



Физический факультет
Московского
государственного университета
имени М.В.Ломоносова



Кафедра оптики,
спектроскопии и физики
наносистем

Бакалаврская работа

Анализ влияния нарушений топологии планарных составных преломляющих линз на формирование сфокусированных пучков синхротронного излучения

Выполнил студент 441 группы

Александров Александр Витальевич

Научные руководители:

д.ф.-м.н., доцент, Стремоухов Сергей Юрьевич,

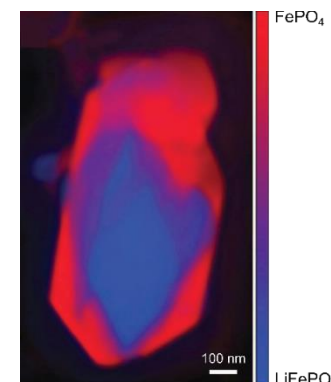
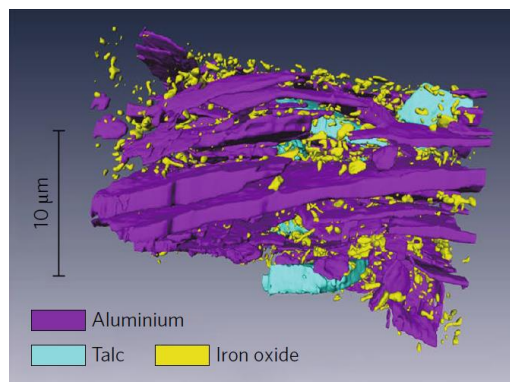
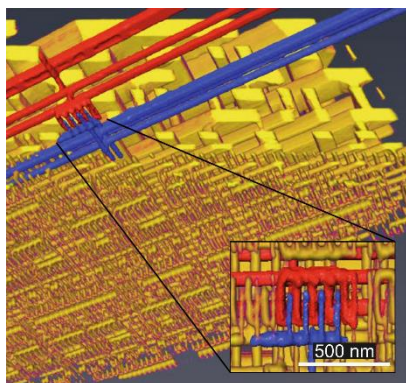
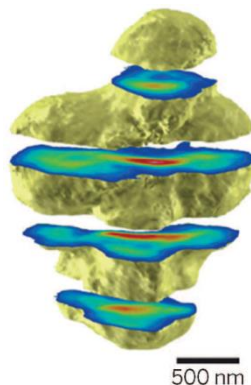
к.ф. м.н., в.н.с., ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Просеков Павел Андреевич,

Москва, 2023 год



Актуальность

- Благодаря СИ стали возможны ранее нереализуемые исследования в различных областях науки и промышленности: нанотехнологии, биология, медицина и микроэлектроника.
- Нанофокусировка открывает новые возможности исследования структуры микро- и нанообъектов благодаря повышению интенсивности и локальности проводимых исследований.
- На всех современных источниках СИ 3-го и 4-го поколения созданы станции, на которых реализованы методы рентгеновской микроскопии, использующие сфокусированный пучок СИ.



H.N. Chapman, K.A. Nugent // Nature Photonics, 2010

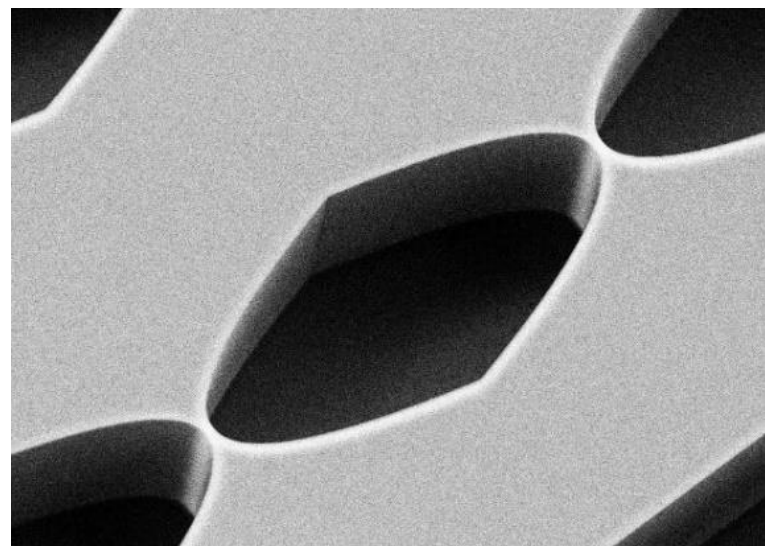
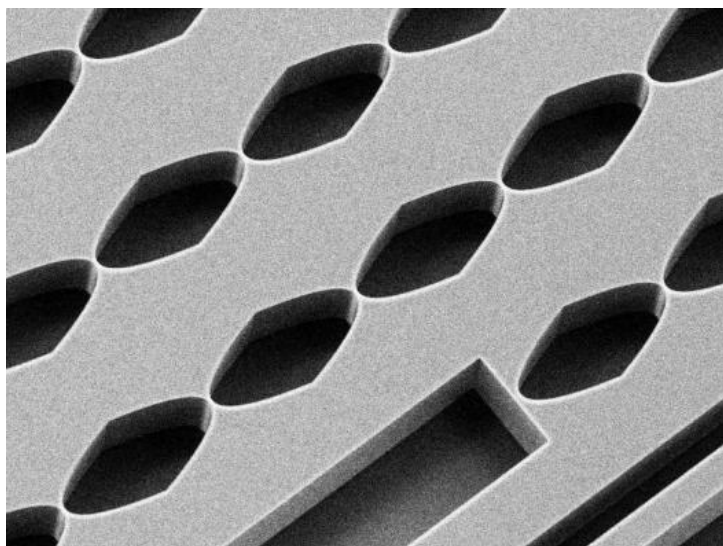
J. Miao et al. // Science, 2015

F. Pfeiffer // Nature Photonics, 2018



Составная преломляющая линза (СПЛ)

СПЛ представляет собой набор последовательно расположенных рентгеновских преломляющих элементов



Планарные параболические СПЛ на поверхности кремния.
Подобные линзы способны **сфокусировать пучок размером ~ 20 нм**

A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva, B. Lengeler // Nature, 1996

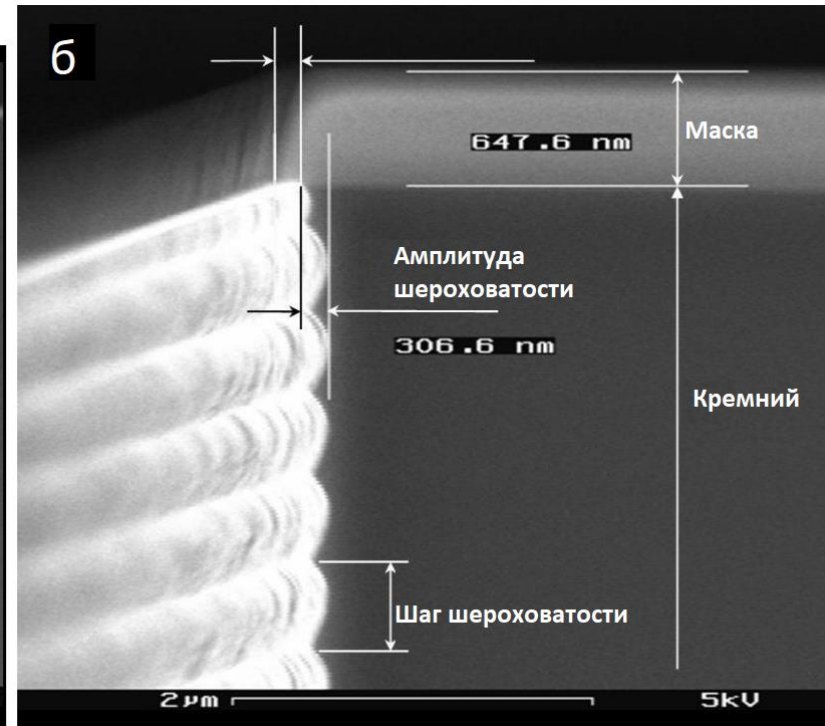
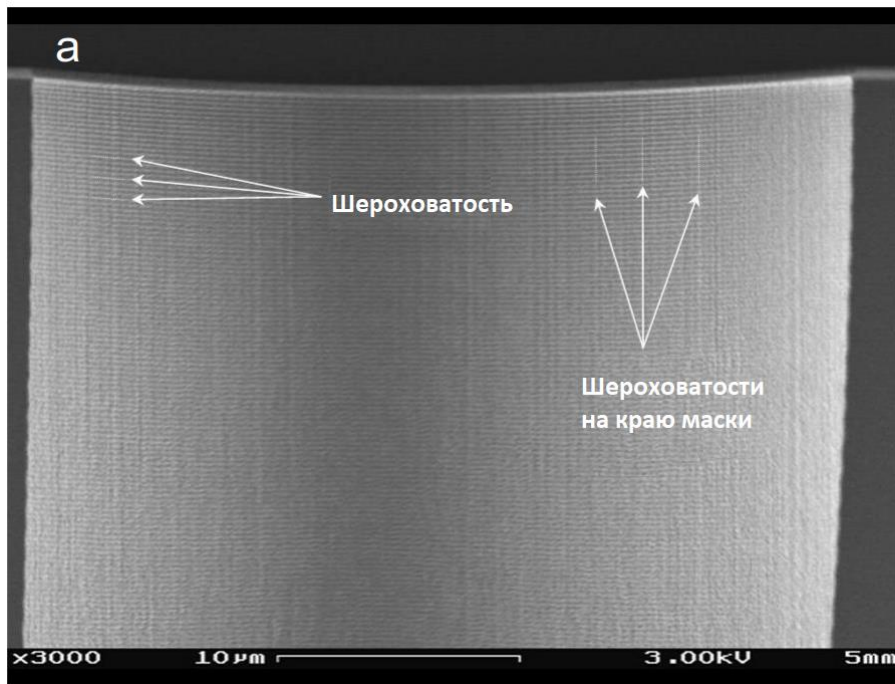
V. Yunkin et al. // Proc. SPIE, 2004

V.G. Kohn, M.S. Folomeshkin // J. Synchrotron Rad., 2021

В.Г. Кон, М.С. Фоломешкин // Российские нанотехнологии, 2022



Нарушение топологии (**шероховатость** поверхности)



СЭМ-изображения поверхностей протравленных линз, демонстрирующие недостатки изготовления (шероховатость)

Snigirev A. A. et al. Silicon planar lenses for high-energy x-ray nanofocusing//Advances in X-Ray/EUV Optics and Components II. – SPIE, 2007. – T.6705. – С. 39-49.



Цели:

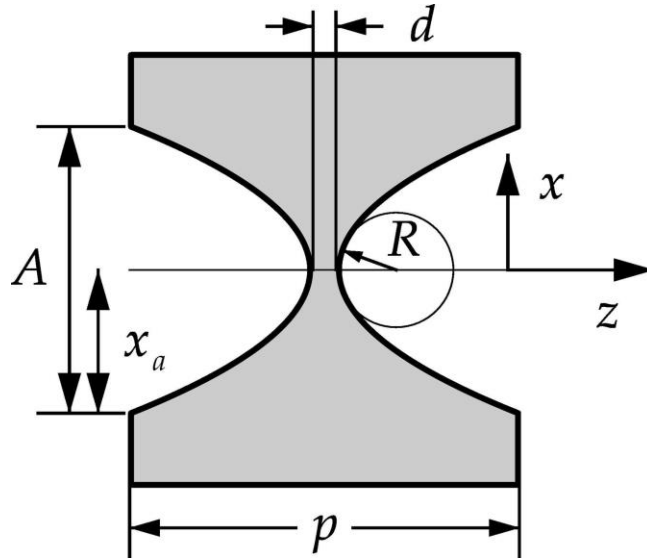
- Исследование влияния нарушения топологии планарных СПЛ на их фокусирующие свойства с использованием численного моделирования.
- Проведение эксперимента по фокусировке СИ с помощью планарных СПЛ из кремния.

Основные задачи:

- Литературный обзор.
- Построение математической модели для описания дефектов топологии элементов СПЛ.
- Проведение численных расчетов формирования сфокусированного пучка СИ с помощью СПЛ с дефектами топологии и анализ полученных результатов расчетов.
- Проведение эксперимента с помощью кремниевых линз и характеристика параметров сфокусированного пучка.

!Стоит отметить, что в настоящее время вопрос влияния нарушения топологии СПЛ на сфокусированный пучок СИ не изучен в полной мере!

Элемент составной преломляющей линзы (СПЛ)

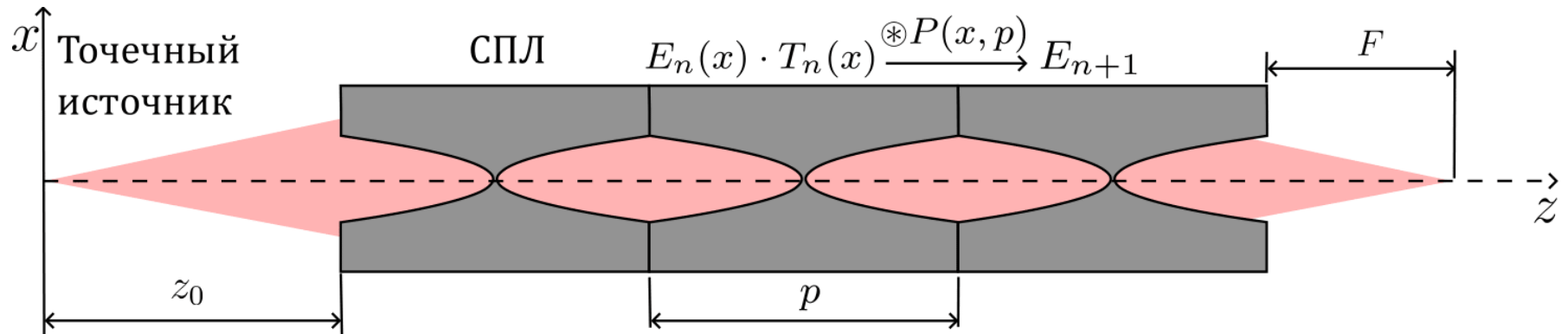


Параметры элемента:

- Материал – кремний
- $A = 50$ мкм
- $R = 6.25$ мкм
- $d = 2$ мкм
- $p = 102$ мкм

A – апертура, R – радиус кривизны в вершине параболы,
 d – толщина перемычки, p – длина элемента.

Оптическая **схема** и основные **выражения** для расчетов



- Излучение точечного источника в вакууме (пропагатор Френеля):

$$P(x, z) = \frac{1}{\sqrt{i\lambda z}} \exp\left(i\pi \frac{x^2}{\lambda z}\right);$$

- Распространение ВФ излучения в среде:

$$E(x, z + z_0) = T(x) \cdot E(x, z);$$

- Трансмиссионная функция объекта:**

$$T(x) = \exp\{-ik[\delta - i\beta] \cdot t(x)\}, \text{ где } t(x) = 2 \cdot \frac{x^2}{2R} + d;$$

- Перенос ВФ излучения на расстояние z :

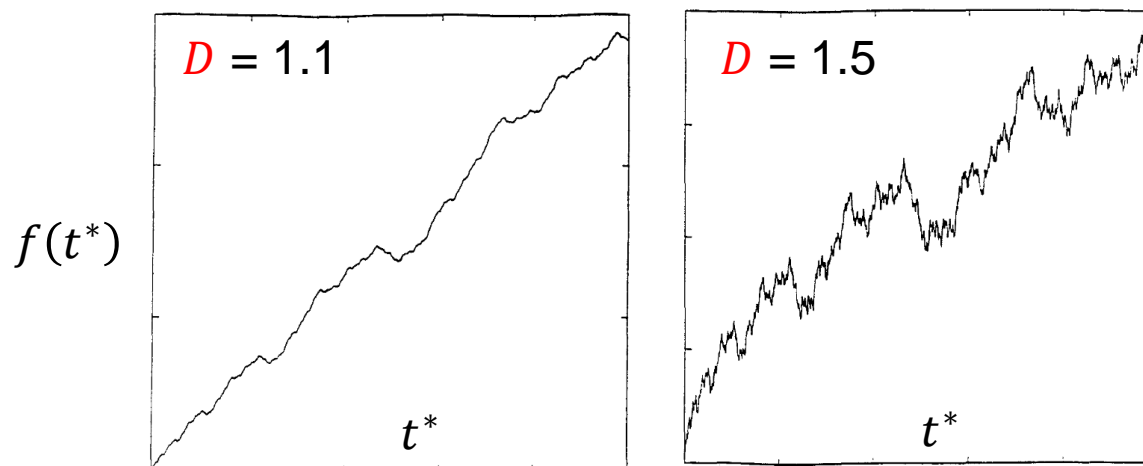
$$E(x, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} dx_1 E(x_1, 0) P(x - x_1, z) = E(x, 0) * P(x, z);$$

- Интенсивность:

$$I(x) = |E(x)|^2.$$

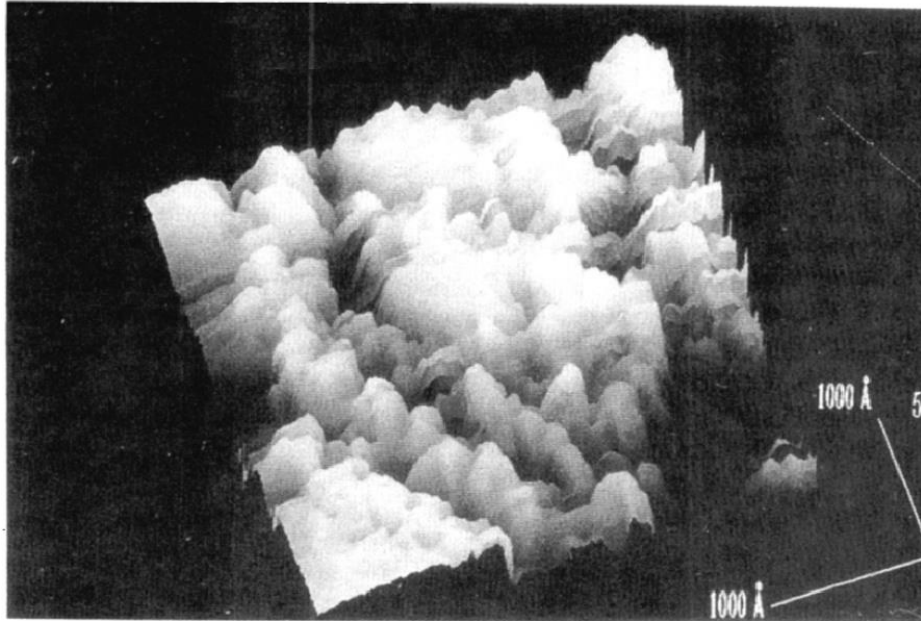
Фрактальная функция Вейерштрасса-Мандельброта

$$f(t^*) = G^{D-1} \sum_{n=n_{min}}^{n_{max}} \frac{\cos(2\pi\gamma^n t^* + \phi)}{\gamma^{(2-D)n}}; \quad G = G(\sigma)$$

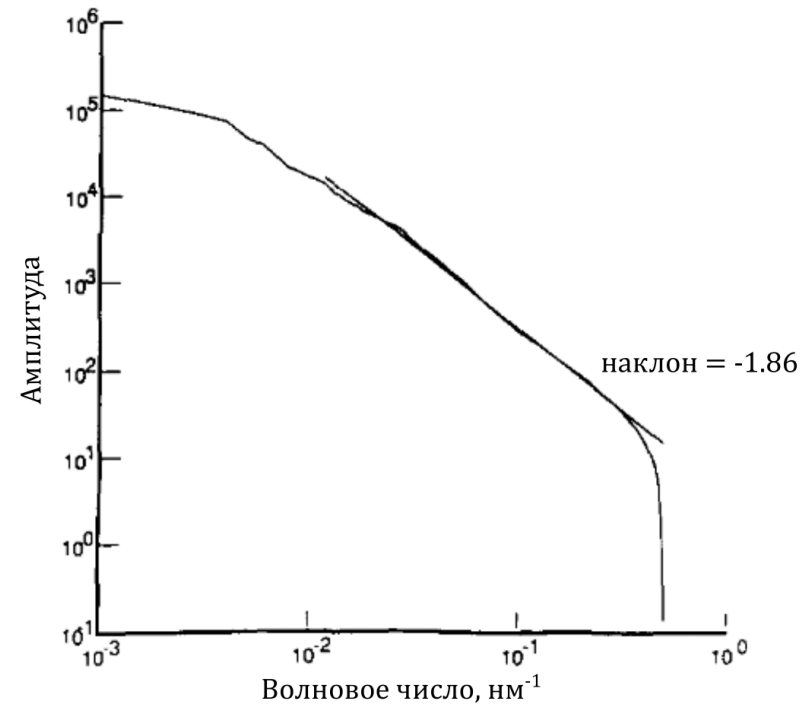


- σ – амплитуда или среднеквадратичное отклонение высот шероховатости ($10 \text{ нм} < \sigma < 300 \text{ нм}$)
 - D – фрактальная размерность ($1 < D < 2$)
-
- Параметр масштабирования $\gamma = 1.5$ для описания броуновской поверхности
 - G – постоянная масштабирования (связана с амплитудой)
 - Уникальность поверхности характеризуется случайной фазой $\phi \in [0, 2\pi)$

На чем основывается выбор функции Вейерштрасса-Мандельброта для описания шероховатой поверхности?



(а) изображение поверхности излома кремния, полученное с помощью сканирующего туннельного микроскопа

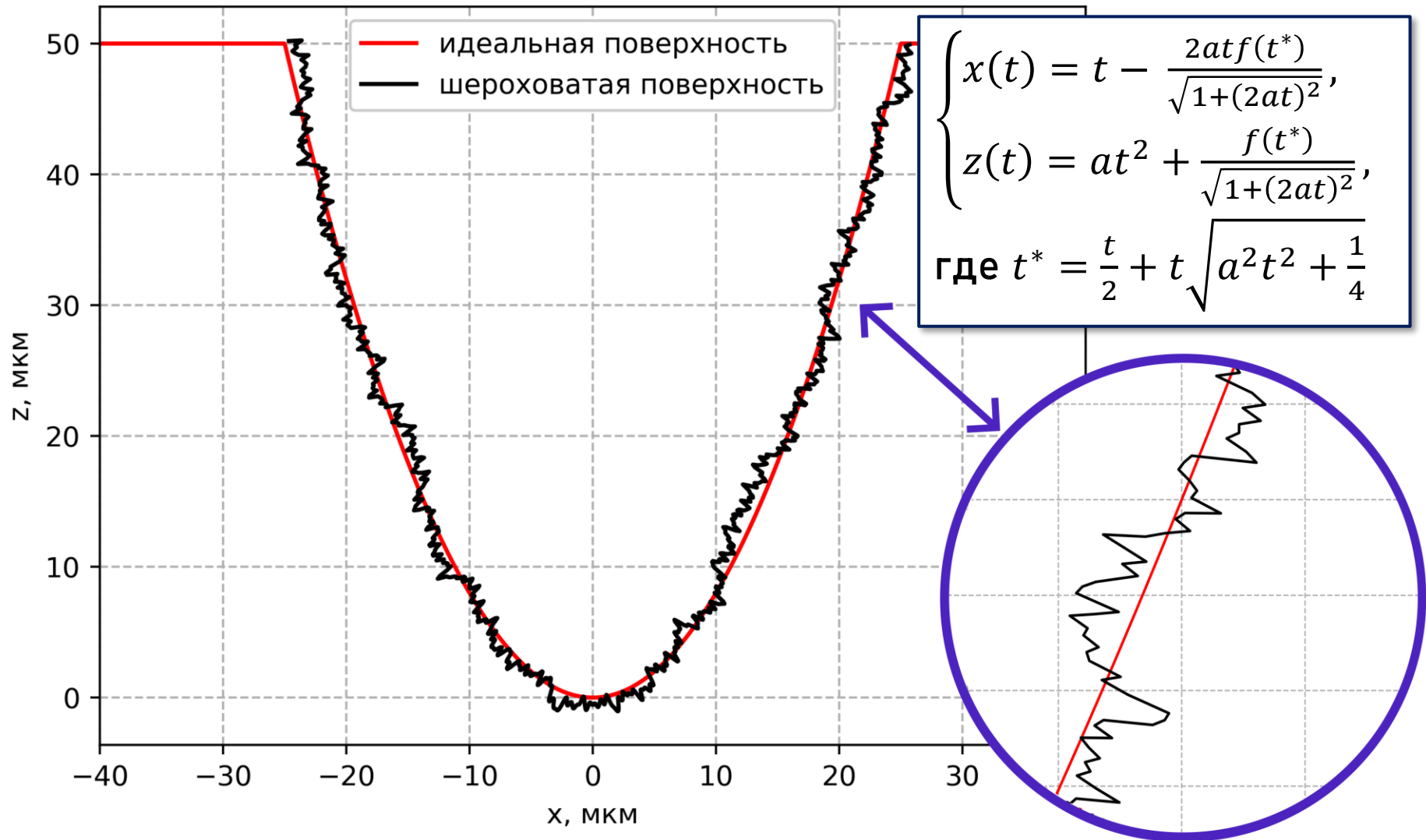


(б) спектральная плотность мощности поверхности кремния в логарифмическом масштабе

Mitchell M. W., Bonnell D. A. Quantitative topographic analysis of fractal surfaces by scanning tunneling microscopy // Journal of Materials Research. – 1990. – Т. 5. – No. 10. – С. 2244-2254

Учет нарушения топологии линзы

Параметрически заданная кривая, описывающая шероховатость профиля СПЛ



где $f(t^*)$ - функция, моделирующая отклонение поверхности, в криволинейных координатах (τ, η)

Основная часть настоящей работы

Интерполяционный поиск точек раздела сред для вычисления **модернизированной функции толщины**

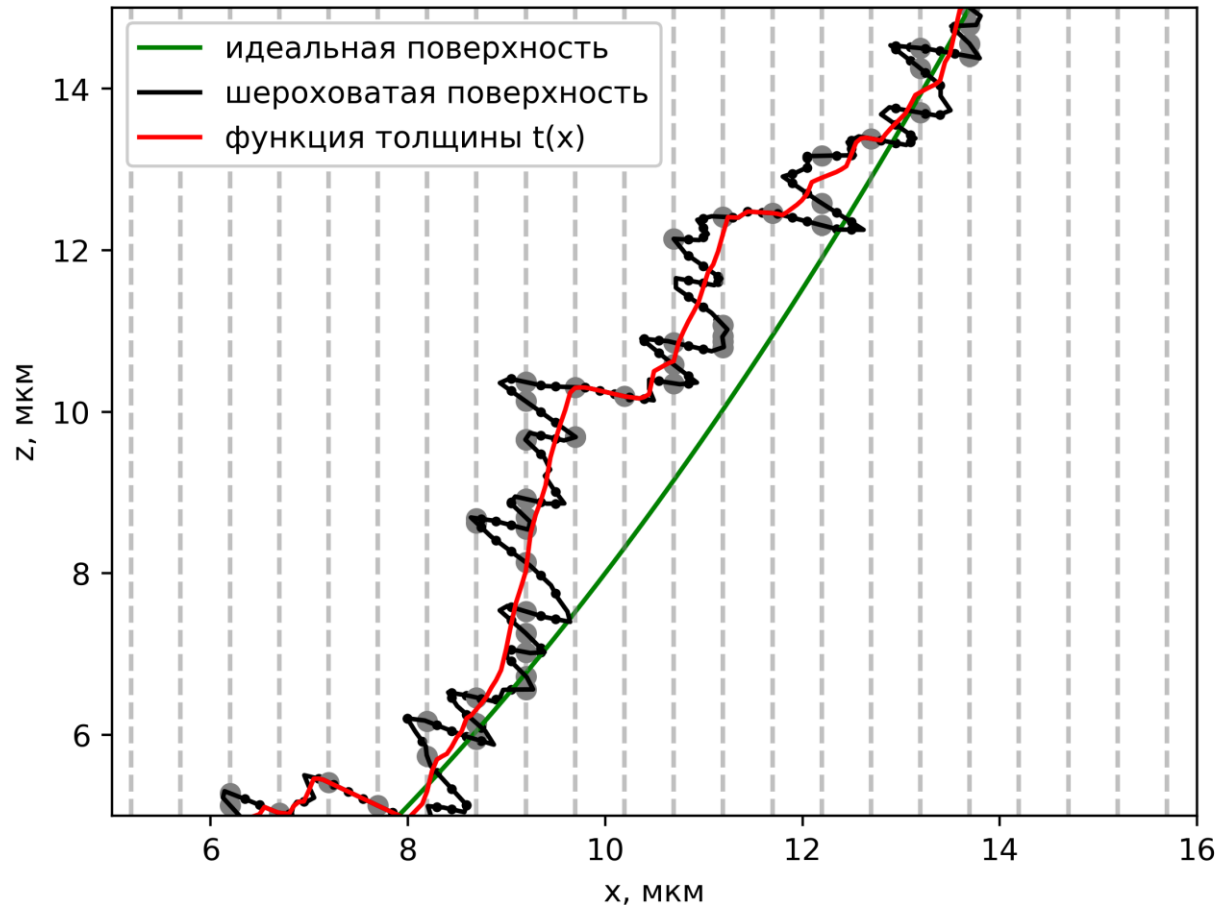
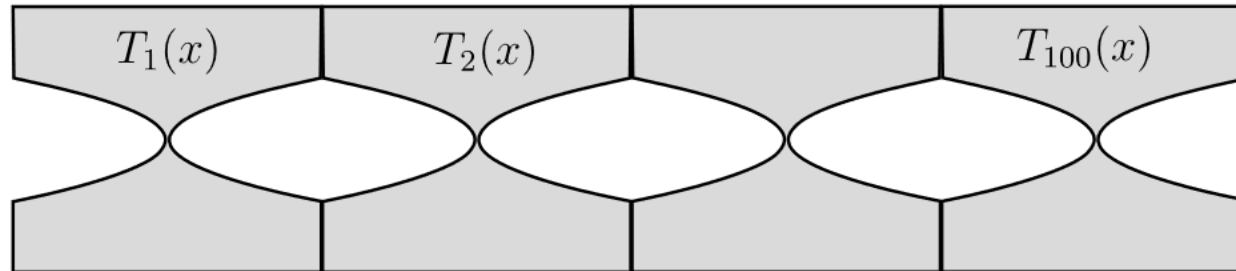


Иллюстрация к алгоритму поиска границ раздела сред
(вакуум и материал СПЛ)

2 варианта шероховатой поверхности



- **Систематический** вариант, в рамках которого предполагается, что систематические процессы изготовления СПЛ ведут к идентичным шероховатостям поверхности каждого элемента СПЛ.

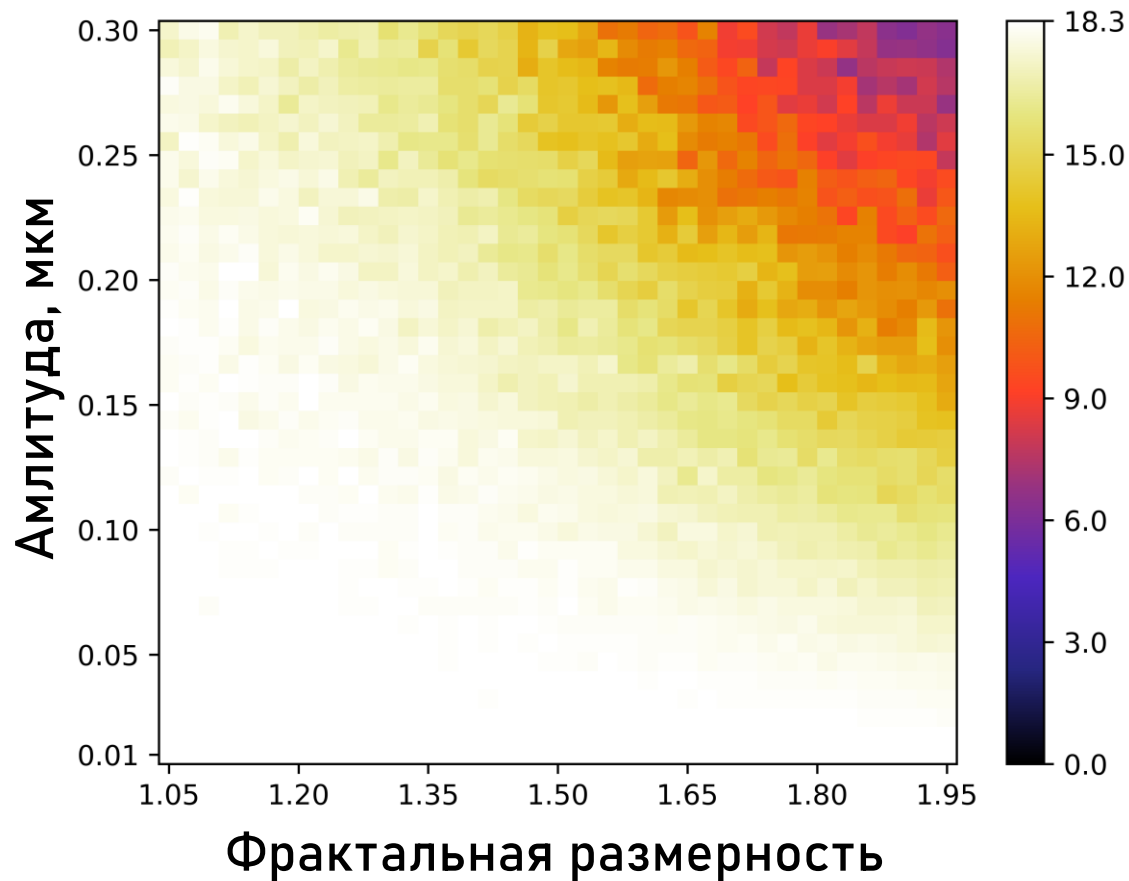
$$T_1(x) = T_2(x) = \dots = T_{100}(x)$$

- **Случайный** вариант, в рамках которого предполагается идея обратная систематическому варианту. Поверхность каждого элемента в таком варианте является уникальной:

$$T_1(x) \neq T_2(x) \neq \dots \neq T_{100}(x)$$

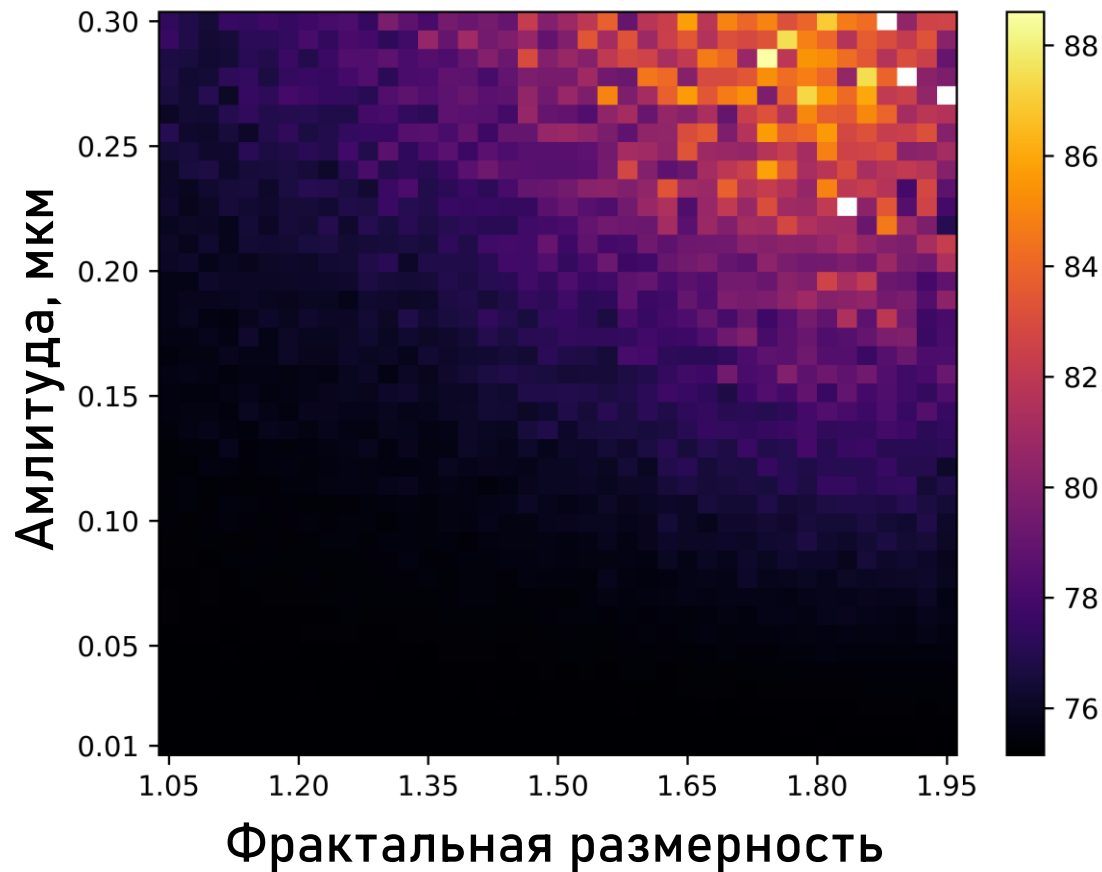
! Для сравнения также рассматривается **идеальный** вариант, в котором поверхность элемента СПЛ без шероховатостей !

Пиковое значение **интенсивности** в фокусе (отн. ед.)
в **случайном** варианте (40x40)



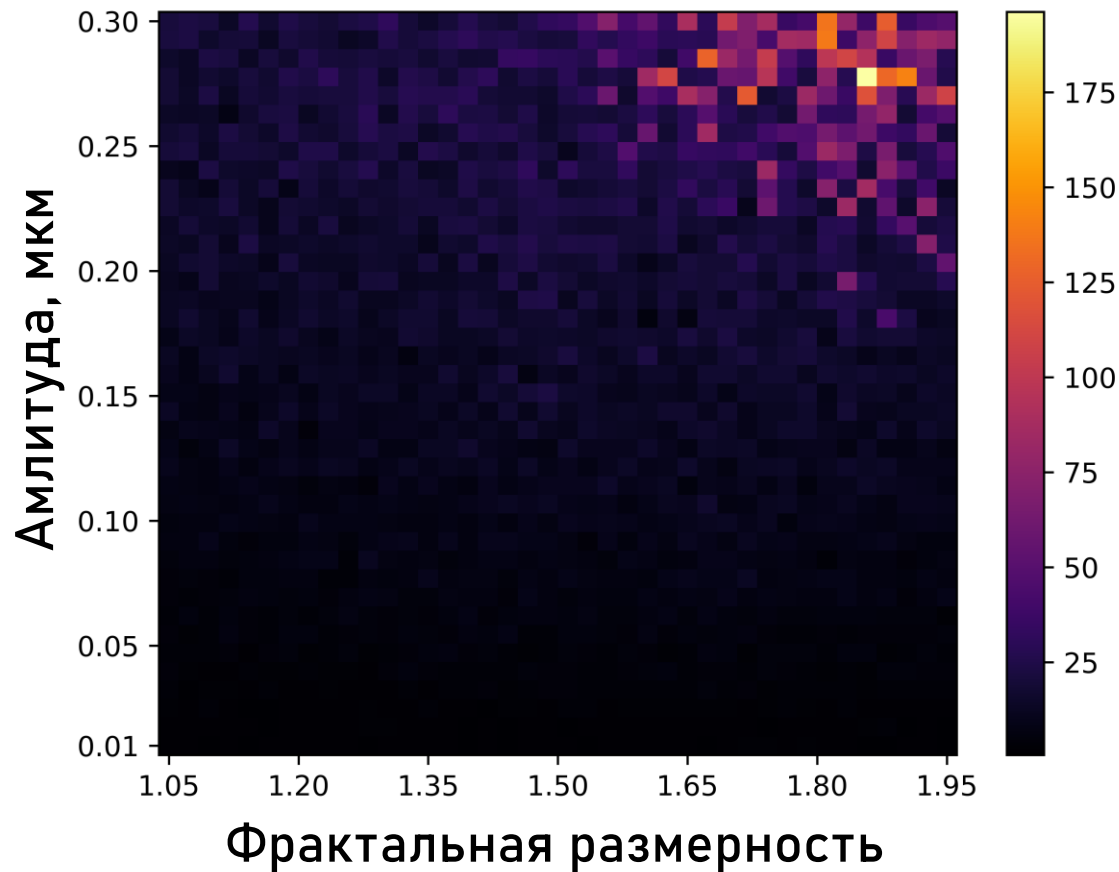
В **идеальном** варианте пик **интенсивности** = 18.3 отн. ед.

Полуширина (FWHM) пучка в фокусе (нм) в случайном варианте (40x40)



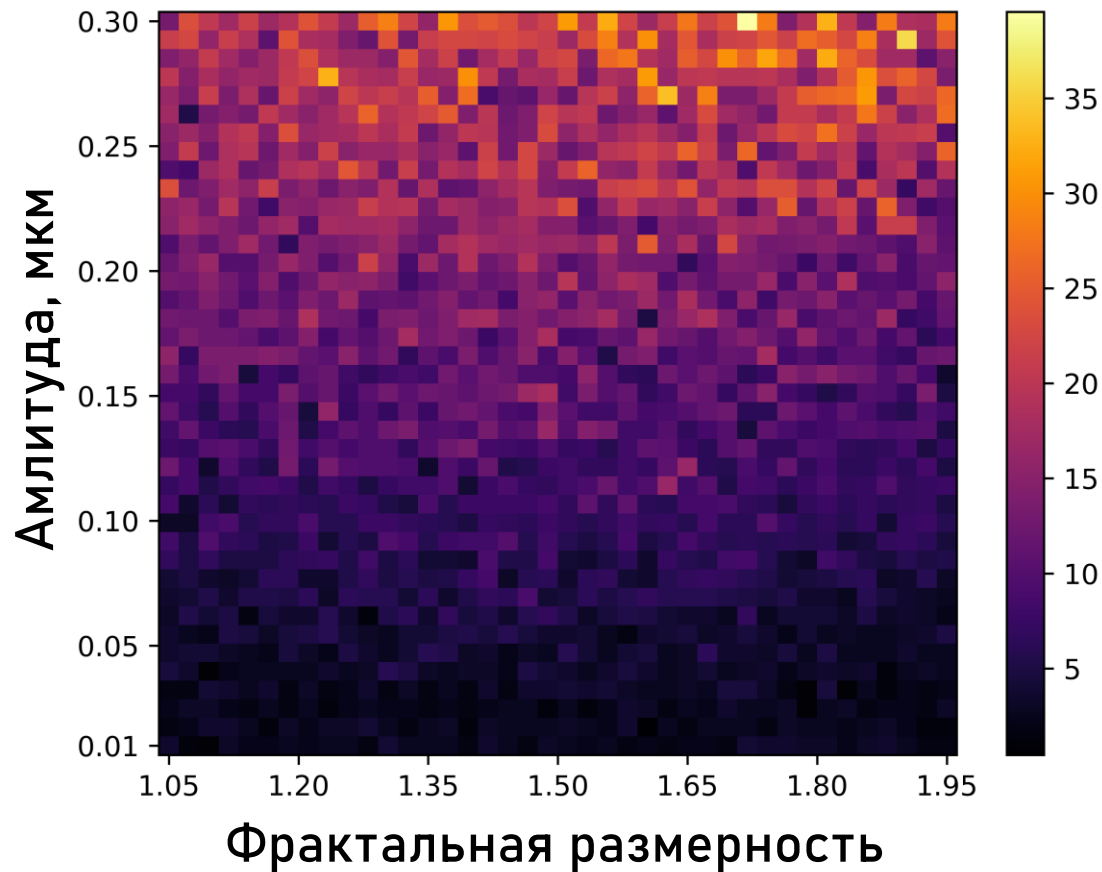
В идеальном варианте полуширина пучка = 75.2 нм

Фокусное расстояние (мм) в случайном варианте (40x40)



В идеальном варианте фокусное расстояние = 2.524 мм

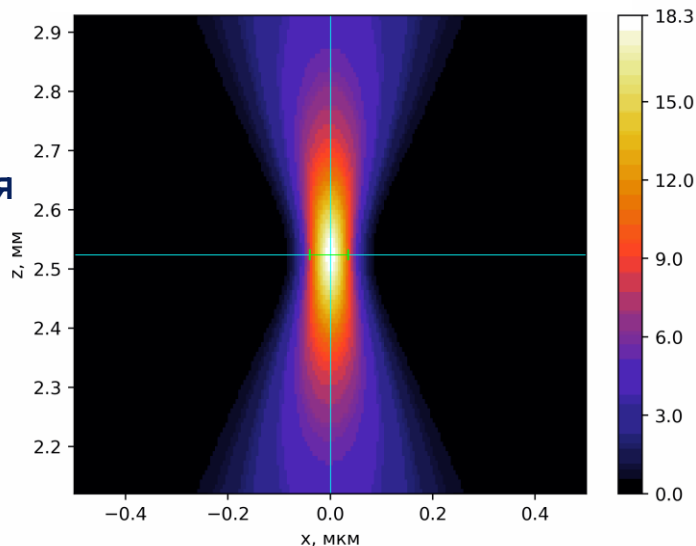
Поперечное смещение фокуса от оптической оси (нм) в случайном варианте (40x40)



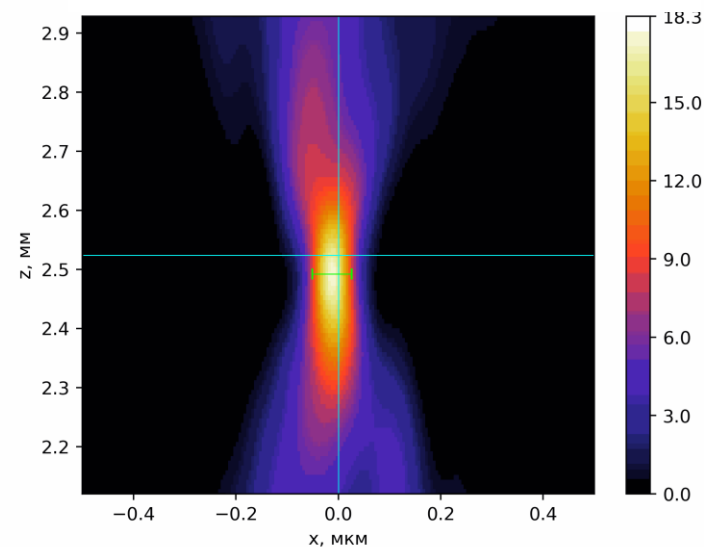
В **идеальном** варианте **поперечное** смещение = 0 нм

Изменение распределения интенсивности в окрестности фокуса в случайном варианте (вид сверху)

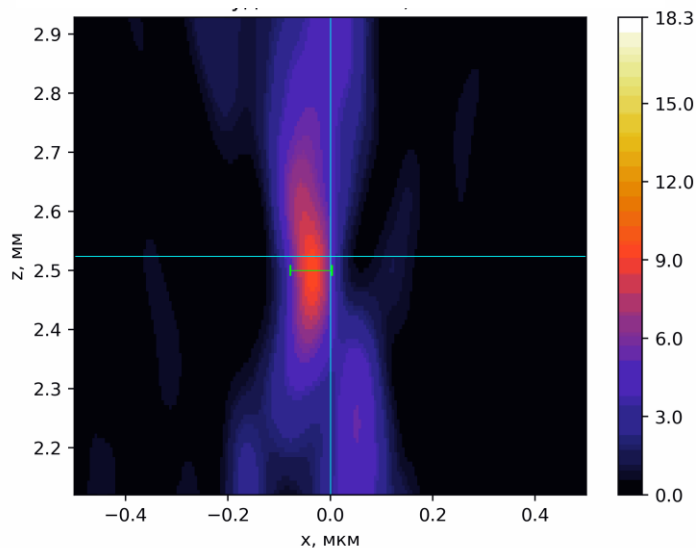
а) ($\sigma=0.01$ мкм, $D=1.05$)



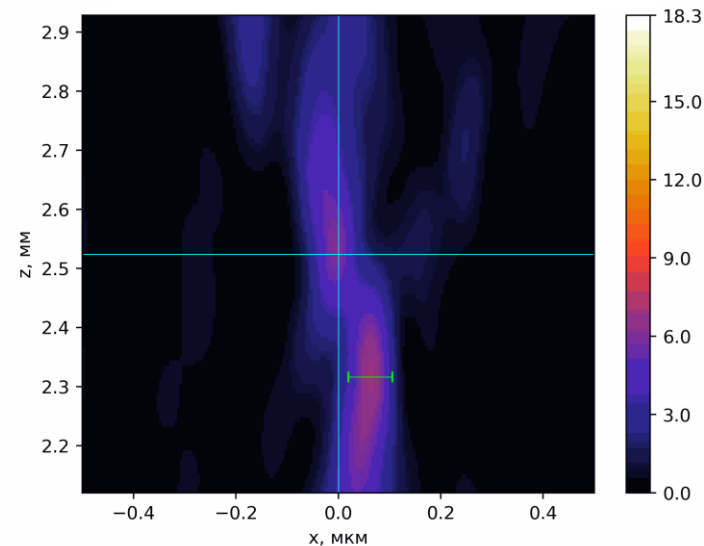
б) ($\sigma=0.16$ мкм, $D=1.50$)



в) ($\sigma=0.25$ мкм, $D=1.80$)



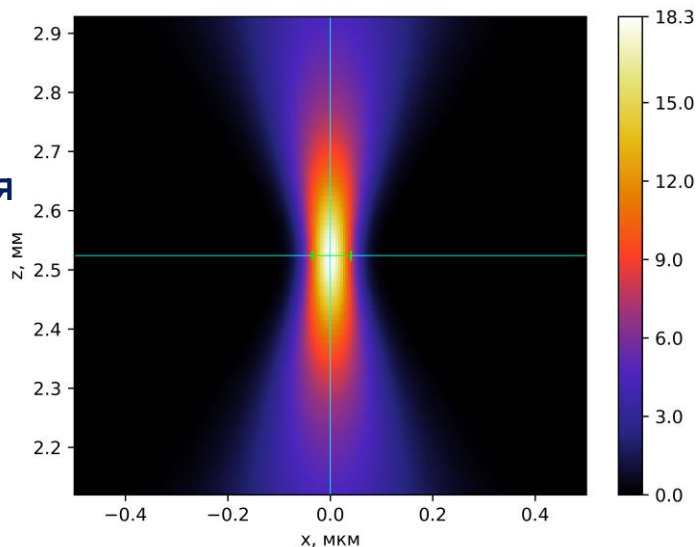
г) ($\sigma=0.3$ мкм, $D=1.94$)



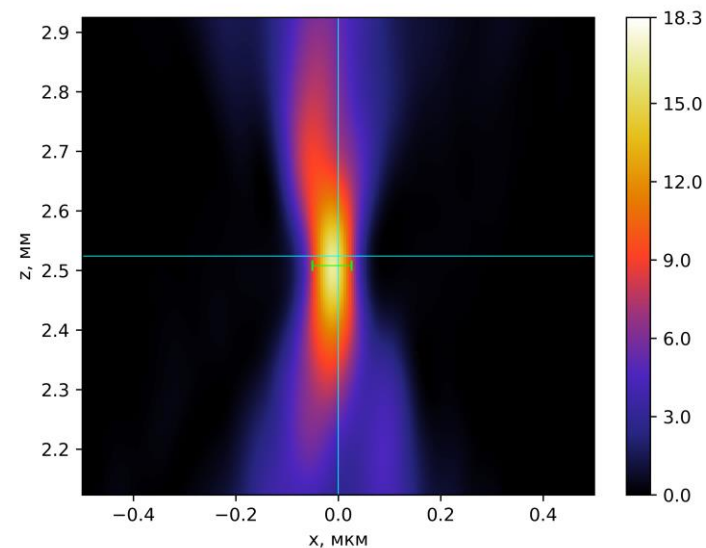
↑ Главная
оптическая
ось z

Распределение интенсивности в окрестности фокуса при $\sigma=0.1$ и $D=1.8$ (вид сверху)

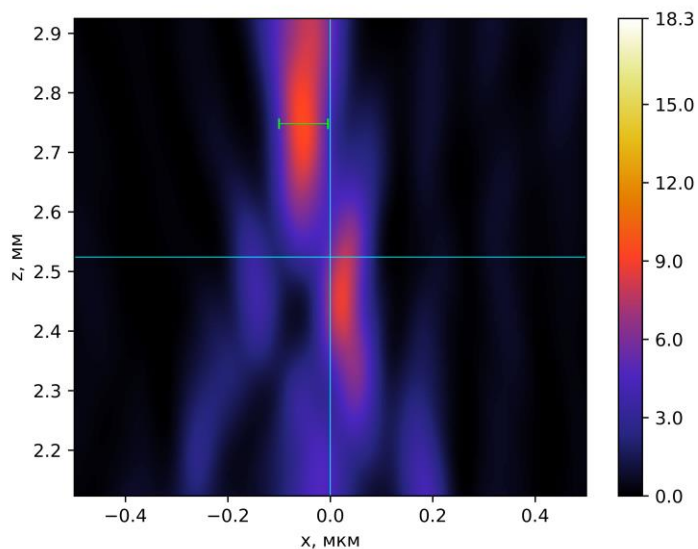
а) Идеальный вариант



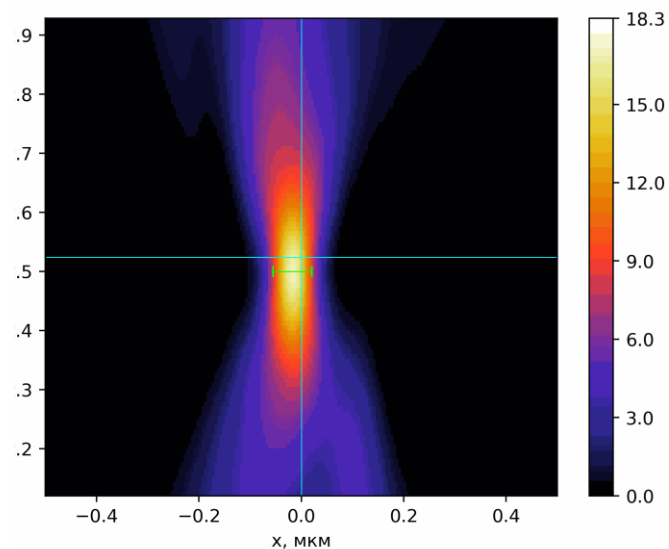
б) Случайный вариант



в) Систематический вариант (I)

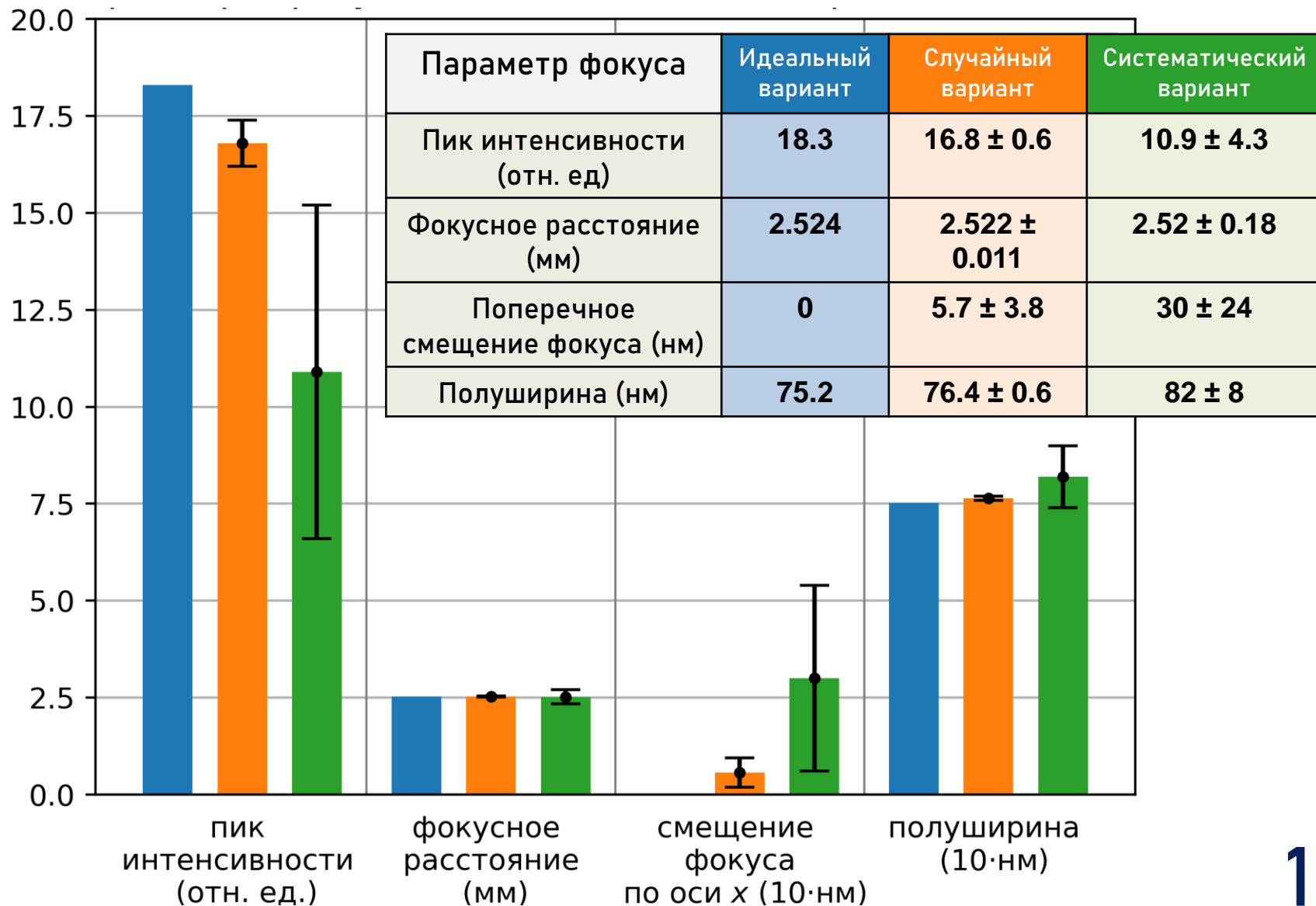


г) Систематический вариант (II)



Основная часть настоящей работы

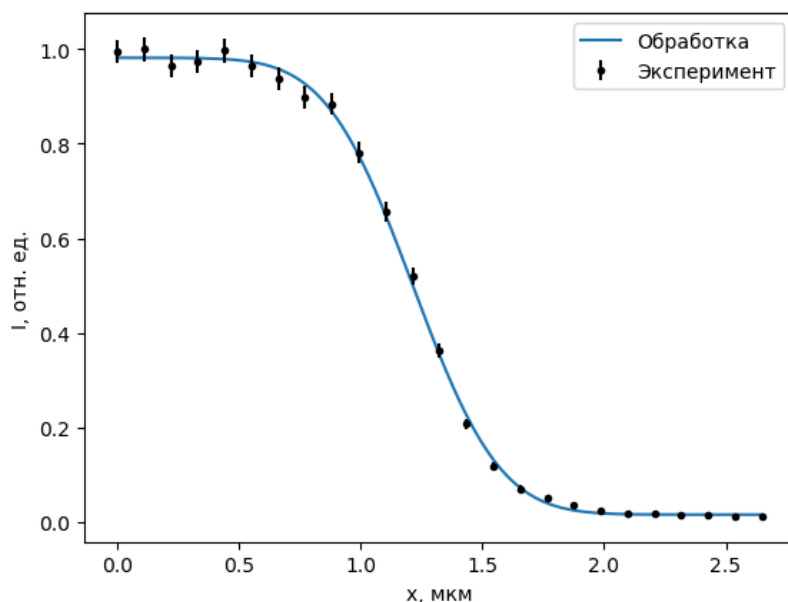
Оценка параметров фокуса для 100 независимых испытаний при $\sigma=0.1$ мкм и $D=1.8$



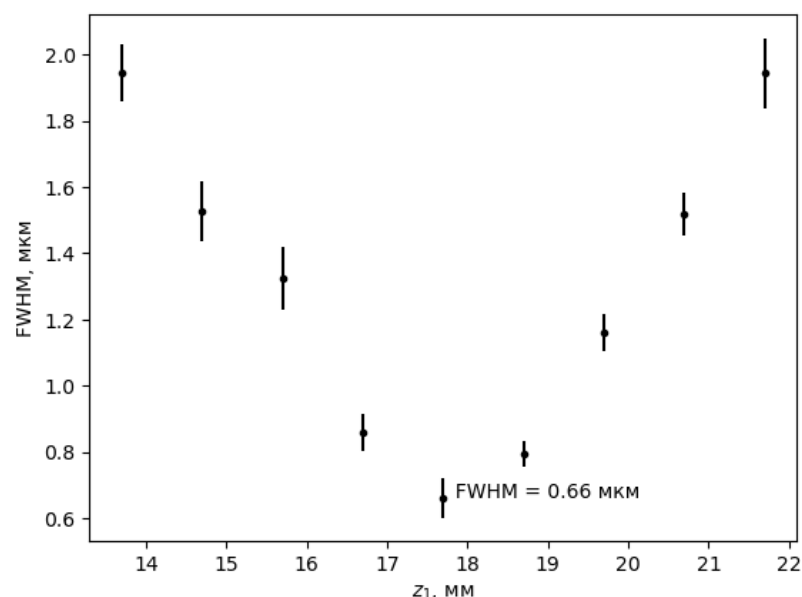
Основная часть настоящей работы

Измерение **размера изображения источника СИ** методом **ножевого сканирования**

Впервые на Курчатовском источнике синхротронного излучения на станции «Рентгеновская кристаллография и физическое материаловедение» реализована субмикронная фокусировка пучка СИ с использованием планарных СПЛ из кремния. Минимальный размер пучка составил 0.66 мкм.



Кривая ножевого сканирования пучка СИ для СПЛ с числом элементов $N = 104$



Размер пучка СИ в окрестности фокуса СПЛ с числом элементов $N = 104$

Численные модели настоящей работы созданы для диагностирования реальных СПЛ. Размеры сфокусированного пучка СИ, полученные на «КИСИ-Курчатов», свидетельствуют о востребованности подобных методов для идентификации возможных проблем, связанных с нарушением топологии преломляющих элементов.

Результаты и выводы

- Разработан новый алгоритм анализа влияния нарушений топологии планарных СПЛ на формирование сфокусированных пучков СИ. (Алгоритм **заключается в независимой модификации комплексной трансмиссионной функции** отдельных элементов СПЛ с учетом отклонения их параметров топологии от теоретических значений)
- С применением фрактальной модели описания поверхности рассмотрены два варианта нарушения топологии – случайные и систематические. На основании полученных результатов расчета сделан вывод о том, что при одних и тех же параметрах расчета **систематические дефекты топологии приводят к более значительной деградации** пятна фокуса **в отличие от случайных** нарушений.
- Определены параметры шероховатости, при которых происходит незначительное изменение параметров фокуса ($\sigma < 0.1$ мкм или при $D < 1.3$) или наблюдается полная деградация фокусного пятна (**при одновременном выполнении условий: $\sigma > 0.25$ мкм и $D > 1.65$**).
- Проведена обработка экспериментальных данных, полученных в ходе экспериментов на Курчатовском источнике синхротронного излучения по фокусировке пучка СИ с использованием кремниевых планарных СПЛ. Минимальный размер пучка в фокусе составил **0.66 мкм**. Полученный результат свидетельствует о необходимости учета нарушения топологии реальных СПЛ в дальнейших исследованиях, связанных с фокусировкой пучка СИ с помощью СПЛ.

Выражаю благодарность!

- Выражаю глубокую признательность за помощь в процессе подготовки дипломной работы моему научному руководителю Павлу Андреевичу Просекову и м. н. с. лаборатории «РМАиСИ» Максиму Сергеевичу Фоломешкину
- А также заведующему кафедрой оптики, спектроскопии и физики наносистем чл. корр. РАН Михаилу Валентиновичу Ковальчуку и д.ф.-м.н. доценту Сергею Юрьевичу Стремоухову за предоставленную возможность учебы на кафедре





Спасибо за внимание!