Правительство РФ
Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего
профессионального образования

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

Ресурсный центр «Физические методы исследования поверхности»

Артем Геннадиевич Рыбкин

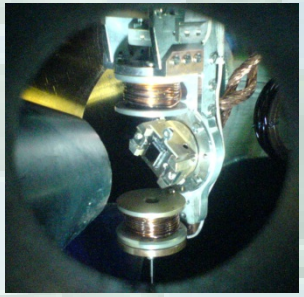
директор РЦ

Объекты исследований

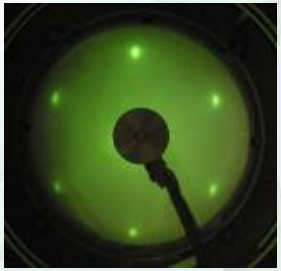
Поверхность твёрдых тел, низкоразмерные системы

- *Энергетическая структура электронных состояний (с разрешением по спину)*
- *Морфология и кристаллическая структура, локальная атомная и электронная структура (с атомным разрешением)*

Методы исследований



- *Фотоэлектронная спектроскопия остовных уровней*
- *Фотоэлектронная спектроскопия валентной зоны с угловым и спиновым разрешением*



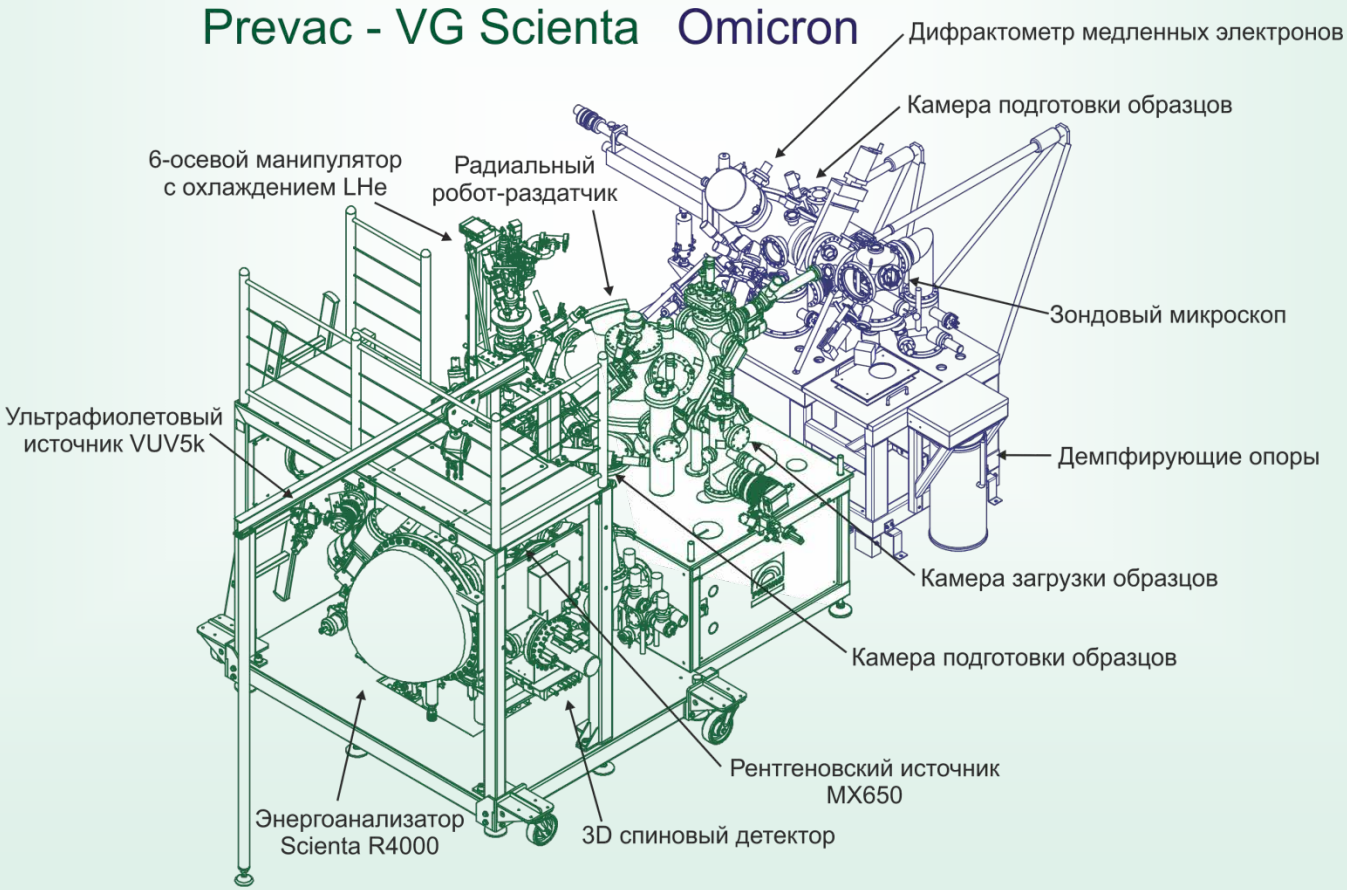
- *Электрон-электронная спектроскопия*
- *Дифракция медленных электронов*

- *Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия*
- *Атомно-силовая микроскопия и спектроскопия*

Оборудование ресурсного центра

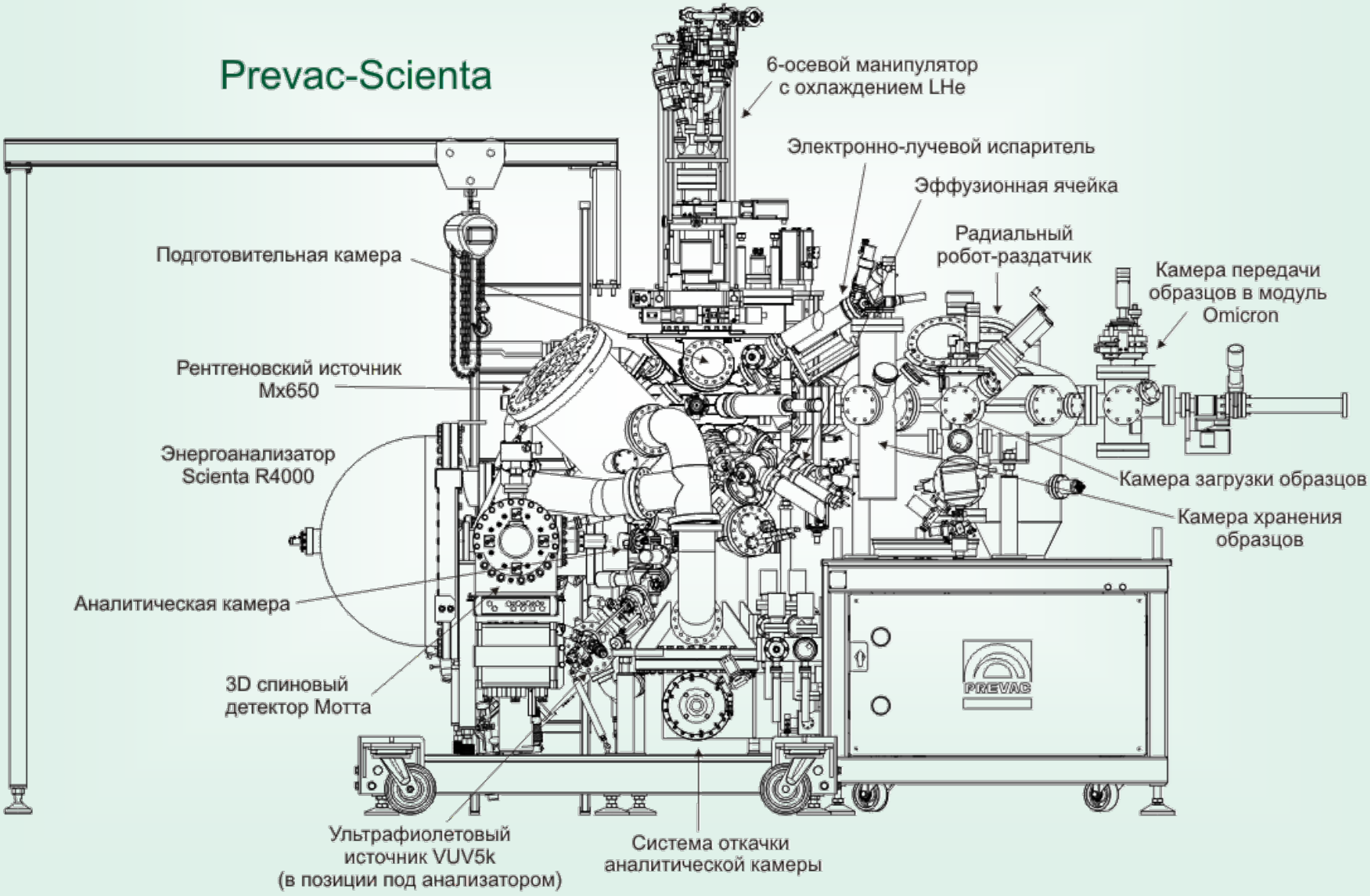
■ Научно-исследовательский комплекс «Нанолаб»

- Энергоанализатор VG Scienta R4000 WAL-0.1 XPS/UPS/ARPES с 3D детектором Мотта
- Манипулятор, 6 осей, охлаждение до 5K
- Источник ультрафиолетового излучения с монохроматором VG Scienta VUV5k
- Рентгеновский источник с монохроматором VG Scienta MX 650
- Сканирующий зондовый микроскоп Omicron VT AFM XA 50/500



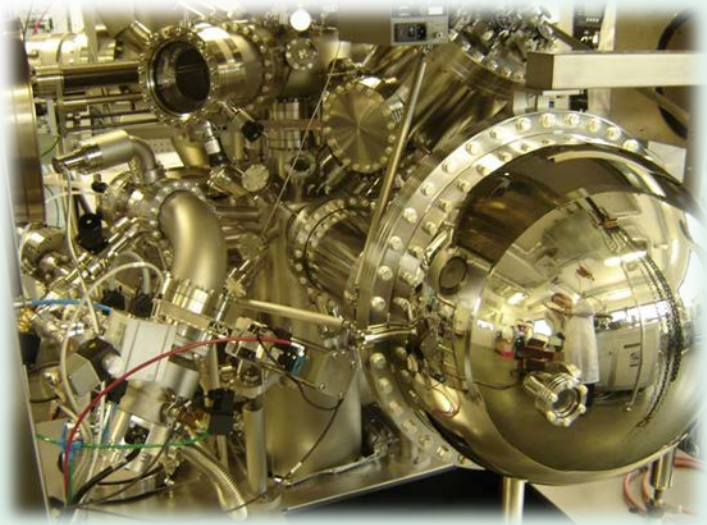
Оборудование ресурсного центра

- **Научно-исследовательский комплекс «Нанолаб»**



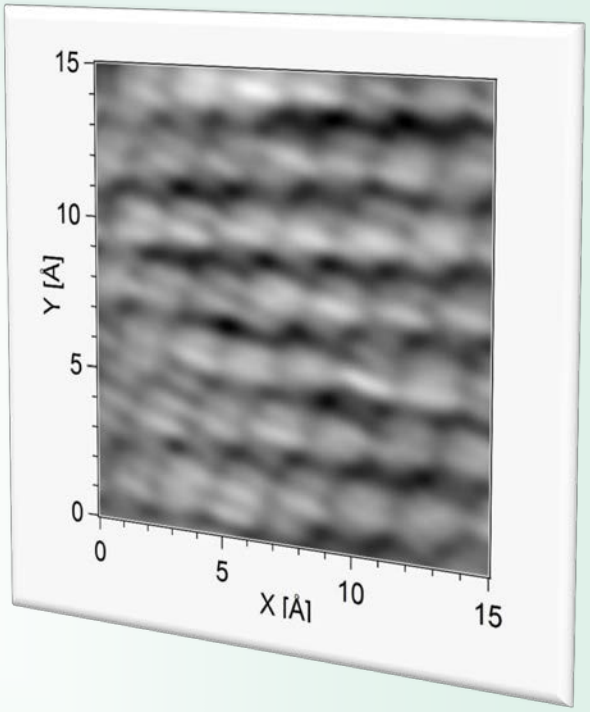
Оборудование ресурсного центра

- Научно-исследовательский комплекс «Нанолаб»

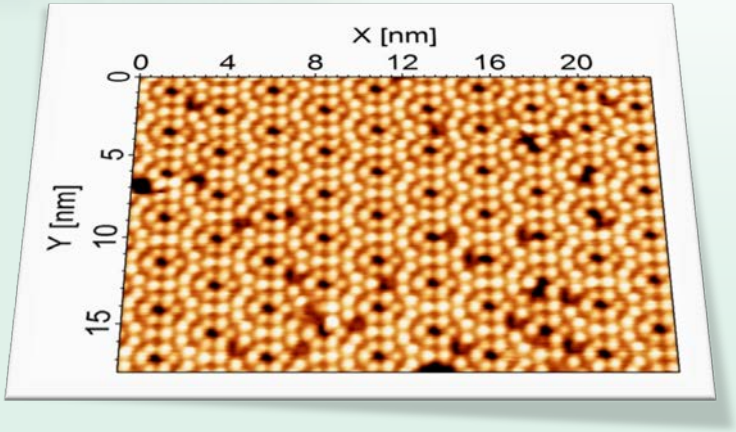


Оборудование ресурсного центра

- Сканирующий зондовый микроскоп Omicron VT AFM XA 50/500



СТМ изображение реконструированной Поверхности Si (111) 7x7 *

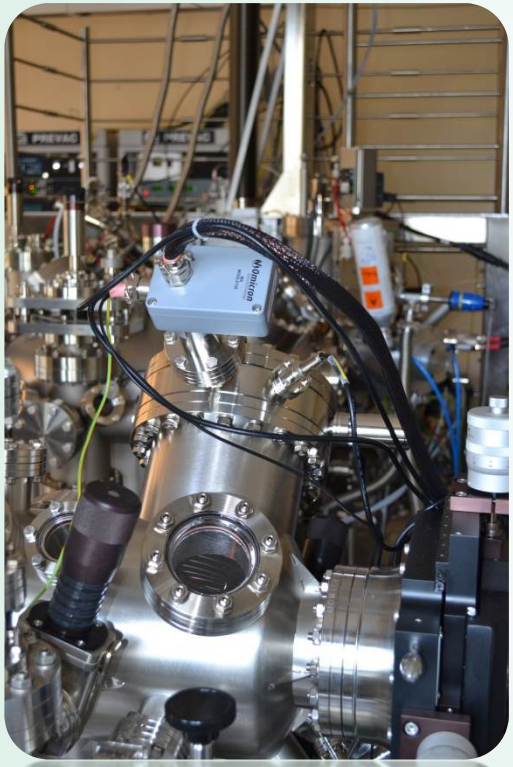


Изображение с атомарным разрешением HOPG (highly oriented pyrolytic graphite), полученное в контактном режиме АСМ *

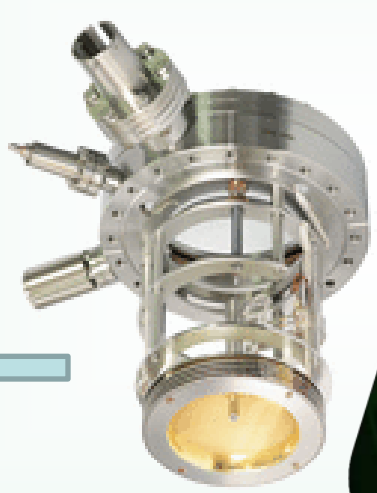
* Изображения получены в рамках проведения тестовых измерений

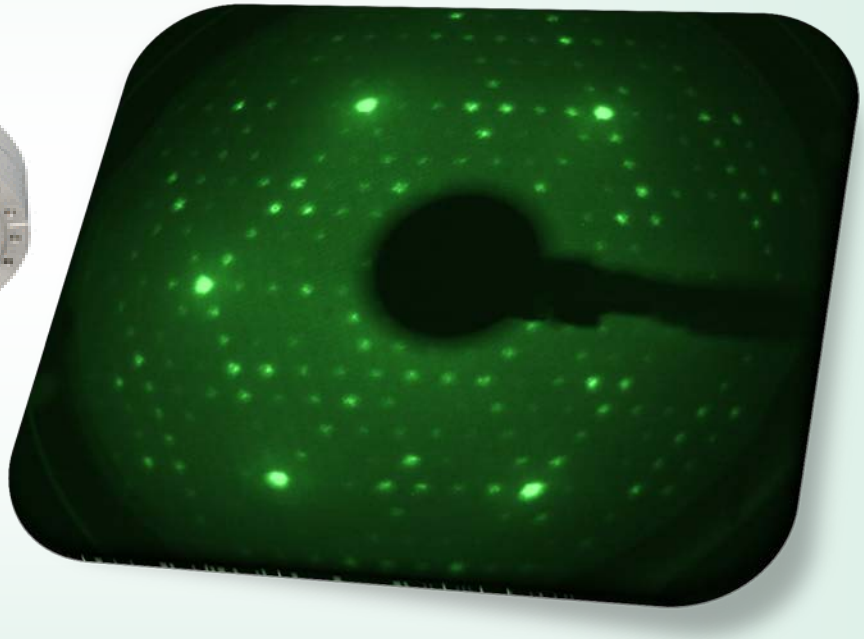
Оборудование ресурсного центра

- Дифрактометр медленных электронов Omicron SPECTALEED



ДМЭ изображение (low-energy electron diffraction, LEED) реконструированной поверхности Si (111) 7x7 (50эВ)*



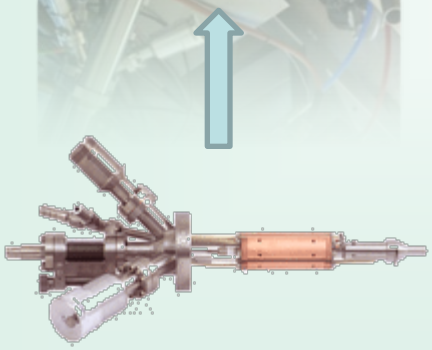


* Изображение получено в рамках проведения тестовых измерений

Позволяет оценить структурное совершенство поверхности и определить обратную решетку поверхности из геометрии дифракционной картины.

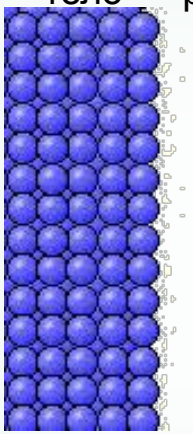
Оборудование ресурсного центра

- Электронно-лучевой испаритель Omicron EFM 3
- Эффузионная ячейка Omicron WEZ
- Ионная пушка Omicron ISE 5

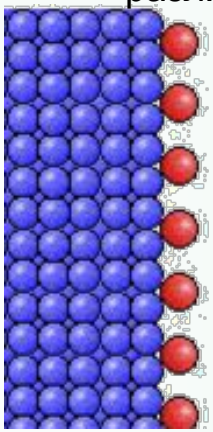


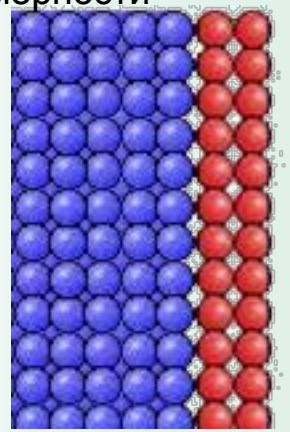
Твердое тело

Вакуум $p=10^{-10}$ торр

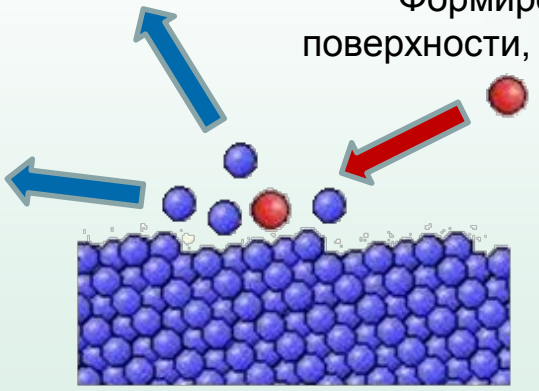


Создание на поверхности структур различной размерности



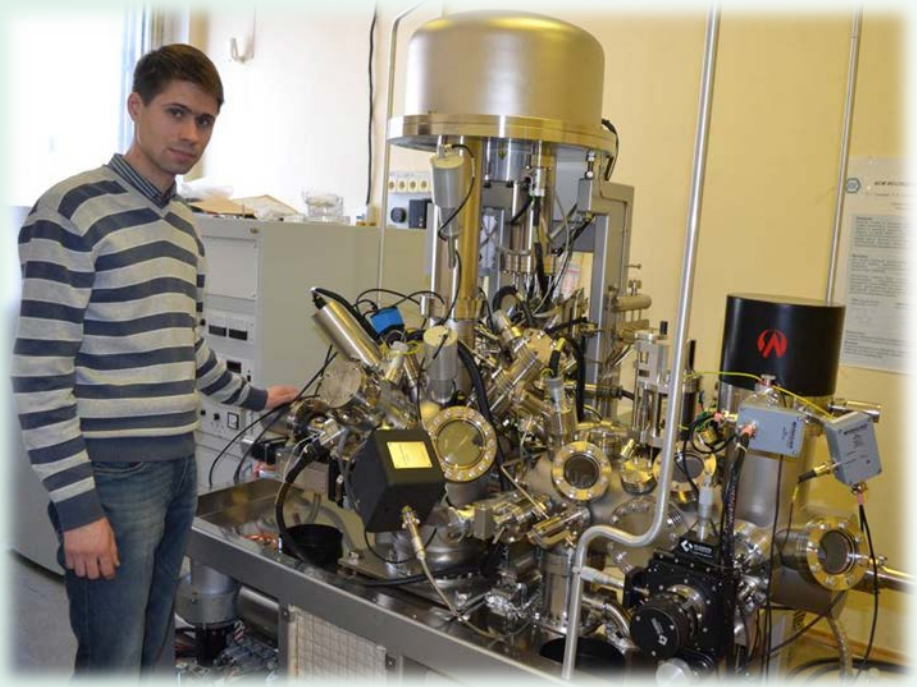


Формирование рельефа поверхности, послойное травление

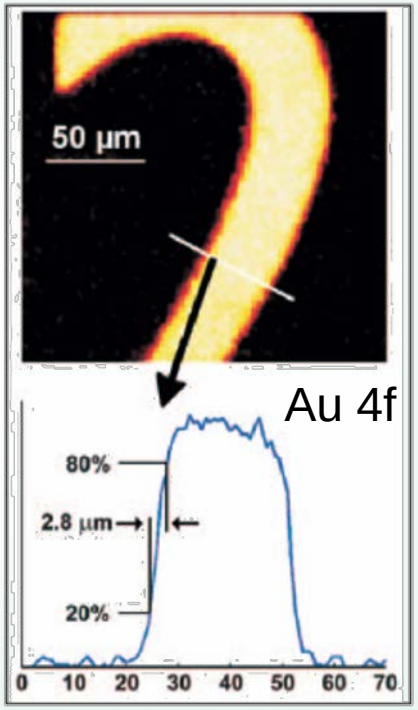


Оборудование ресурсного центра

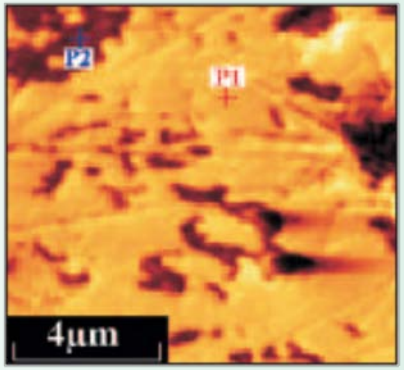
- **Комплексный фотоэлектронный и растровый оже-электронный спектрометр Thermo Scientific Escalab 250Xi**

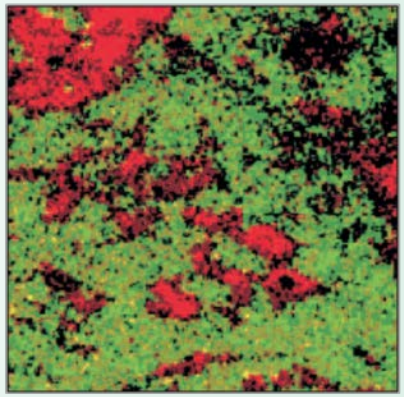


Au/стекло



CuNi



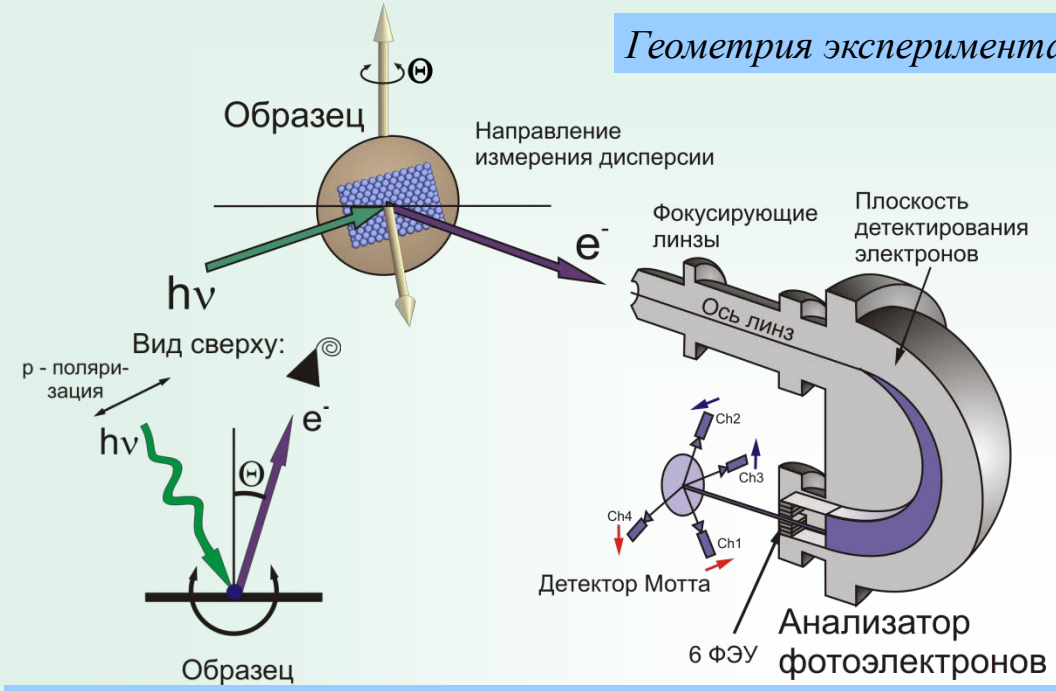


Cu Cl

- **Рентгеноэлектронные и оже-электронные спектрометры VG ESCAlab 5 и Kratos XSAM 800**

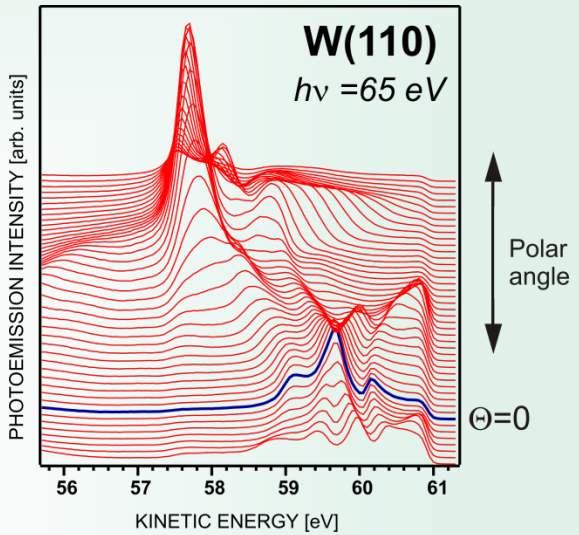
Методы исследований. ФЭСУР и ДМЭ.

Геометрия эксперимента



Полярный угол θ определяет волновой вектор $k_{||}$

$N(E_{Kin}, \theta)$ для W(110)



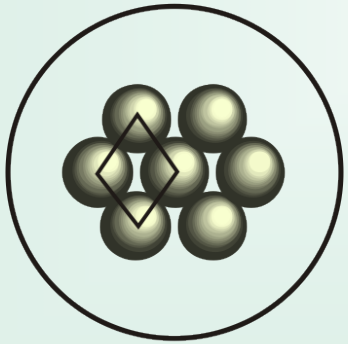
$$k_{||} = 0.51\sqrt{E_{Kin}}\sin\theta$$

$$E_{Bind} = h\nu - E_{Kin} - W$$

Азимутальный угол φ определяет направление в зоне Бриллюэна:

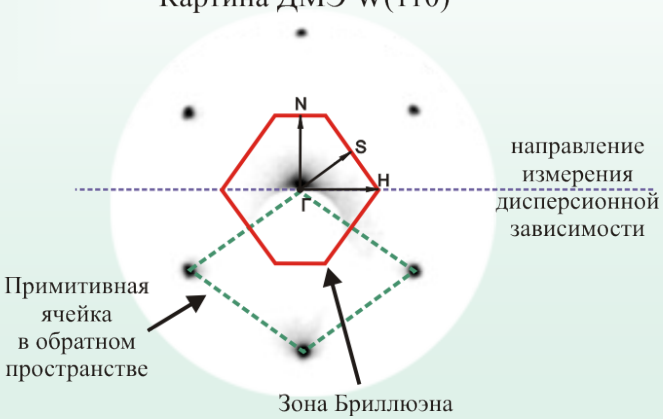
Прямое пространство

Образец

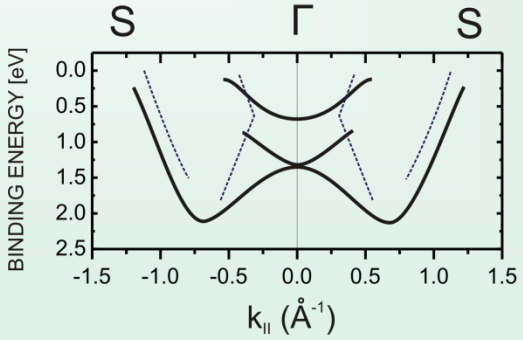


Обратное пространство

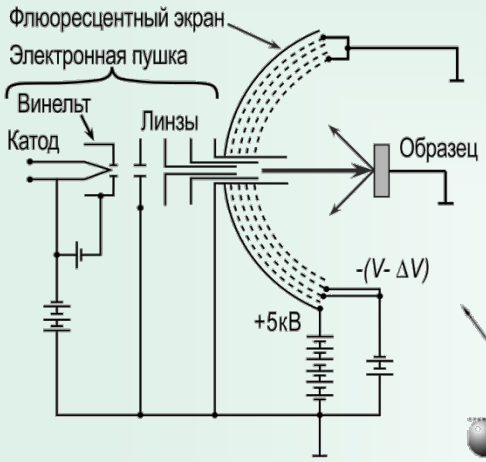
Картина ДМЭ W(110)



$E_B(k_{||})$ для W(110)

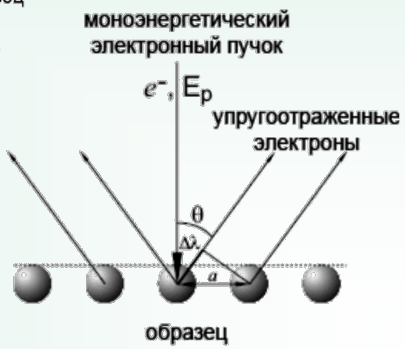


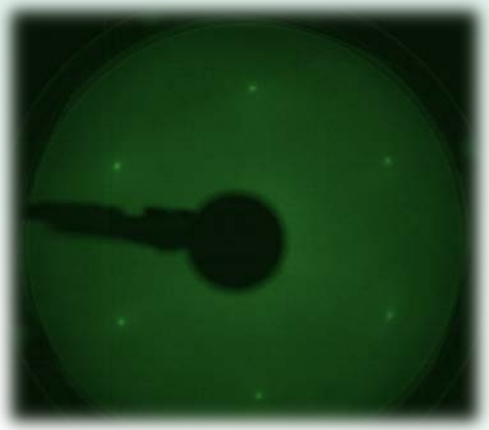
Дифракция медленных электронов



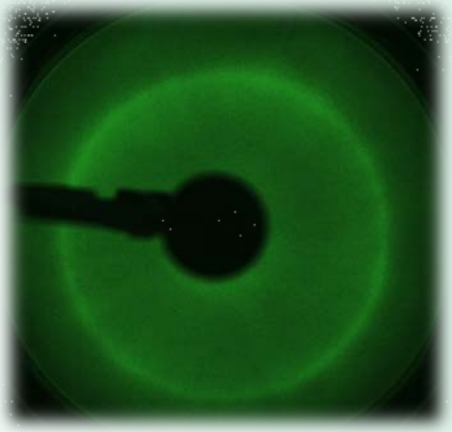
$$\lambda\,[\text{Å}] = \sqrt{\frac{150}{E[\text{эВ}]}}$$

$$\Delta\lambda = n \cdot \lambda = a \cdot \sin\theta$$



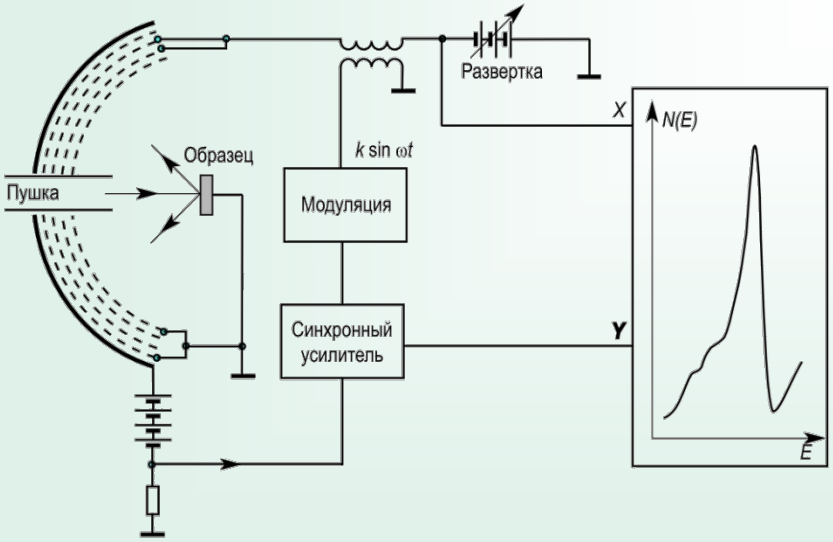


ДМЭ изображение графена (125эВ)*

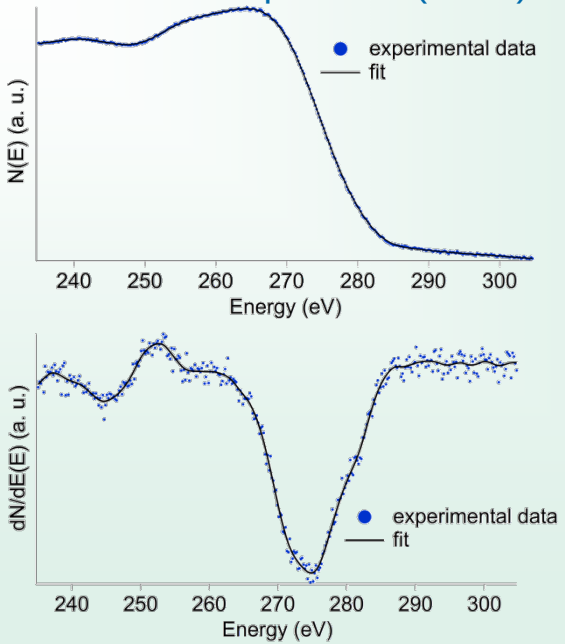


ДМЭ изображение HOPG (138эВ)*

Электронная оже-спектроскопия



Оже-спектр HOPG (C KLL)

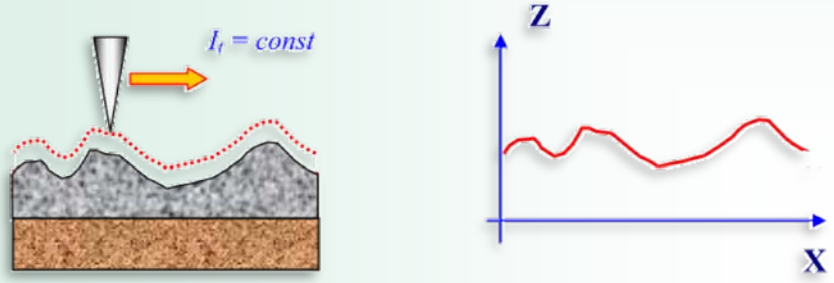


* Данные получены на Escalab 250 Xi

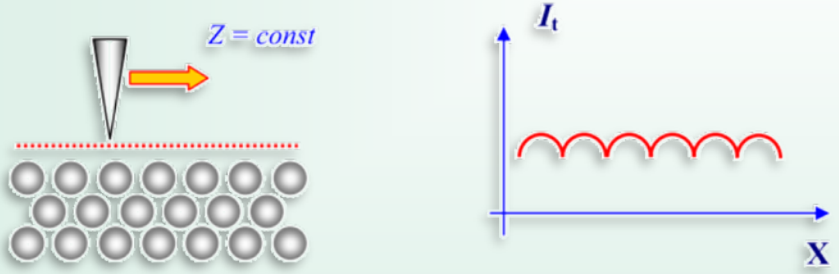
Принципы сканирующей туннельной микроскопии

Формирование СТМ изображений поверхности

по методу постоянного туннельного тока



по методу постоянного среднего расстояния



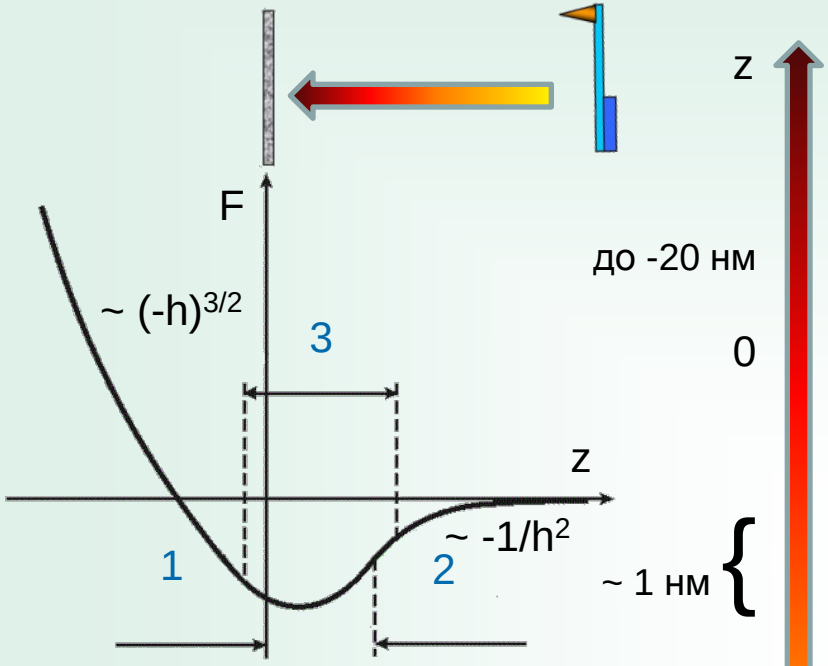
Высокое пространственное разрешение СТМ определяется экспоненциальной зависимостью туннельного тока от расстояния до поверхности:

$$j_t = j_0(V) \cdot e^{-\frac{4\pi}{h}\cdot\sqrt{2m\cdot\varphi^*}\cdot\Delta Z},$$

где m - масса электрона, φ* - средняя работа выхода электрона, h – постоянная Планка, ΔZ - ширина барьера.

Уменьшение расстояния «игла-образец» на несколько ангстрем приводит к возрастанию туннельного тока на порядок, что позволяет достигать разрешения вплоть до 0,1 Å.

Принципы атомной силовой микроскопии



1. *контактная атомно-силовая микроскопия*
2. *бесконтактная атомно-силовая микроскопия*
3. *полуконтактная атомно-силовая микроскопия*

Сила, определяющая взаимодействие образца с зондом, складывается из нескольких составляющих:

- упругое отталкивание – возникает при деформации образца кантилевером
- межмолекулярное взаимодействие (сила Ван-дер-Ваальса)
- капиллярные силы – при наличии на поверхности жидкой плёнки необходимо учитывать силы поверхностного натяжения
- адгезии – электростатические силы на границе раздела двух тел (разная природа для разных материалов)
- электростатическое взаимодействие
- магнитное взаимодействие

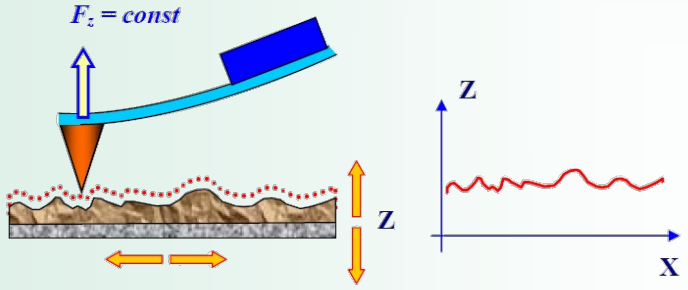
Принципы атомной силовой микроскопии:

контактный режим

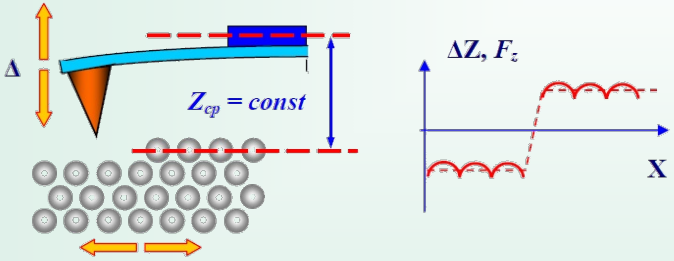
модуляционные методики

Формирование АСМ изображений поверхности:

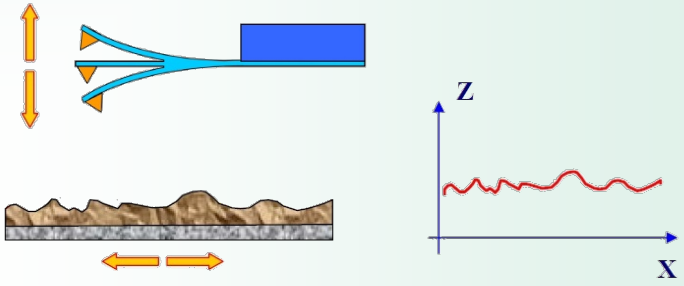
по методу постоянной силы взаимодействия



по методу постоянного среднего расстояния



$$A \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$



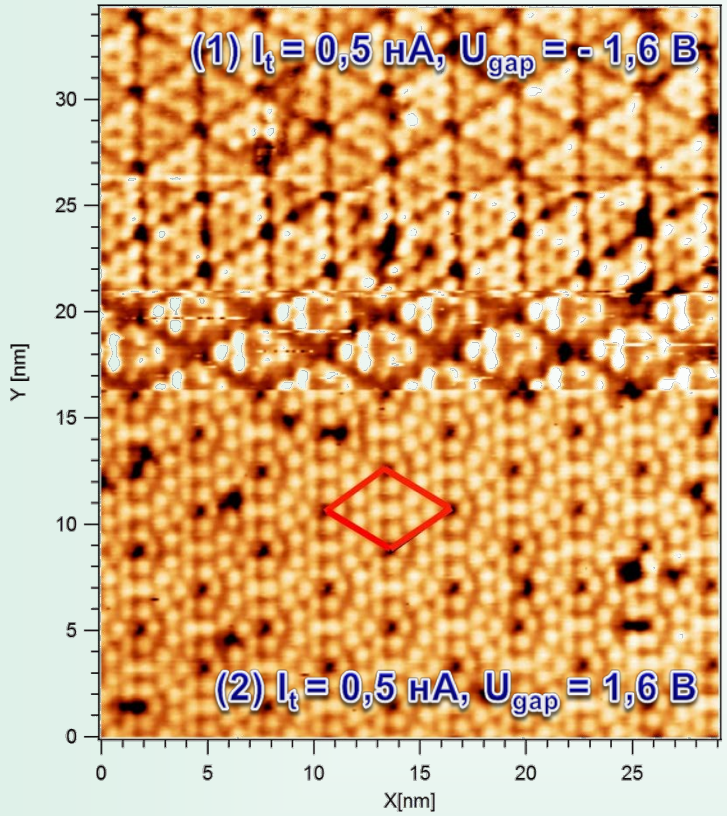
Изменение амплитуды и фазы колебаний кантилевера при взаимодействии зонда с поверхностью несёт в себе информацию о рельефе.

Области применения СЗМ

- ✓ Физика и химия (исследование с атомарным разрешением структуры поверхности проводящих образцов (СТМ) и изоляторов (АСМ), изучение механических, электрических, магнитных свойств материалов (СТМ- и АСМ-спектроскопия))
- ✓ Нанометрия (исследование наношероховатости поверхности образца)
- ✓ Нанотехнологии и материаловедение (исследование, изготовление и контроль приборных структур в микроэлектронике и наноэлектронике)
- ✓ Запись и воспроизведение информации (при записи используют эффект локального воздействия зонда на поверхность носителя информации)
- ✓ Исследование биологических объектов (модуляционные методики АСМ)

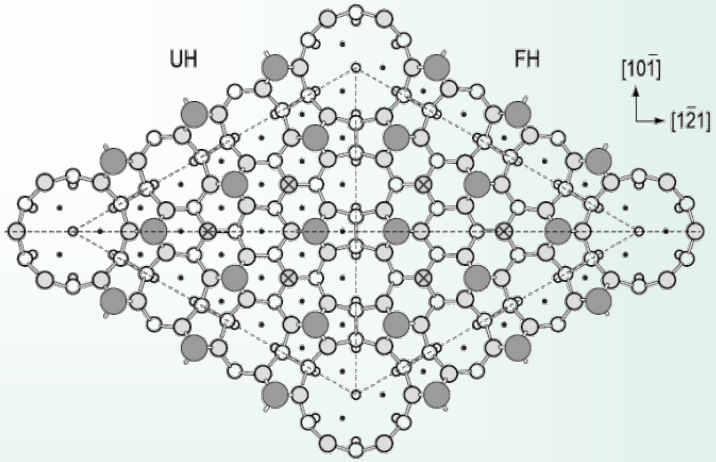
Результаты первых тестовых измерений

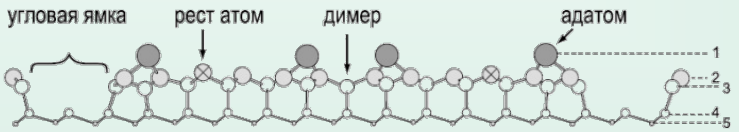
Omicron VT AFM XA 50/500



Светлые максимумы соответствуют адатомам Si, тёмные минимумы – угловым ямкам, что полностью соответствует модели реконструкции Si (111) 7x7*.

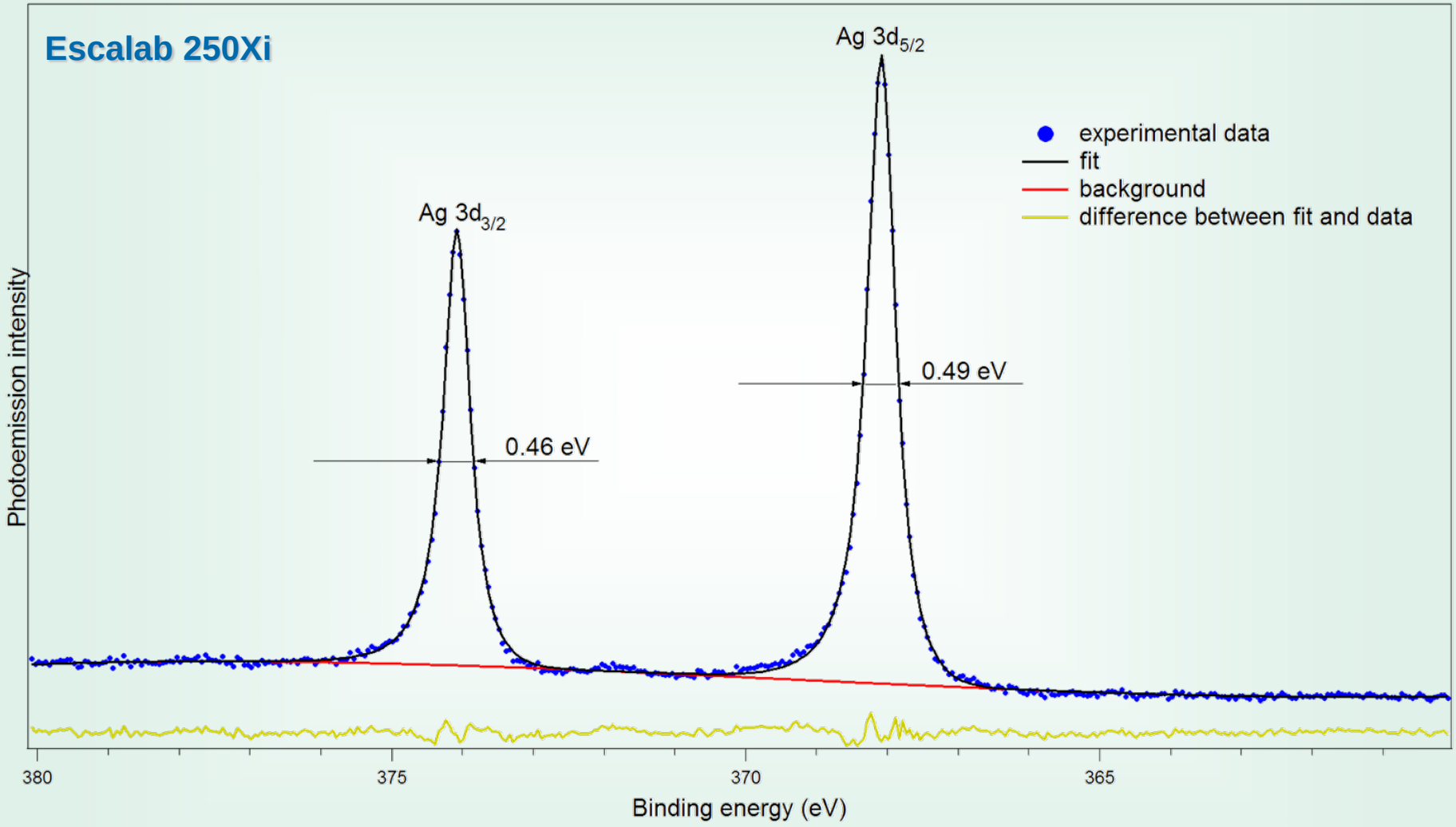
В зависимости от полярности напряжения между образцом и иглой отображаются либо заполненные электронные состояния (1), либо свободные состояния (2).





* Takayanagi K., Tanishiro Y., Takahashi S., Takahashi M. // Surf. Sci. - V. 164 , 1985 - P. 367

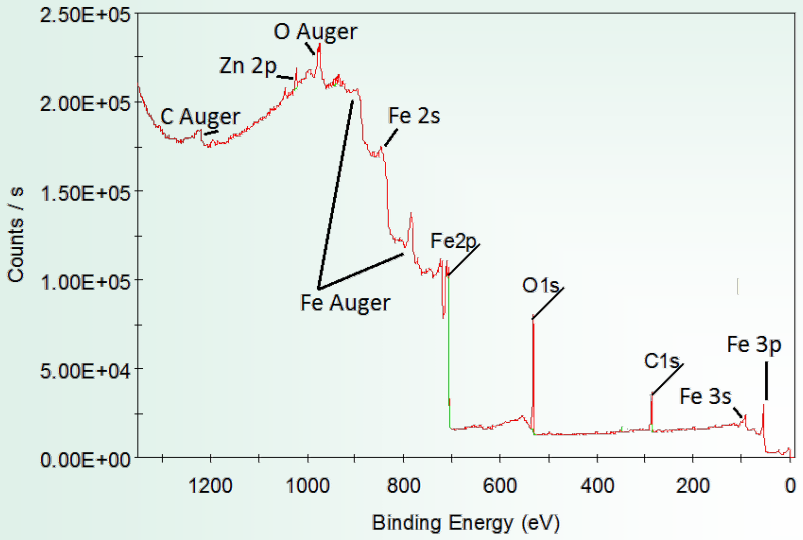
Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия: 3d остовные уровни серебра

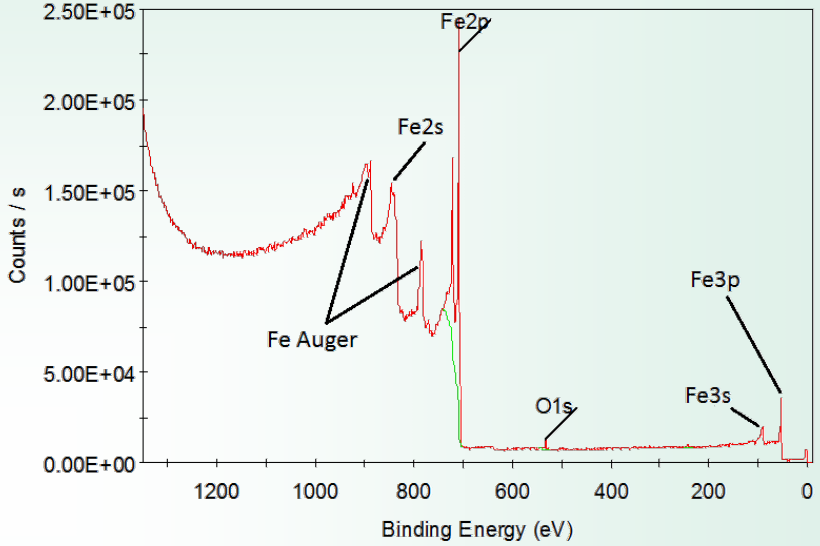


Полуширина пика Ag $3d_{3/2}$ составляет 0.46 эВ, пика Ag $3d_{5/2}$ - 0.49 эВ.

Изучение электронной структуры остовных уровней. Определение химического состава. Очистка поверхности.

Thermo Scientific Escalab 250Xi

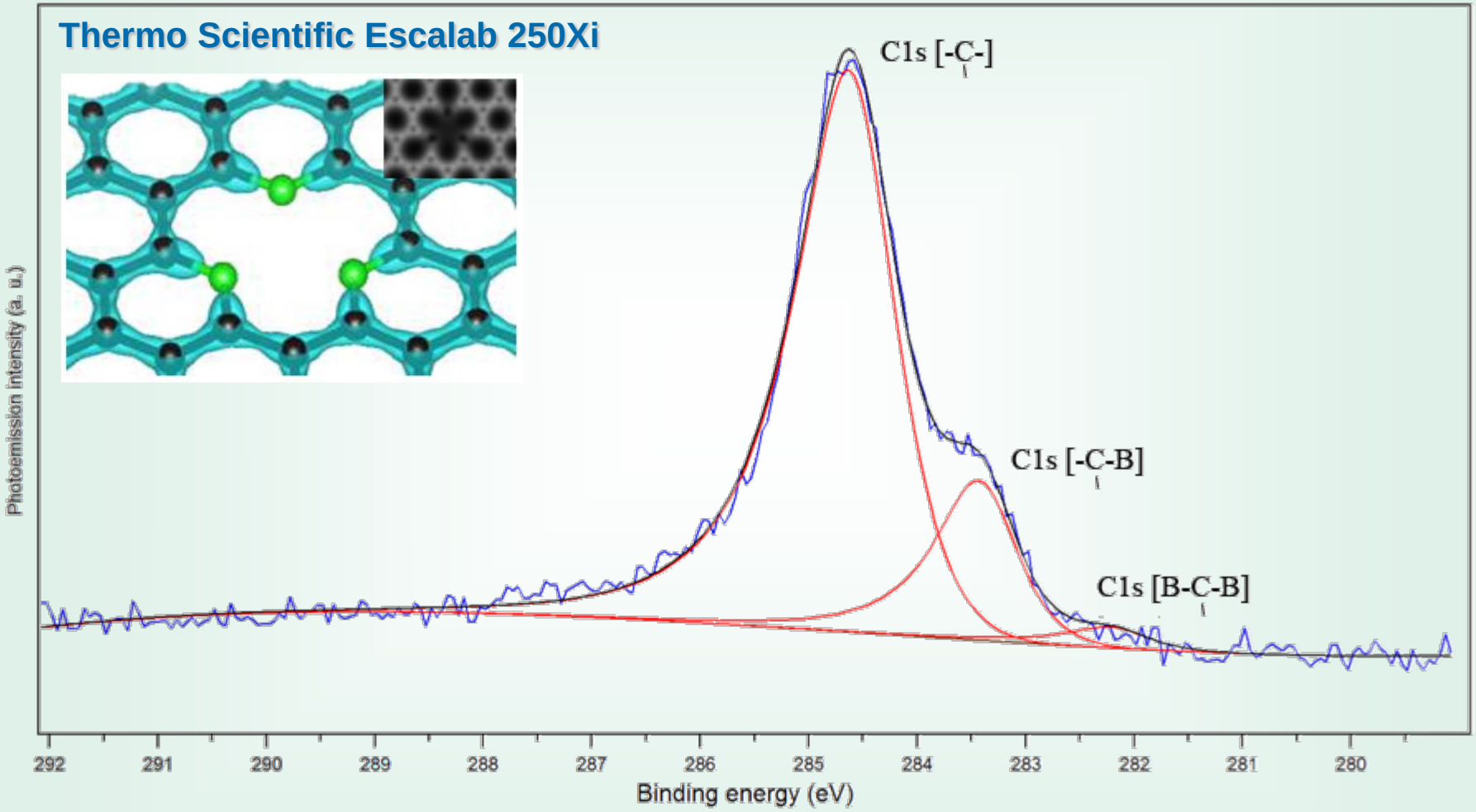




Элементный состав образца				
	Исходное состояние		Состояние после очистки	
Элемент	**Энергия (эВ)**	**Атомная доля (%)**	**Энергия (эВ)**	**Атомная доля (%)**
Fe 2p	707.01	1.91	707.45	92.22
O 1s	531.28	67.89	531.19	7.78
C 1s	285.87	30.20	-	-

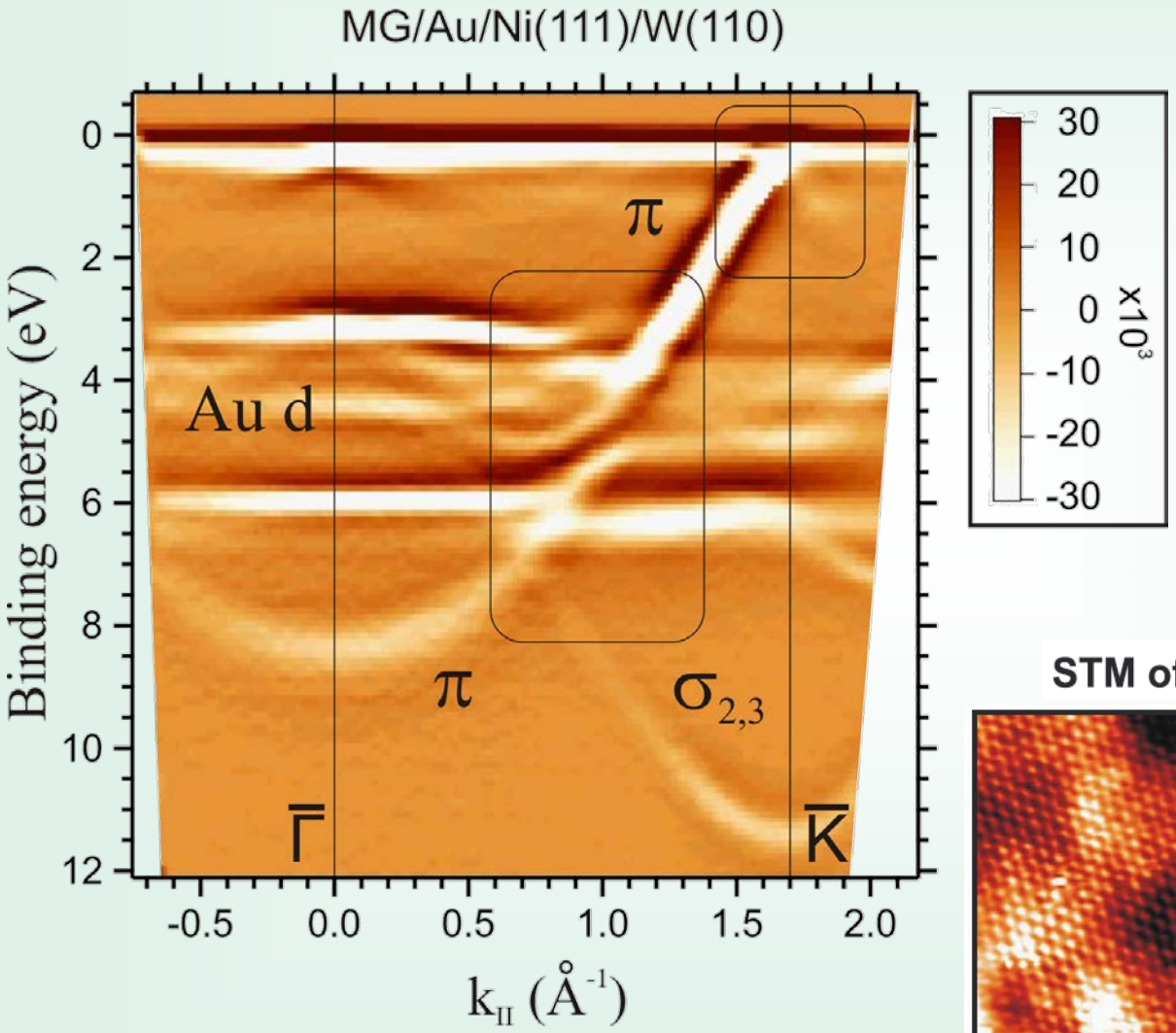
Результаты показывают, что оборудование позволяет: а) идентифицировать химический состав с высокой чувствительностью; б) произвести эффективную очистку поверхности.

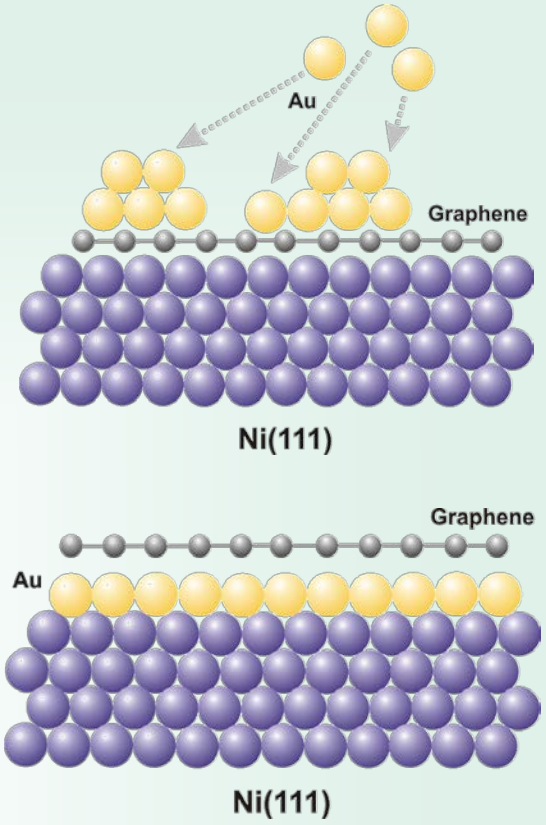
Разложение остовного уровня C1s на компоненты на примере наносистемы B-графен/Ni(111)/W(110)



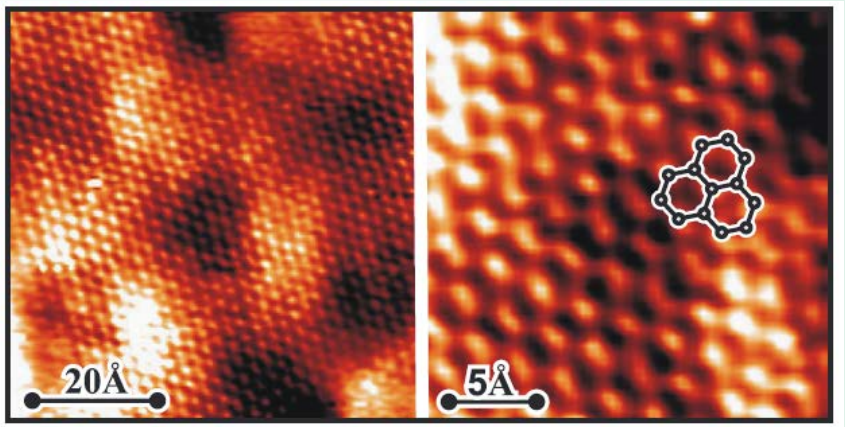
Полученный спектр даёт основания предполагать, что при использованном способе синтеза образца атомы бора встраиваются в решётку графена и имеют в ближайшем окружении два атома углерода.

Графен на Ni(111) с интеркалированным монослоем Au. Электронная и атомная структура.





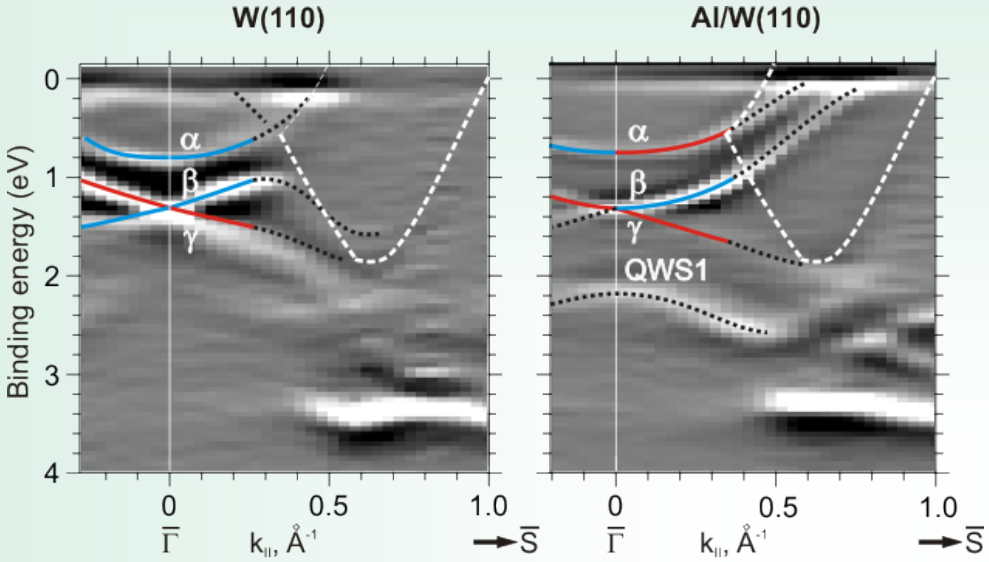
STM of Graphene / 1ML Au / Ni(111)

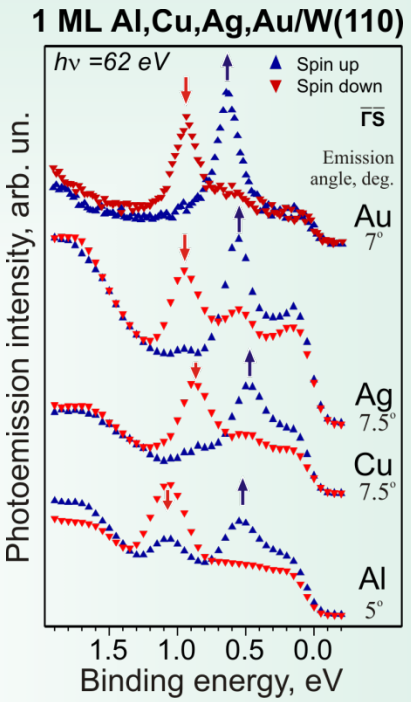


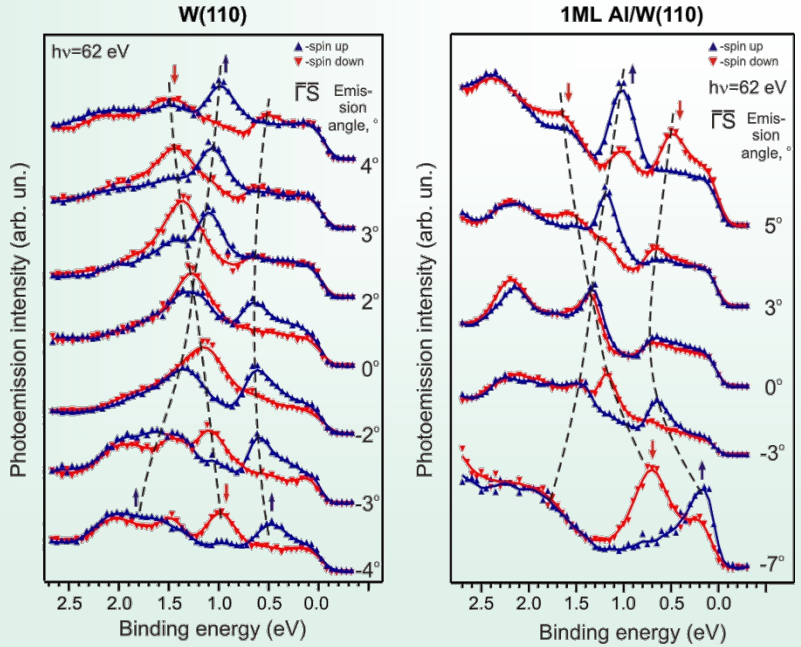
A. Varykhalov et al., Phys. Rev. Lett. 101, 157601 (2008)

A.M. Shikin et al., New J. Phys., 15, 013016 (2013)

ФЭСУР со спиновым разрешением. Валентная зона W(110) и 1 МС Al/W(110)







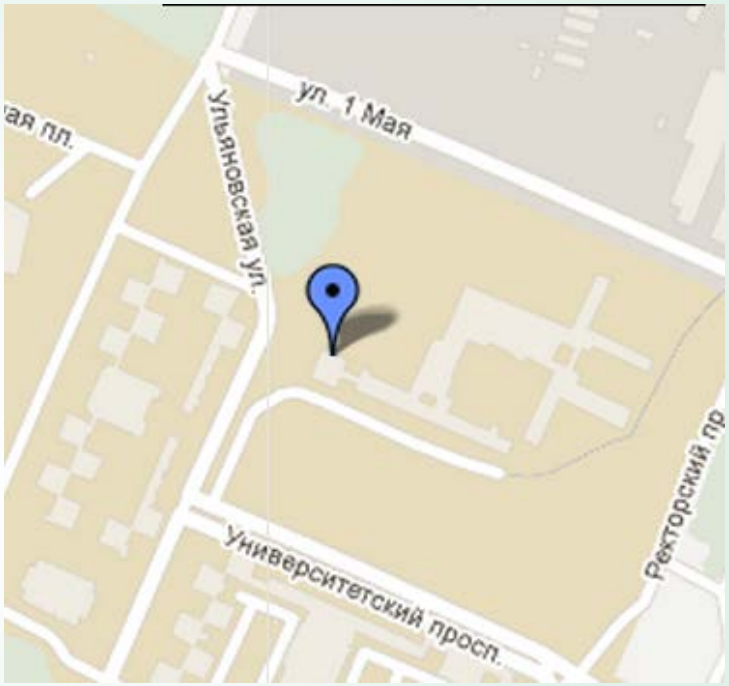
Для монослоя Al в запрещенной зоне W формируются состояния, поляризованные по спину. Величина расщепления сравнима с величиной, получаемой при напылении монослоёв благородных Me.

A.G. Rybkin, PRB 86, 035117 (2012)

Контакты

198504 Санкт-Петербург, Петергоф,
Университетский пр. 35, лит. А, 1 этаж
http://www.surface.spbu.ru

Артем Геннадиевич Рыбкин
директор РЦ
Тел. +7 904 555 86 72
artem.rybkin@spbu.ru



Правительство РФ
Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего
профессионального образования

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Спасибо за внимание!

www.surface.spbu.ru

artem.rybkin@spbu.ru