



Станция 1-6: «Электронная структура» – ЦКП «СКИФ»

А.В. Бухтияров, А.Д. Николенко

Институт катализа СО РАН
Институт ядерной физики СО РАН
A.D.Nikolenko@inp.nsk.su



Станция 1-6: «Электронная структура»

ФЭС УР

Параметры:

- Energy range 10 – 2200 eV
- Insertion device – Shifter
- Monochromator – PGM

Задачи:

1. РФЭС ВД (отв. Бухтияров А.В. – ИК СО РАН)

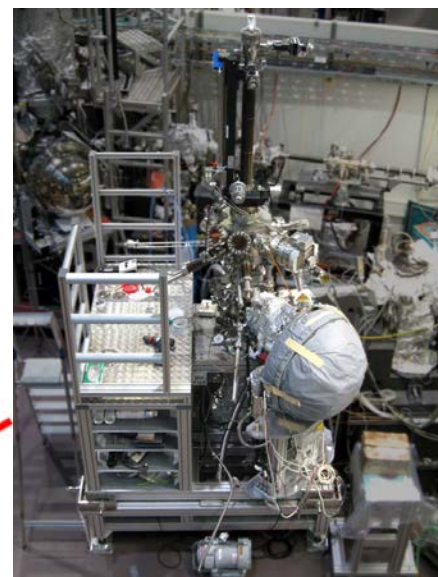
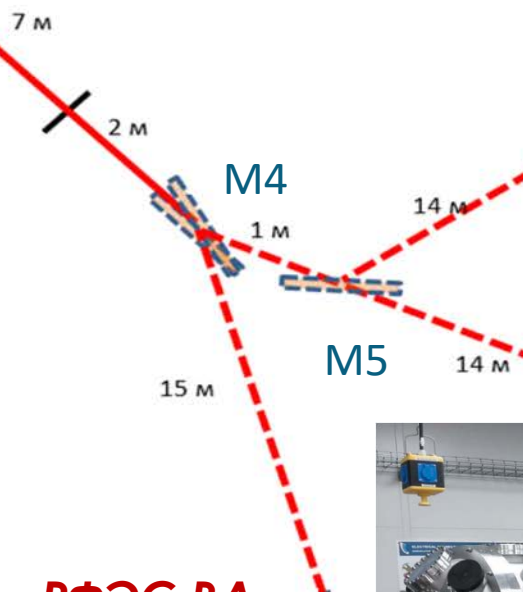
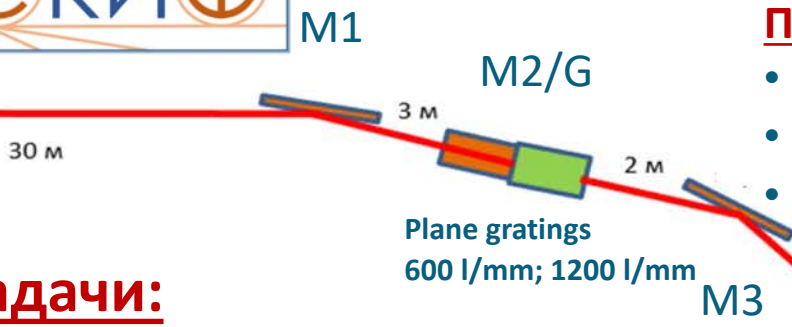
- *In situ* и *operando* исследования каталитических систем
- *Ex situ* и *in situ* изучение широкого класса инновационных функциональных материалов

2. ФЭС УР (отв. Терещенко О.Е. – ИФП СО РАН)

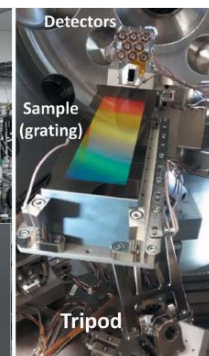
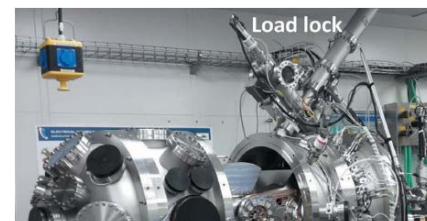
- Исследования зонного спектра и спиновой поляризации твердых тел для приложений нанoeлектроники и спинтроники

3. Рефлектометрия (отв. Николенко А.Д. – ИЯФ СО РАН)

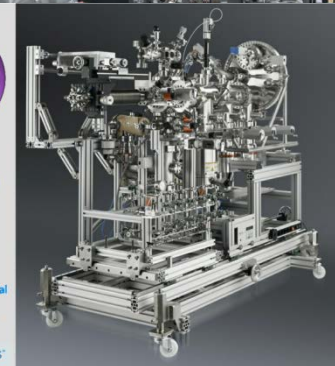
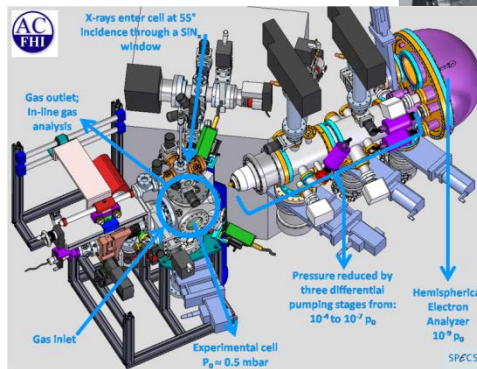
- Аттестация спектральных оптических элементов, фокусирующих элементов и детекторов рентгеновского излучения



Рефлектометрия



РФЭС ВД





Станция 1-6: «Электронная структура»

До источника

30 м

40 м

50 м

60 м

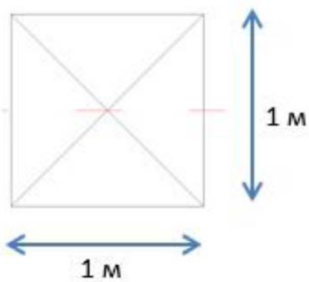
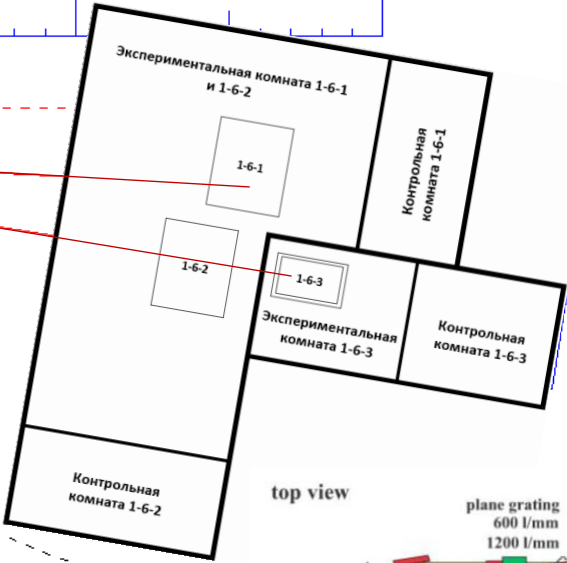
Ловушка
белого пучка

Линия белого пучка СИ

щели

Стена здания

Стена биозащиты синхротрона
Синхротрон

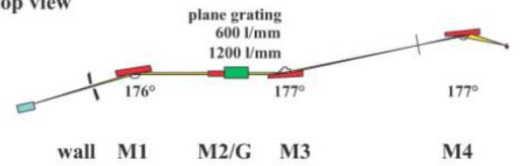


Условные габариты вакуумных объемов оптических элементов

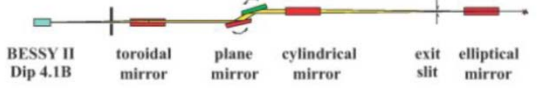
Оптические элементы:

- 1 – Плита с узлом тороидального зеркала
- 2 и 3 – Монохроматор: плита, на которой расположен узел плоского зеркала и плоских дифракционных решеток
- 4 – Плита с узлом цилиндрического зеркала
- 5 – Плита с узлом щелевого механизма
- 6 – Плита с узлом тороидального зеркала

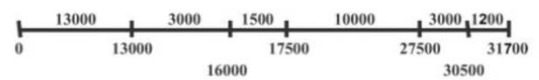
top view



side view



distance between elements (mm)

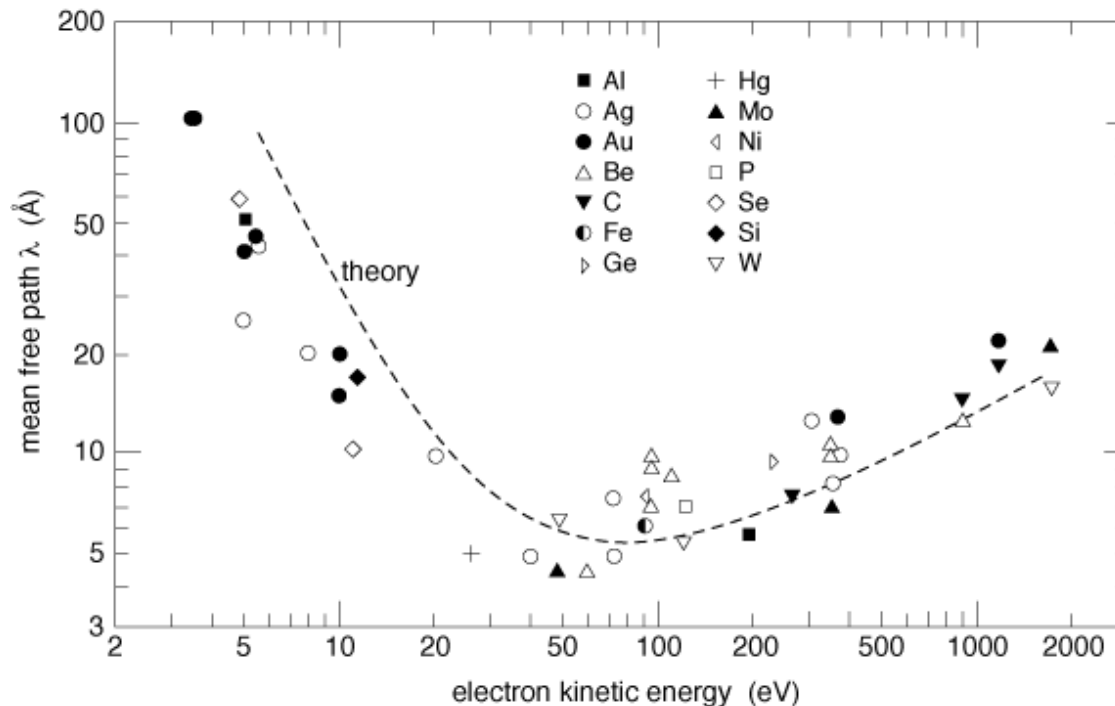


distance to source point (mm)

Оптическая схема ISSS beamline BESSY II

Преимущества РФЭС на базе СИ

- Использование синхротронного излучения высокой светимости позволяет возбуждать на несколько порядков большее количество фотоэлектронов, по сравнению со стандартными лабораторными источниками рентгеновского излучения ($AlK\alpha$ и $MgK\alpha$) – увеличение интенсивности
- Малая собственную ширину излучения при использовании монохроматоров высокого разрешения – улучшение разрешения
- Возможность выбора энергии первичного возбуждения - оптимизация сечения фотоионизации, разделение перекрывающихся фотоэлектронных линий,



Изучение распределения элементов по глубине анализа при помощи изменения кинетической энергии электронов без «разрушения» поверхности

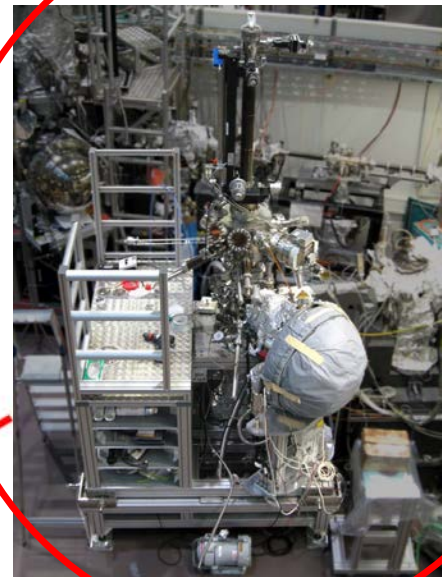


Станция 1-6: «Электронная структура»

ФЭС УР

Параметры:

- Energy range 10 – 2200 eV
- Insertion device – Shifter
- Monochromator – PGM



Рефлектометрия

Задачи:

1. РФЭС ВД (отв. Бухтияров А.В. – ИК СО РАН)

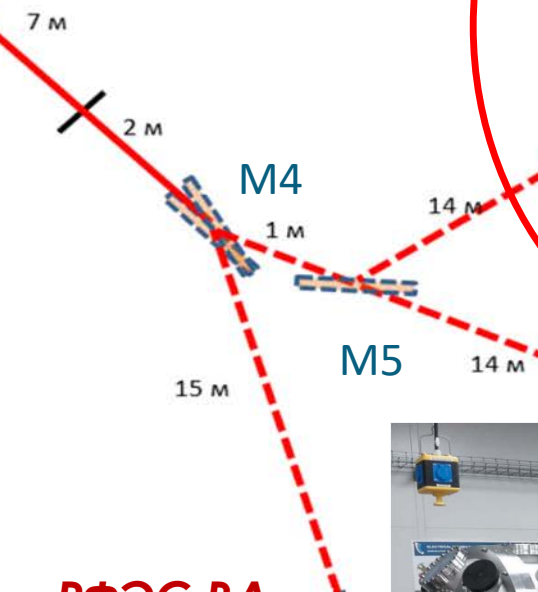
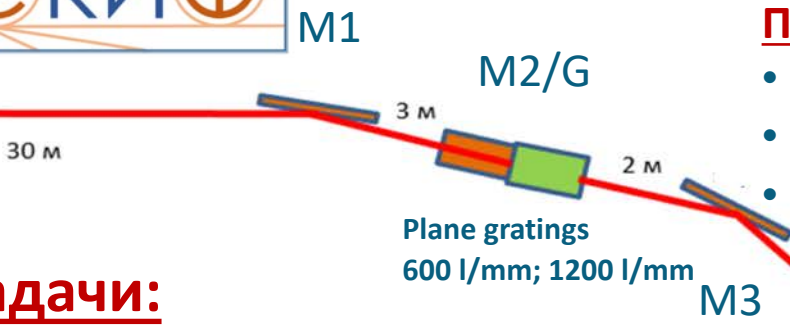
- *In situ* и *operando* исследования каталитических систем
- *Ex situ* и *in situ* изучение широкого класса инновационных функциональных материалов

2. ФЭС УР (отв. Терещенко О.Е. – ИФП СО РАН)

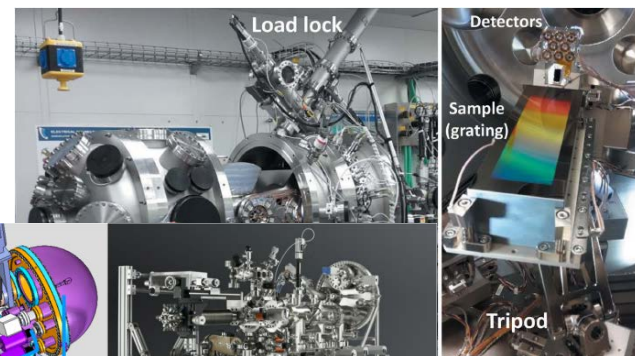
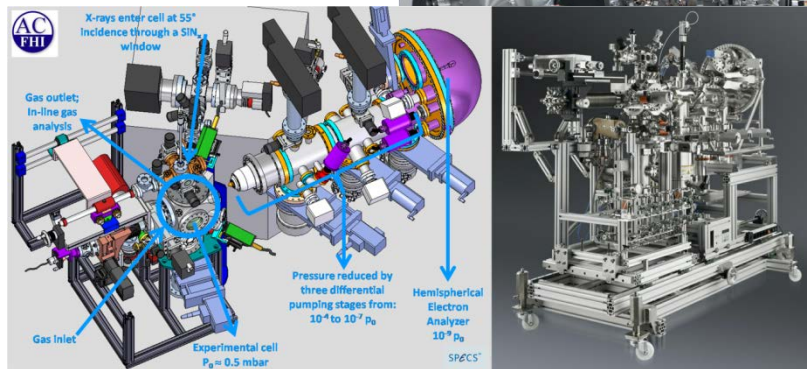
- Исследования зонного спектра и спиновой поляризации твердых тел для приложений нанoeлектроники и спинтроники

3. Рефлектометрия (отв. Николенко А.Д. – ИЯФ СО РАН)

- Аттестация спектральных оптических элементов, фокусирующих элементов и детекторов рентгеновского излучения

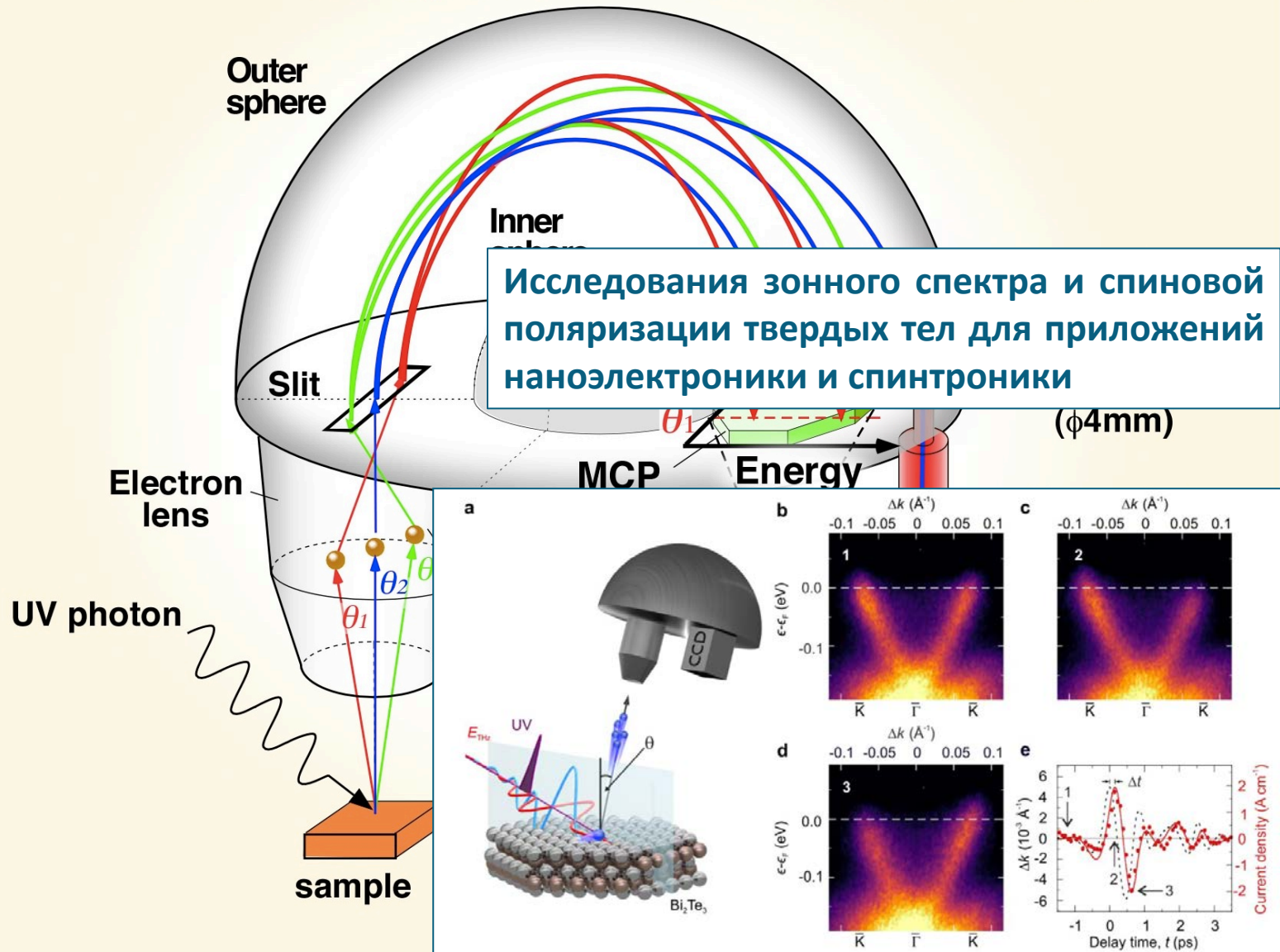


РФЭС ВД



ФЭС УР с разрешением по спину

Hemispherical electron analyzer (R=200mm)



Nature 562, p.396 (2018).



Станция 1-6: «Электронная структура»

ФЭС УР

Параметры:

- Energy range 10 – 2200 eV
- Insertion device – Shifter
- Monochromator – PGM

Задачи:

1. РФЭС ВД (отв. Бухтияров А.В. – ИК СО РАН)

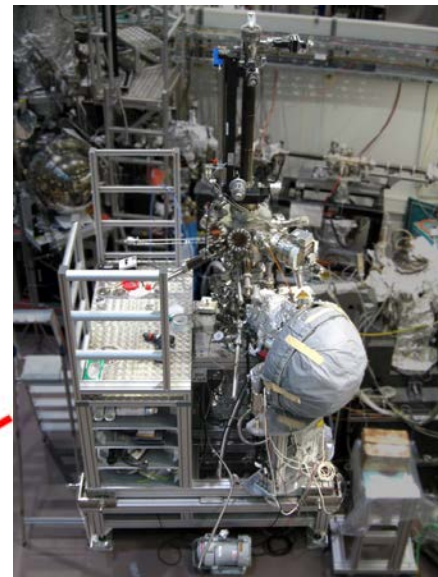
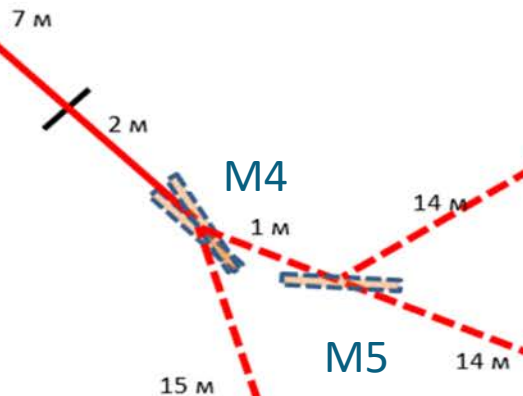
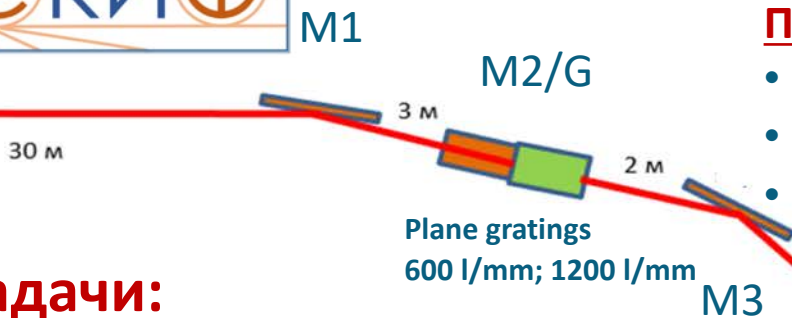
- *In situ* и *operando* исследования каталитических систем
- *Ex situ* и *in situ* изучение широкого класса инновационных функциональных материалов

2. ФЭС УР (отв. Терещенко О.Е. – ИФП СО РАН)

- Исследования зонного спектра и спиновой поляризации твердых тел для приложений нанoeлектроники и спинтроники

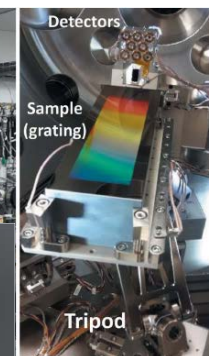
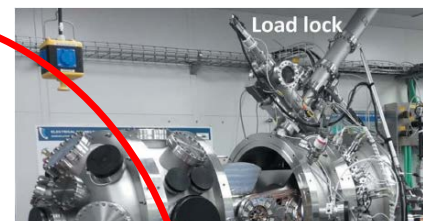
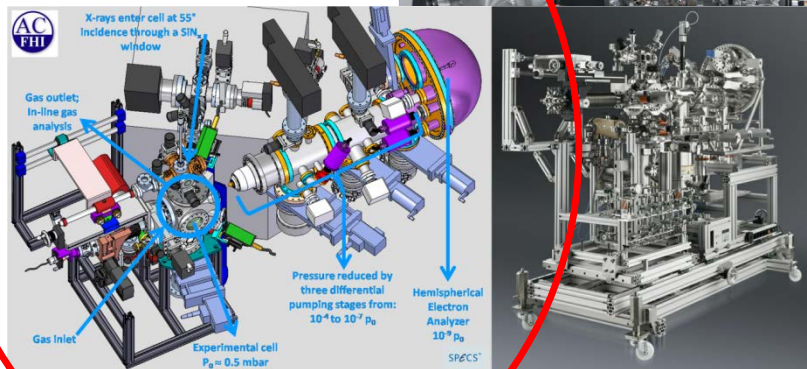
3. Рефлектометрия (отв. Николенко А.Д. – ИЯФ СО РАН)

- Аттестация спектральных оптических элементов, фокусирующих элементов и детекторов рентгеновского излучения

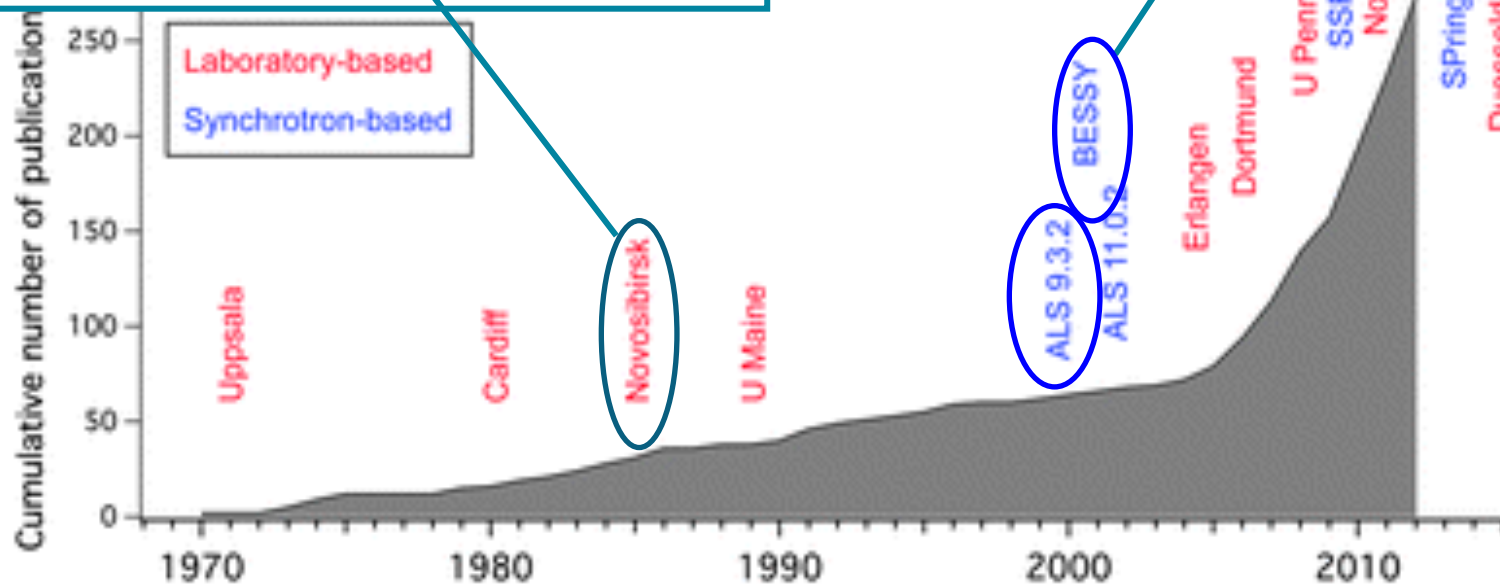
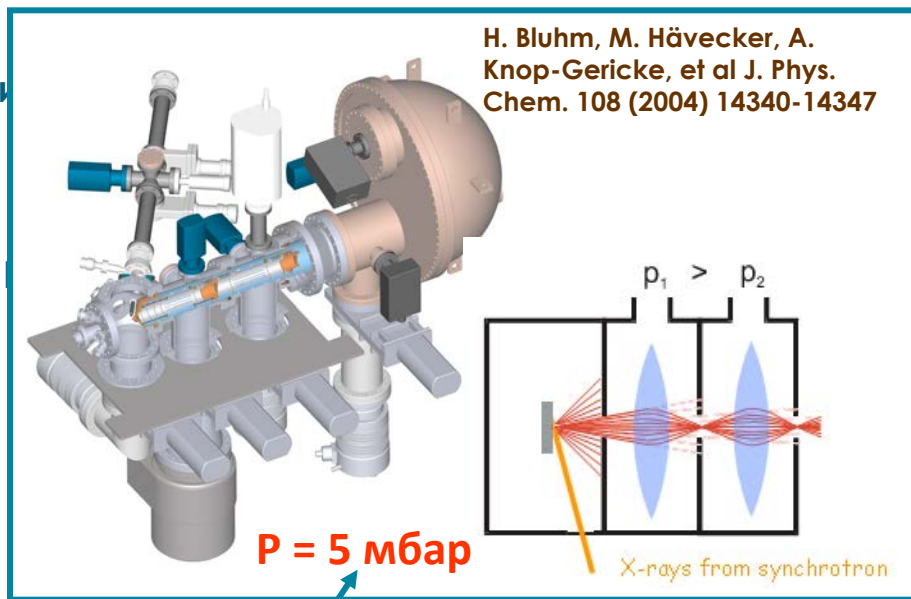
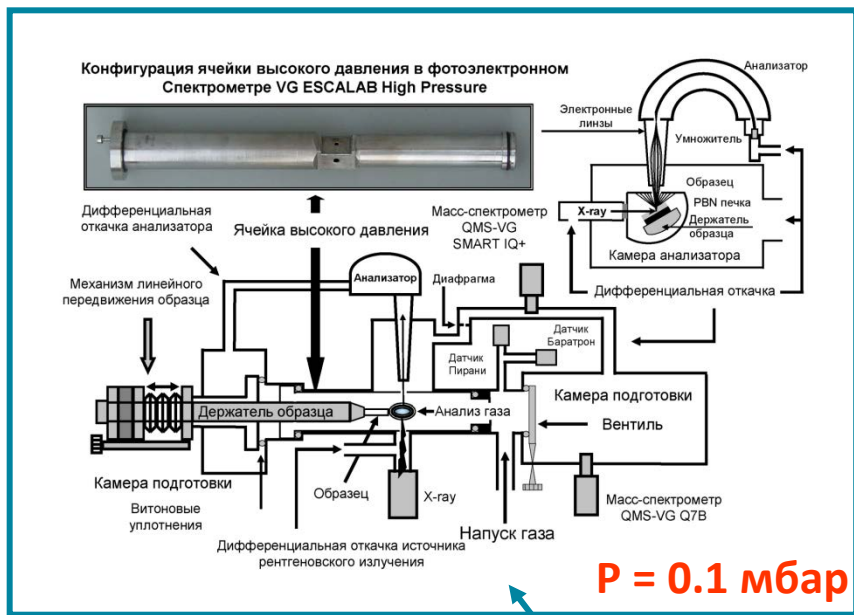


Рефлектометрия

РФЭС ВД



РФЭС при повышенном давлении



D. E. Starr, Z. Liu, M. Hävecker, A. Knop-Gericke, H. Bluhm; Chem. Soc. Rev. 42, (2013), 5833

РФЭС при повышенном давлении

Дополнительные возможности:

- Получение информации об изменении поверхности катализатора непосредственно в ходе протекания реакции/адсорбции
- Изучение интермедиатов реакции
- Получение информации о продуктах реакции (маршрут)

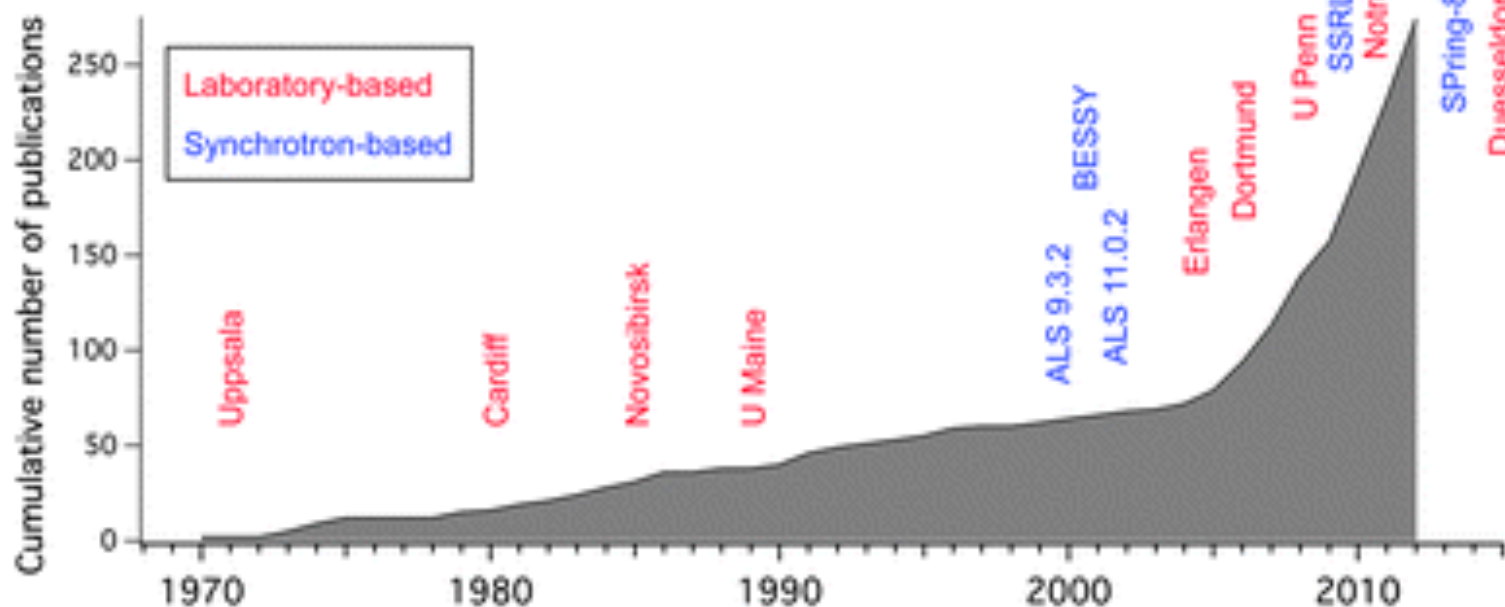
Siegbahn et al. early 1970's

Joyner and Roberts

Boronin and Bukhtiyarov

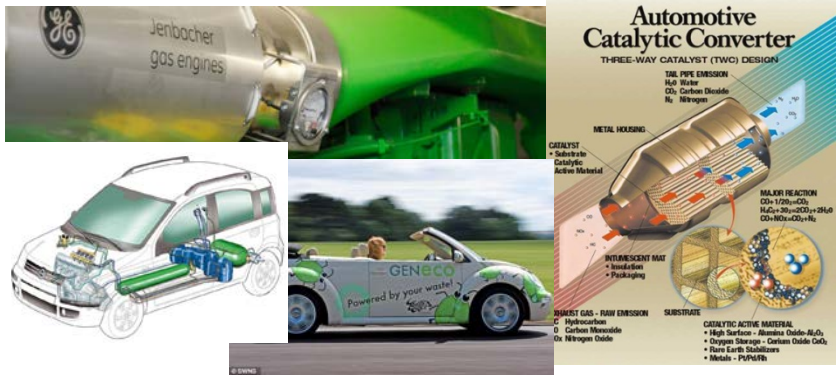
Grunze et al.

Развитие in-situ РФЭС

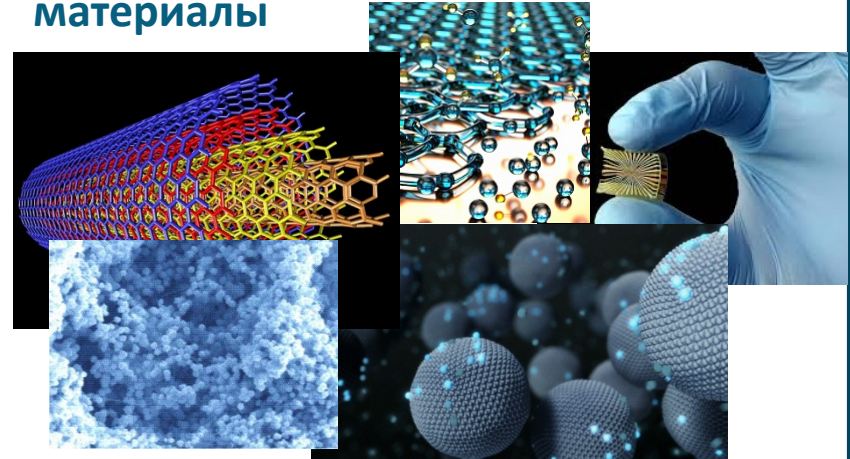


Применение метода РФЭС

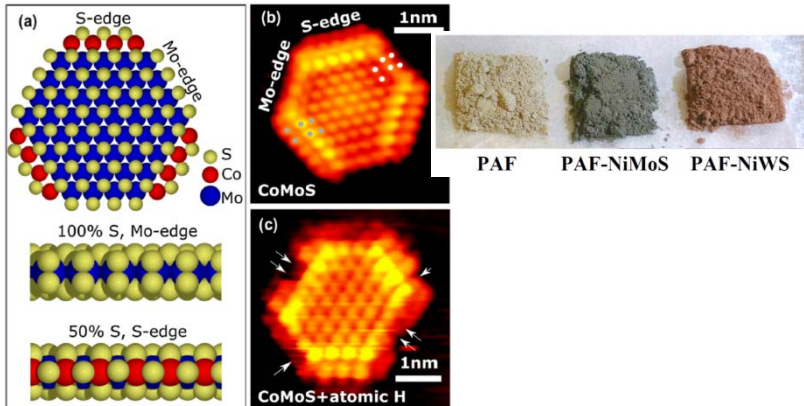
- Каталитическое восстановление оксидов азота (DeNOx)
- Полное окисление метана (Газ. двигатели)



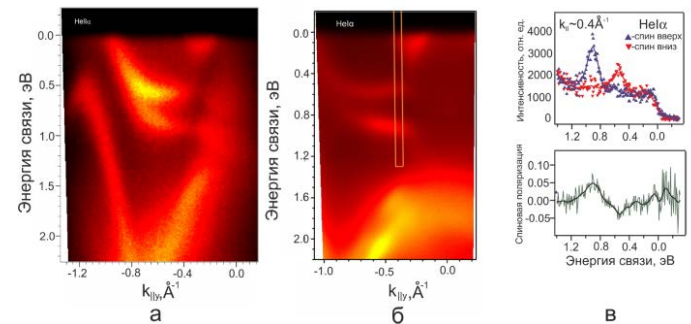
Функциональные и композитные материалы



Сульфидные катализаторы гидроочистки нефтяных фракций



Наноэлектроника и спинтроника: исследований зонного спектра и спиновой поляризации твердых тел

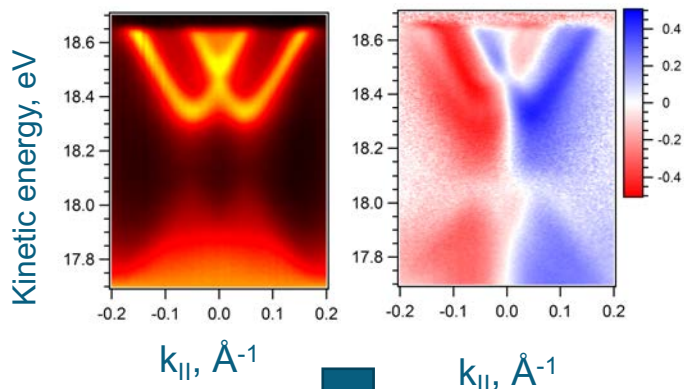


I. Формирование комбинированной электронной структуры спин-поляризованных поверхностных состояний Дирака и Рашбы

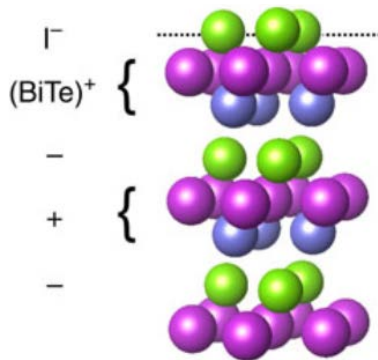
BiTeI -полупроводник ($E_g=0.7$ эВ) с гигантским расщеплением Рашбы

Spin-Polarized ARPES

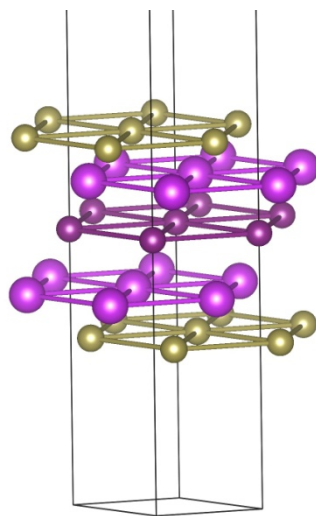
Spin-polarized valence band spectra of initial surface



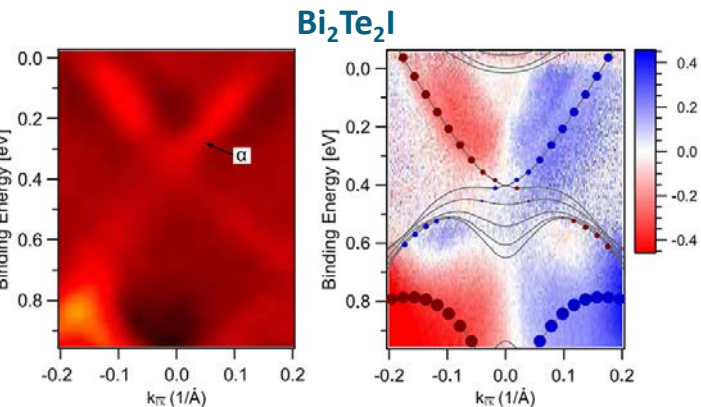
BiTeI Structure



Bi₂Te₂I Structure

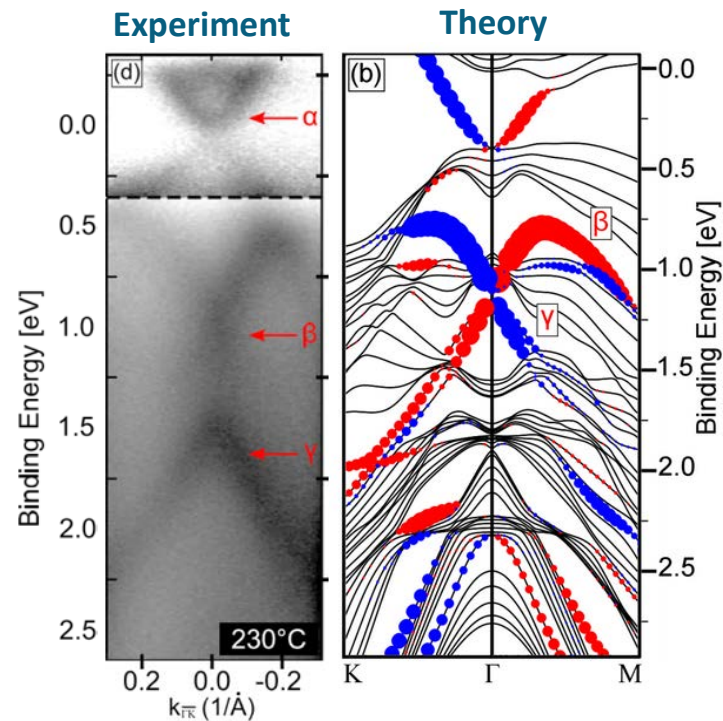


Spin-polarized valence band spectra Bi₂Te₂I



BESSY II

Valence band spectra after heating up to 230°C

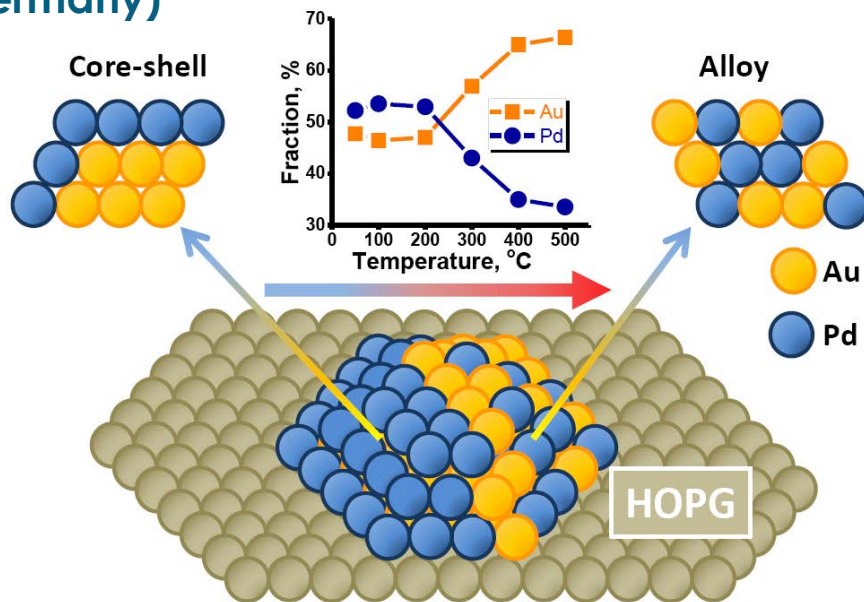
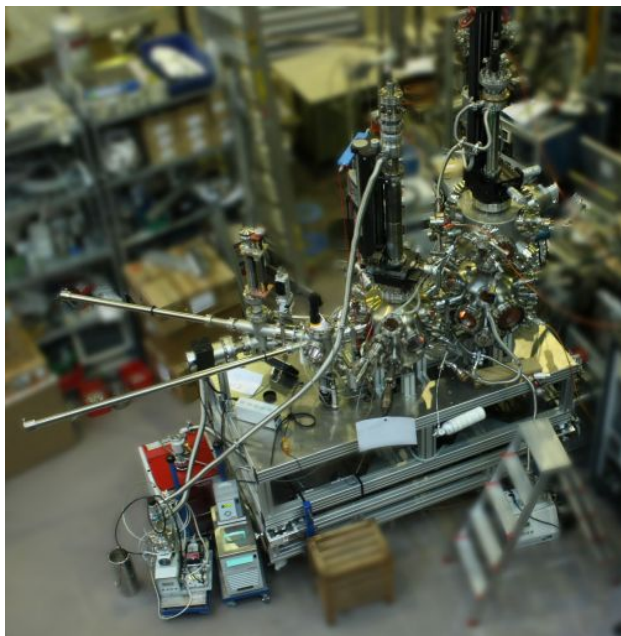


Nature Communications, 2016, v. 7, p. 11621.

S. Fiedler et al. New J. Phys. 20 (2018) 063035

II. Модельные Pd-Au/HOPG катализаторы: методика приготовления

Russian-German Lab @ BESSY II (Berlin, Germany)

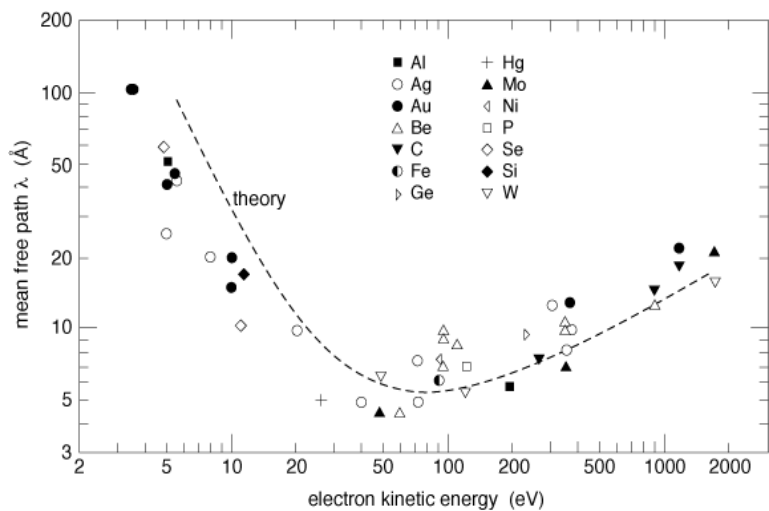


A.V. Bukhtiyarov, I.P. Prosvirin, V.I. Bukhtiyarov // Appl. Surf. Sci. 367 (2016) 214.

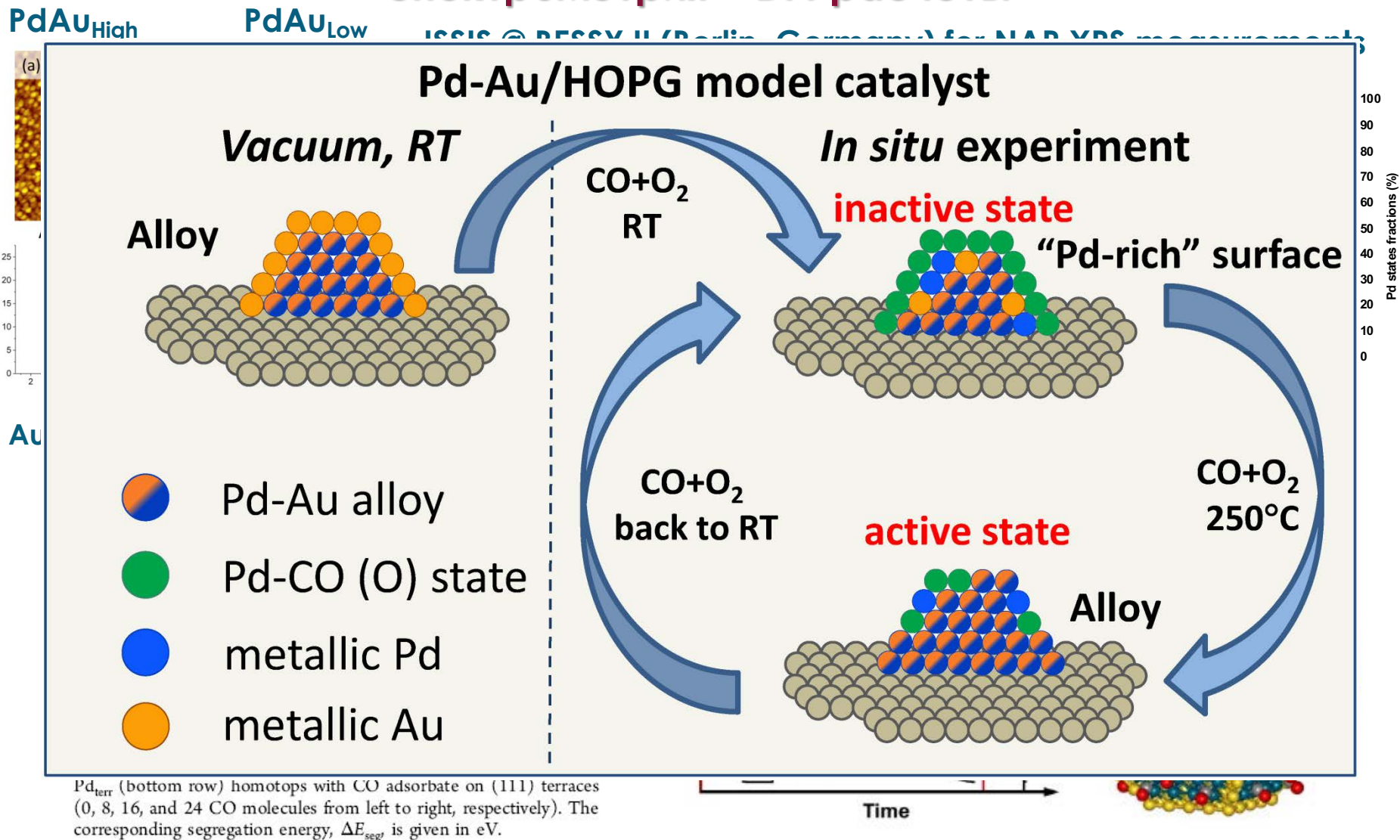
Методика приготовления

1. Мягкое травление поверхности ионами Ar^+
2. Напыление золота
3. Прогрев в UHV до $300^\circ C$
4. Напыление палладия
5. Формирование сплава

Оптимальная температура для образования сплава $\sim 400^\circ C$



III. Окисление CO на Pd-Au/HOPG: *in situ* РФЭС и масс-спектрометрия + DFT расчёты



A.V. Bukhtiyarov, I.P. Prosvirin, A.A. Saraev, A.Yu. Klyushin, A. Knop-Gericke, V.I. Bukhtiyarov, *Faraday Discuss.*, 2018, 208, 255-268.

M. Mamatkulov, I.V. Yudanov, A.V. Bukhtiyarov, I.P. Prosvirin, V.I. Bukhtiyarov, and K.M. Neyman // *J. Phys. Chem. C* 2018, DOI: 10.1021/acs.jpcc.8b07402



Станция 1-6: «Электронная структура»

ФЭС УР

Параметры:

- Energy range 10 – 2200 eV
- Insertion device – Shifter
- Monochromator – PGM

Задачи:

1. РФЭС ВД (отв. Бухтияров А.В. – ИК СО РАН)

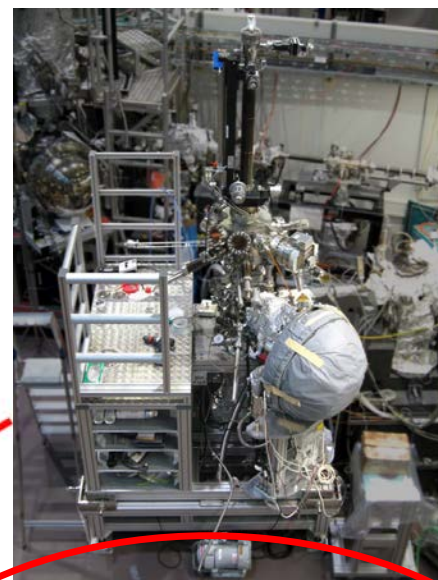
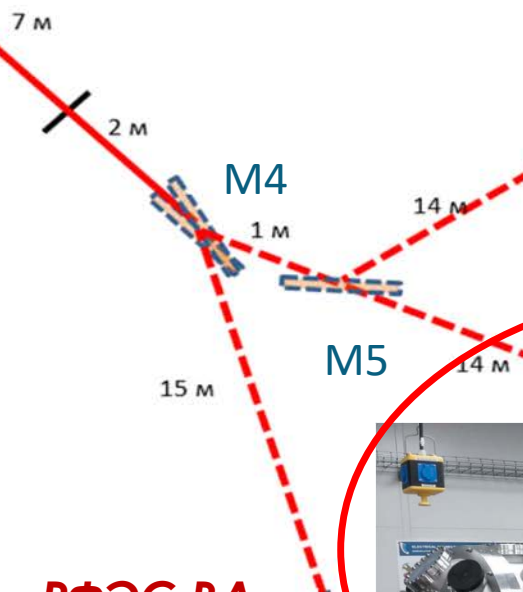
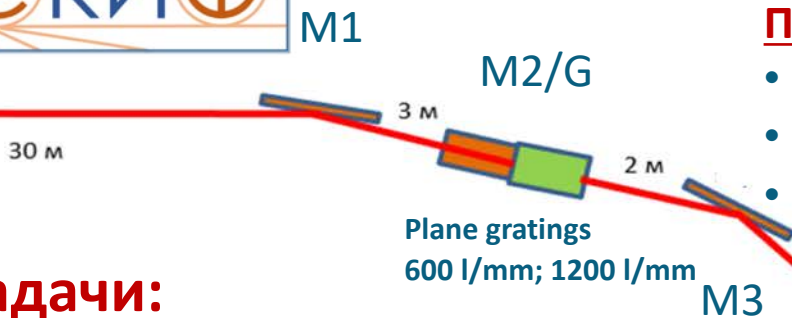
- *In situ* и *operando* исследования каталитических систем
- *Ex situ* и *in situ* изучение широкого класса инновационных функциональных материалов

2. ФЭС УР (отв. Терещенко О.Е. – ИФП СО РАН)

- Исследования зонного спектра и спиновой поляризации твердых тел для приложений нанoeлектроники и спинтроники

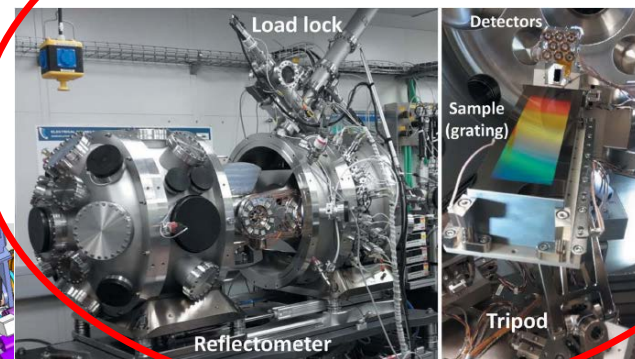
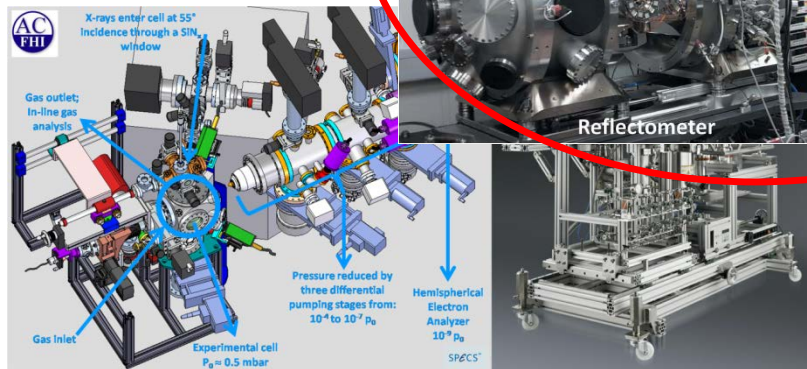
3. Рефлектометрия (отв. Николенко А.Д. – ИЯФ СО РАН)

- Аттестация спектральных оптических элементов, фокусирующих элементов и детекторов рентгеновского излучения



Рефлектометрия

РФЭС ВД



Reflectometer

Detectors

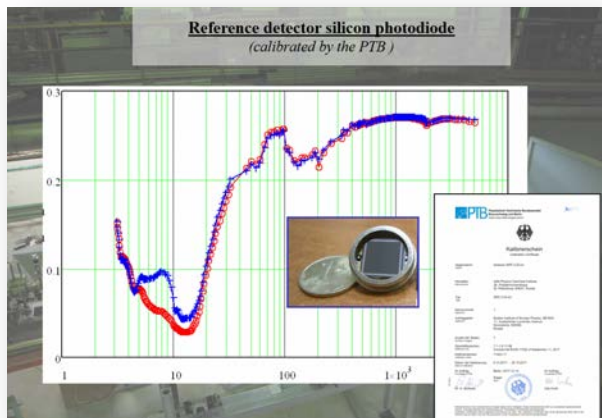
Sample (grating)

Tripod

Станция метрологии и рефлектометрии

Задача абсолютной калибровки детекторов

Проблема эталонного детектора



Эталонный детектор.

Прокалиброван в РТВ (Германия)

$$S = \frac{1}{w} \exp\left(-\frac{d_C}{\lambda_C} - \frac{d_{SiO_2}}{\lambda_{SiO_2}} - \frac{d_B}{\lambda_B}\right) \left[\left(\exp\left(-\frac{d_{aSi}}{\lambda_{aSi}}\right) \right) \left(1 - \exp\left(-\frac{d_{aSi}}{\lambda_{aSi}}\right) \right) + \sigma_z \left(1 - \exp\left(-\frac{d_{aSi}}{\lambda_{aSi}}\right) \right) \right]$$

Параметры:

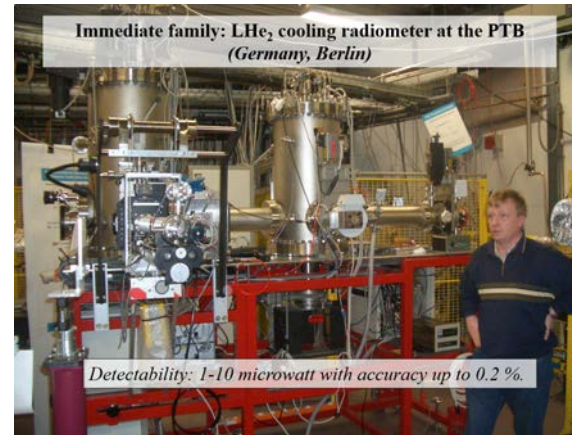
$d_C, d_{SiO_2}, d_B, d_{aSi}, d_{aSi}$ - толщины слоев детектора - поглощающих (углерода, оксида кремния и бора), мертвого и активного слоев кремния соответственно.

$\lambda_C, \lambda_{SiO_2}, \lambda_B, \lambda_{aSi}$ - радиационные длины для соответствующих материалов.

σ_z - вероятность диффузии носителей заряда из "мертвого" слоя детектора в активную область.

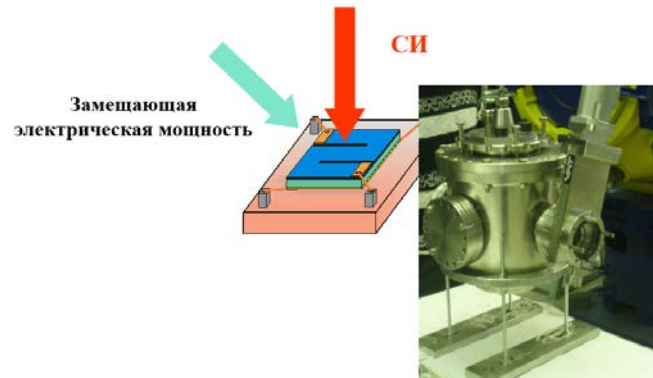
w - энергия образования электрон-дырочной пары в кремнии (3.66 эВ)

Формула чувствительности эталонного детектора



Первичный эталон РТВ

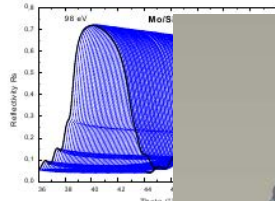
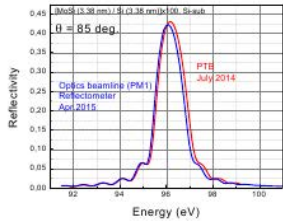
Сверхпроводящий болометр как первичный эталон (80-3000 эВ)



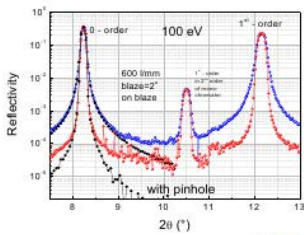
Первичный эталон собственной разработки

Мягкая рентгеновская рефлектометрия Области применения

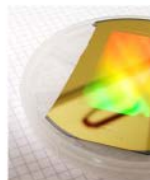
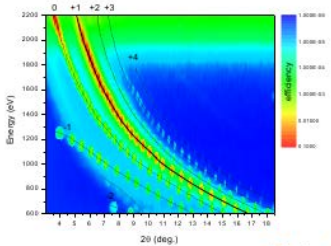
Metrology on Multilayers



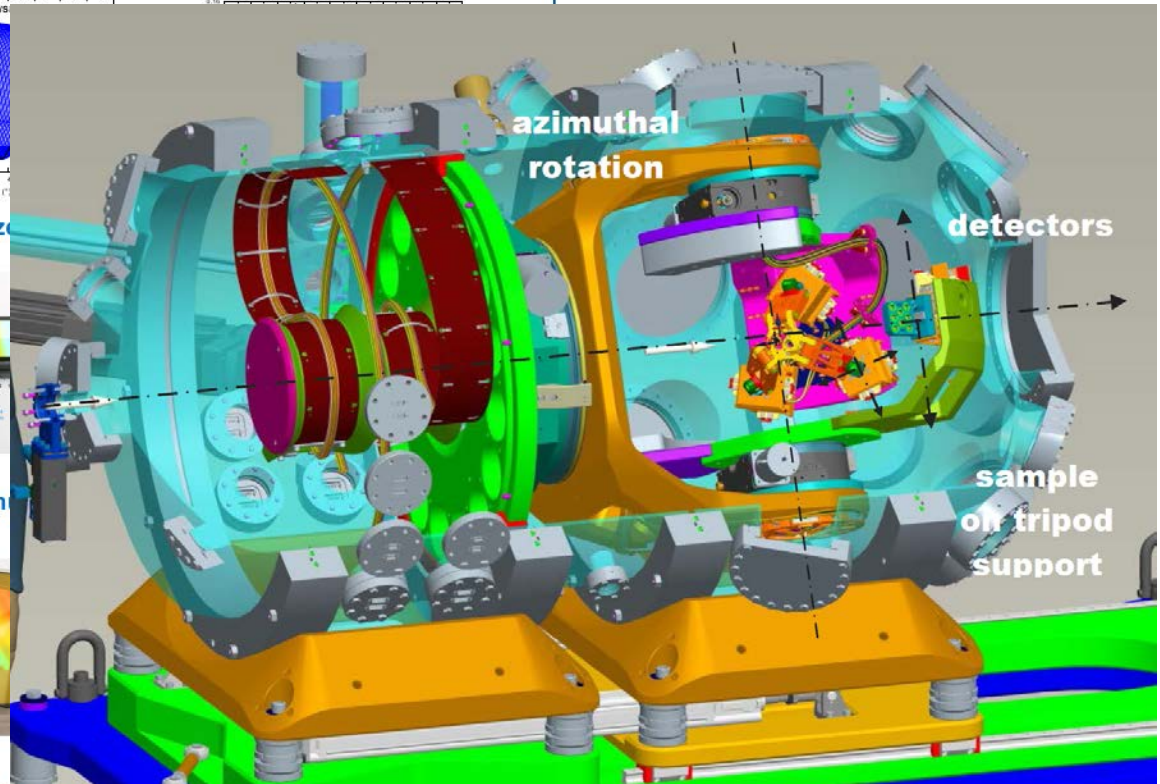
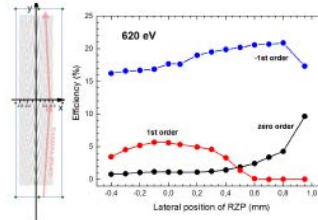
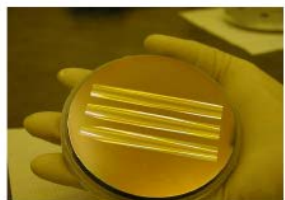
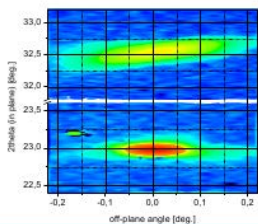
Metrology on blazed gratings



Metrology on blazed mirrors



Metrology on Reflection Zone Plates

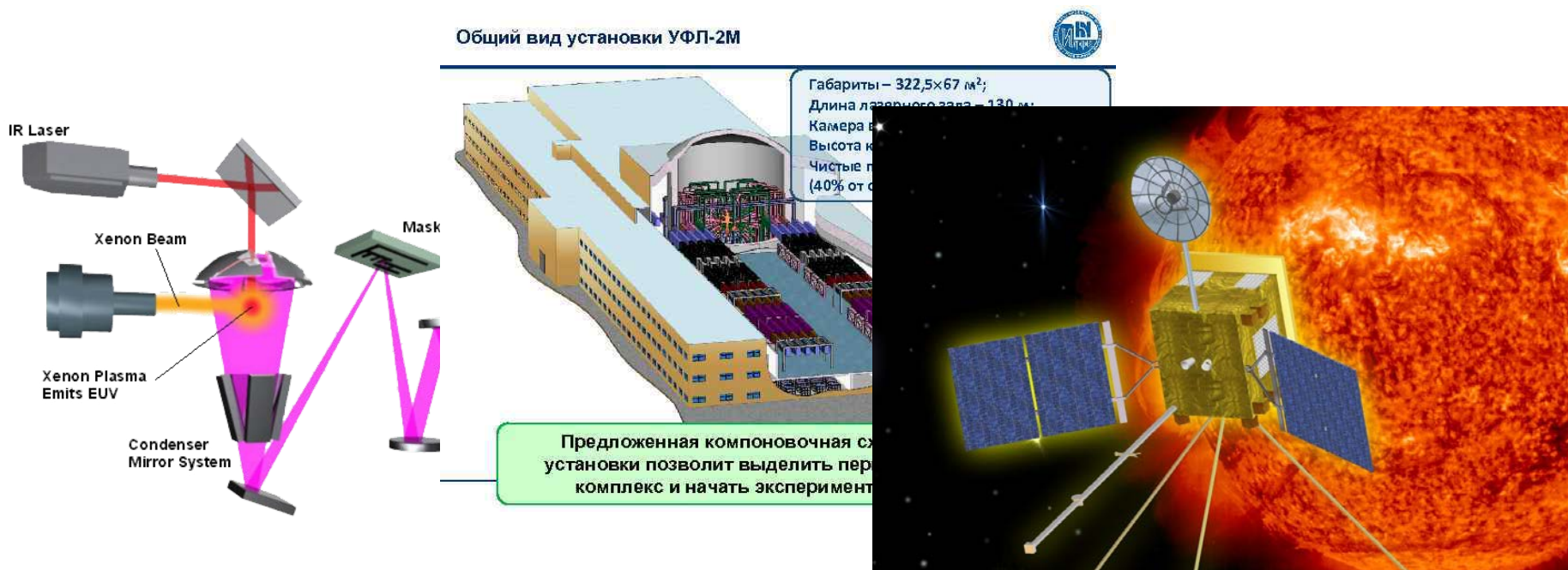


**At-Wavelength Metrology Facility
for UV- and XUV Reflection and
Diffraction Optics F. Schäfers, F.
Eggenstein, P. Bischoff et al.**

Мягкая рентгеновская метрология (30-6000 эВ) Области применения

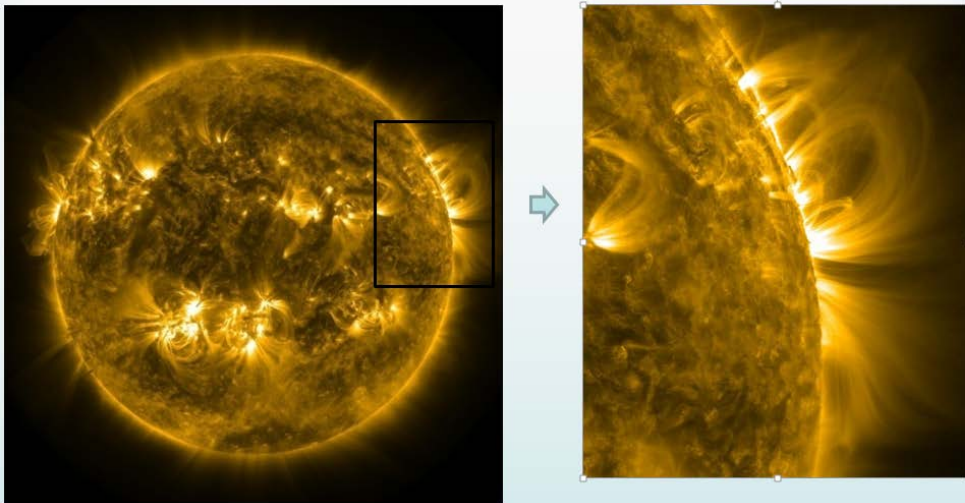
Разработка и реализация метрологических методик в МР диапазоне:

- ЭУФ нанолитография
- Наблюдение высокотемпературной плазмы
- Мягкая рентгеновская и ВУФ астрономия



Метрология и рефлектметрия для космоса

«Телескоп – лупа» (проект АРКА)



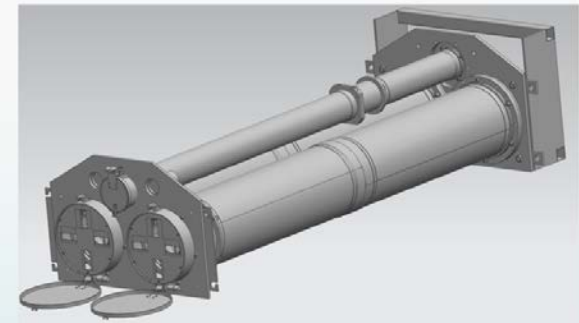
Задача проекта АРКА – получить угловое разрешение $0.10''$ (~ 75 км)

Работа с охлаждаемыми матрицами



Исследуемые ПЗС-матрицы фирмы Te2v:
- охлаждаемые CCD backside-illuminated
- размер 1072×2048 пикселей 13×13 мкм²

Телескопы солнечного проекта АРКА



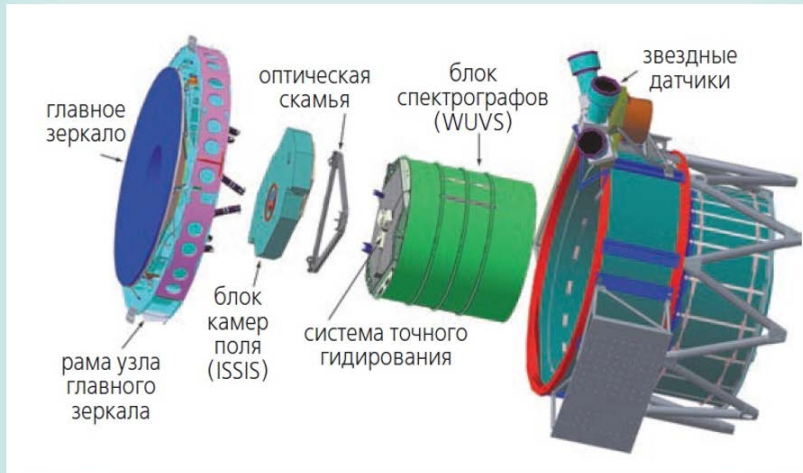
Три ЭУФ телескопа:

- T1, T2 – телескопы высокого разрешения ($\lambda_1 = 171 \text{ \AA}$, $\lambda_2 = 304 \text{ \AA}$, FOV = $10' \times 10'$)
- TX – обзорный телескоп с умеренным пространственным разрешением и полем зрения, захватывающим полный диск Солнца

**XXIII Международный симпозиум
«Нанофизика и наноэлектроника» 2019 г.
Вишняков Е.А. и др.**

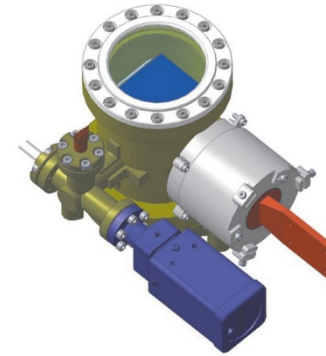
Метрология и рефлектметрия для космоса

Схемы приборов проекта Спектр-УФ



Инструментальный отсек телескопа Т-170М

*М.Е.Сачков и др. *Вестник НПО им.Лавочкина*, 5(26), 34-39 (2014).

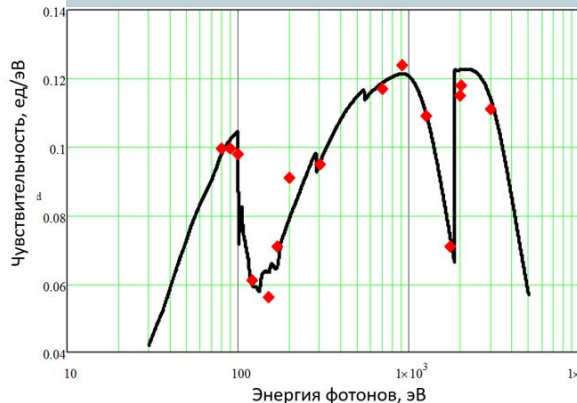


Бокс с чувствительным элементом

Цели и задачи проекта Спектр-УФ (WSO-UV = World Space Observatory UltraViolet)

- Физика ранней Вселенной
- Звёздообразование в галактиках
- Образование и эволюция галактик
- Наблюдение сверхмассивных звёзд
- Формирование нашей Галактики
- Наблюдение протопланетных дисков
- Исследования атмосферы экзопланет
- Наблюдения за удалёнными телами Солнечной системы

Чувствительность ПЗС-матрицы: эксперимент и аппроксимация



Измерение чувствительности ПЗС для наблюдения термоядерной плазмы. Николенко А.Д. Суслов Н.А



Станция 1-6



Институт катализа СО РАН:

Квон Р.И., Просвирин И.П.,
Панафидин М.А., Четырин И.А.,
Бухтияров А.В.



Институт ядерной физики СО РАН:

Николенко А.Д.



Институт физики полупроводников
СО РАН:

Терещенко О.Е.



Институт неорганической химии
СО РАН:

Асанов И.П., Асанова Т.И.



N* Novosibirsk
State
University
*THE REAL SCIENCE



Спасибо за внимание!