



Оптика дифракционного качества для коротковолнового диапазона: проблемы, состояние, перспективы

Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало

Институт физики микроструктур РАН

Научный семинар «Коррекция оптической близости в литографии»
НИИМЭ, Зеленоград, 30.01.2019

План доклада

- ❑ Особенности взаимодействия рентгеновского излучения с веществом и многослойные зеркала
- ❑ Требования и проблемы метрологии оптики дифракционного качества для рентгеновского диапазона
- ❑ Развитые в ИФМ РАН методы:
 - метрология поверхности подложек
 - ионно-пучковая суперполировка, асферизация и коррекция локальных ошибок формы поверхностей
 - напыление и характеристика коэффициентов отражения и внутреннего строения МЗ
- ❑ Применение изображающей оптики
- ❑ Заключение

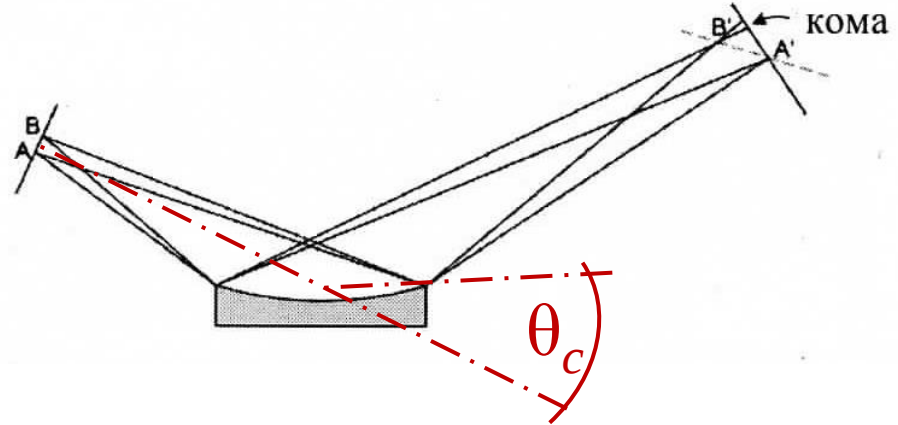
Особенности взаимодействия рентгеновского излучения с веществом $\lambda=0,01-60$ нм

$$n=1-\delta+i\beta$$

$$\delta = N_0 Z r_e \rho \lambda^2 / (A 2\pi)$$

$$\delta = 10^{-6} \dots 10^{-1}$$

$$\theta_c = \delta^{1/2} = 10^{-3} \dots 0,3 \text{ рад}$$
$$= 0,06 - 20^\circ$$



$$\delta x = k \times \lambda / \sin \theta_c \approx k \times \lambda / \theta_c$$
$$\theta_c \sim \lambda$$

Разрешение δx оптики
скользящего падения не зависит
от длины волны!

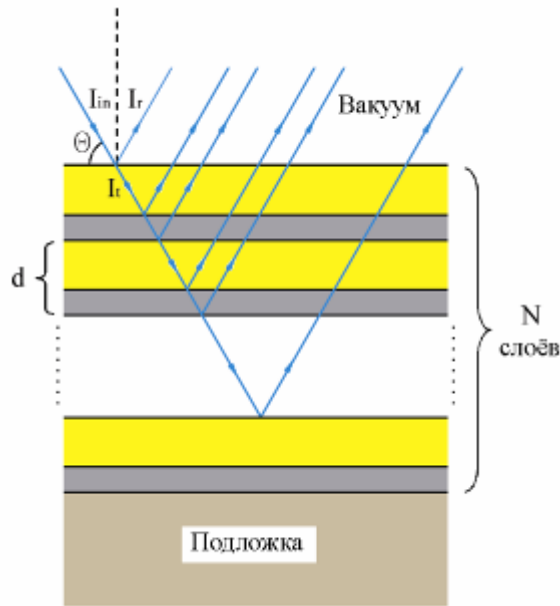
Многослойные зеркала для $\lambda=0,01-60$ нм

$$\delta x \approx \lambda/2$$

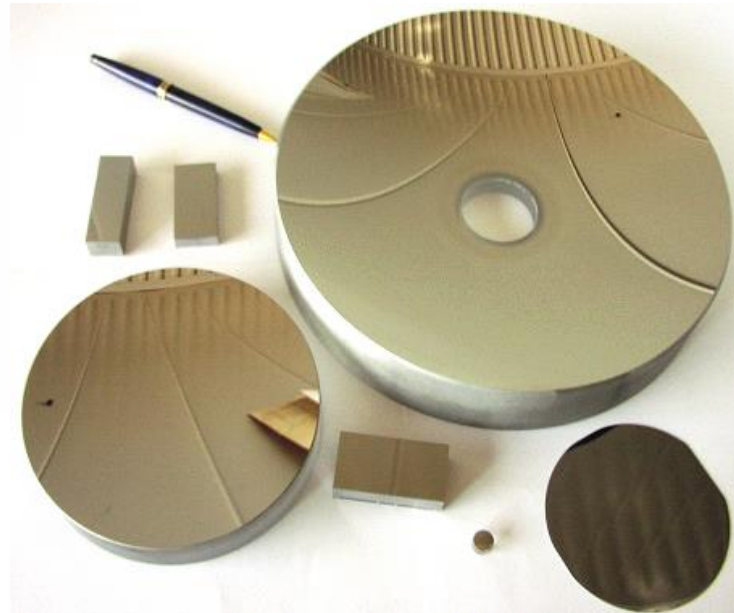
$$2d \sin \vartheta = \lambda \rightarrow d \cong \lambda / 2 = 1 \div 30 \text{ нм}$$

$$N = 50 - 2000$$

$$\delta d / d \ll 1 / N \rightarrow \delta d / d \sim 0.1\%$$



Многослойное
зеркало



Типичные зеркала,
производимые в
ИФМ РАН. Более **20**
различных пар
материалов
наносятся на
плоские и
криволинейные
подложки с $\varnothing \leq 300$
мм

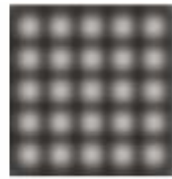
Требования к технологическому процессу **ФАНТАСТИЧЕСКИЕ**

Требования к оптике дифракционного качества для МР и ЭУФ диапазонов



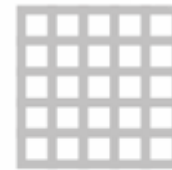
figure

→ aberrations



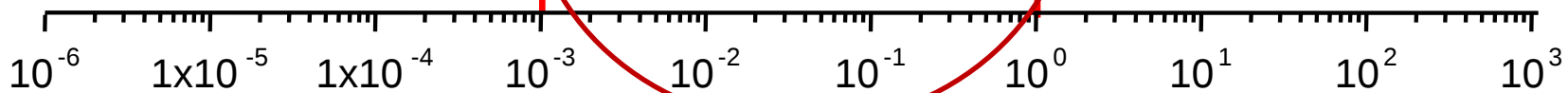
MSFR

→ scattering



HSFR

→ reduced reflectivity



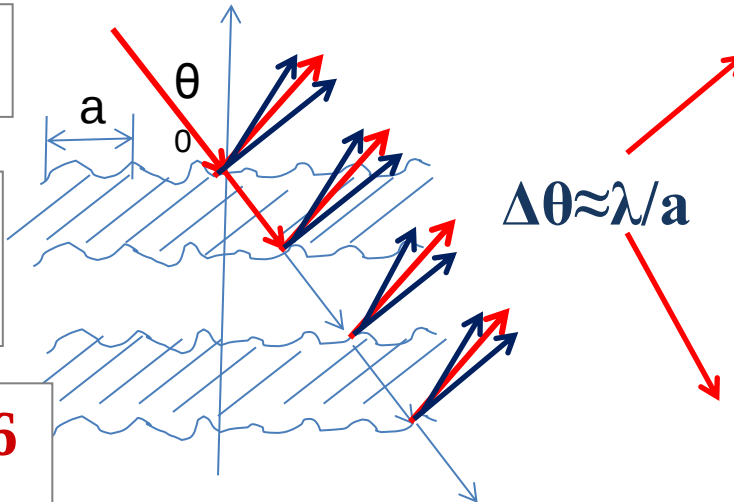
Пространственная частота, μm^{-1}

$$RMS_{obj} \leq \lambda / 14$$

$$RMS_1 \leq \lambda / (14\sqrt{N})$$

Для $\lambda=3$ нм $N=2$
 $RMS_1 \approx 0.14$ нм

Для $\lambda=193$ нм $N=36$
 $RMS_1 \approx 2$ нм



$$\Delta\theta \approx \lambda/a$$

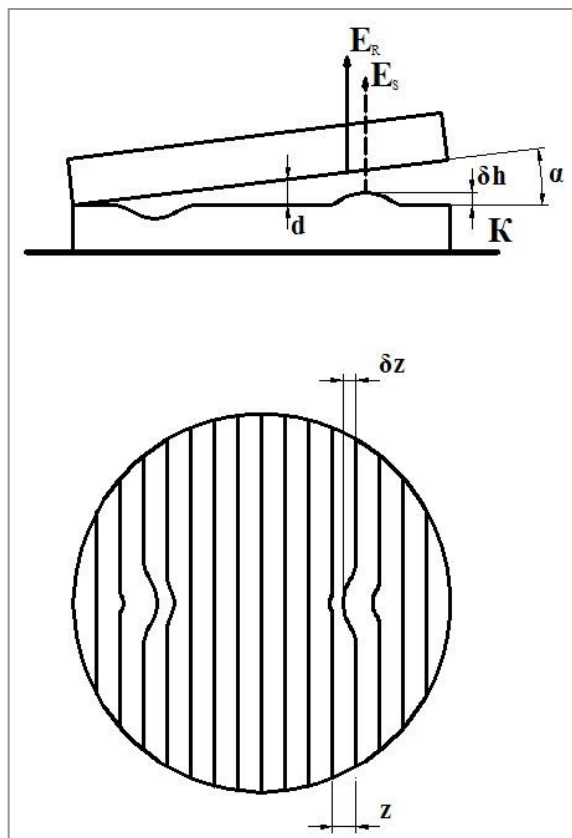
$$\Delta\theta < \theta_{Br},$$

$$\delta x \approx \Delta\theta \times F$$

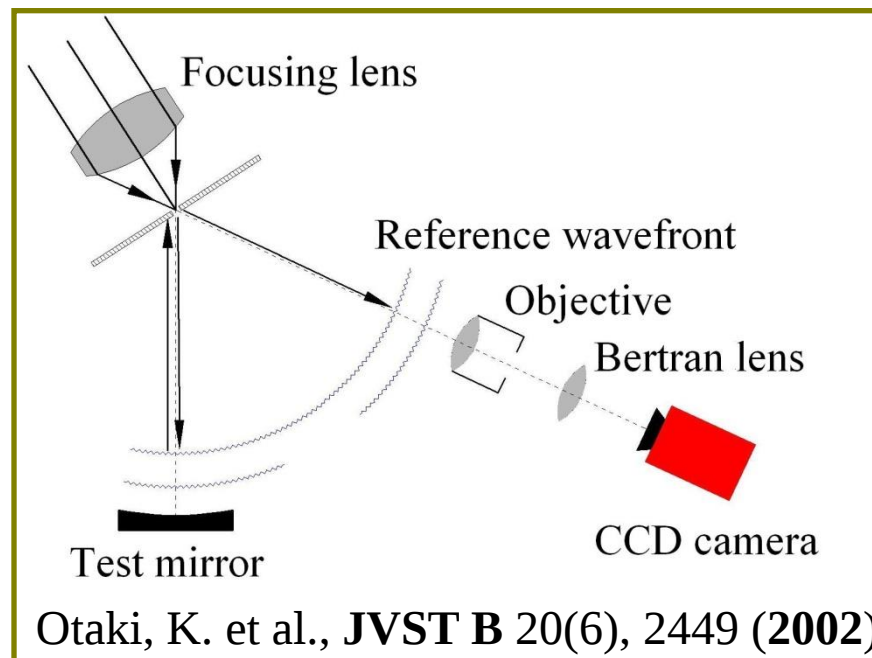
$$\delta x \approx \lambda \times \textcircled{F/a}$$

Проблемы интерферометрии

Linnik, V.P., Bulletin of the Academy of Sciences of USSR 1, 208 (1933).



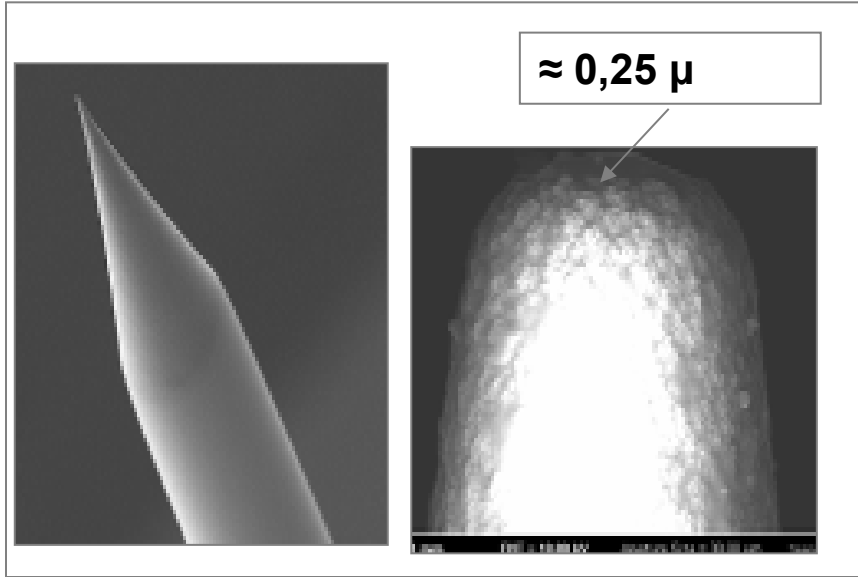
**Абсолютная точность
измерений $\lambda/30 - \lambda/20$
(20-30 нм) !
На практике до $\lambda/3$**



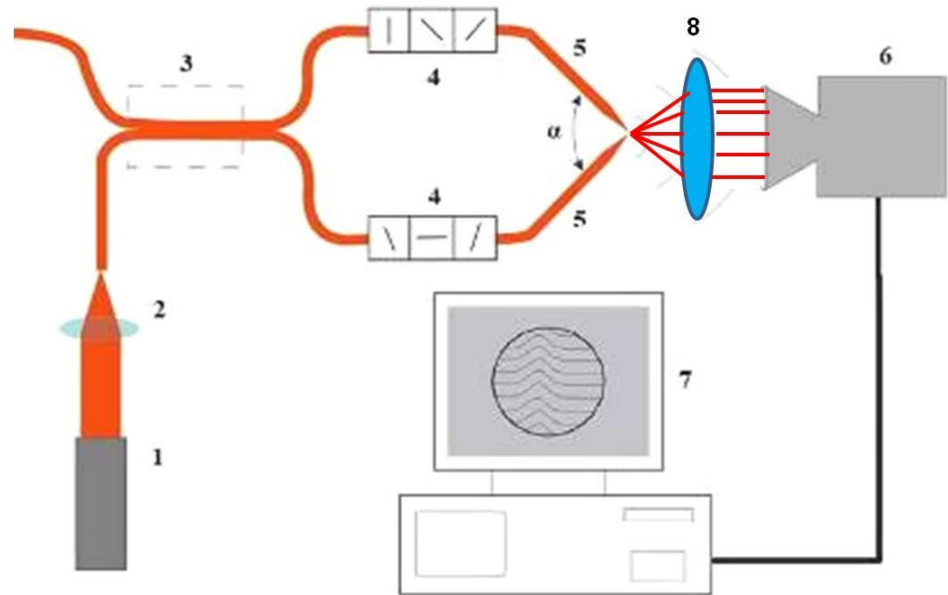
Otaki, K. et al., *JVST B* 20(6), 2449 (2002).

- Неоднородный по интенсивности фронт
- Чувствительность к aberrациям первичной оптики
- Чувствительность к разъюстировке осей лазерного пучка и отверстия

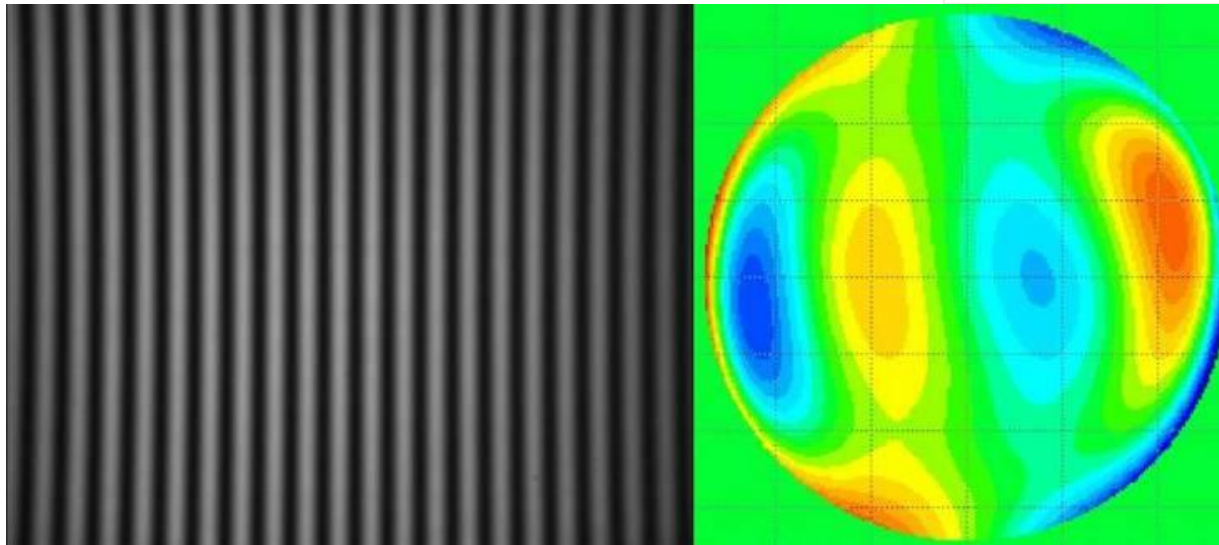
ИЭСВ на основе ООВ



N.I. Chkhalo, et al.. **RSI** V. 79. 033107 (2008).

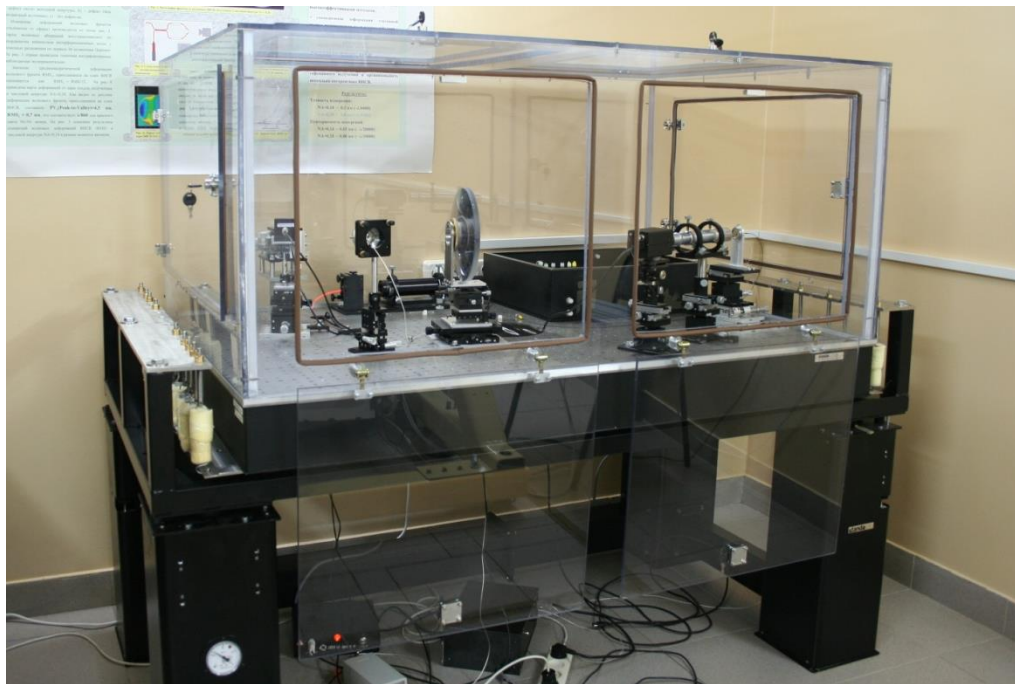


Опыт Юнга для измерения aberrаций сферического фронта источника на основе одномодового волокна ($\lambda=530$ и 633 нм).

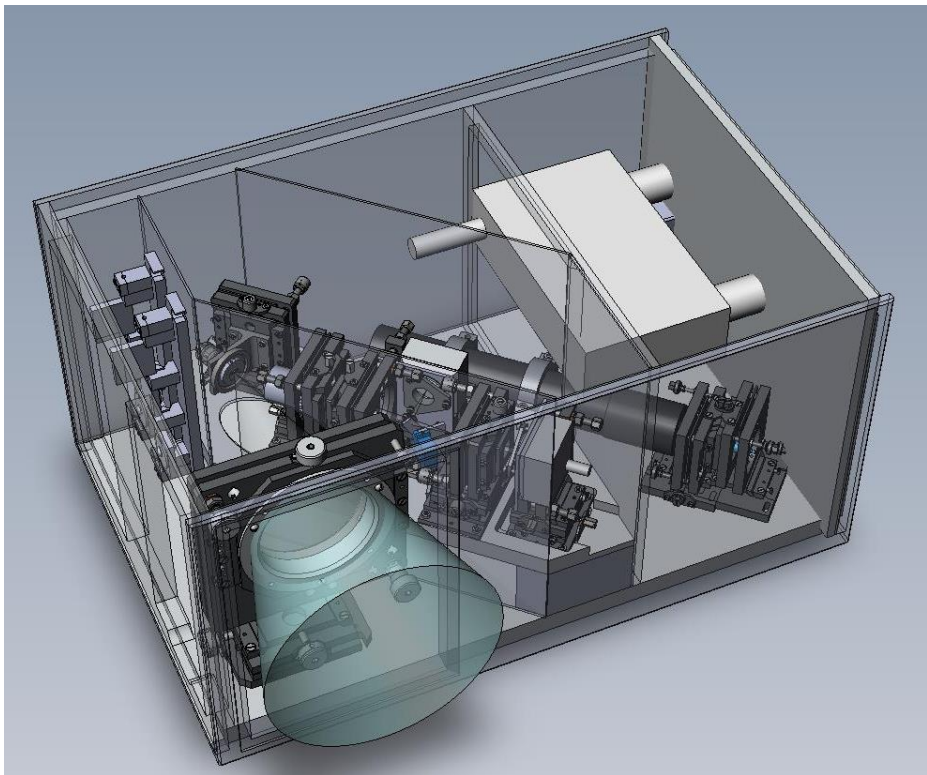


**Рекордно
низкие
абберации
волнового
фронта!**

Интерферометрическая лаборатория

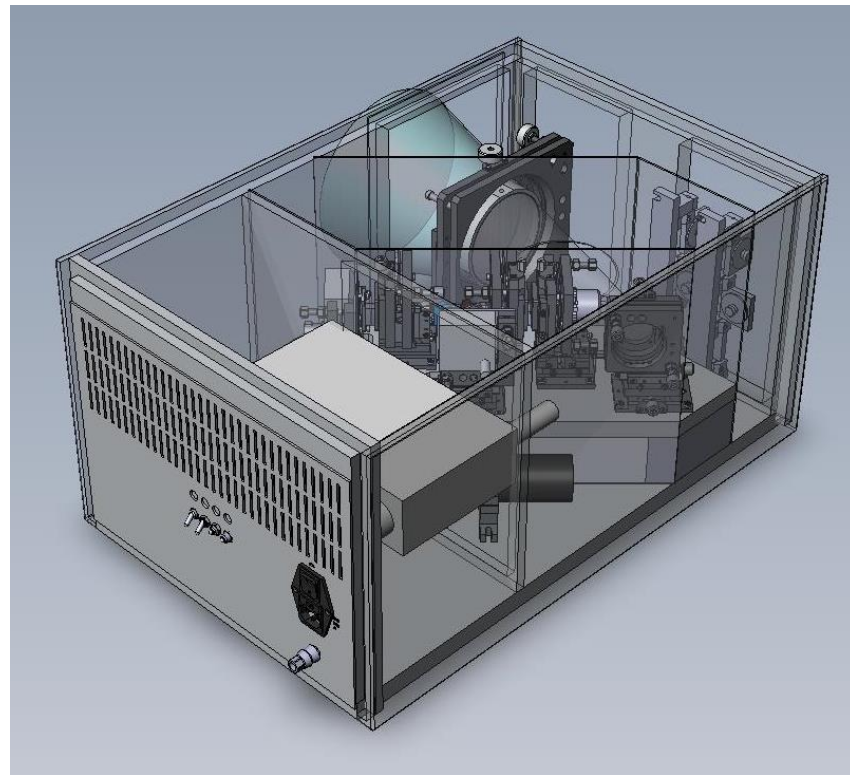


БЭИДВС для промышленных применений



3D модель экспериментального
образца БЭИДВС

Размеры 600×400 ×300 мм

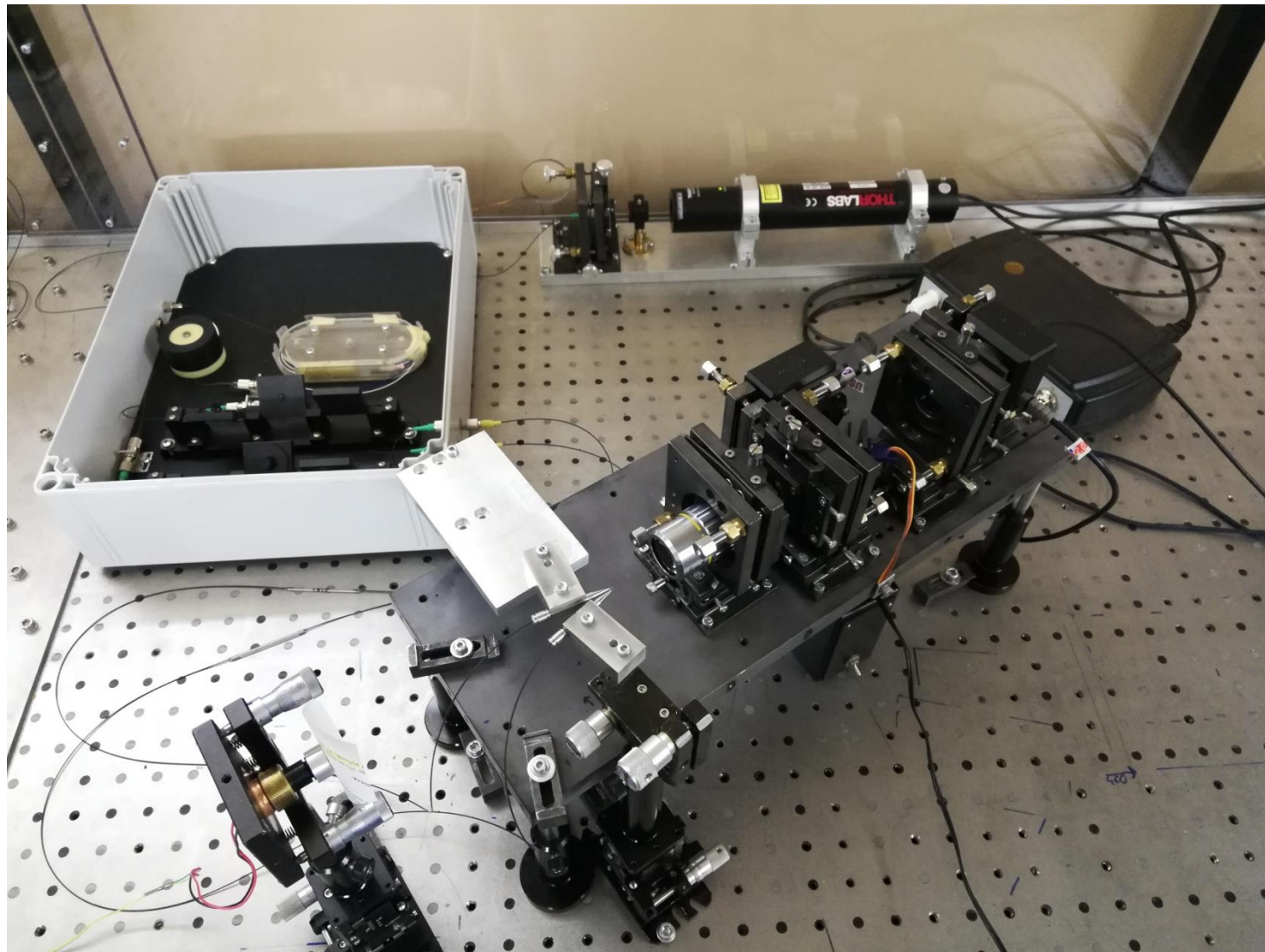


«Разработка безэталонного интерферометра
для прецизионных измерений аберраций
оптических элементов и систем»

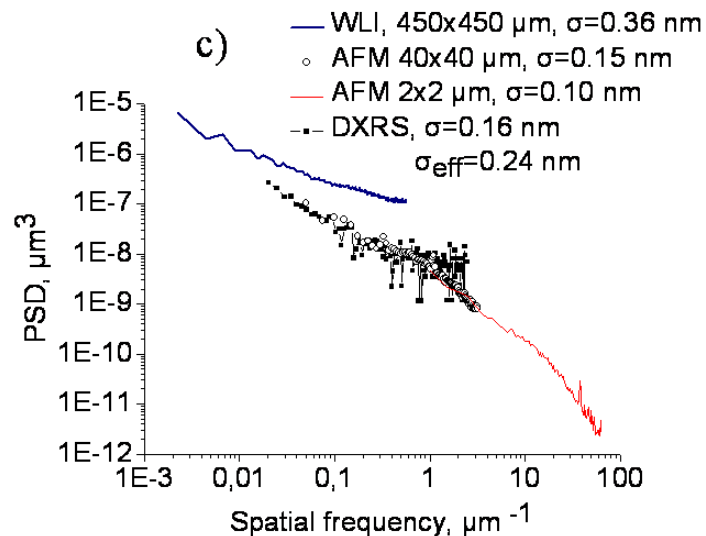
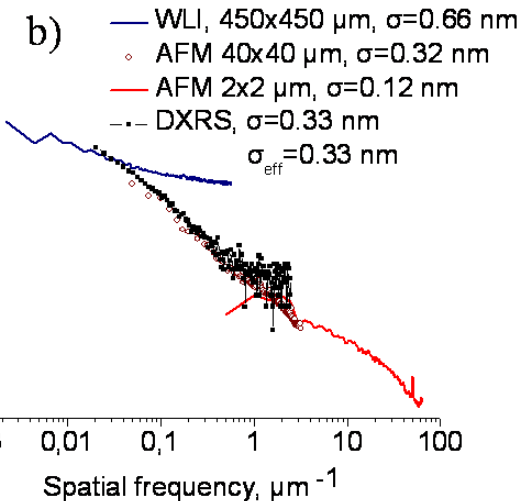
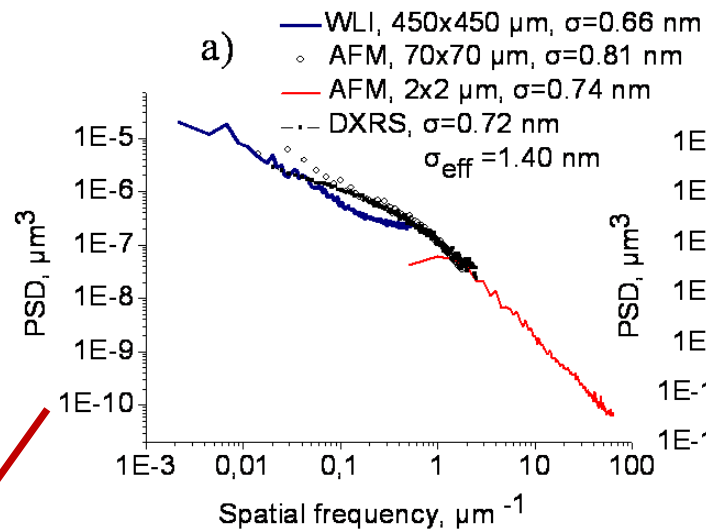
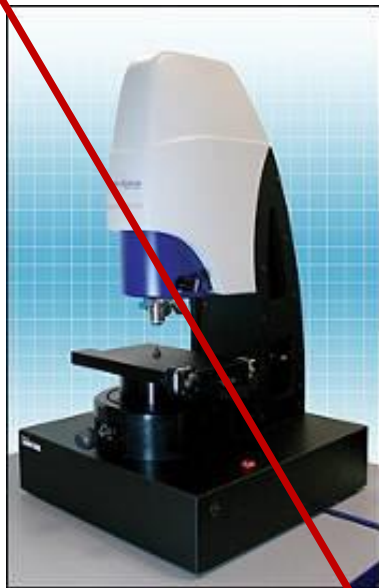
Уникальный идентификатор проекта
RFMEFI60418X0202

при поддержке Минобрнауки России
Соглашение № 075-02-2018-182 от 26.11.2018

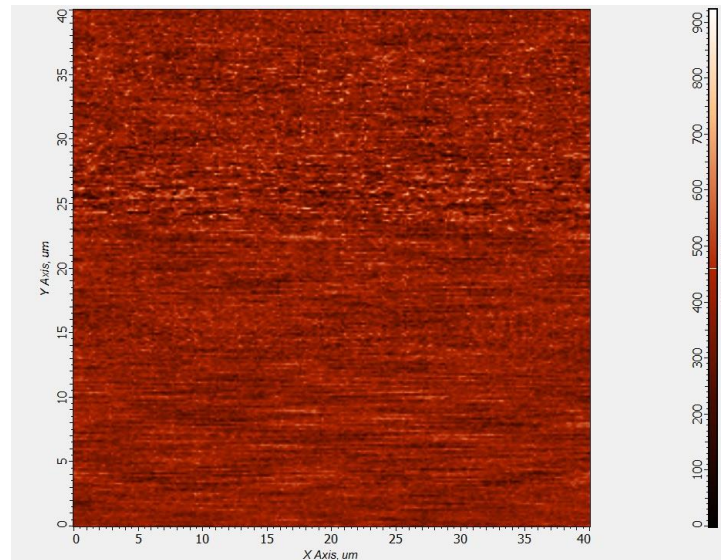
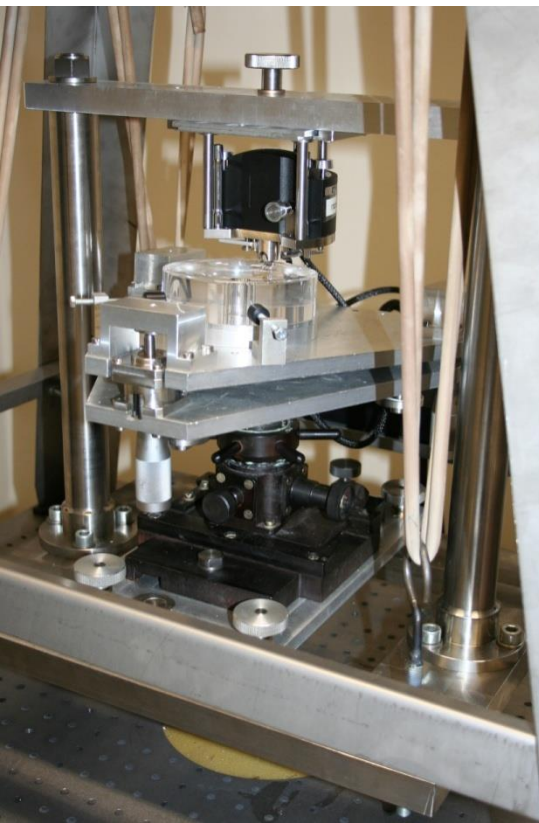
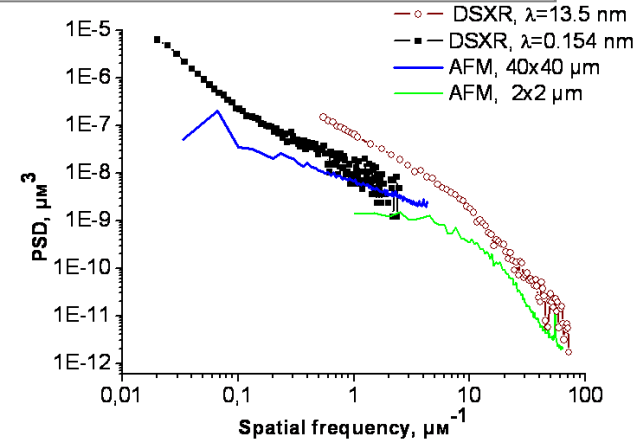
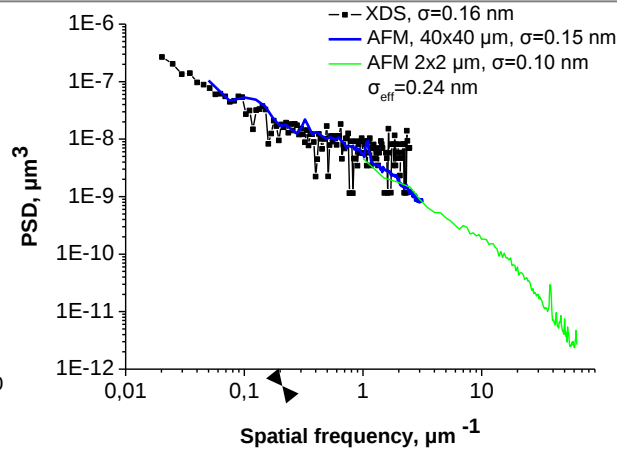
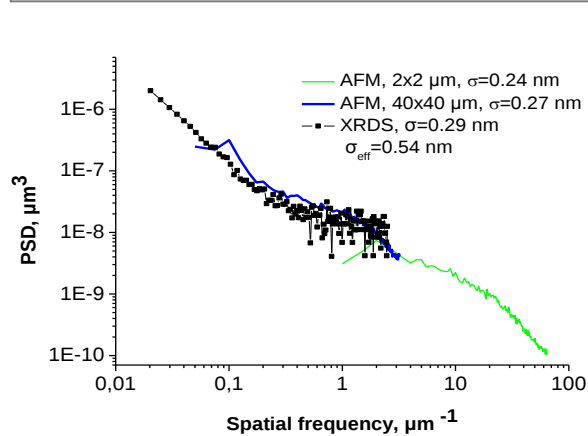
Отладка систем БЭИДВС для индустриальных применений



О применимости ИБС для изучения сверхгладких поверхностей



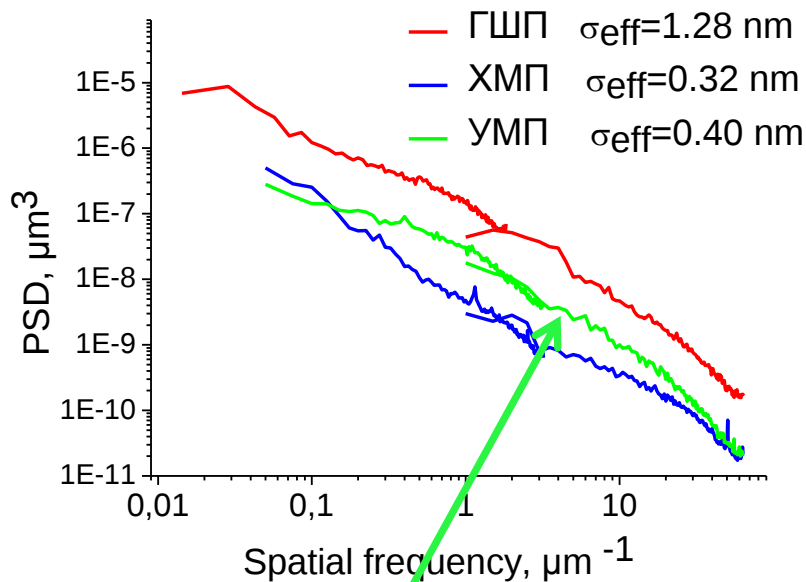
Атомно-силовая микроскопия для изучения средне- и высоко- частотных шероховатостей (1 nm - 25 μm)



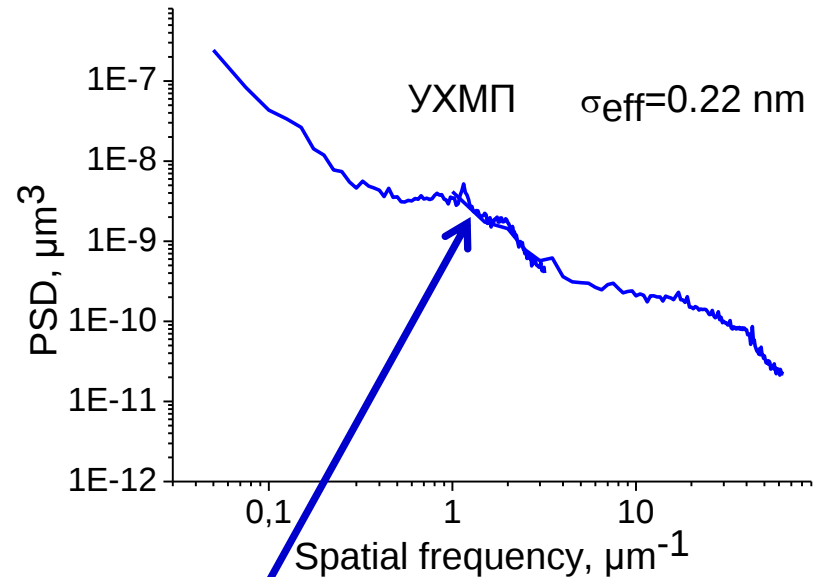
Noise R.M.S. $< 0.1 \text{ nm}$ in spectral range $0.025\text{--}65 \mu\text{m}^{-1}$



Усовершенствованный процесс ХМП (2014г.)



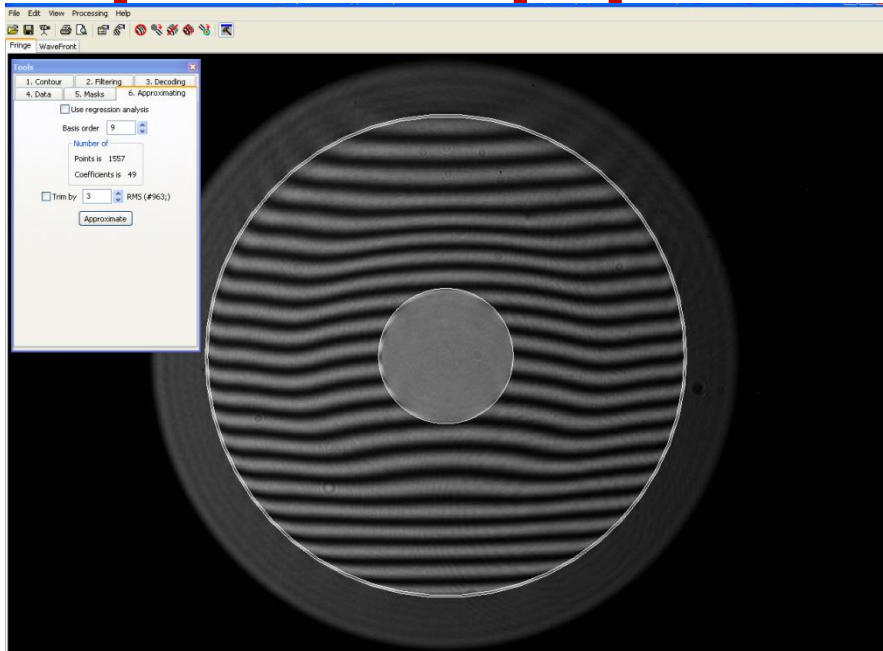
МП
 $\sigma_{\text{eff}} \approx 0.4 \text{ nm}$



+ **УХМП**
 $\sigma_{\text{eff}} \approx 0.22 \text{ nm}$

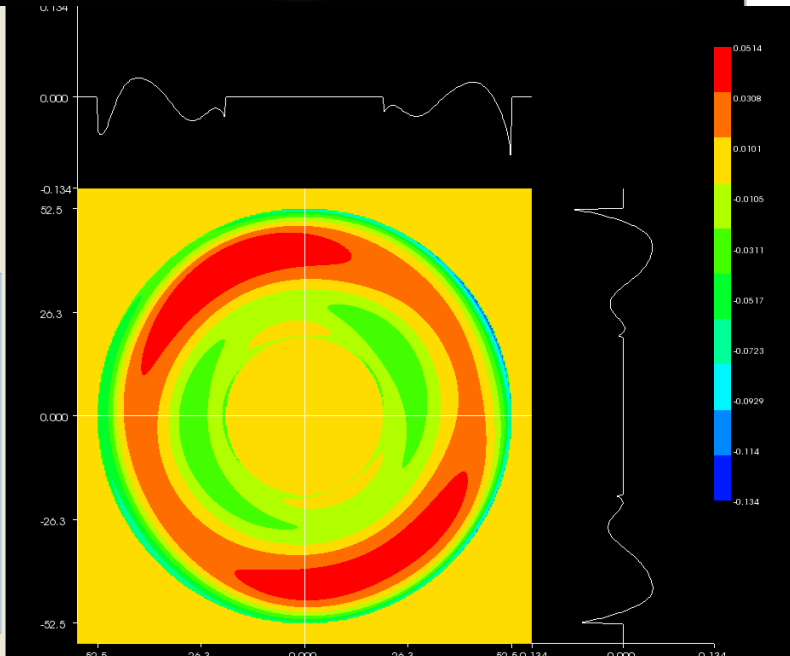
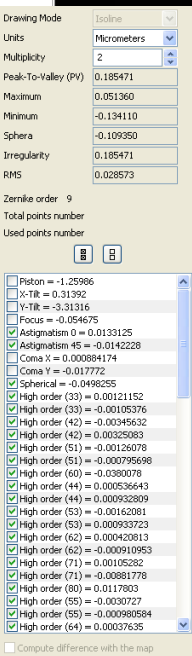
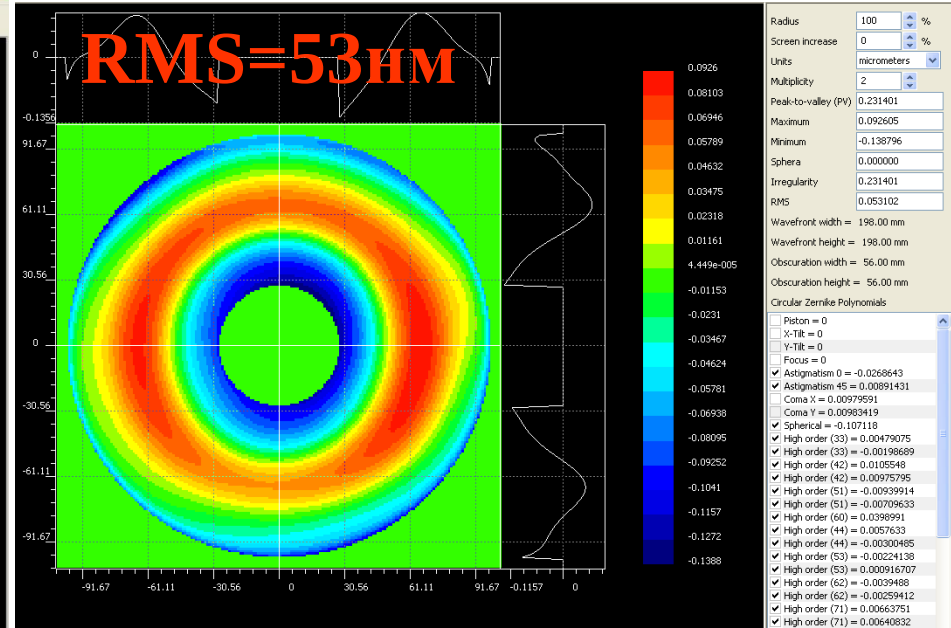
**ИФМ РАН и ФИ АН создали технологию полирования
кварца, ситалла и ULE мирового уровня!**

Проблема формы!



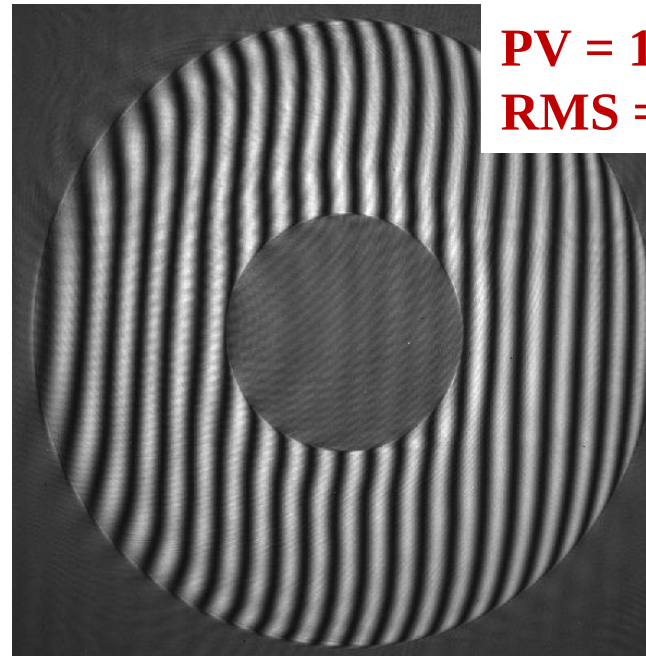
PV=231нм

RMS=53нм

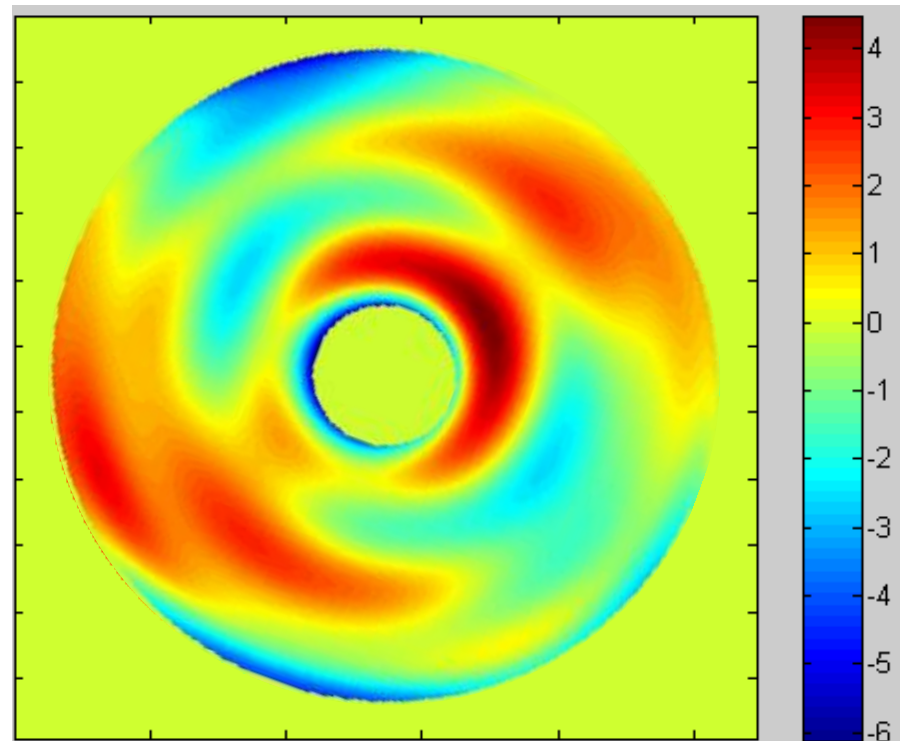


PV = 185 нм

RMS = 28.6 нм



Для сравнения!



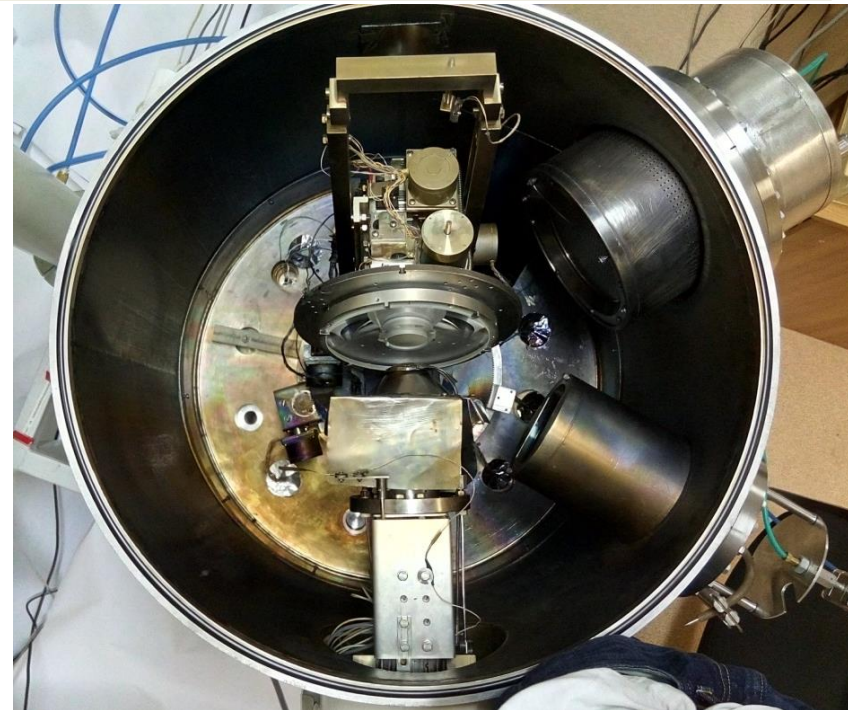
RMS = 1.6 nm

PV = 10.2 nm

Laboratoire Charles Fabry, Institut d'Optique Graduate
School, CNRS, Université Paris-Saclay

Ионно-пучковая обработка подложек

1. Ионная суперполировка подложек
2. Асферизация оптических поверхностей
3. Коррекция локальных ошибок формы поверхности подложек

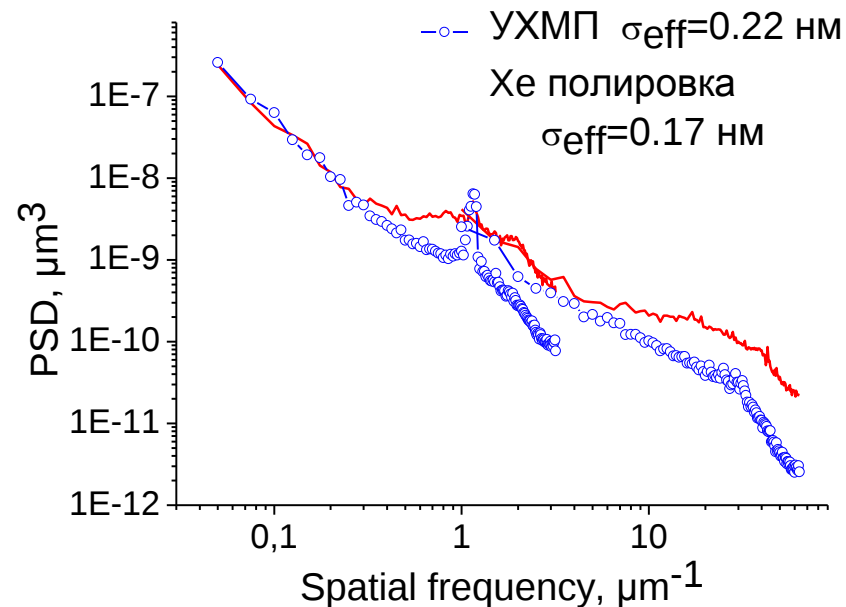
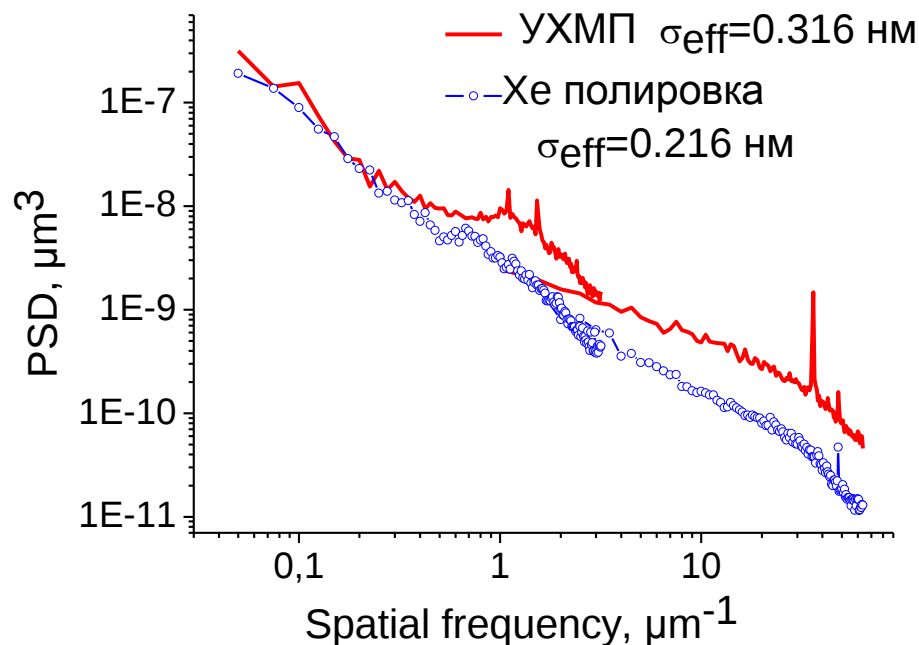


N.I. Chkhalo, et al. **NIM A**. 603(1-2), 62 (2009).

N.I. Chkhalo, et al. **Appl. Optics**. 55(6), 1249 (2016)

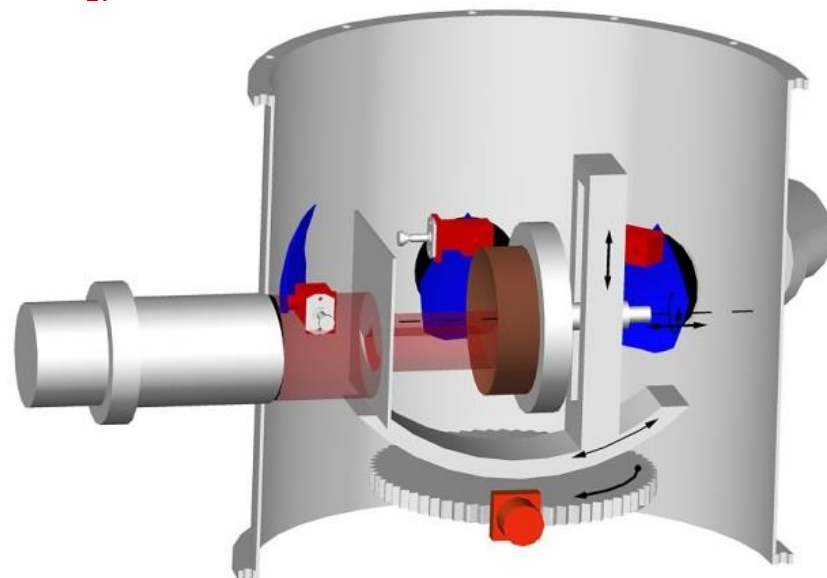
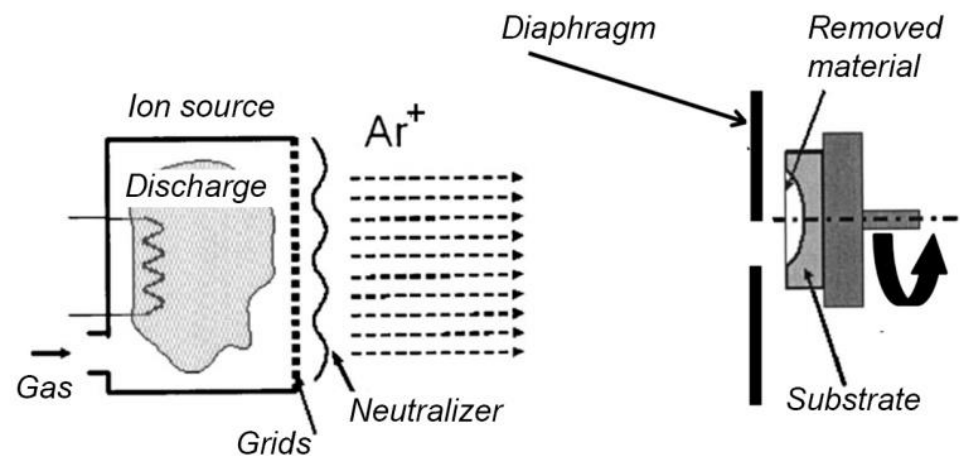
N.I. Chkhalo, et al. **Precision Engineering**, 48, 338 (2017)

Ионная суперполировка подложек

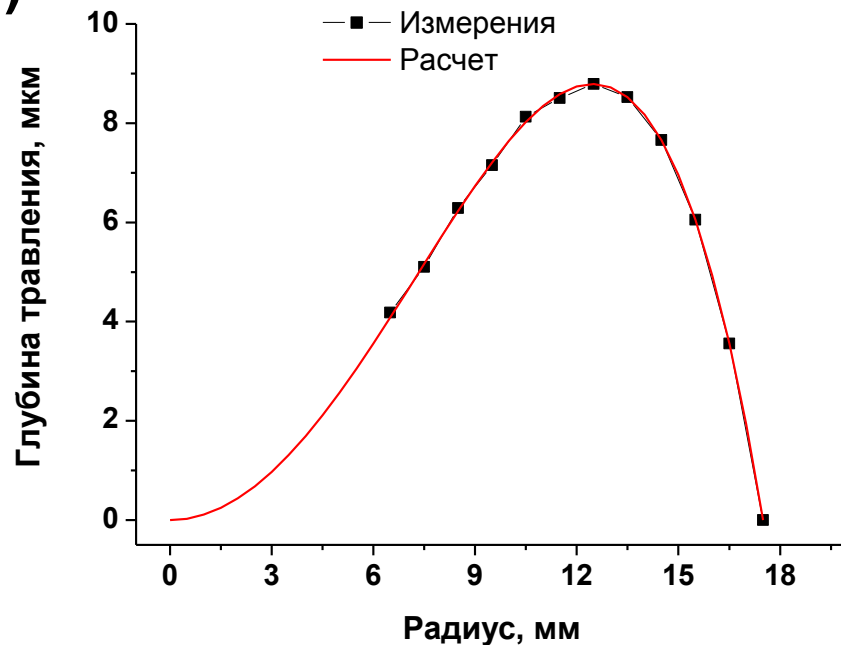


1. Суперполировка **кварца** и **ULE** нейтрализованными ионами **ксенона** с энергией **600 эВ** позволила получить рекордные значения эффективной шероховатости, которая, с учетом шумов АСМ, составила **$\sigma_{\text{eff}} \approx 0.14 \text{ nm}$** !
2. Можно приступить к разработке оптики дифракционного качества с коротковолновой границей менее **10 nm**!

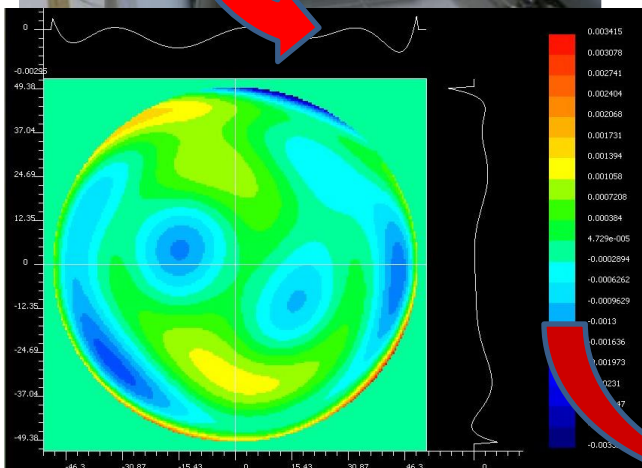
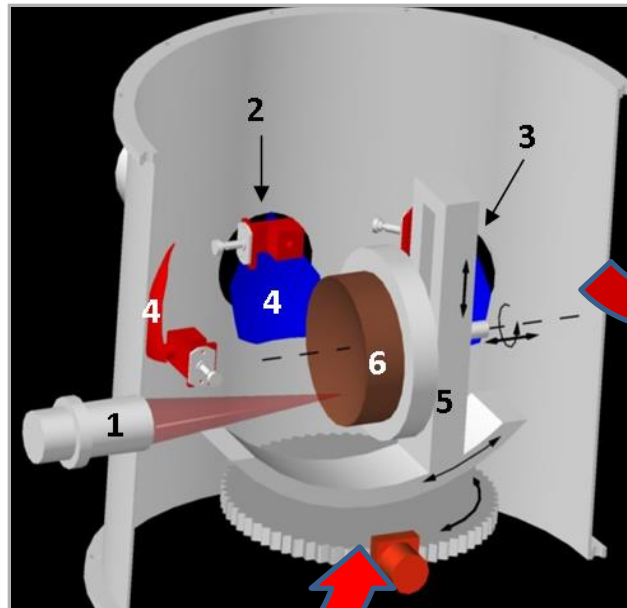
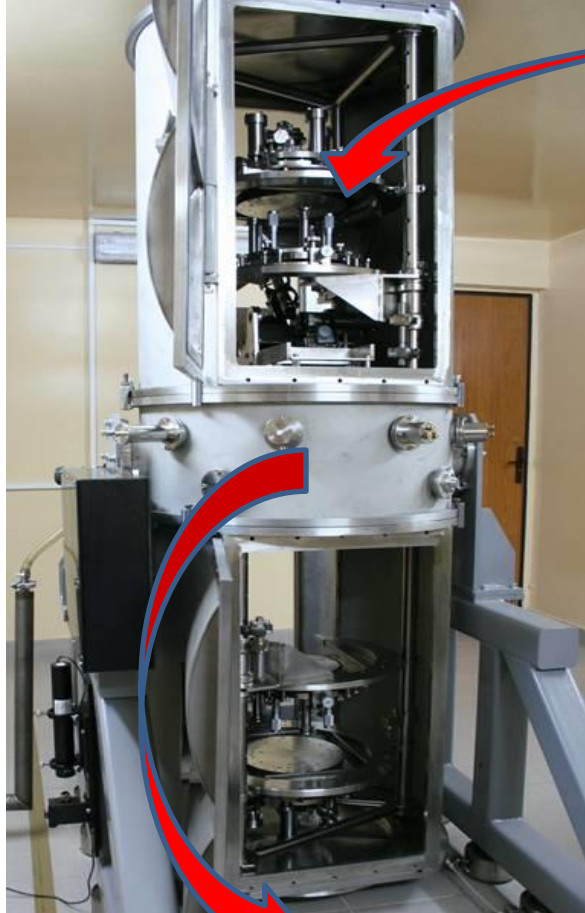
Асферизация ионным пучком



б)



**Точность профиля
асферизации ±1,5%**



**P-V = 6.7 nm,
RMS = 0.6 nm**

Напыление многослойных зеркал

8 технологических установок :

6-ти магнетронные – 2 шт.

4-х магнетронная +пучки – 1 шт.

4-х магнетронные – 3 шт.

2-х магнетронные – 2 шт.

>20 материалов



2014 г.

2017 г.

N.I. Chkhalo, et al. **Thin Solid Films** 631, 106 (2017).

N. Chkhalo, et al. **Opt. Lett.** 42(24), 5070 (2017).

M. Svechnikov, et al. **J. Appl. Cryst.** 50, 1428 (2017).

M. V. Svechnikov, et al. **Optics Express**, 26 (26), 33718 (2018).

V. N. Polkovnikov, et al. **Opt. Lett.** 44 (2) , 263 (2019).

N. Chkhalo, et al. **J. Nanosci. Nanotech.**, 19, 546 (2019).

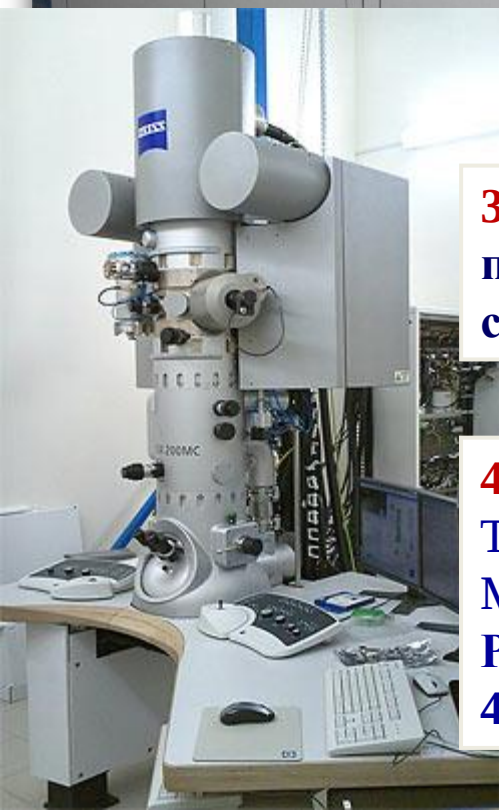
Экспериментальные методы: изучение МЗ

1. Лабораторная рефлектометрия в МРИ и ЭУФ диапазонах в диапазоне 0.6-70 нм

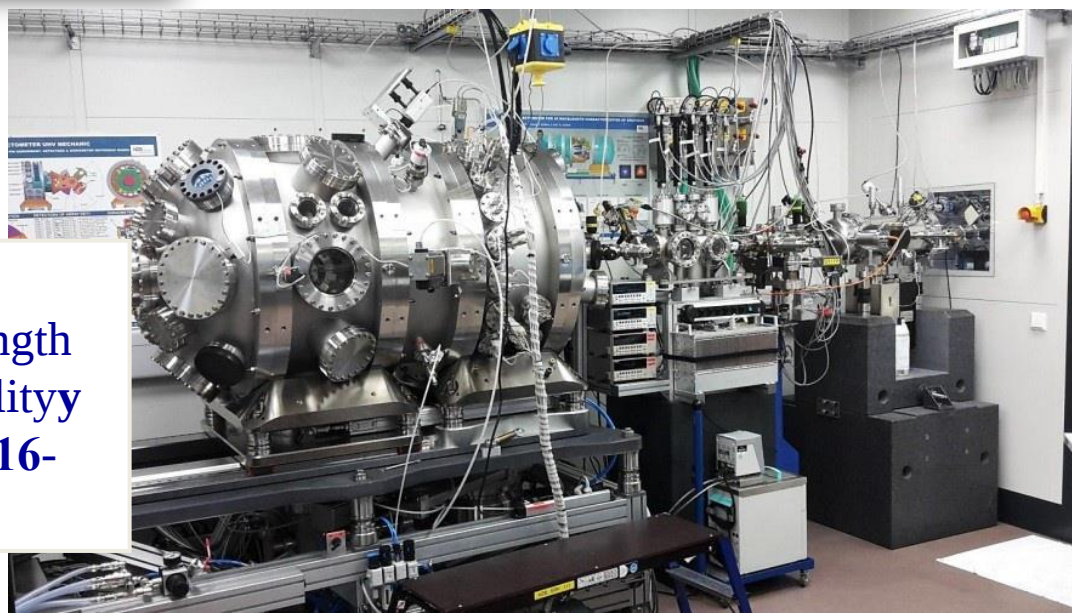


2. Четырехкристальная дифрактометрия на 0.154 нм

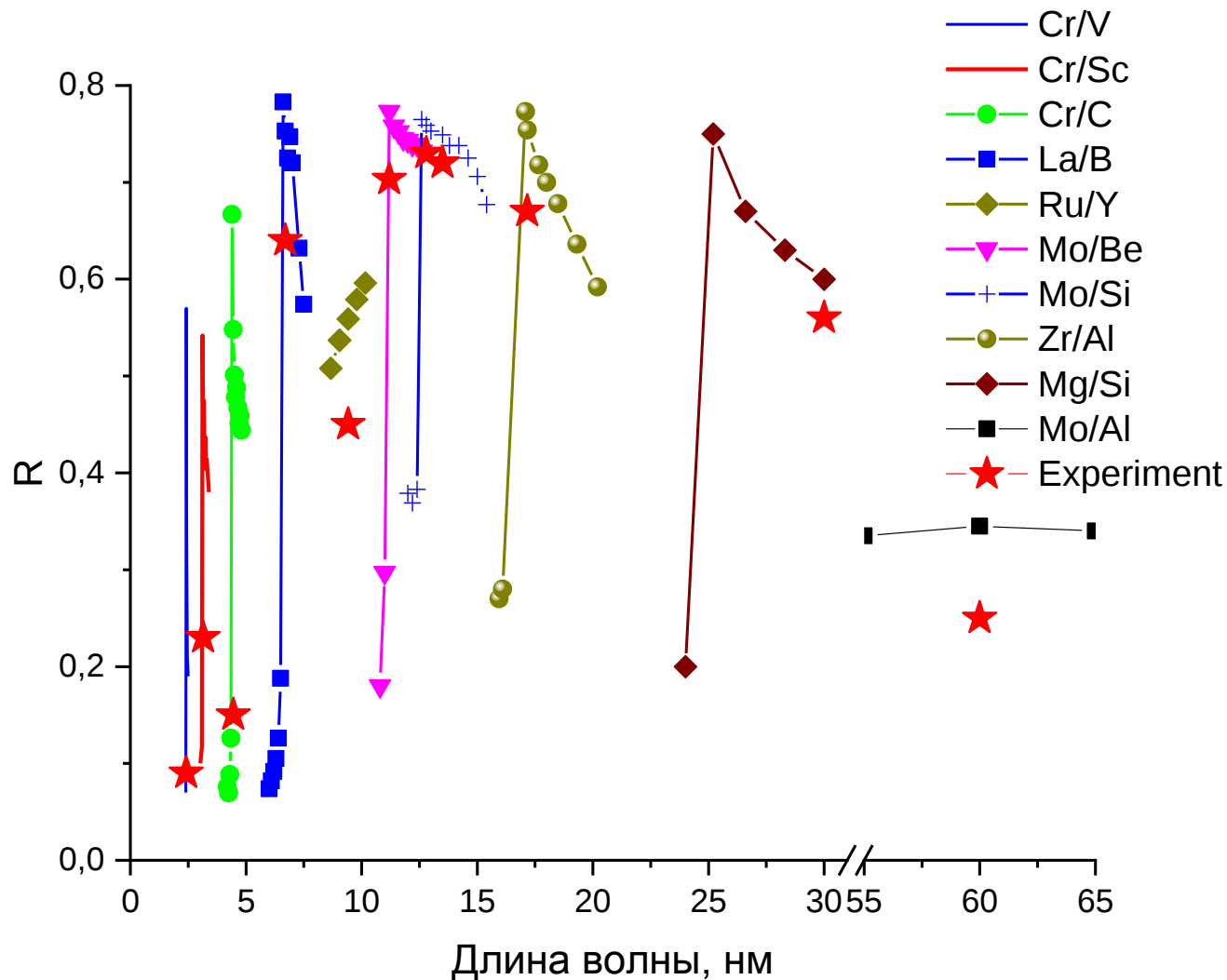
3. ЭРМ поперечных срезов



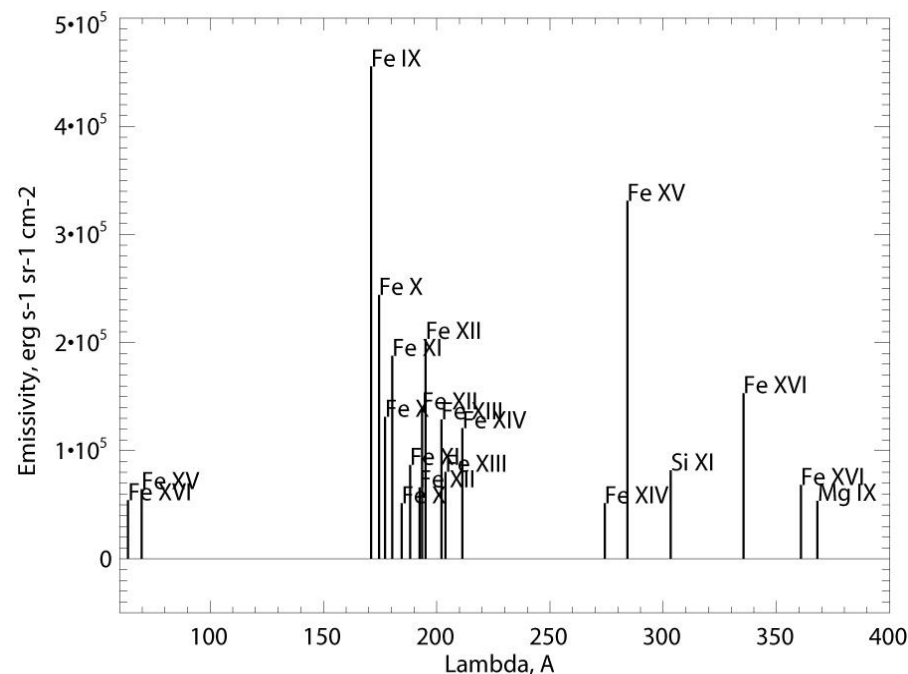
**4. BESSY-2
The At-Wavelength
Metrology Facility
РНФ-DFG №16-
42-01034**



Расчетные и экспериментальные коэффициенты отражения многослойных зеркал нормального падения

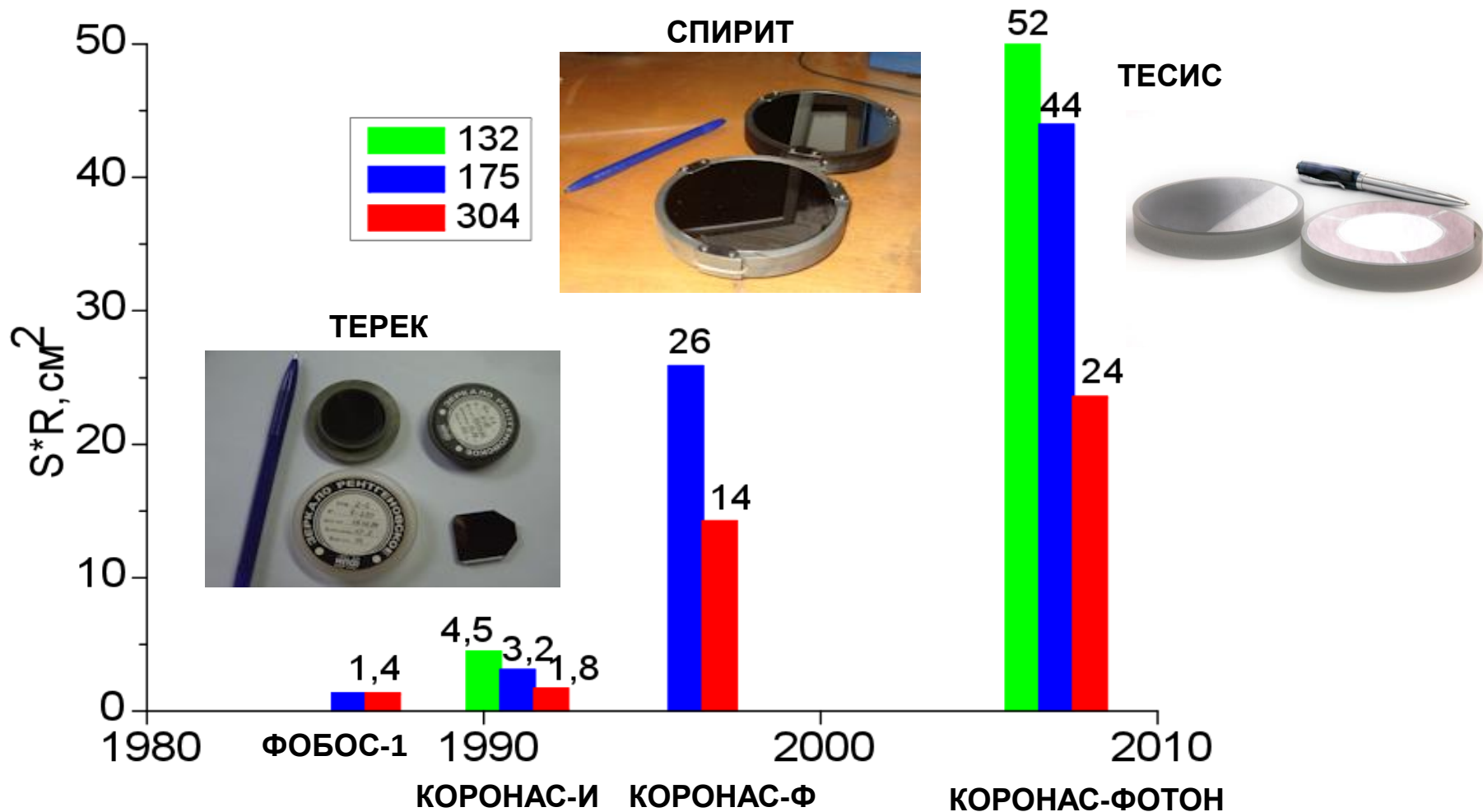


Активная фаза

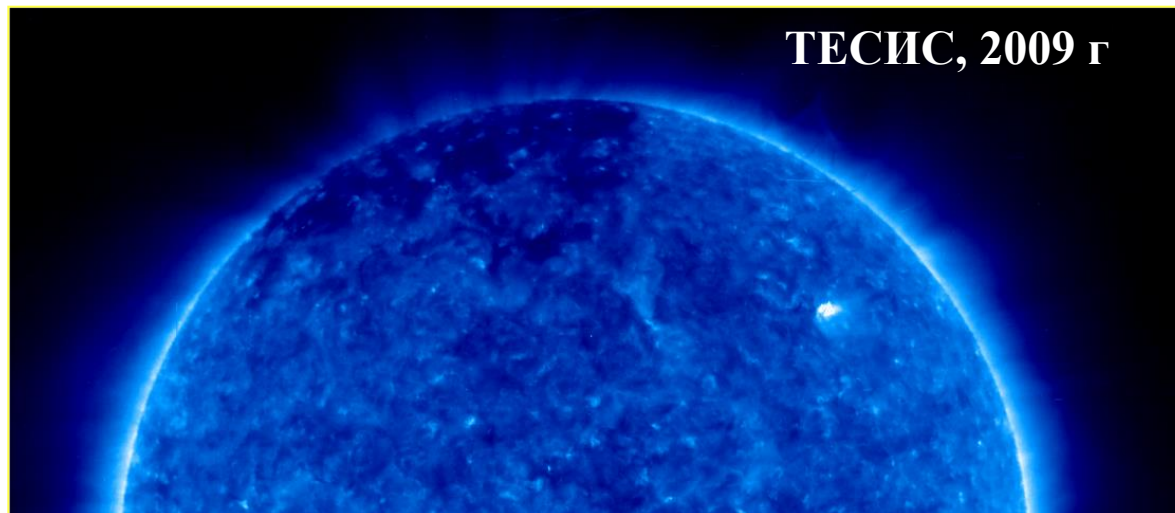
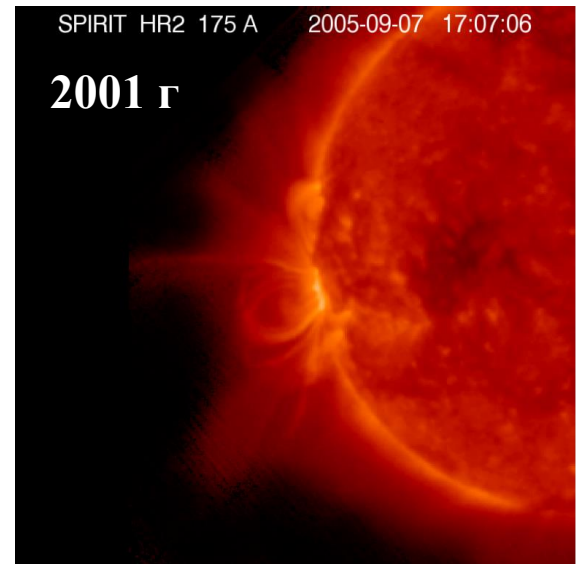
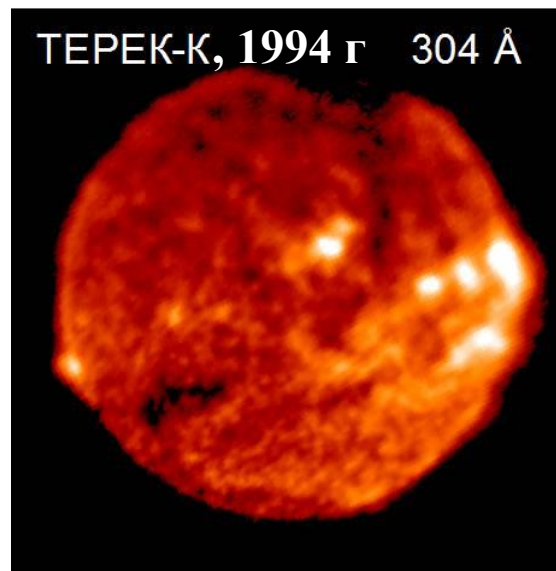
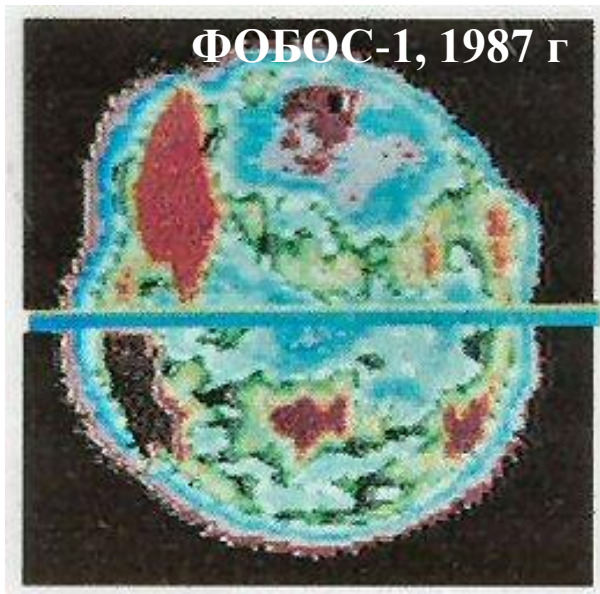


Изображения в спектральных линиях с высоким пространственным разрешением в ЭУФ и МР диапазонах являются основным источником информации о процессах на Солнце

Многослойная отражающая оптика для ЭУФ-телескопов (ИФМ РАН)



Изображения Солнца



Разрешение 1,7''

Развиваемые проекты по исследованию Солнца

Проект АРКА

Цель: Изучение механизмов нагрева короны Солнца, пополнения и выброса корональных масс

Характеристики:

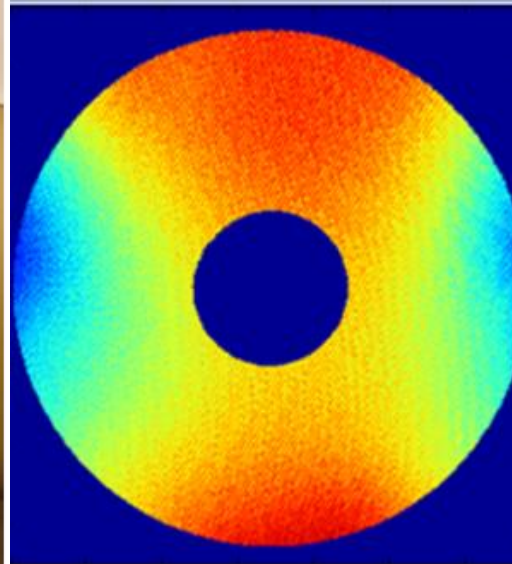
диаметр первичного зеркала **250 мм**
угловое разрешение **0.1-0.2"**
пространственное **70-140 км**

Проект Кортес

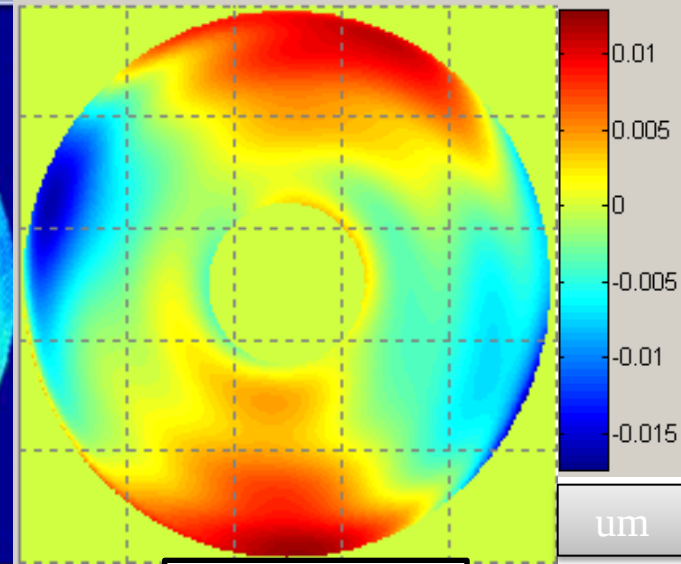
Специфика:
Работа на МКС

Проект Интергелиозонд

Специфика:
расстояние от Солнца **0.2 а.е.**
температура **~400° Ц**



RMS=6 nm
PV=34 nm



RMS=6.5 nm
PV=41 nm

Телескопы для гиперспектральной аппаратуры в УФ и ВАК УФ диапазоне

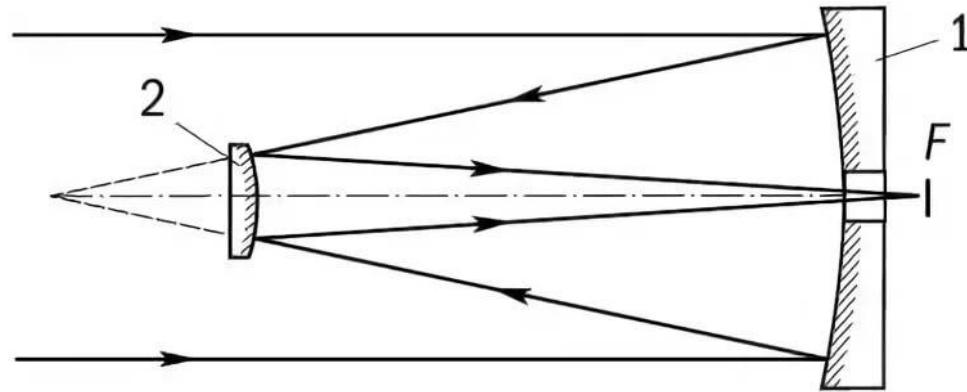
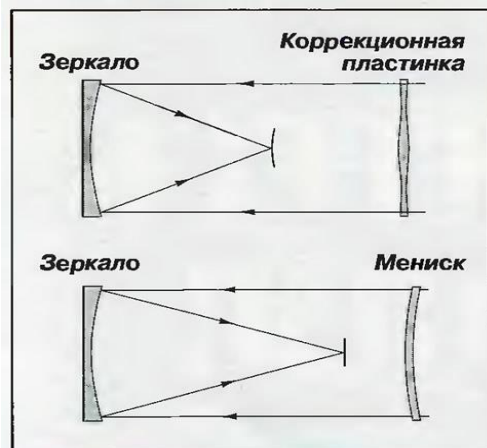
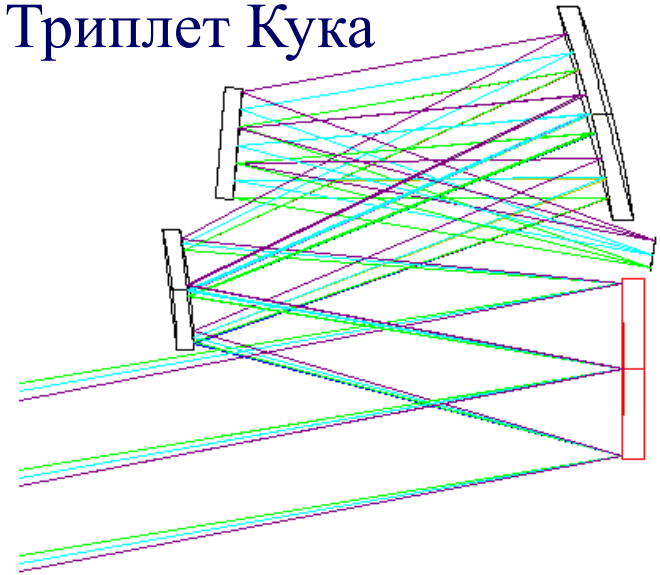
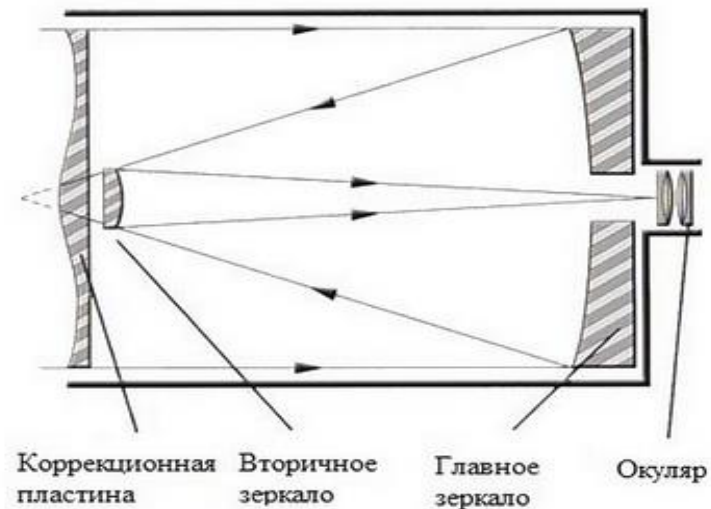


Схема Кассегрена

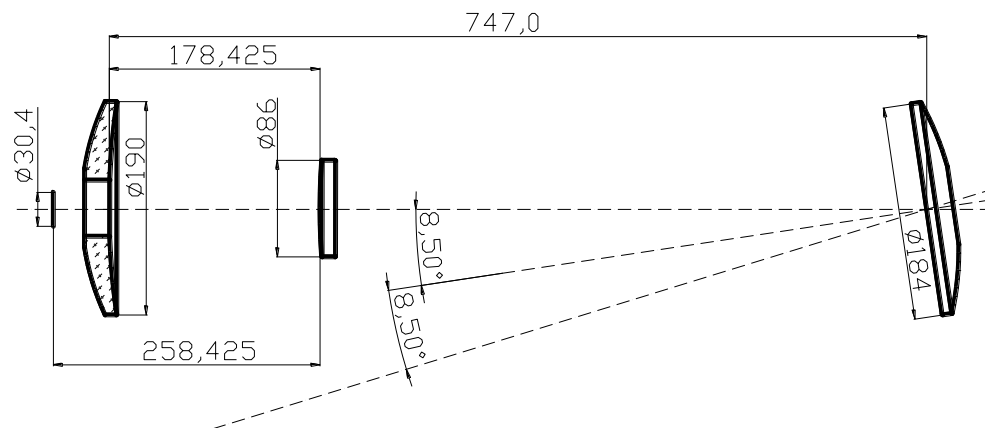
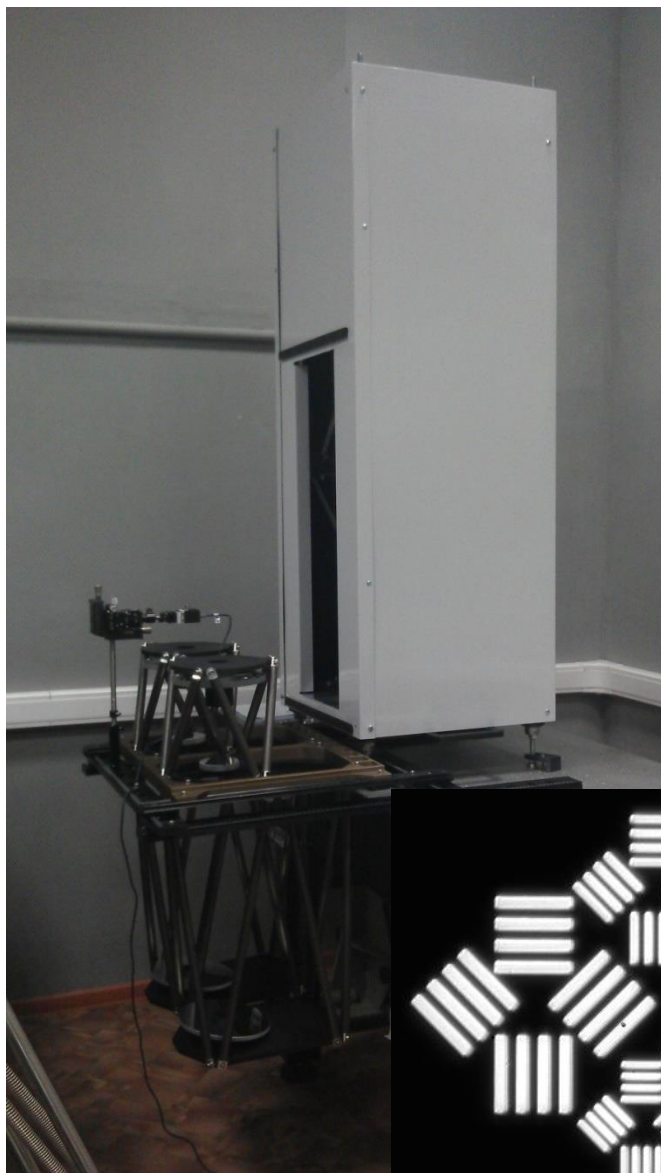
Триплет Кука



Оптические схемы телескопов систем Шмидта (вверху) и Максудова.

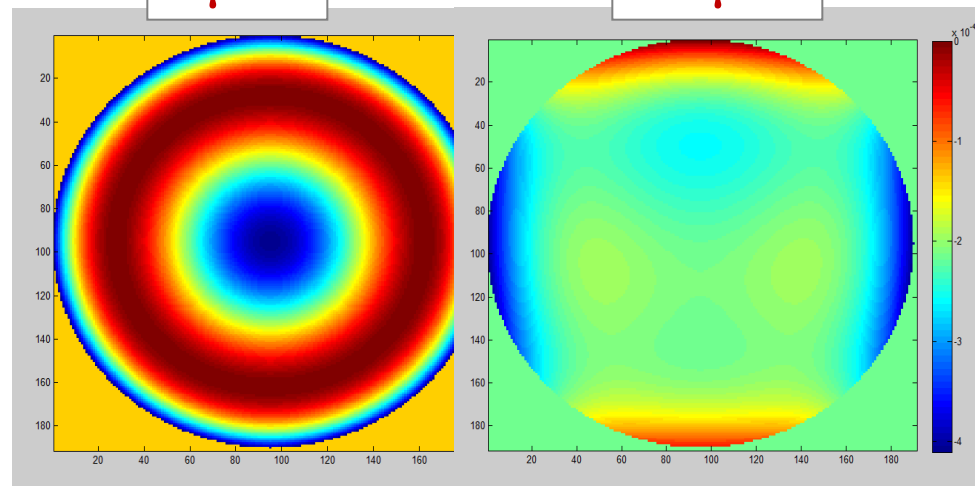


Зеркальная схема Шмидта-Кассегрена телескопа для УФ и ВАК УФ диапазона



4 μm

0.4 μm



M. N. Brychikhin, et al. **Appl. Optics**, 55(16) 4430 (2016).
N.I. Chkhalo, et al. **JATIS** 4(1), 014003 (2018).

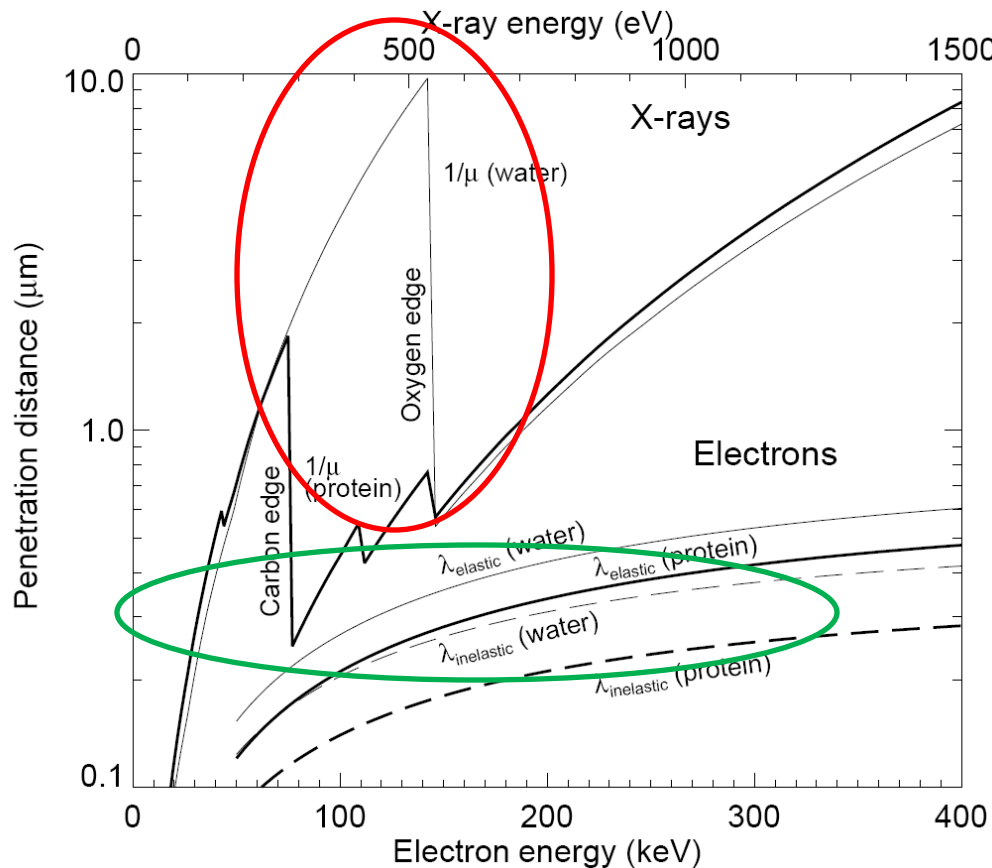
Микроскопия

1.1 Высокое разрешение

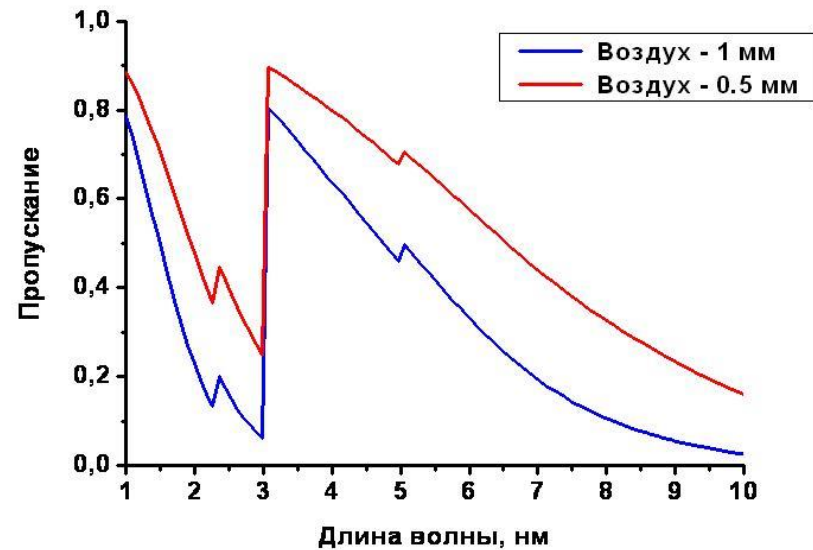
$$\delta x = 0.61 \cdot \lambda / (NA) \approx \lambda / 2$$

$$NA = n \cdot \sin \alpha$$

$$\lambda = 3 \text{ nm} \quad NA = 0.3 \quad \delta x \approx 6 \text{ nm}$$

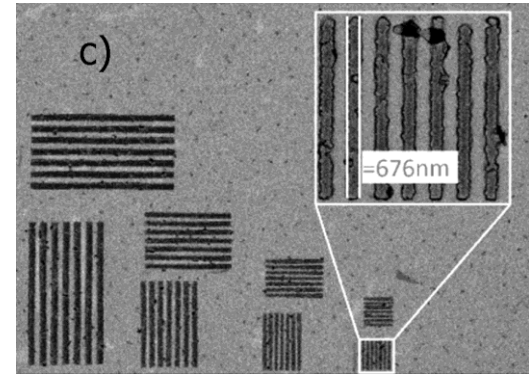
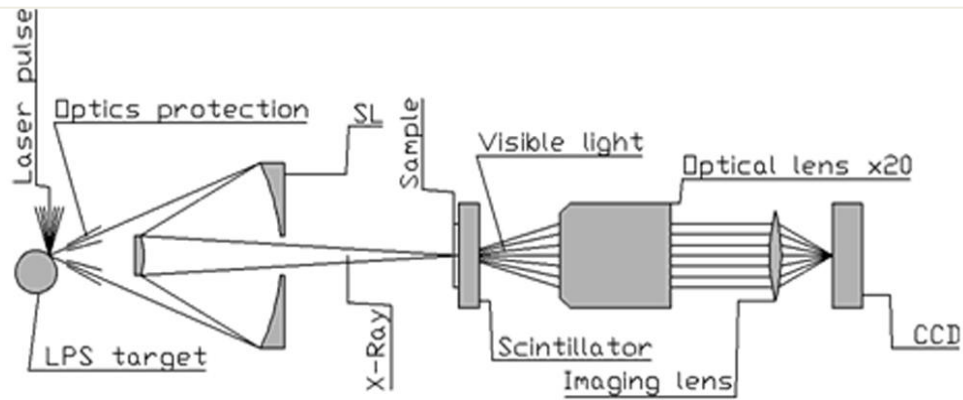


1.2 Высокие проникающая способность и абсорбционный контраст

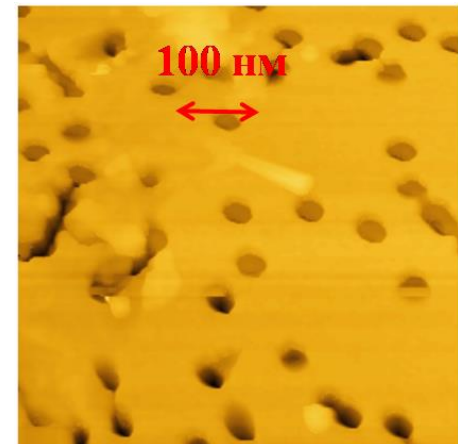


**Можно изучать
живые образцы!**

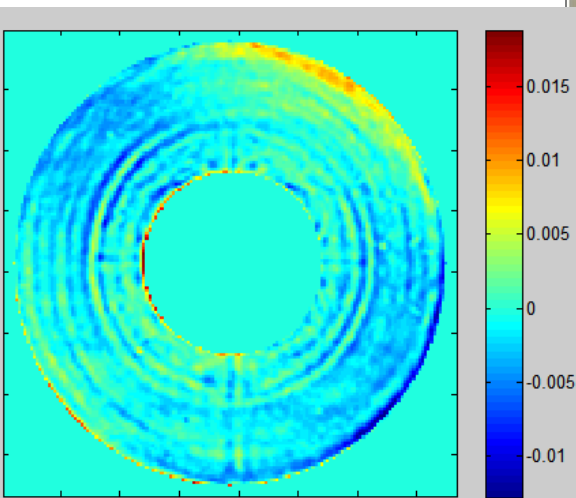
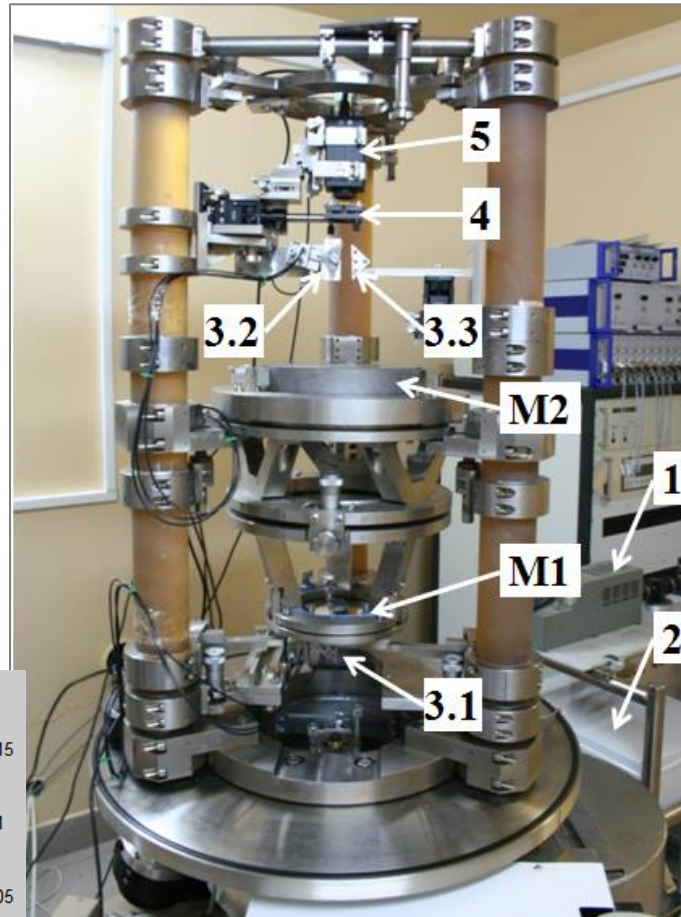
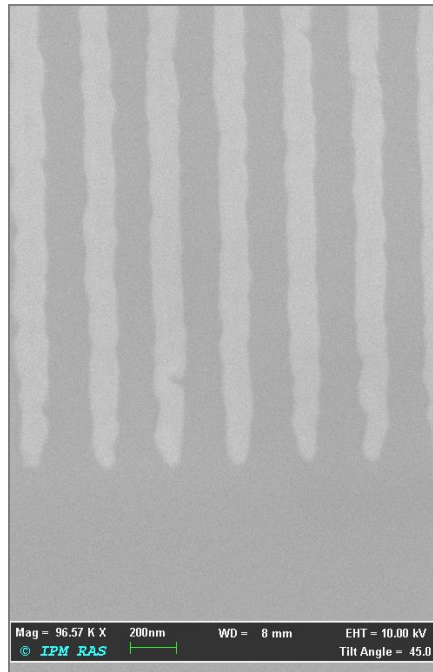
Рентгеновский микроскоп



Изображения тест-объектов:
цифровое и в фоторезисте



Стенд нанолитографии ($\lambda = 13,5$ нм) с расчетным разрешением 30 нм



$RMS = 2.7 \text{ нм}$
 $RMS^a = 3.8 \text{ мкрад}$

Заключение

1. Развиты **безэталонные методы** изучения шероховатости и формы поверхности элементов рентгеновской оптики. Чувствительность и точность измерений находится на **ангстремном уровне**. Методы применимы для изучения любой оптики, включая асферику.
2. Развиты ионно-пучковые методы финишной суперполировки, асферизации и коррекции локальных ошибок формы поверхности подложек для рентгеновских зеркал. Методы позволяют изготавливать подложки с **нанометровой точностью** и с **шероховатостью** на уровне полутора **ангстрем**.
3. Разработаны методы напыления **многослойных зеркал** с **рекордными коэффициентами** отражения, включая $\lambda=13,5$ нм .
4. Разработанная оптика применяется в **телескопах** для изучения **короны Солнца** в ЭУФ и МР диапазонах, в экспериментальных образцах **телескопа** для дистанционного зондирования Земли и **околоземного пространства** в УФ и ВУФ диапазонах, **рентгеновского микроскопа** и **ЭУФ литографа**.

Спасибо за внимание!

