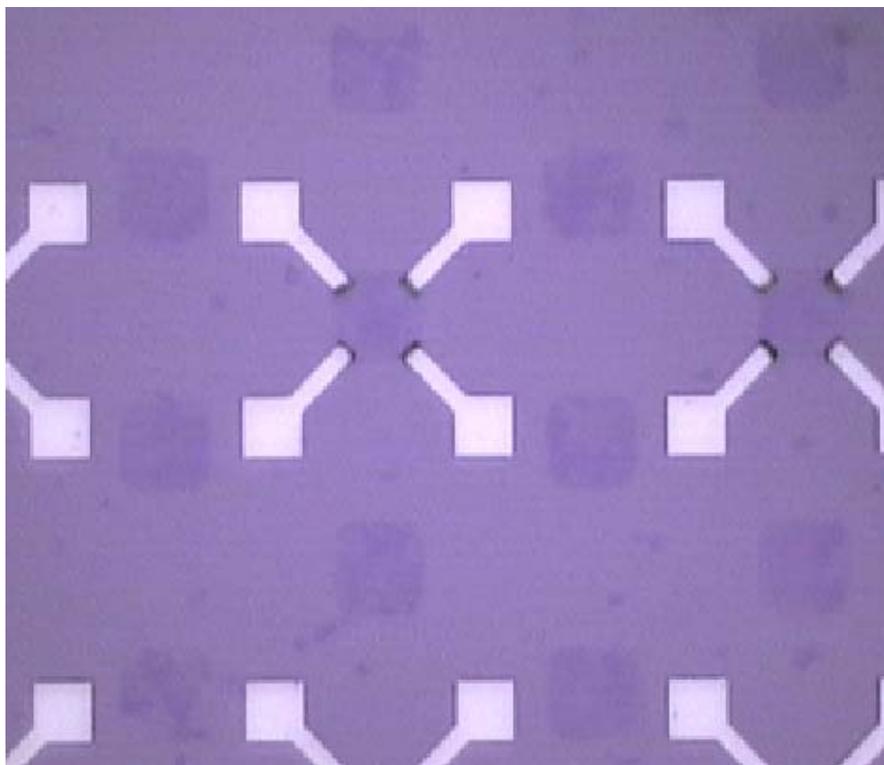
Модель топологии тестовой структуры



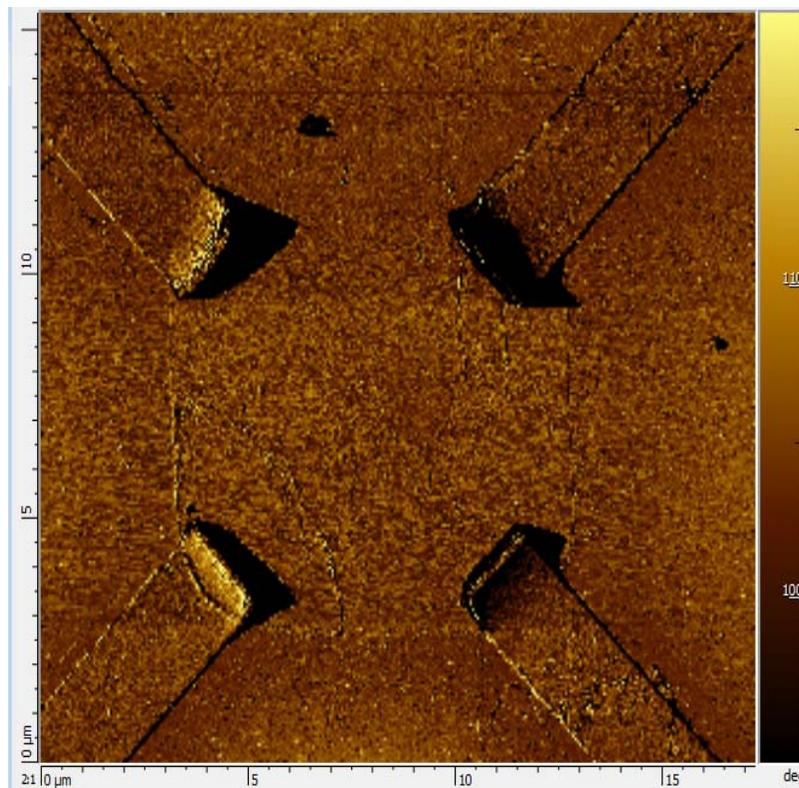
Пространственная модель топологии тестовой структуры графена

Визуализация топологии графеновой структуры

Графен, выращенный на предварительно структурированной с помощью электронной литографии плёнке катализатора



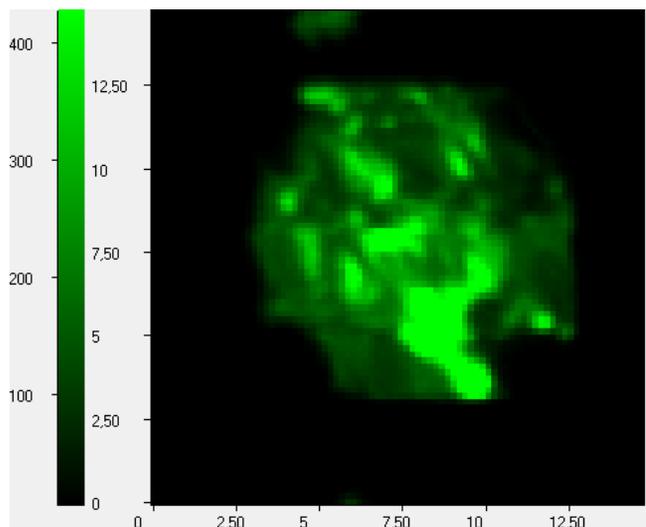
Микрофотография тестовых графеновых структур x100



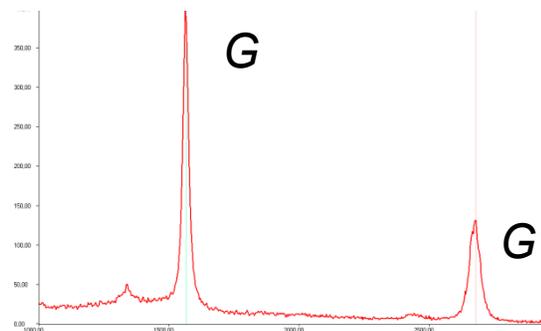
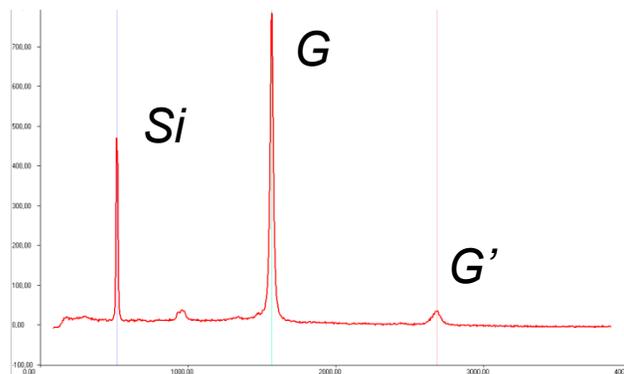
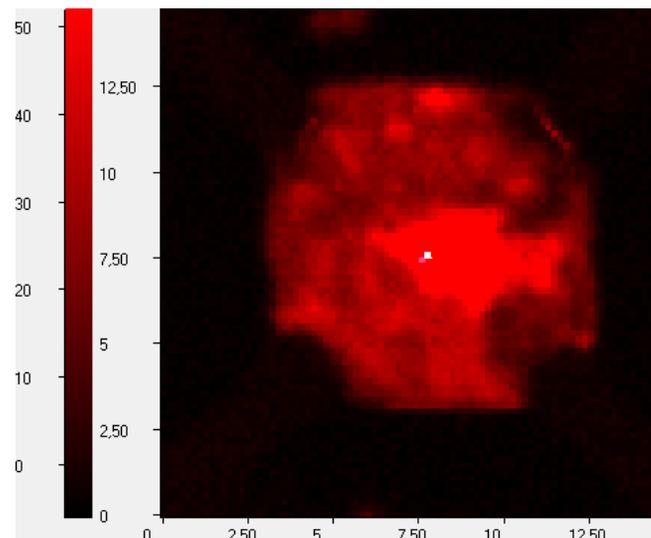
Изображение АСМ

Микрорамановские карты распределения толщин графена

Пик G

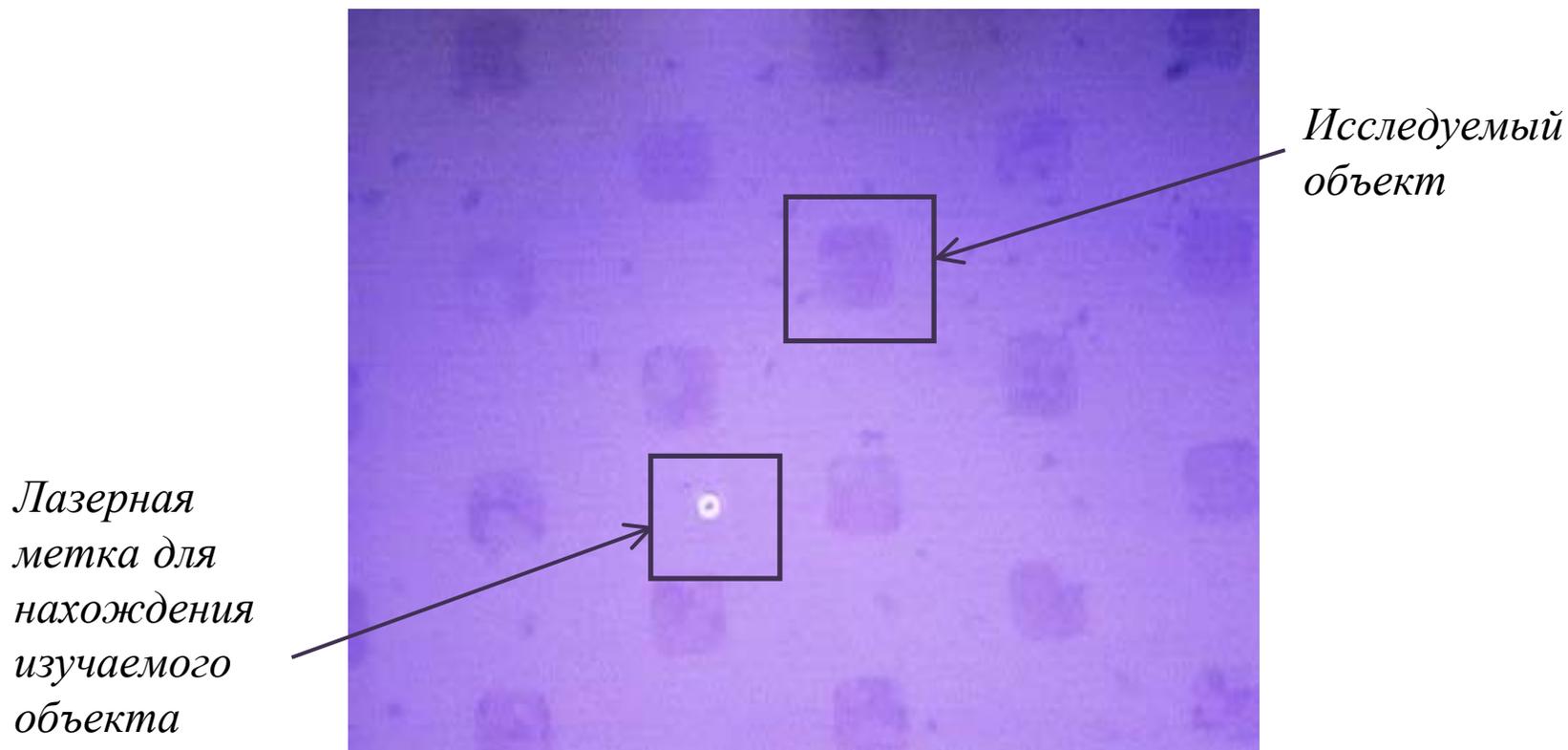


Пик 2D



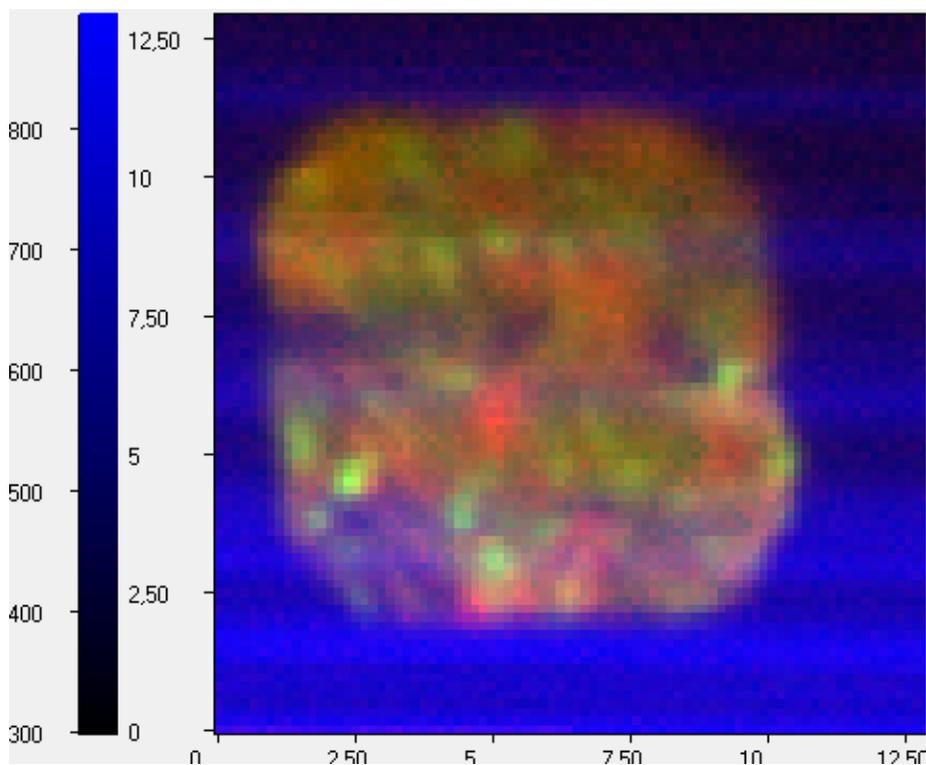
Рамановские спектры в различных точках структуры. Соотношение пиков G'/G говорит о том, что графеновая плёнка состоит из областей с двумя (правый спектр) и более слоями, наличие Si пика, говорит о прозрачности графена

Тестовые структуры графена

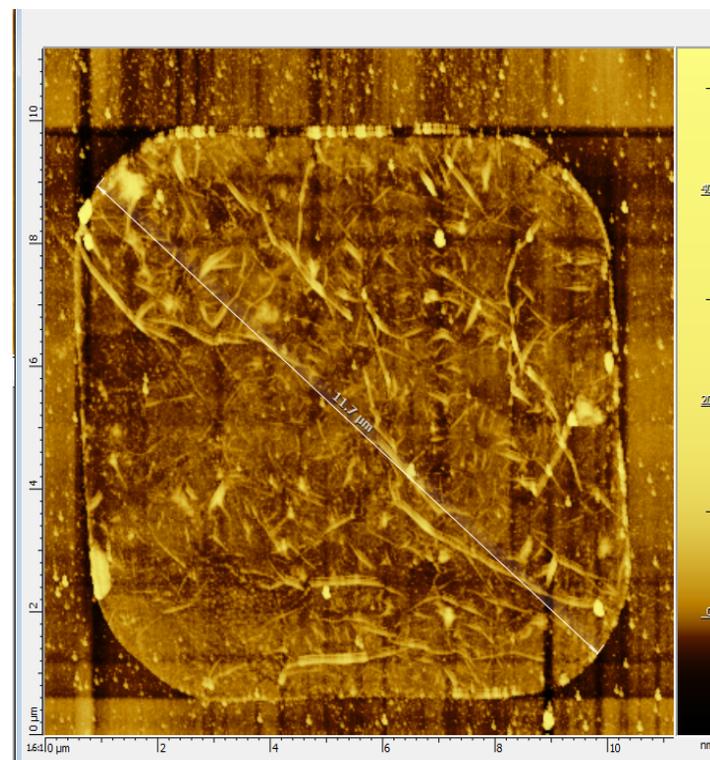


Микрофотография тестовых структур графена x100,
образец изготовлен на базе ИПТМ г. Черноголовка

Спектральное КРС картирование и СЗМ картирование, методология TERS

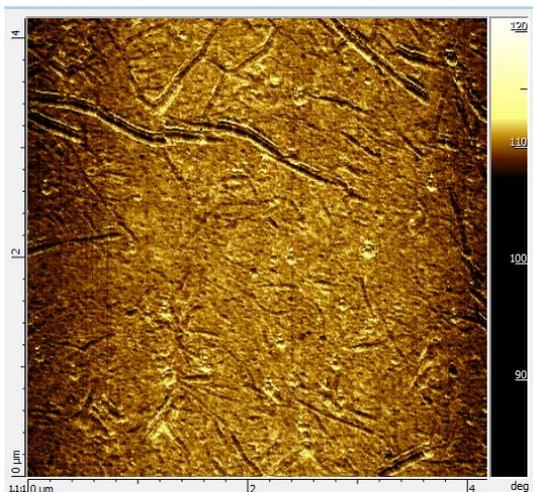


Микрорамановская карта
распределения G'/G

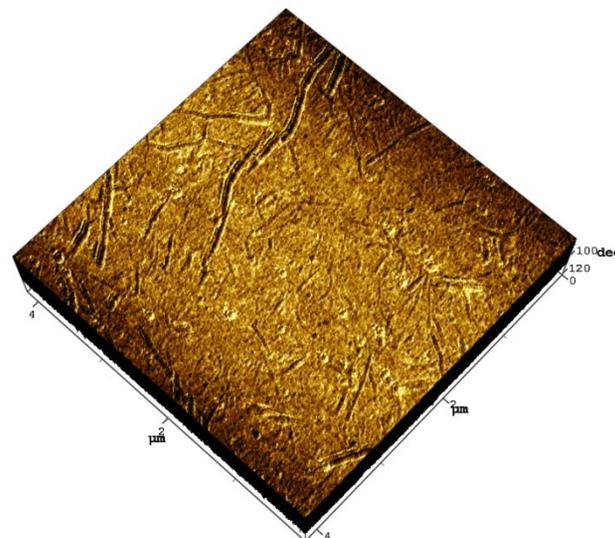
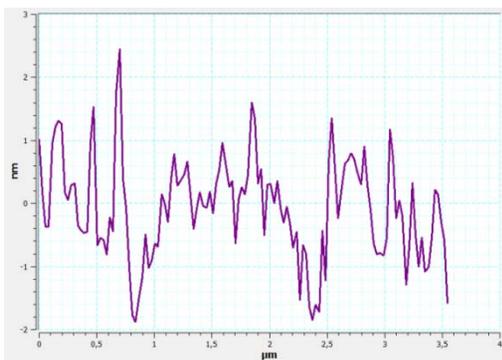


АСМ 10x10мкм

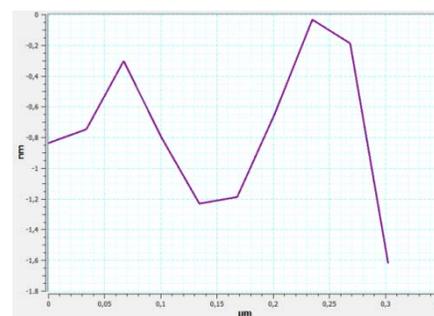
АСМ отдельной выделенной области тестовой графеновой структуры



АСМ изображение графена 4x4 мкм

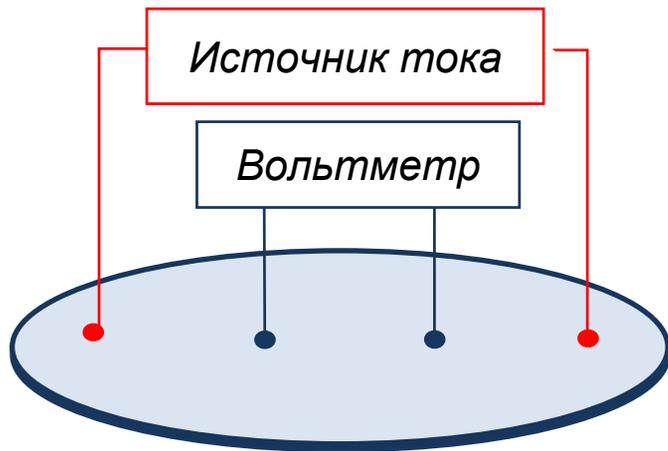


3D визуализация
АСМ изображение графена 4x4 мкм

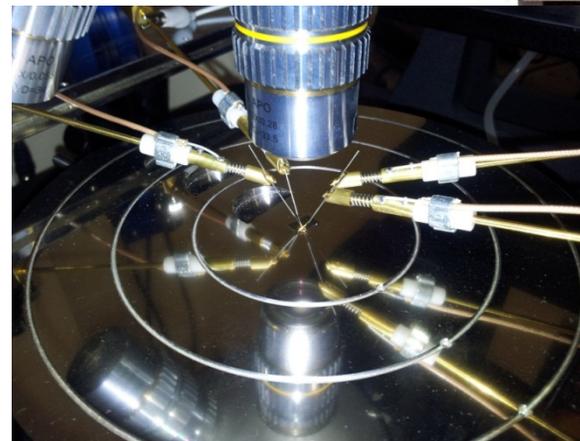
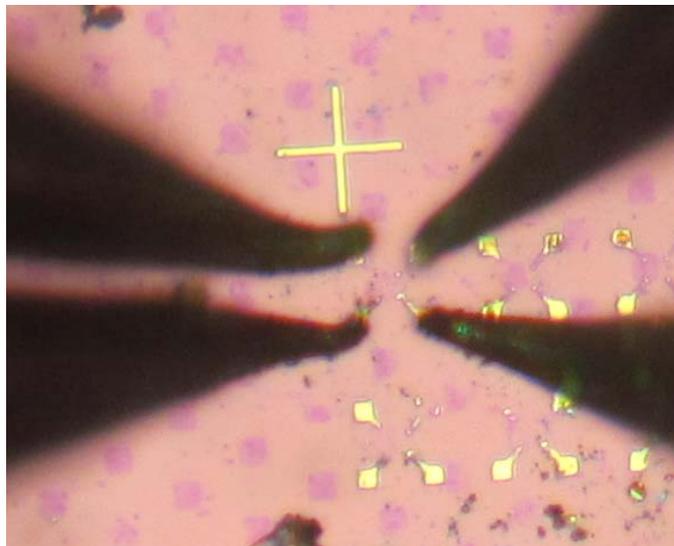
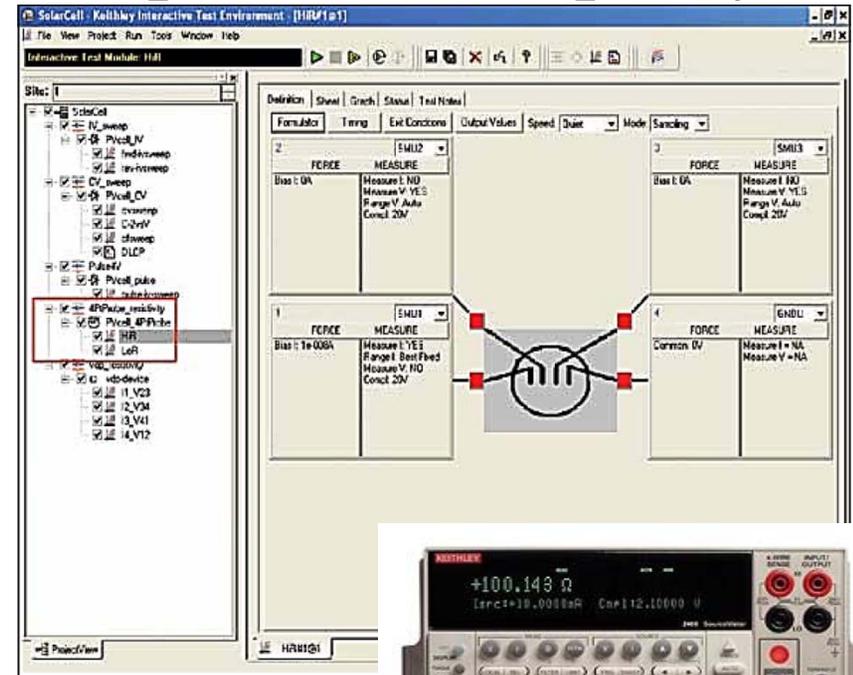


Разброс высот на поверхности графеновой пленки от $\pm 0,8$ нм до ± 2 нм , согласно теоретическим данным толщина между атомарными слоями графена $\sim 0,335$ нм, сам графен $\sim 0,54$ нм

Четырёх зондовый метод измерения ван дер Пау

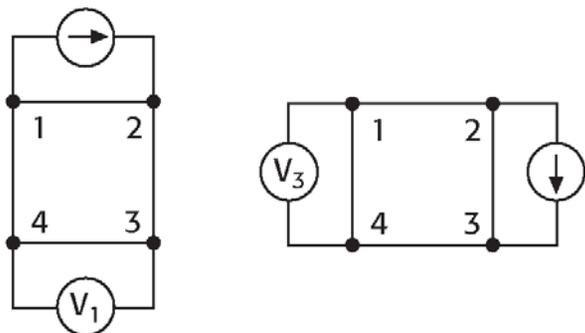


Четырёх зондовая схема измерения удельного сопротивления



Расчет удельного сопротивления

Через контакты 1 и 2 к образцу подводится ток $I_{12} = 0,5 [мкА]$



$$R_{12,34} = \frac{U_{34}}{I_{12}} = \frac{79,9 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 10^{-6}} = 159,8 \cdot 10^3 [Ом]$$

$$R_{23,14} = \frac{U_{14}}{I_{23}} = \frac{3,9 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 10^{-6}} = 7,8 \cdot 10^3 [Ом]$$

Удельное сопротивление равно:

$$\rho = \left(\frac{\pi \cdot d}{\ln 2} \right) \cdot (R_{12,34} + R_{23,14}) \cdot \frac{f}{2} = \left(\frac{\pi \cdot 2 \cdot 10^{-9}}{\ln 2} \right) \cdot (159,8 + 7,8) \cdot \frac{0,69}{2} = 52 [мкОм \cdot см]$$

Сопротивления порядка 52 мкОм·см, говорит о сравнительно малом удельном сопротивлении графена, что коррелируется с теоретическими сведениями о графене. Но все же это значение достаточно велико, следовательно графеновая пленка имеет разброс по слоям и дефектность.

ВЫВОДЫ

- Исследование транзисторных структур на основе графена позволило охарактеризовать CVD метод изготовления графена на катализаторе, с последующем стравливание катализатора в водном растворе нитрата железа, проанализировать технологические проблемы метода.
- Разработана методика комплексного анализа графеновых структур основанная на методах сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), методе конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), четырех зондовом методе ван дер Пау анализа тестовых графеновых структур.
- Итогом применения методики является топологические характеристики тестовых графеновых структур, оценка количества слоев графена, внедрение химических примесей, дефектов структуры, значение величины удельного сопротивления графена.

АПРОБАЦИЯ

- Я.Б. Волкова «Классификация спектров комбинационного рассеяние света»
Электронное научно-техническое издание «Наука и образование» ВАК: # 12,
декабрь 2011
- Я.Б. Волкова « Комбинационное рассеяние света как метод анализа
углеродны наноструктур» Сборник трудов конференции Научоемкие
технологии и интеллектуальные системы – Москва, 2012, с.294-300

Работа отмечена дипломом III-степени
на XIV молодежной молодёжной
международной научно-технической
конференции:

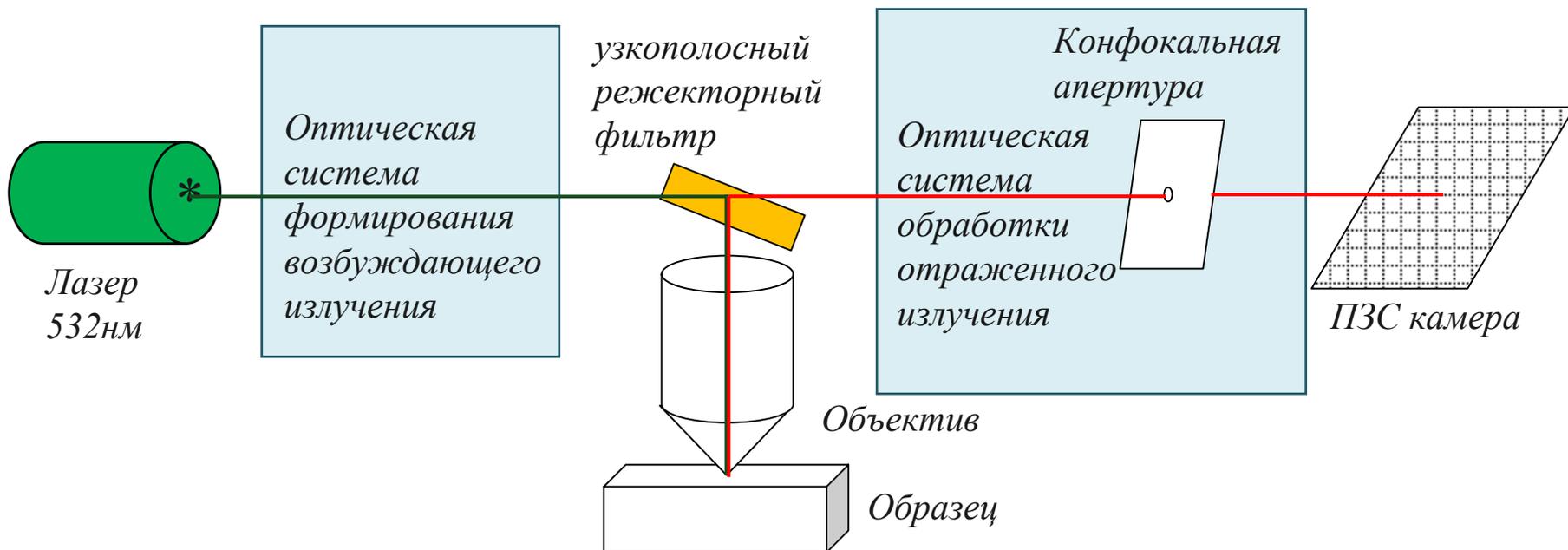
«Научоемкие технологии и
интеллектуальные системы – 2012»
(TECHNOLOGY&SYSTEMS - 2012)



БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!



Схема регистрации сигнала в конфокальном КРС микроскопе



В Рамановской спектроскопии примерно один фотон из миллиона после отражения от образца приобретает частоту, смещенную по отношению к частоте исходного монохроматического излучения.