



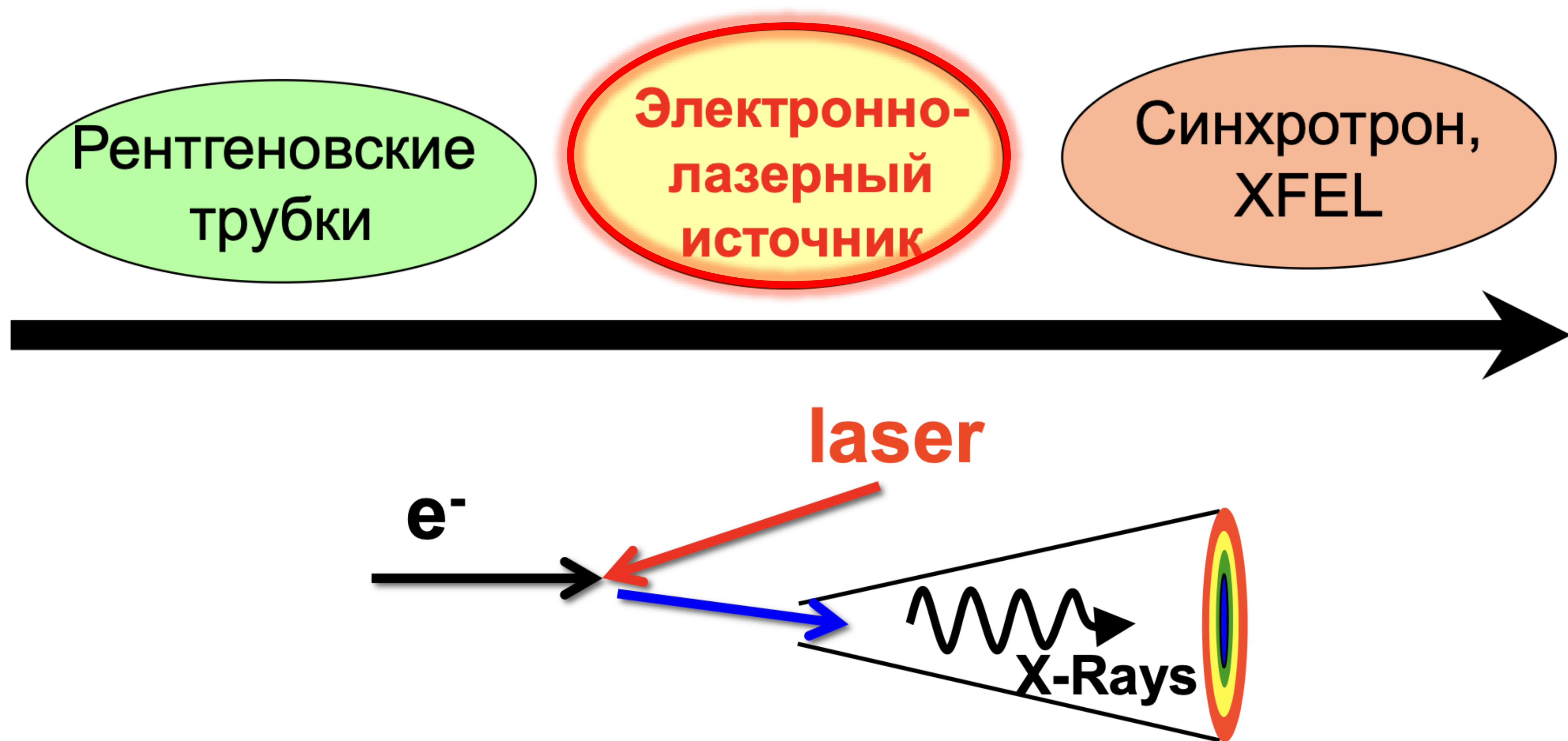
Двухфотонная лазерная литография для изготовления рентгеновской оптики: преимущества, проблемы и решения

Семинар памяти профессора Б.С. Ишханова
**“Фотоядерные исследования. Состояние и
перспективы”**

НИИЯФ МГУ имени М.В. Ломоносова.

2025

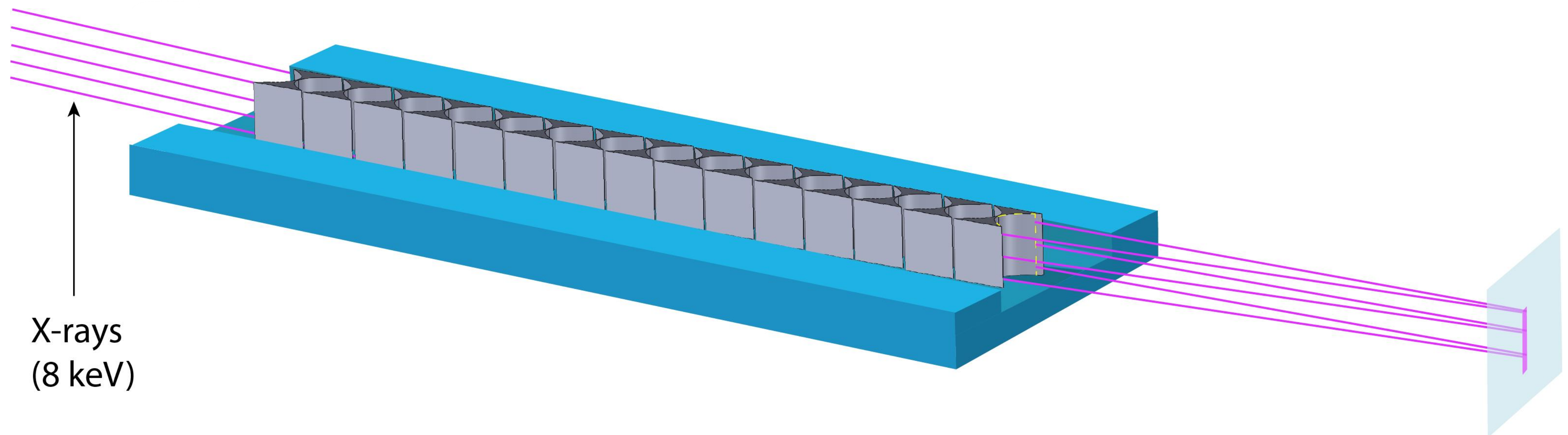
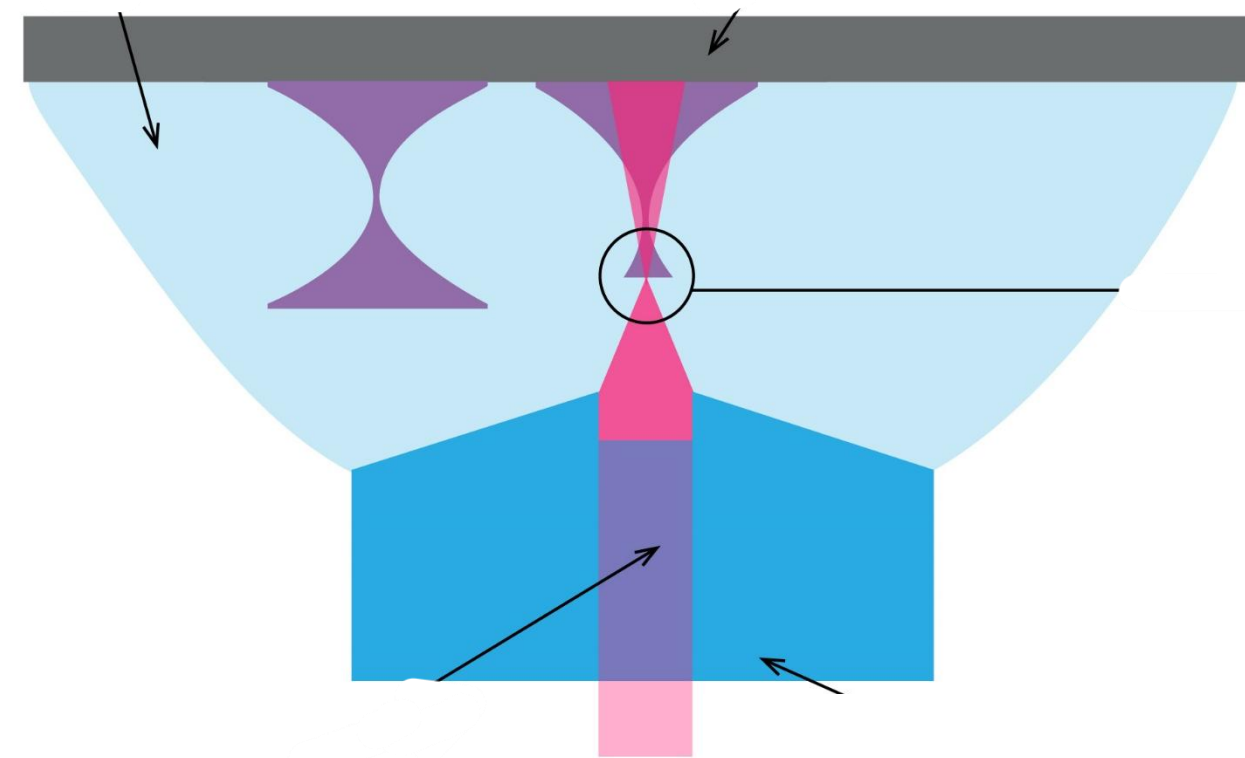
Комптовский источник рентгеновского излучения



Взято из: [«Выездное совещание Совета РАН, ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 20-21 марта 2023. Комптовский источник МИФИ. С.М. Полозов и др.»](#)

Введение

Схема метода
двухфотонной
лазерной
литографии



Преломление синхротронного излучения в составной
преломляющей линзе

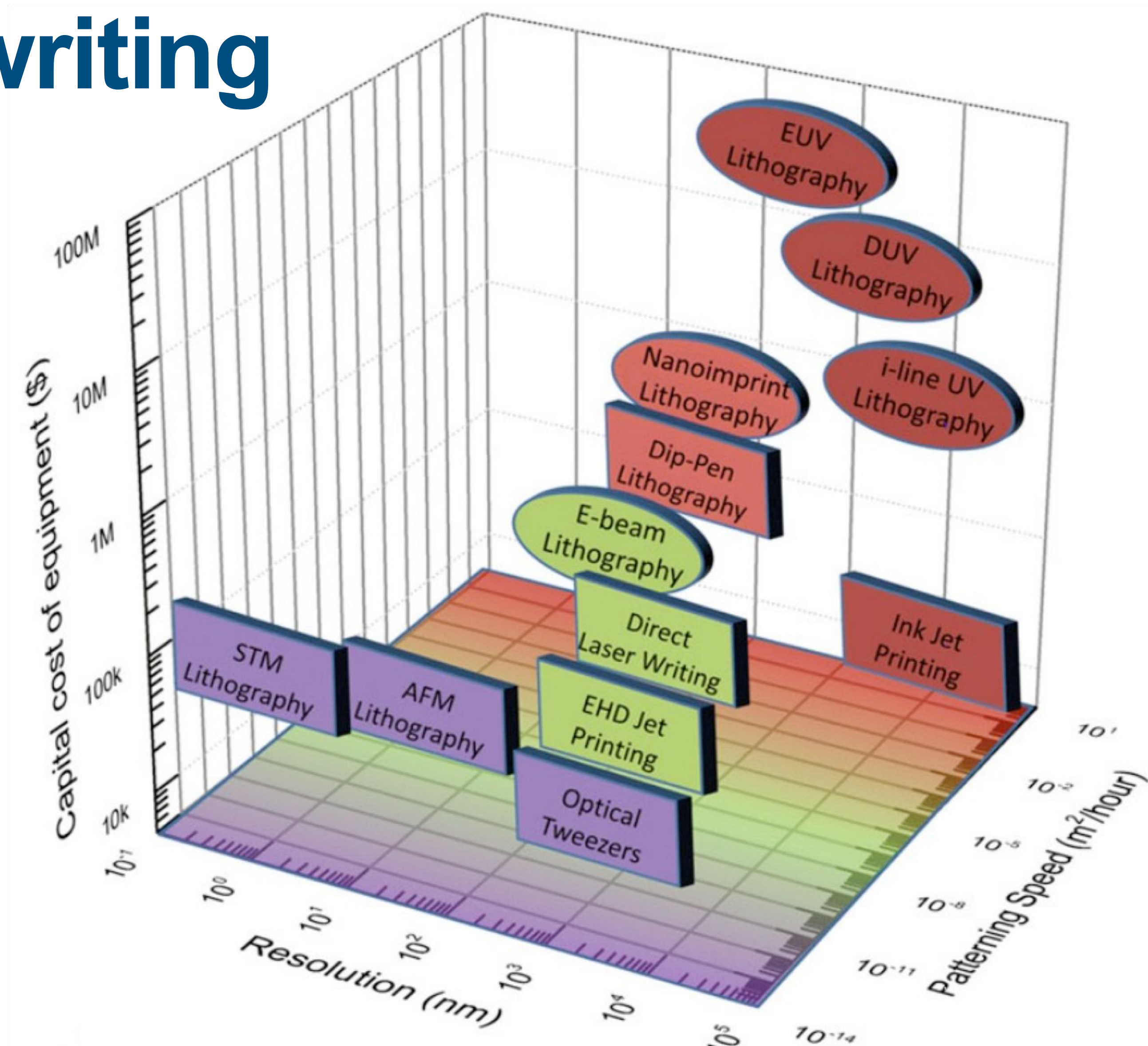
DLW — Direct Laser writing



DLW-система
«Однолуч»



Nanoscribe
Photonics
Professional



Используется фемтосекундное лазерное излучение с пиковой мощностью 25 кВт

Двухфотонная полимеризация

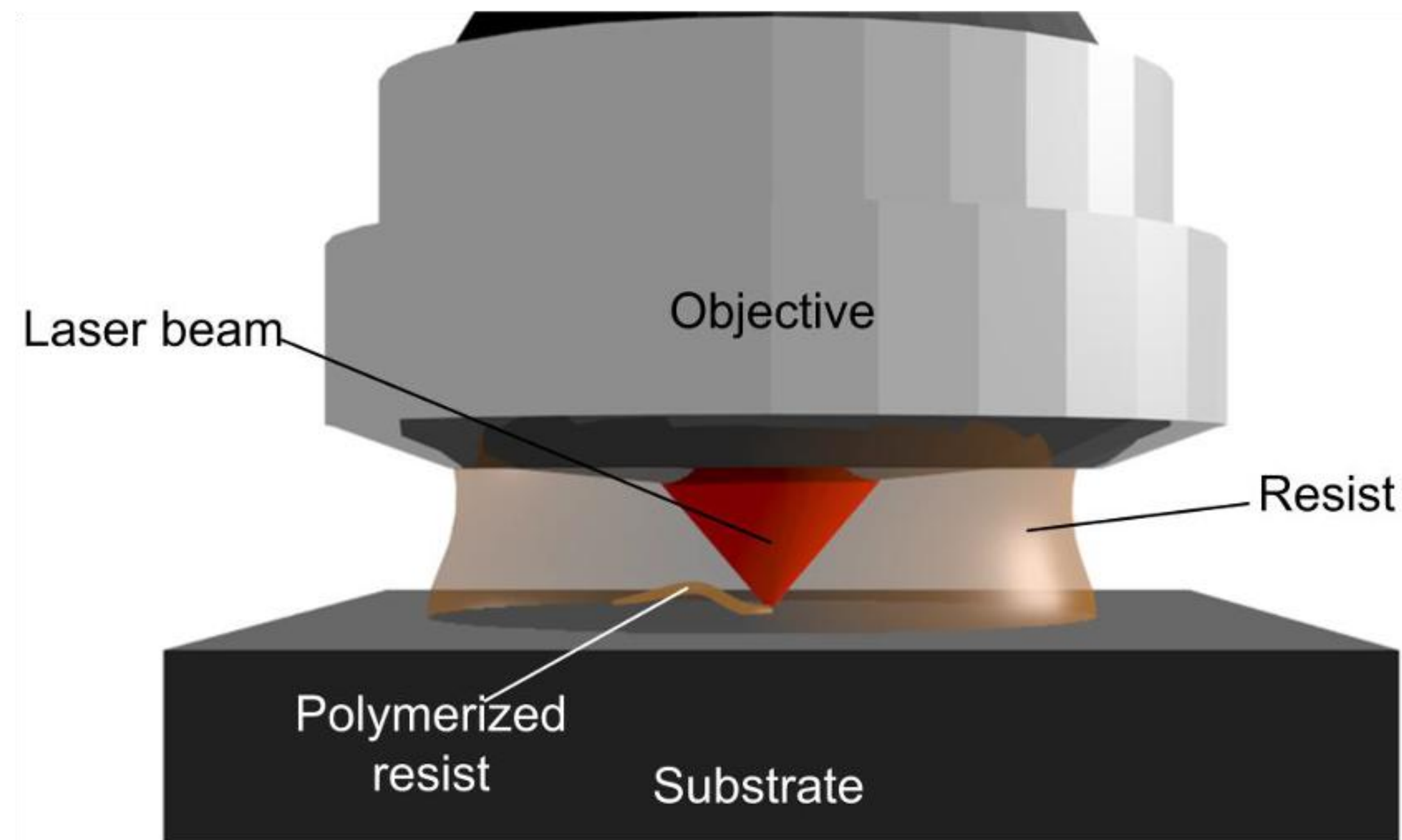
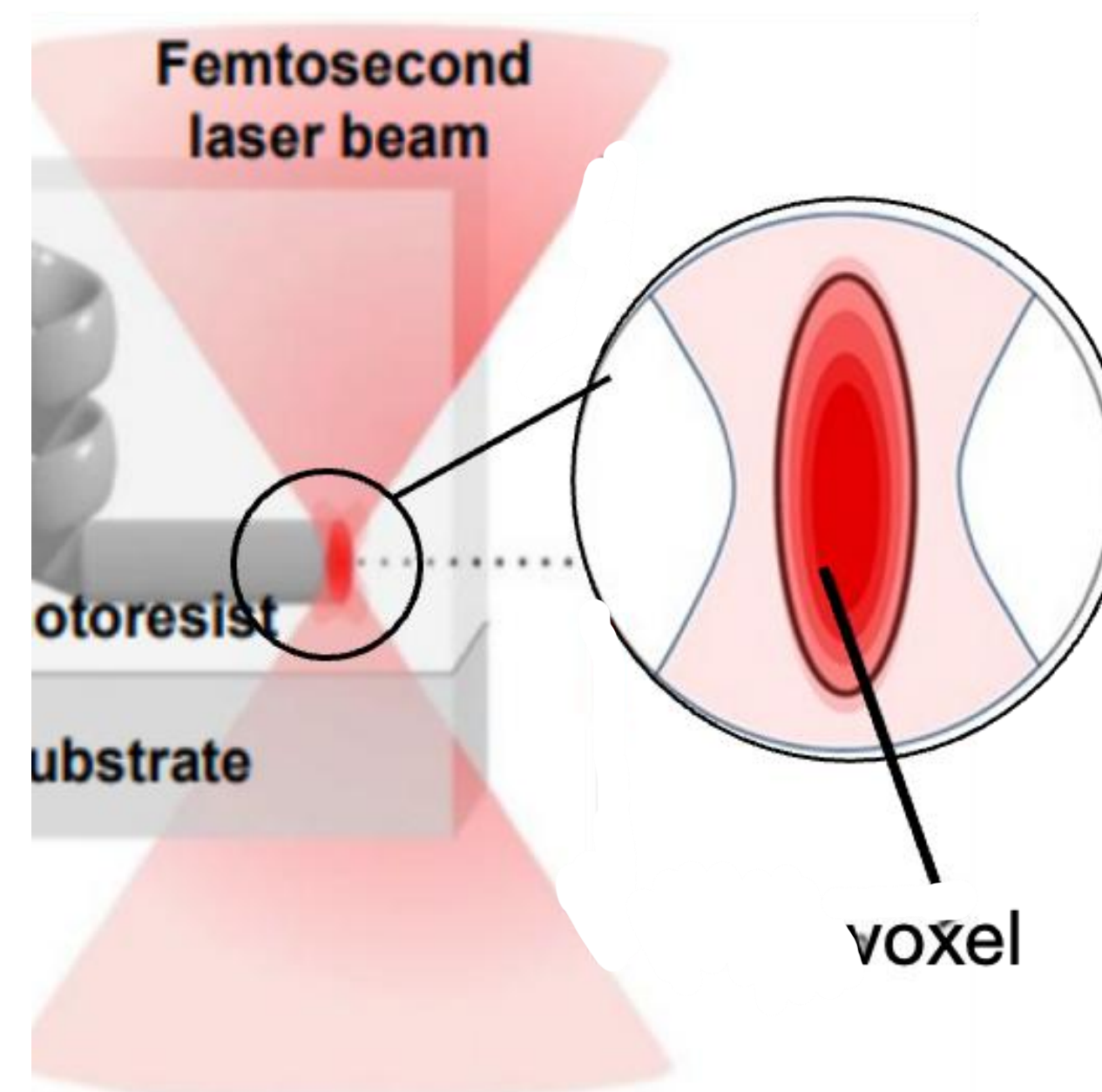
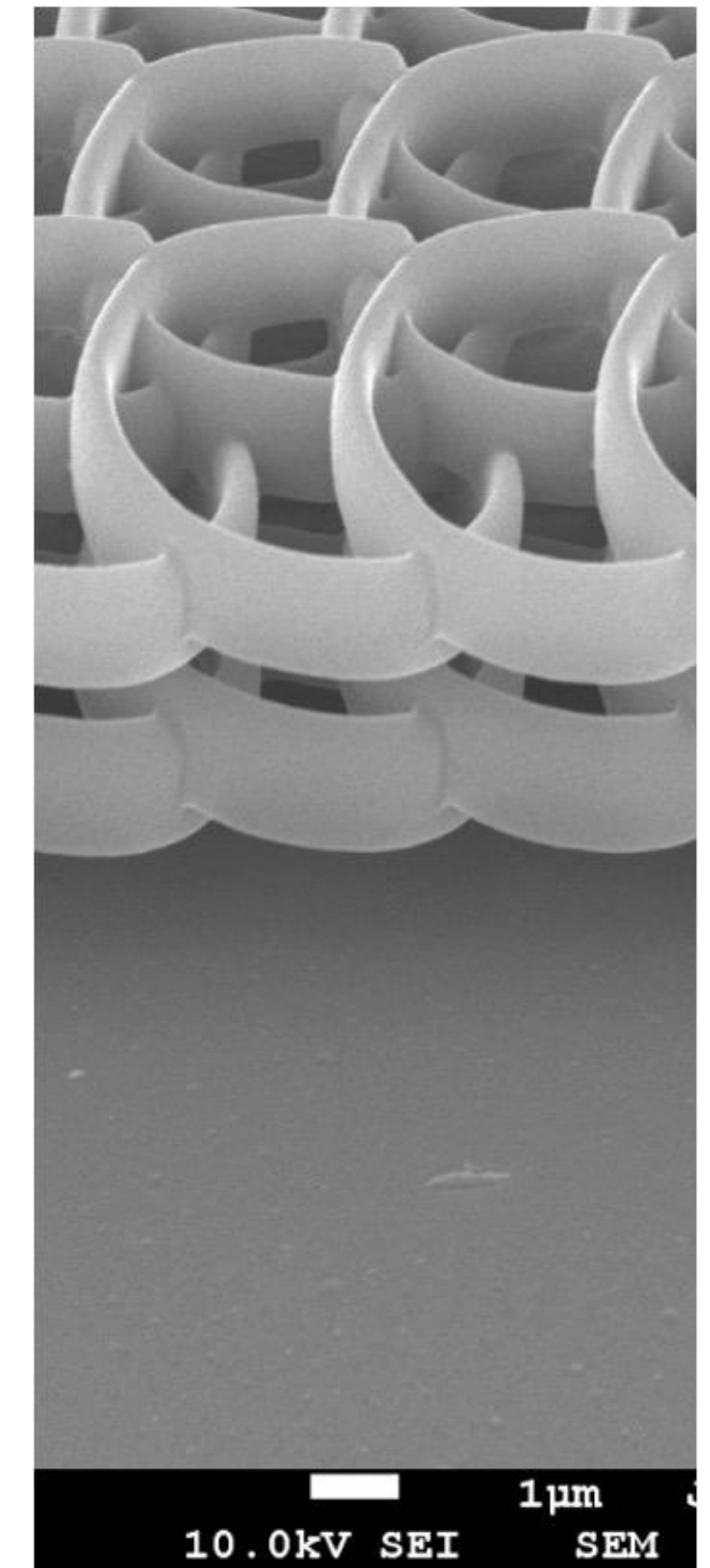


Схема DLW-печати



Образование вокселя

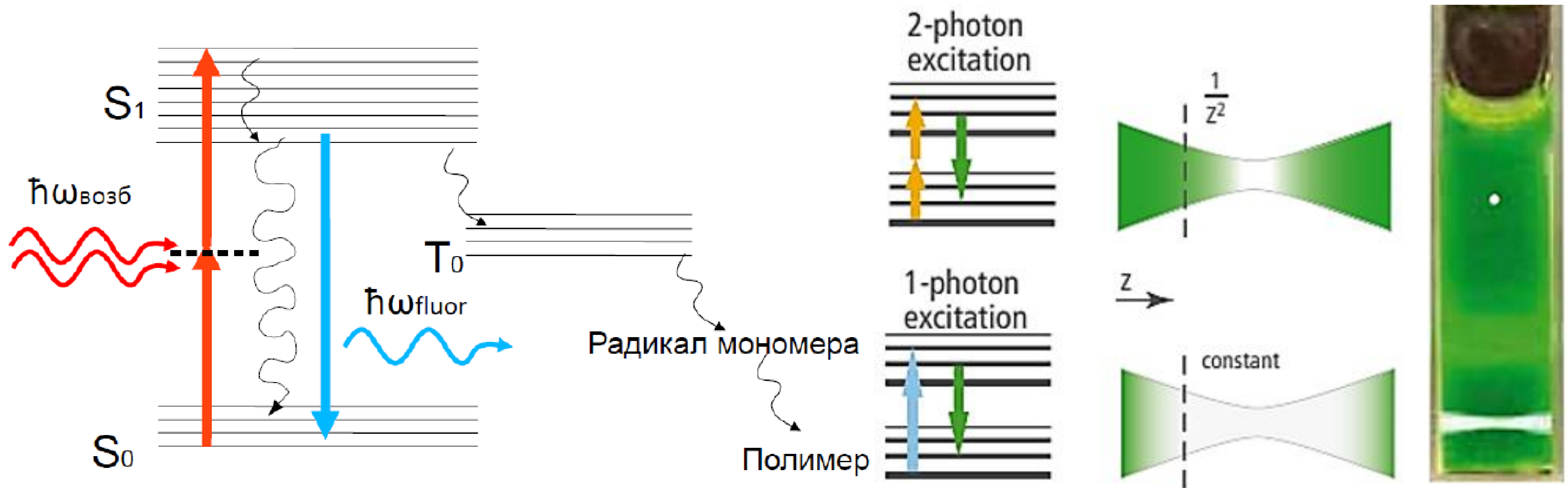


Снимок в РЭМ
хиральной
структуры

Двухфотонное поглощение в фотоинициаторе

Материал для DLW: мономер + фотоинициатор.

Пример: триакрилат + 4-Met-C5, коммерческий фоторезист IP-Dip



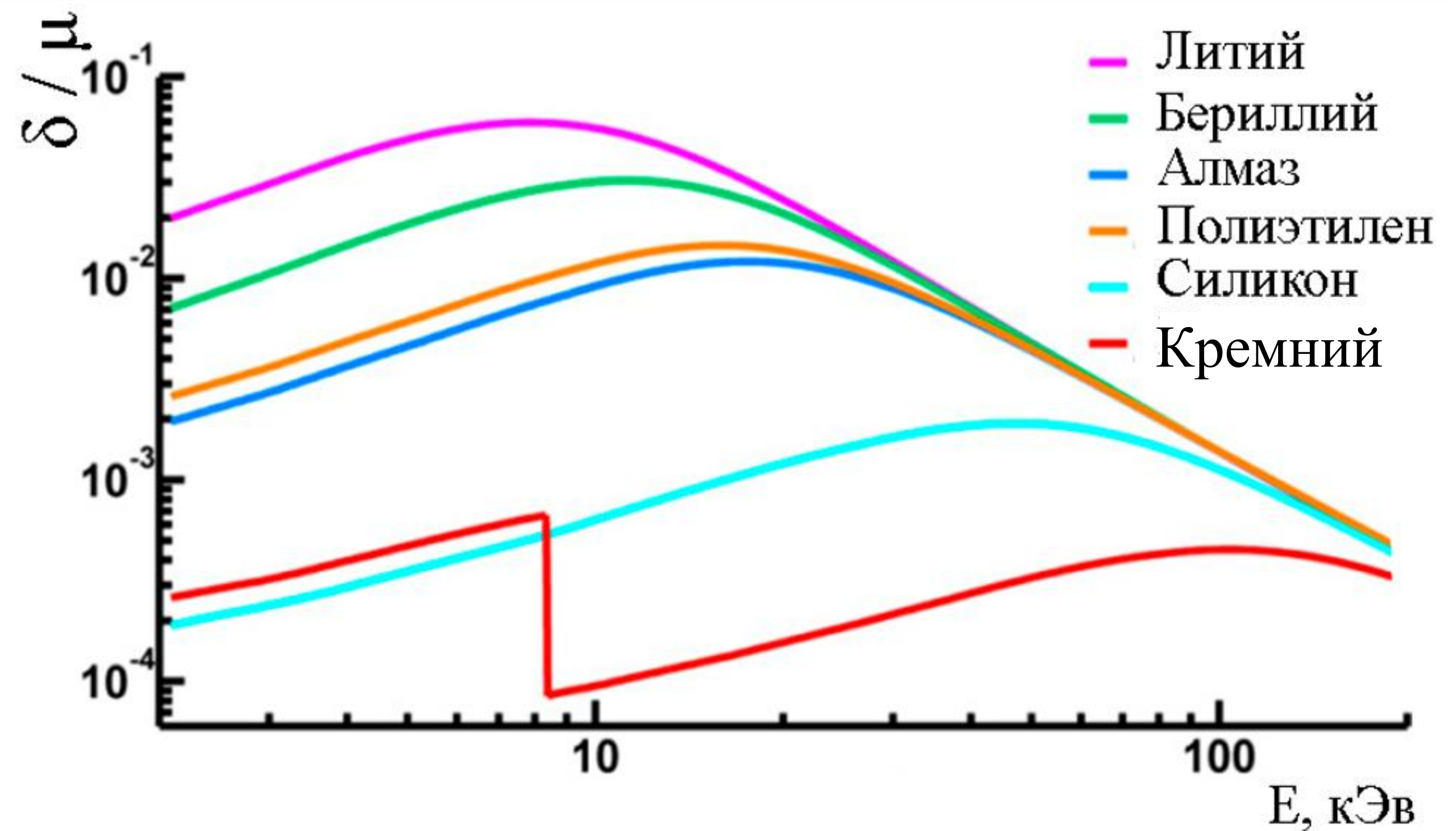
Преломление рентгеновского излучения

Для рентгеновского излучения ($\lambda = 10^{-2} - 10^2 \text{ \AA}$)

$$n = 0,9999999 \approx 1$$

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

$$\beta = \lambda\mu/4\pi.$$



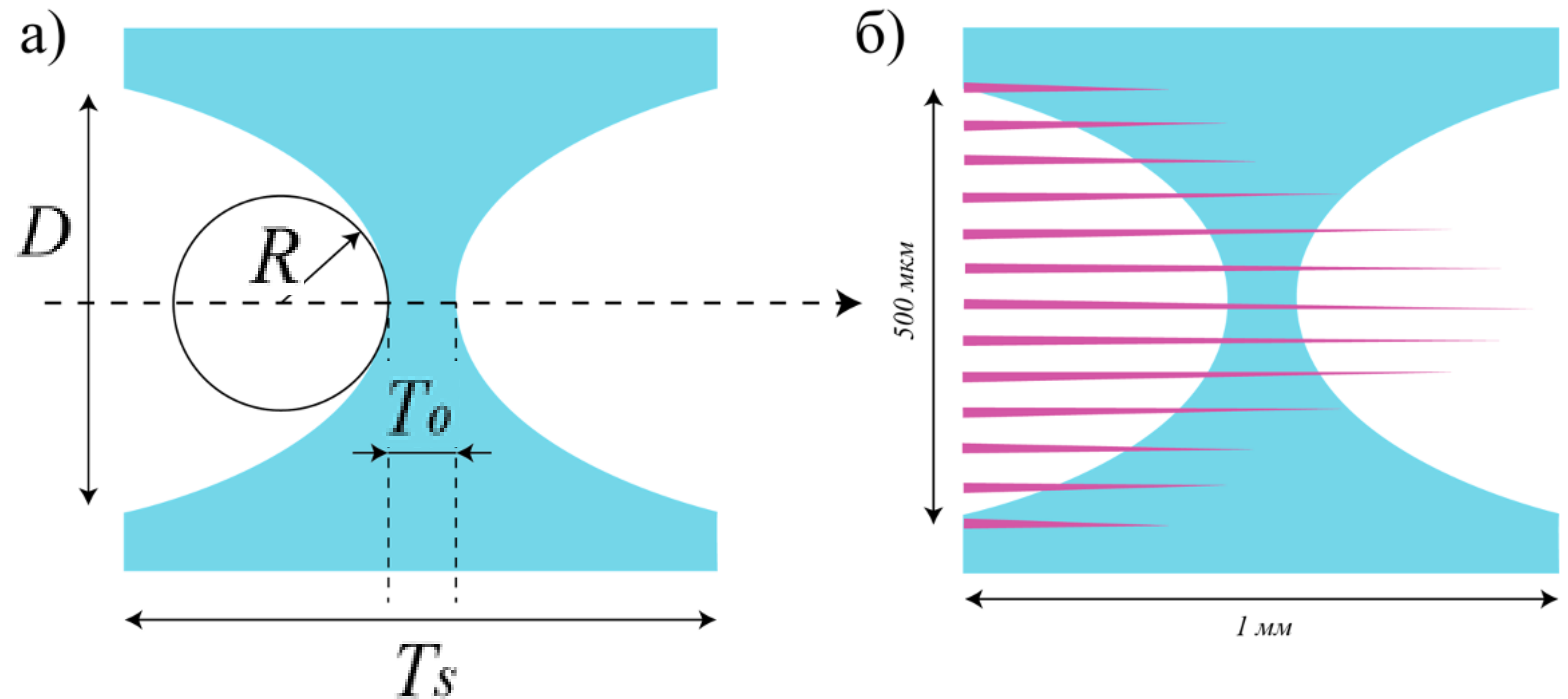
Составные преломляющие рентгеновские линзы (СПЛ)

$$F = \frac{R}{2N\delta}, \quad F \text{ — фокусное расстояние}$$

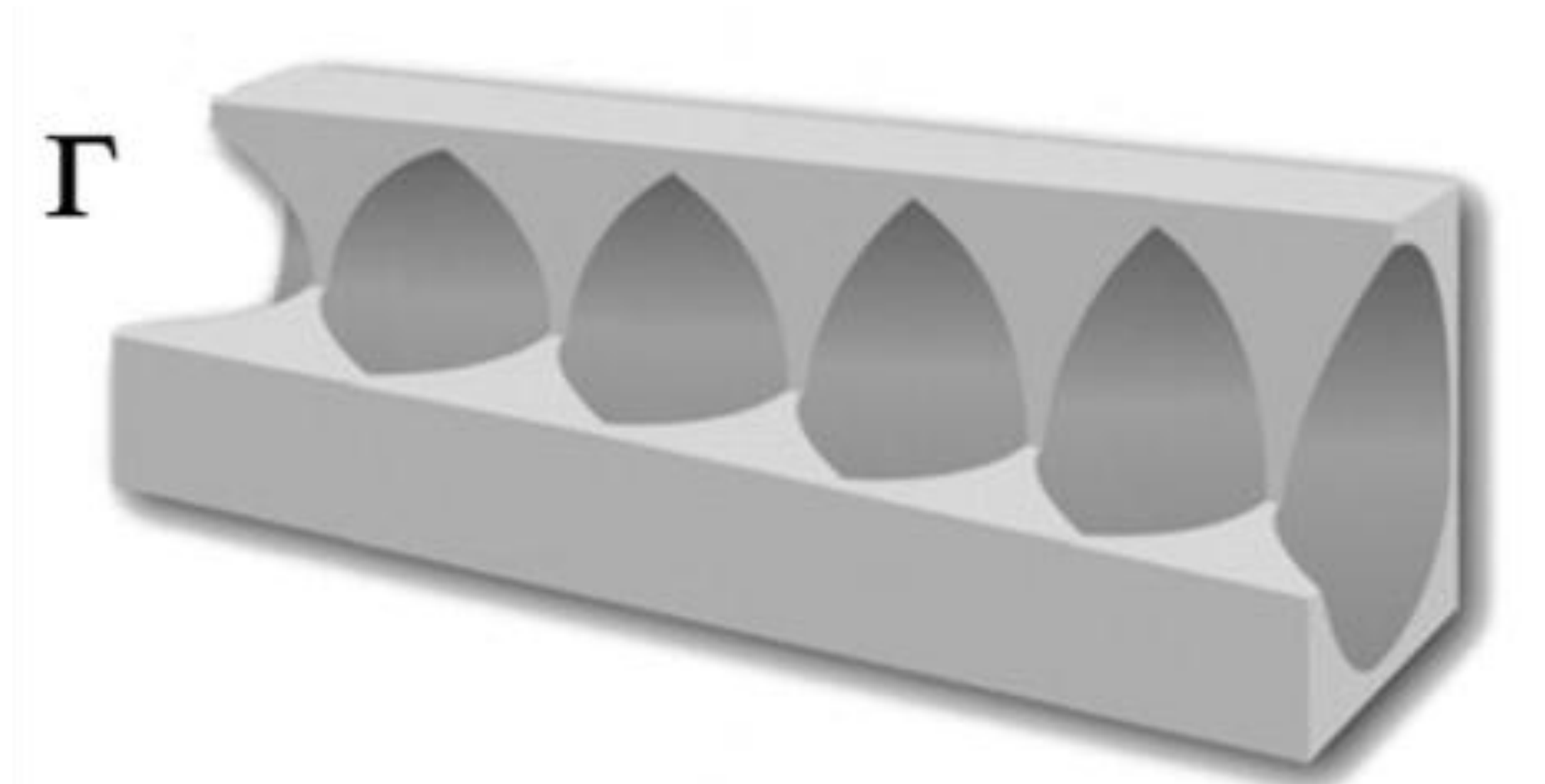
Учет поглощения

$$A_{eff} = \sqrt{8R/\mu N}$$

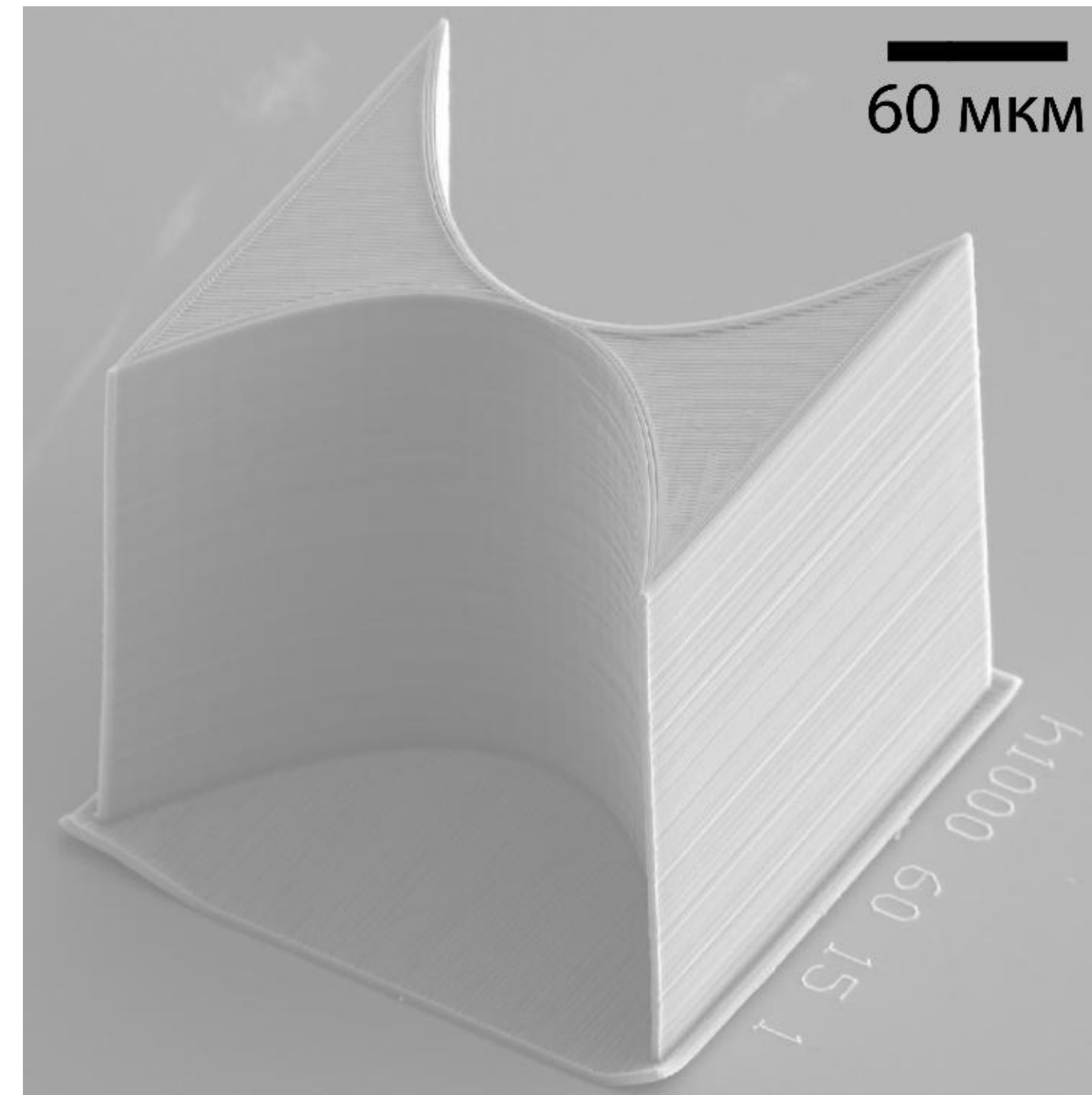
(когда $I\left(\frac{A_{eff}}{2}\right) = \frac{I_0}{e^2}$),



Составные преломляющие рентгеновские линзы (СПЛ)

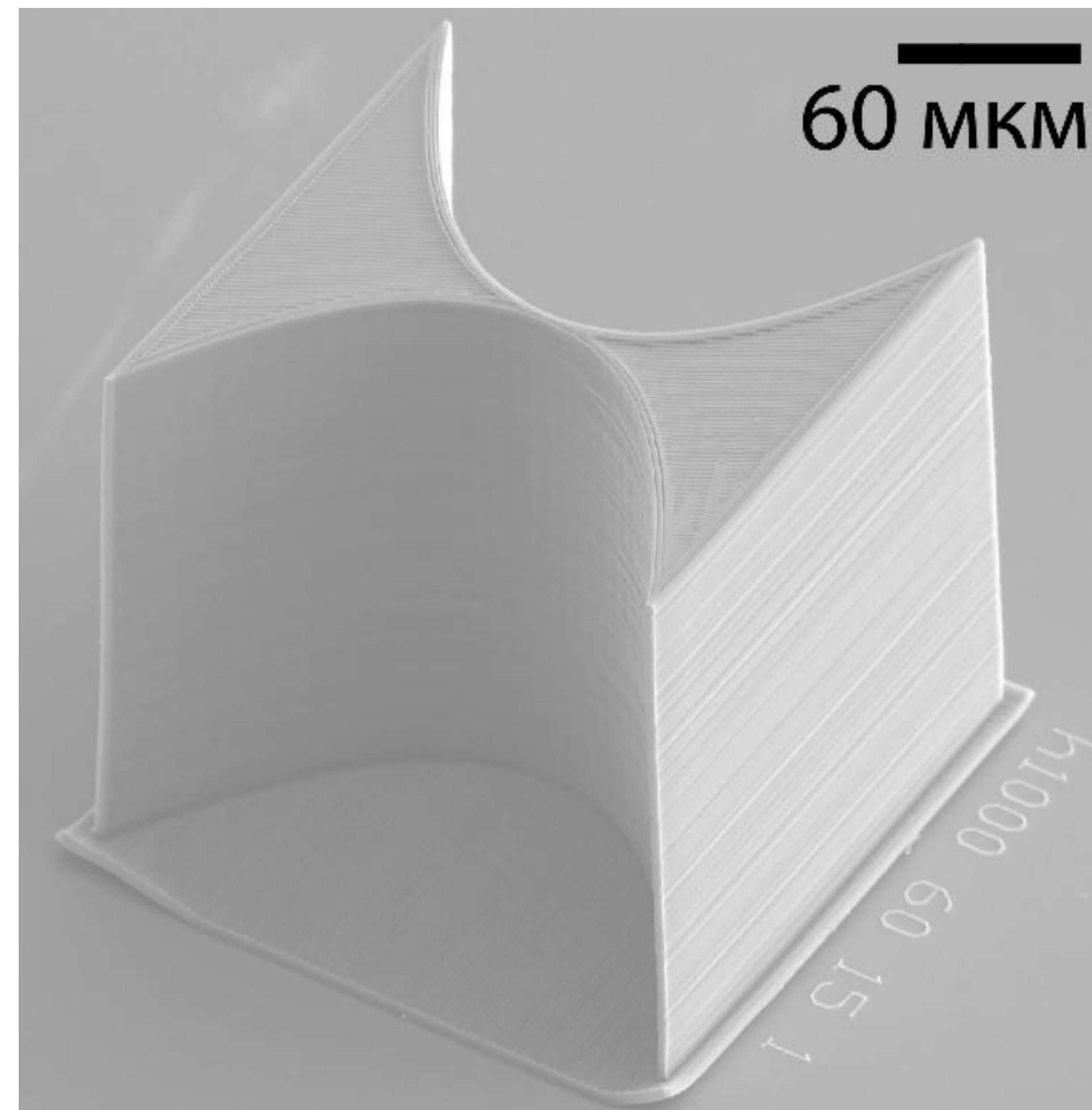
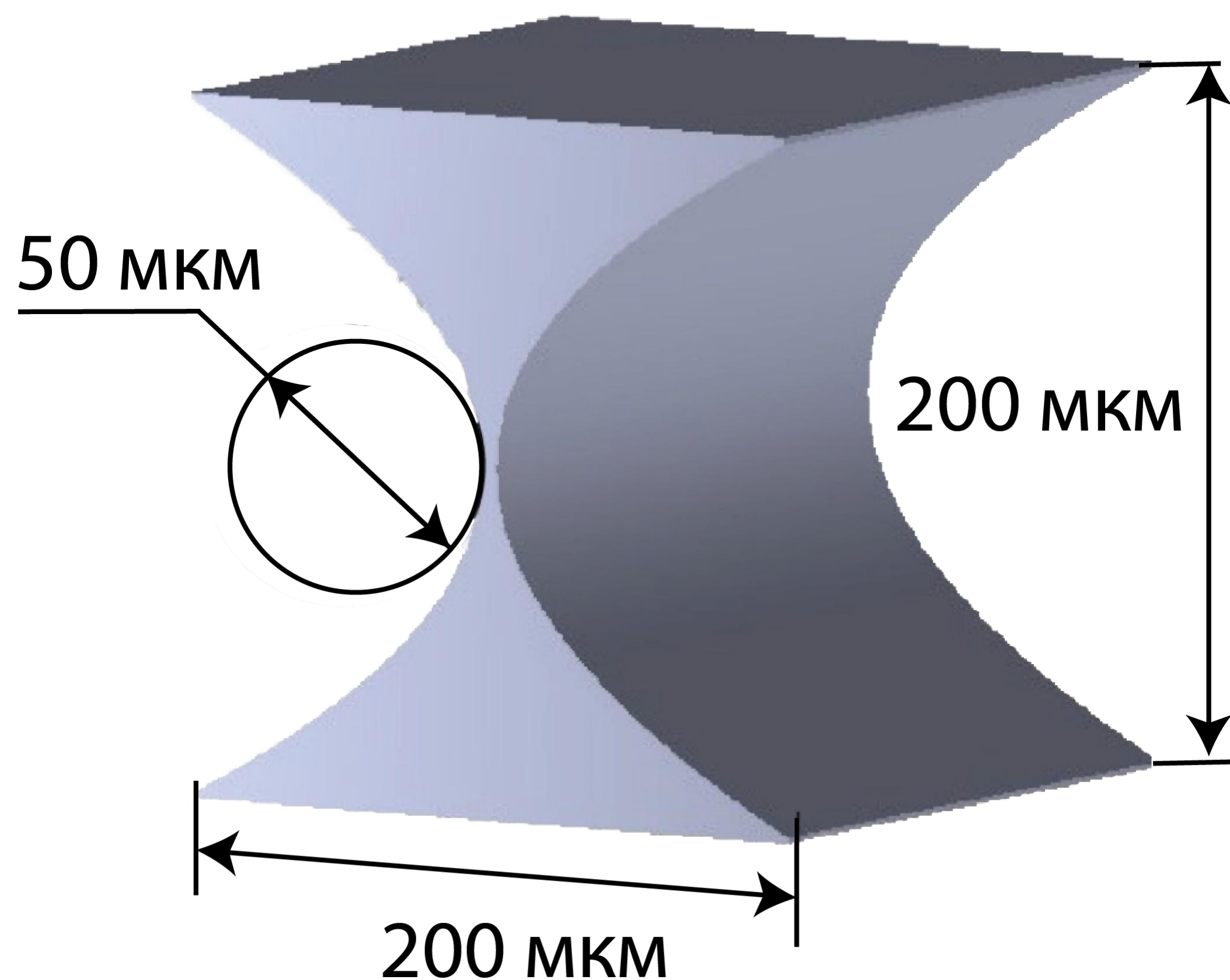


Составная преломляющая линза



Одиарная 1D преломляющая рентгеновская линза, изготовленная методом DLW

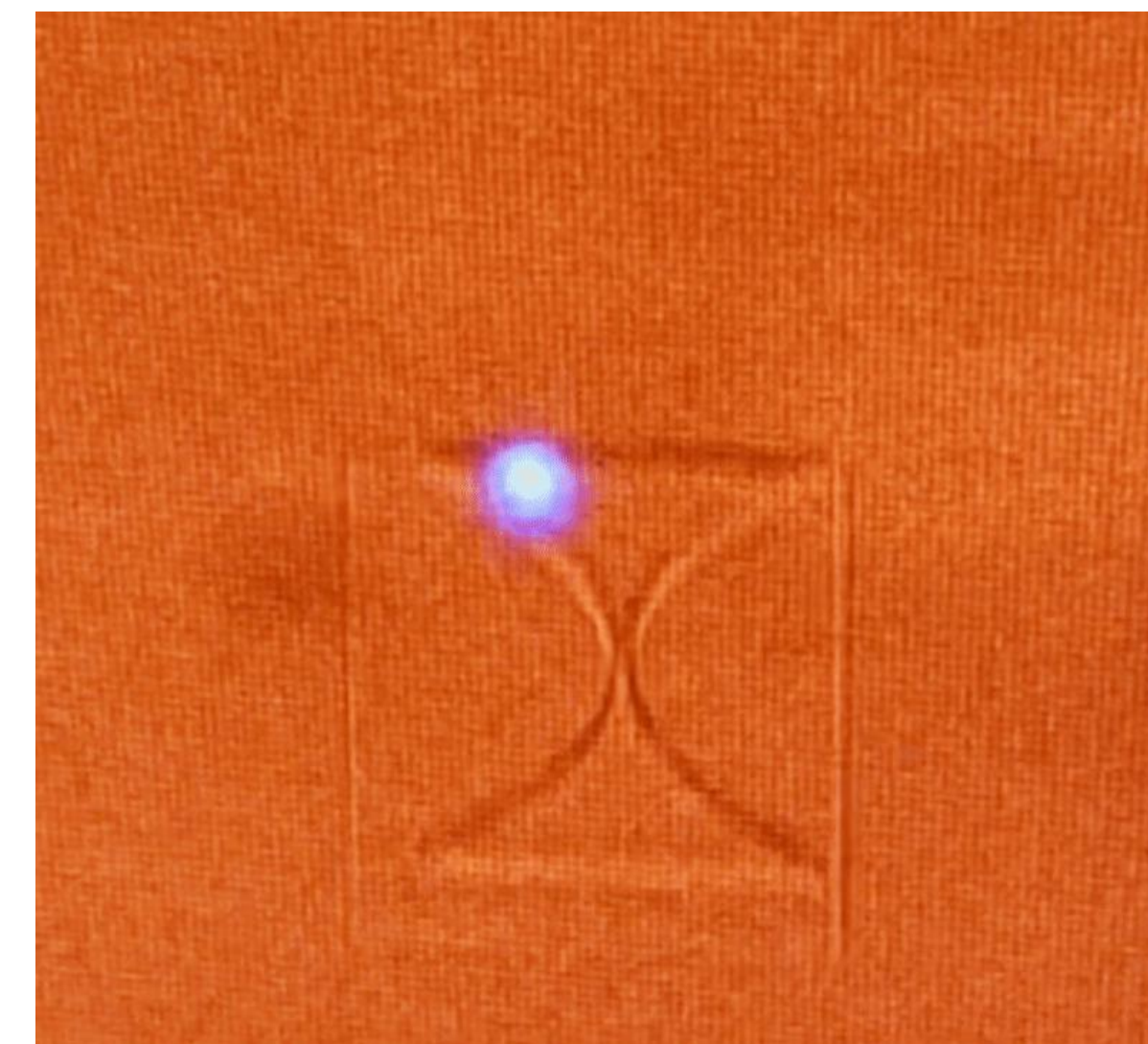
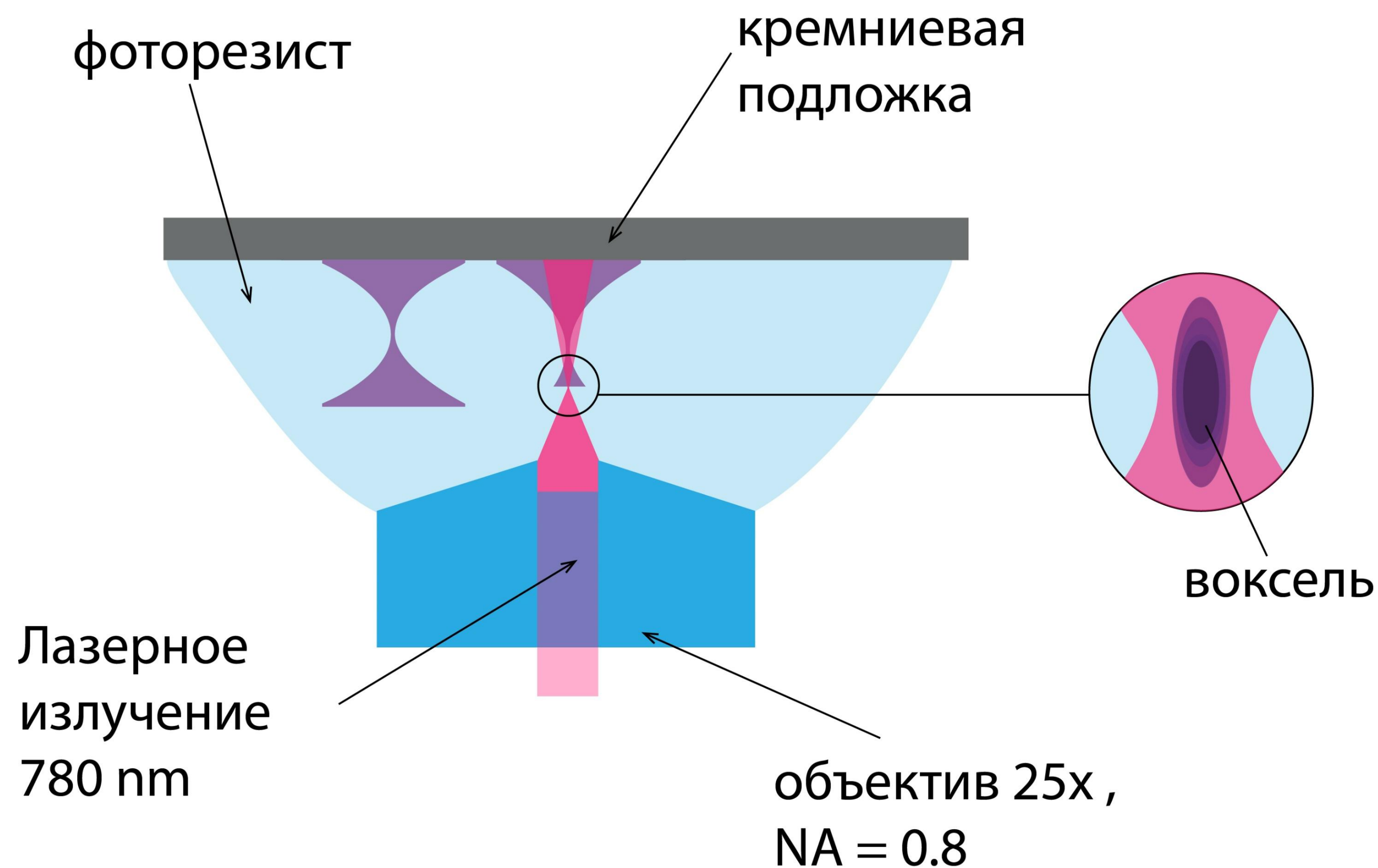
Разработка СПЛ



Одиарная 1D преломляющая рентгеновская линза

Разработка СПЛ

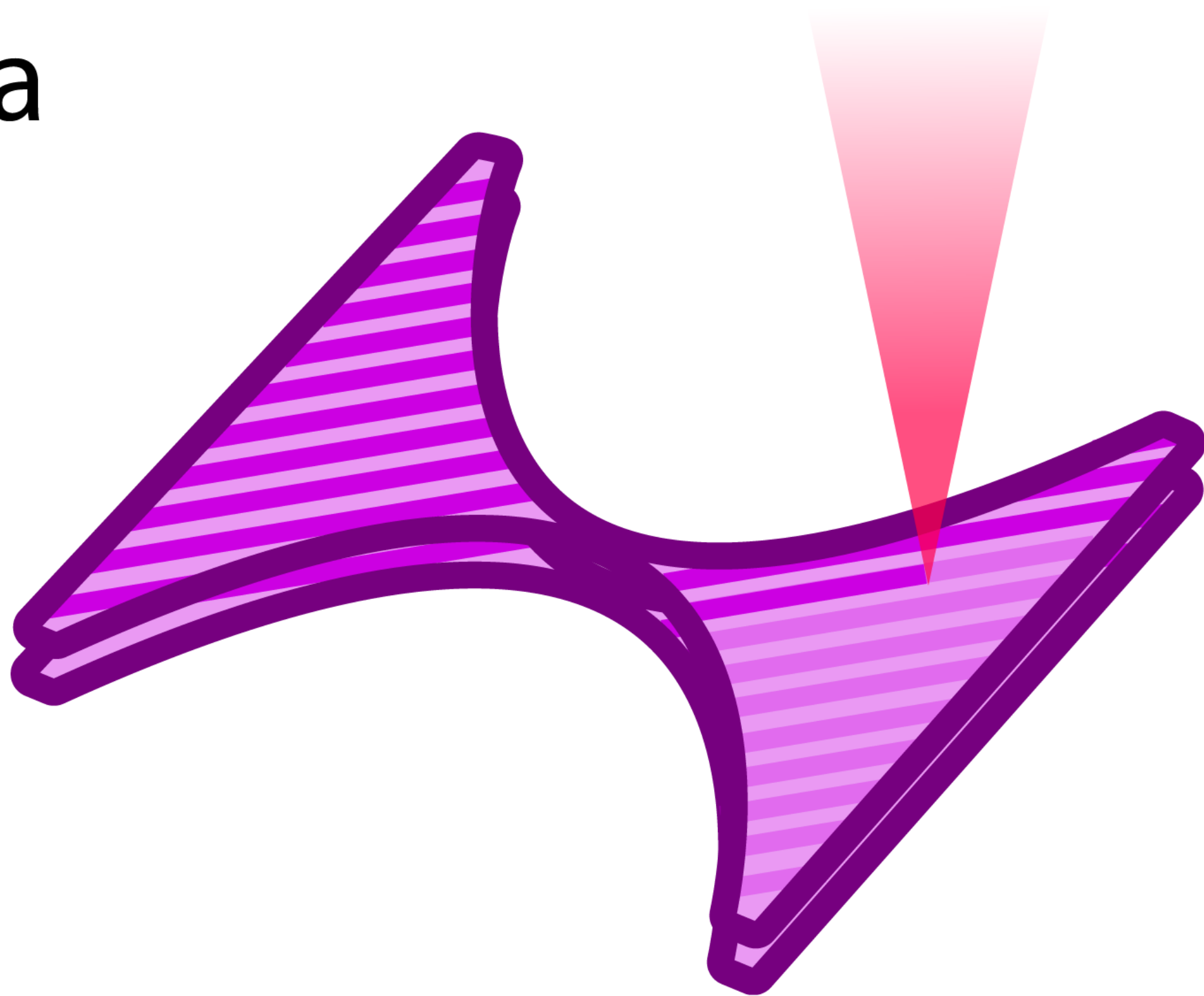
Материал: фоторезист IP-Dip ($\text{CH}_2\text{N}_{0.001}\text{O}_{0.34}$)



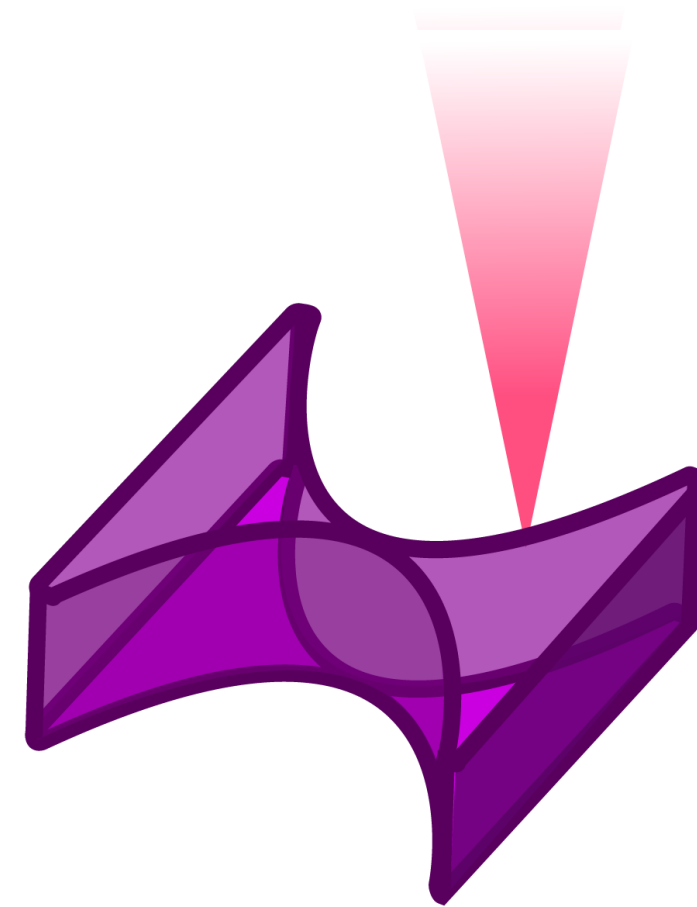
Пиковая мощность до 3 кВт

Влияние способа заполнения на время печати и качество структур

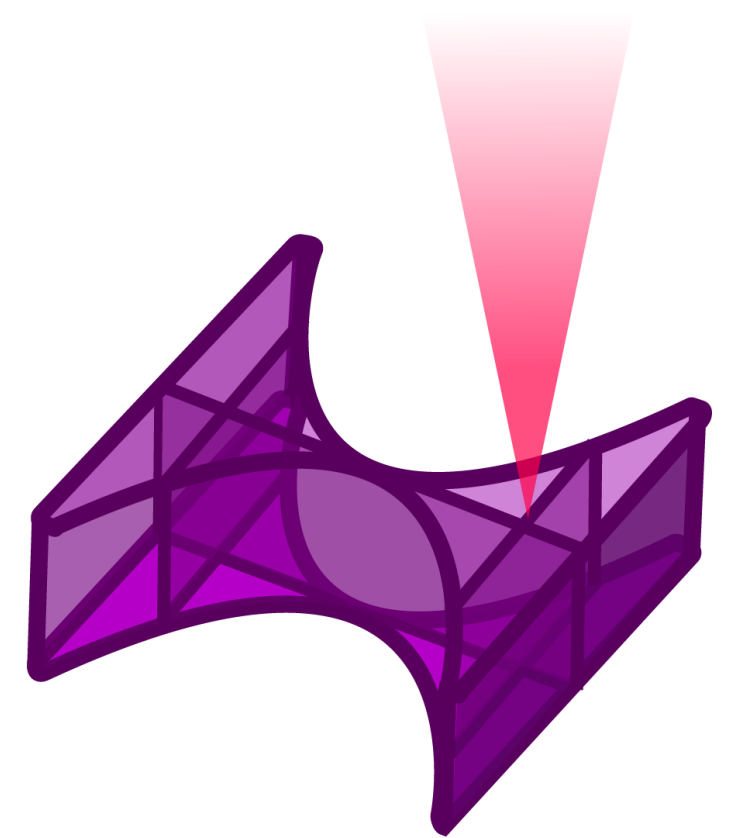
a



b



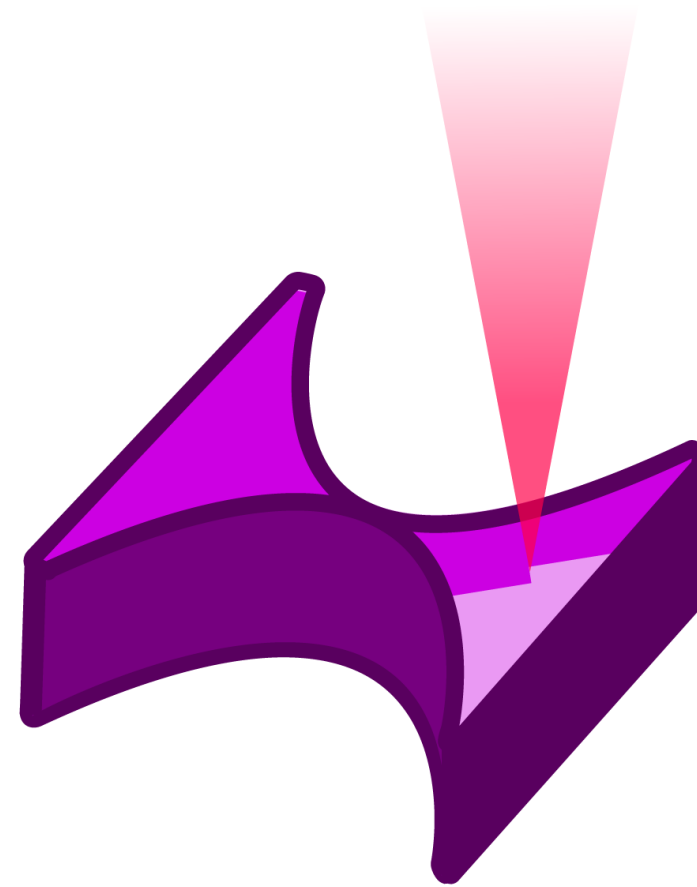
c



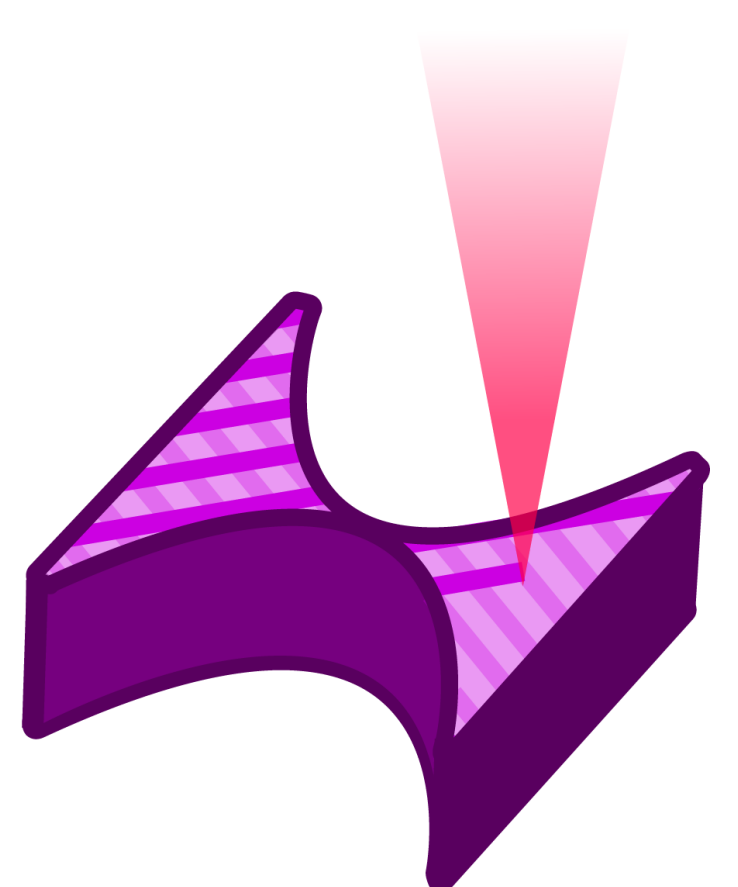
$t = 2.5$ ч.

$t = 3.8$ ч.

d



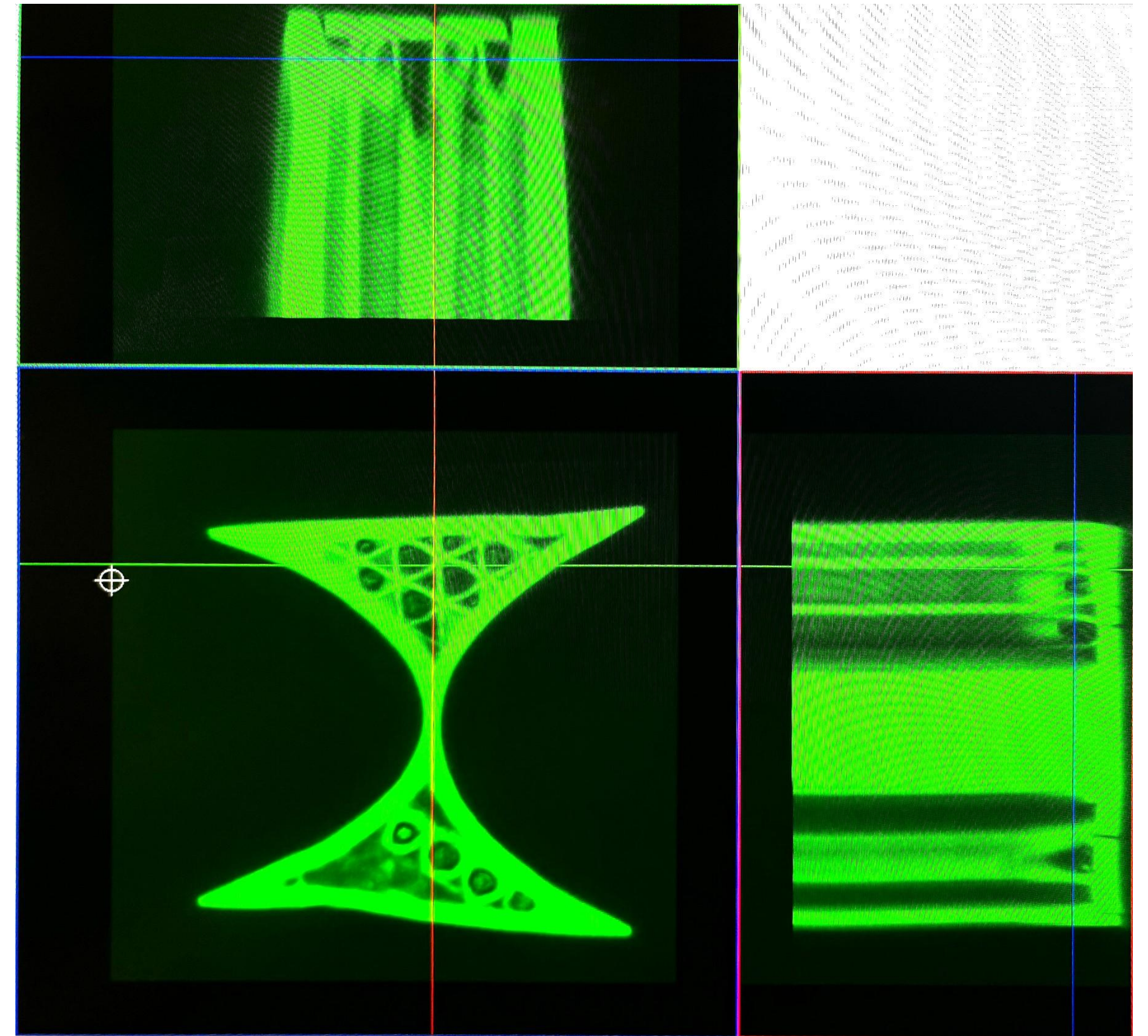
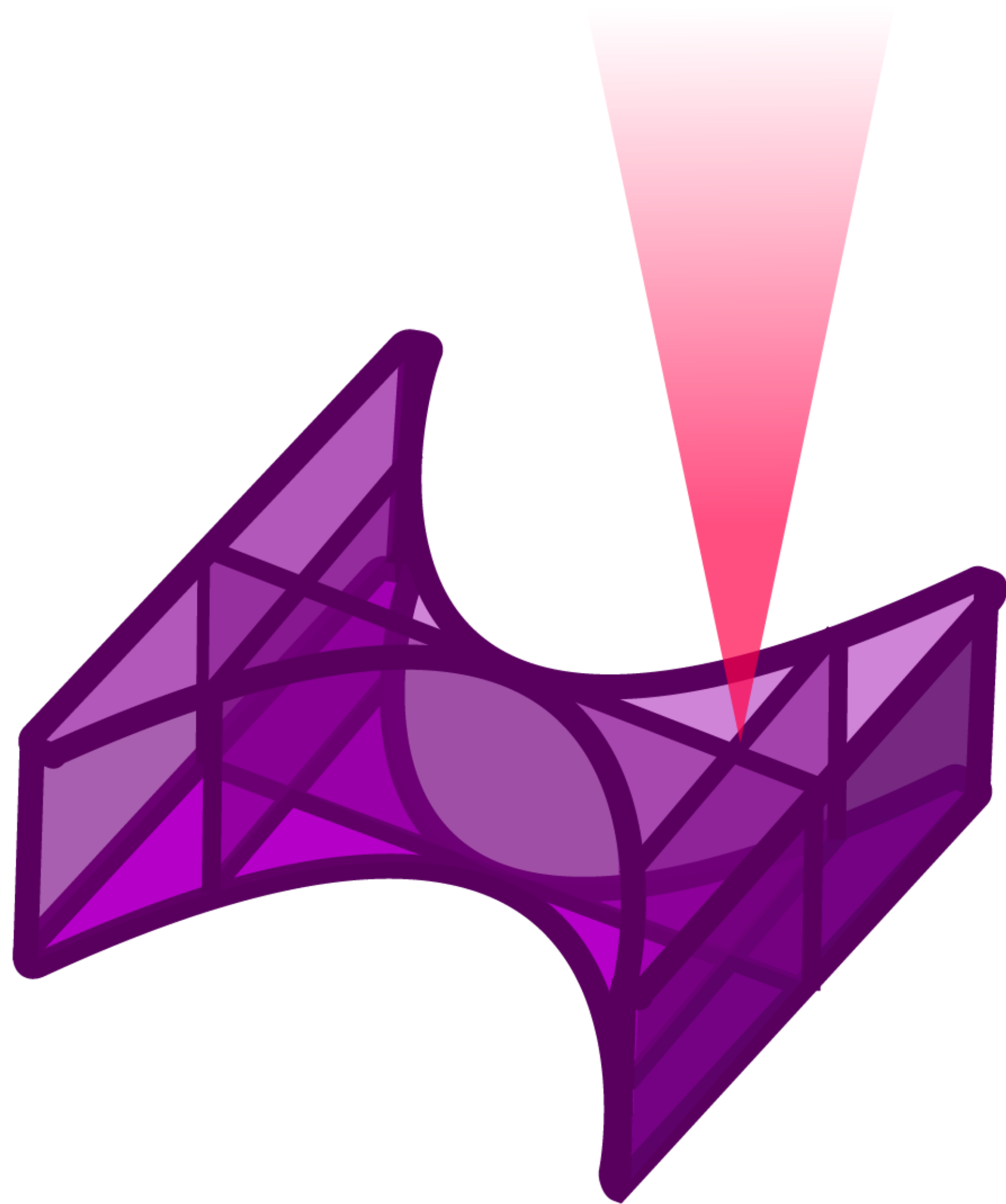
e



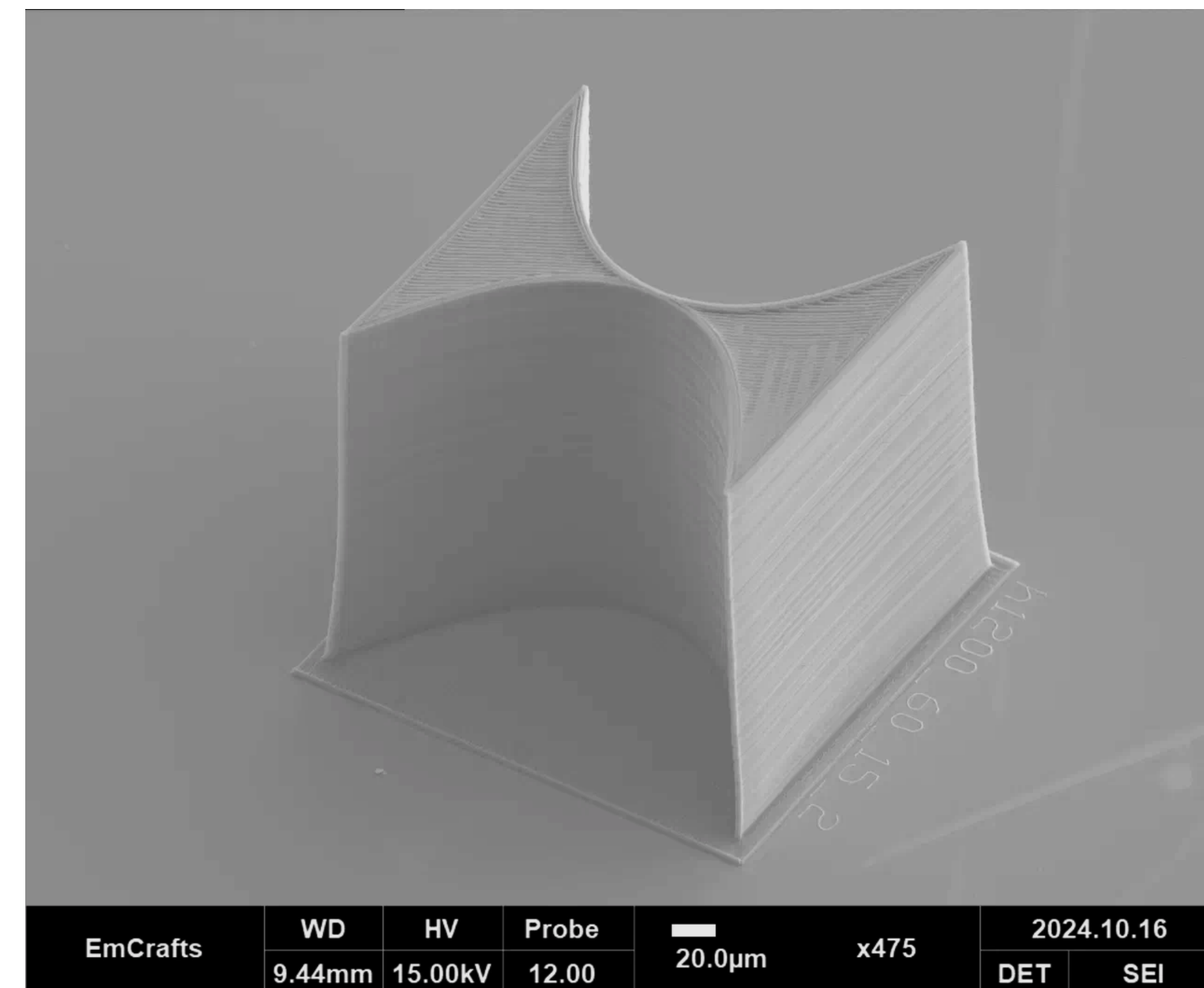
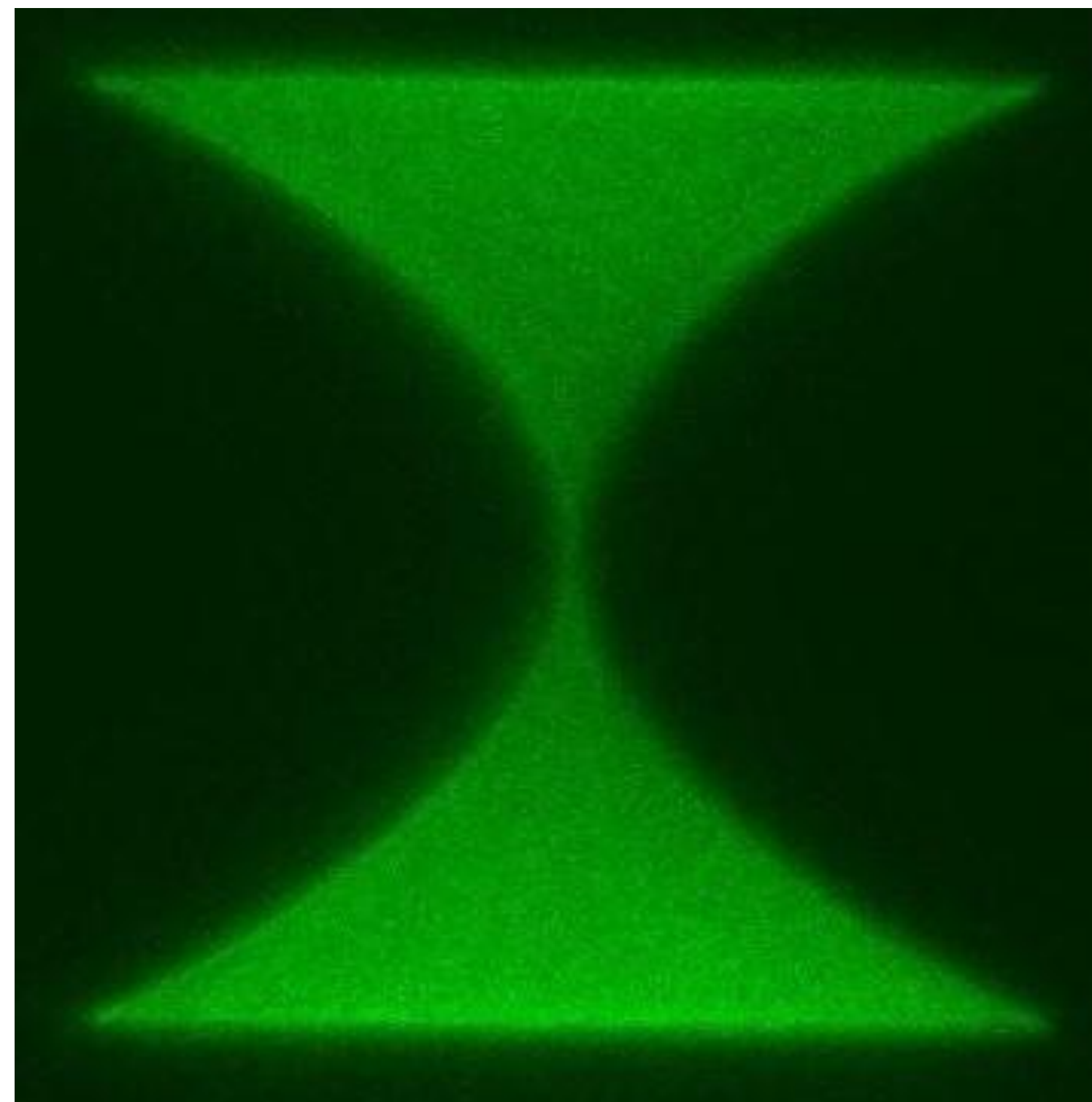
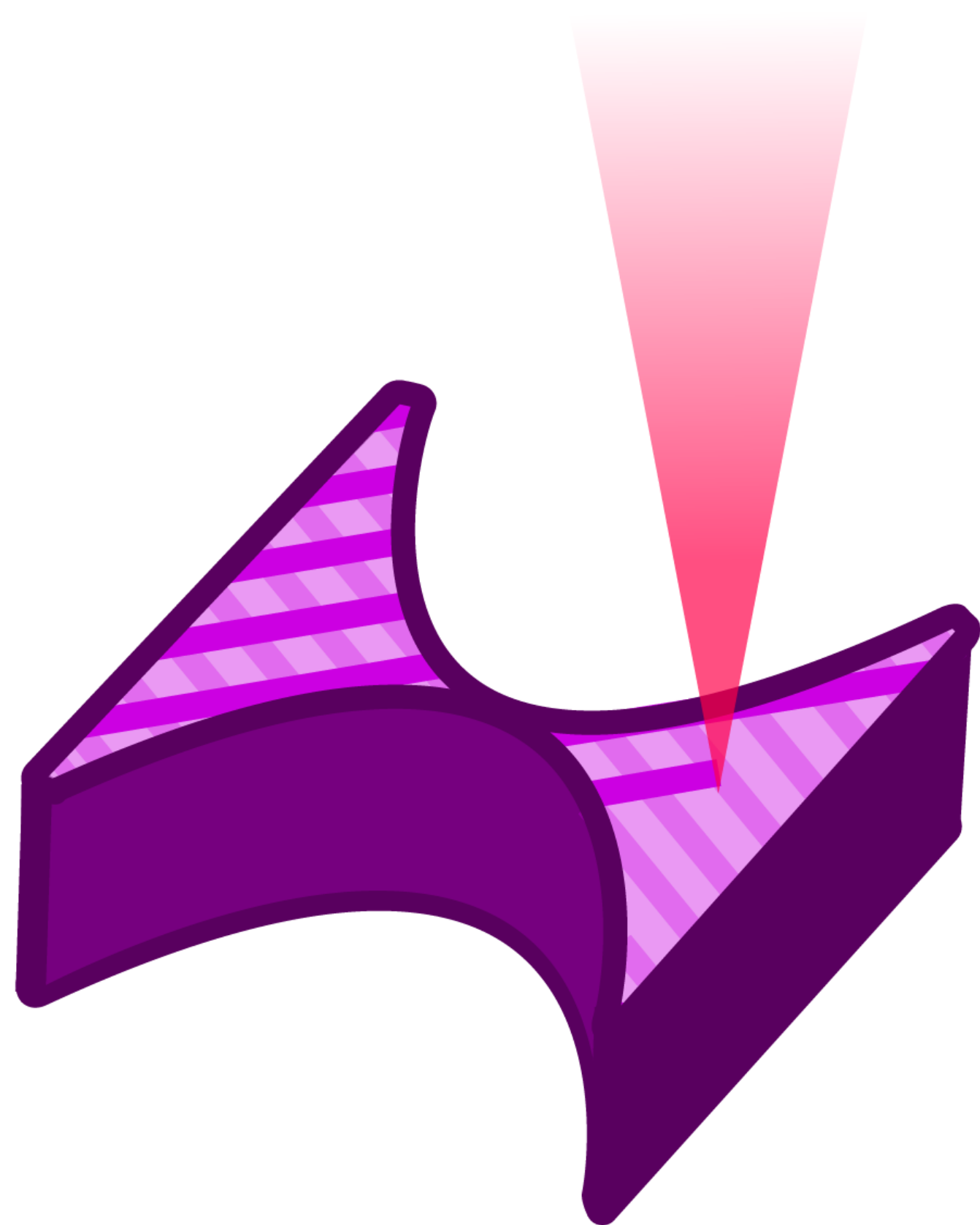
$t = 9.0$ ч.

$t = 6.0$ ч.

Влияние способа заполнения на время печати и качество структур



Влияние способа заполнения на время печати и качество структур



Апертура 185 мкм, $R = 45$ мкм. Расстояние между слоями 1.2 мкм, между штрихами 1.0 мкм

Исследование в пучке синхротронного излучения

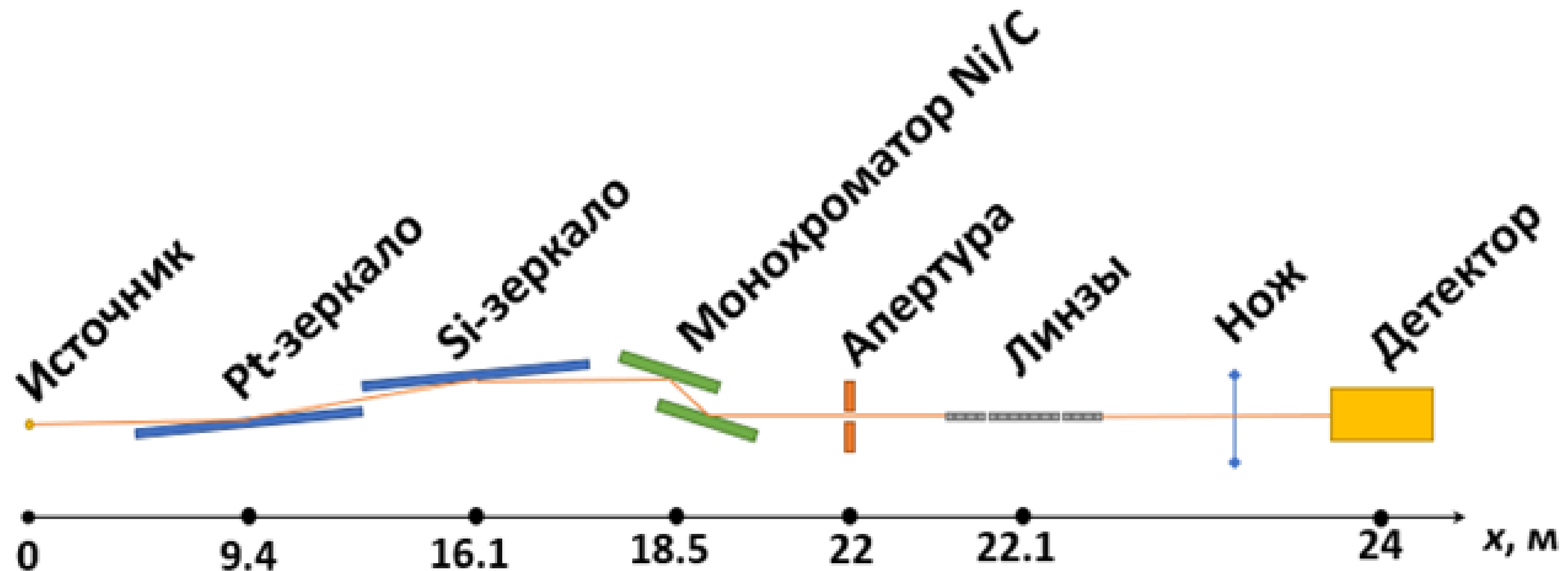
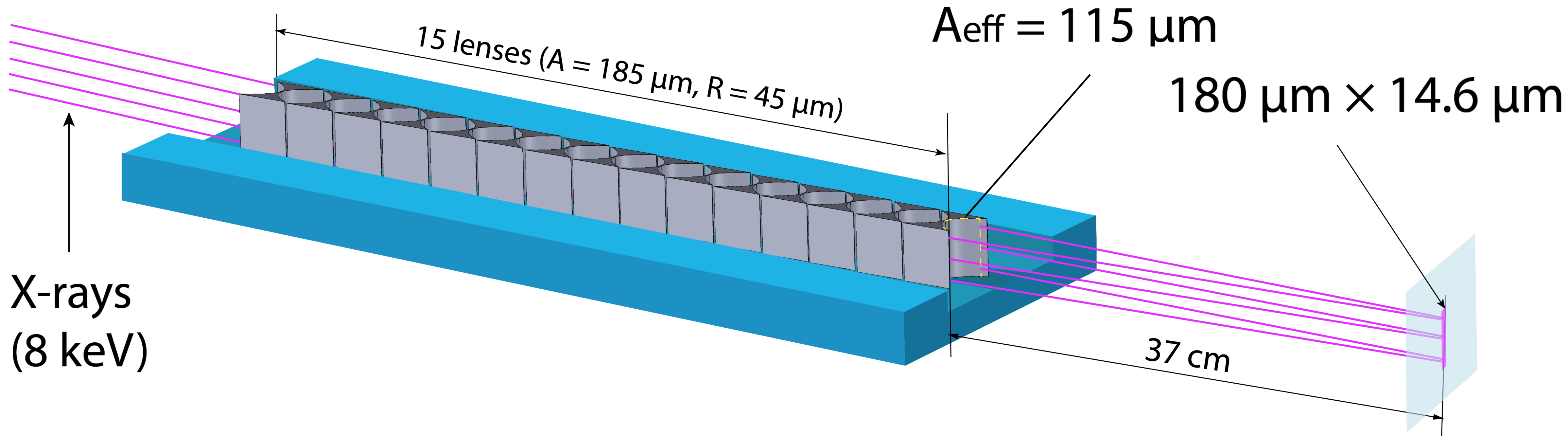


Схема прохождения СИ на станцию «Микрофокус» синхротрона «КИСИ-Курчатов»

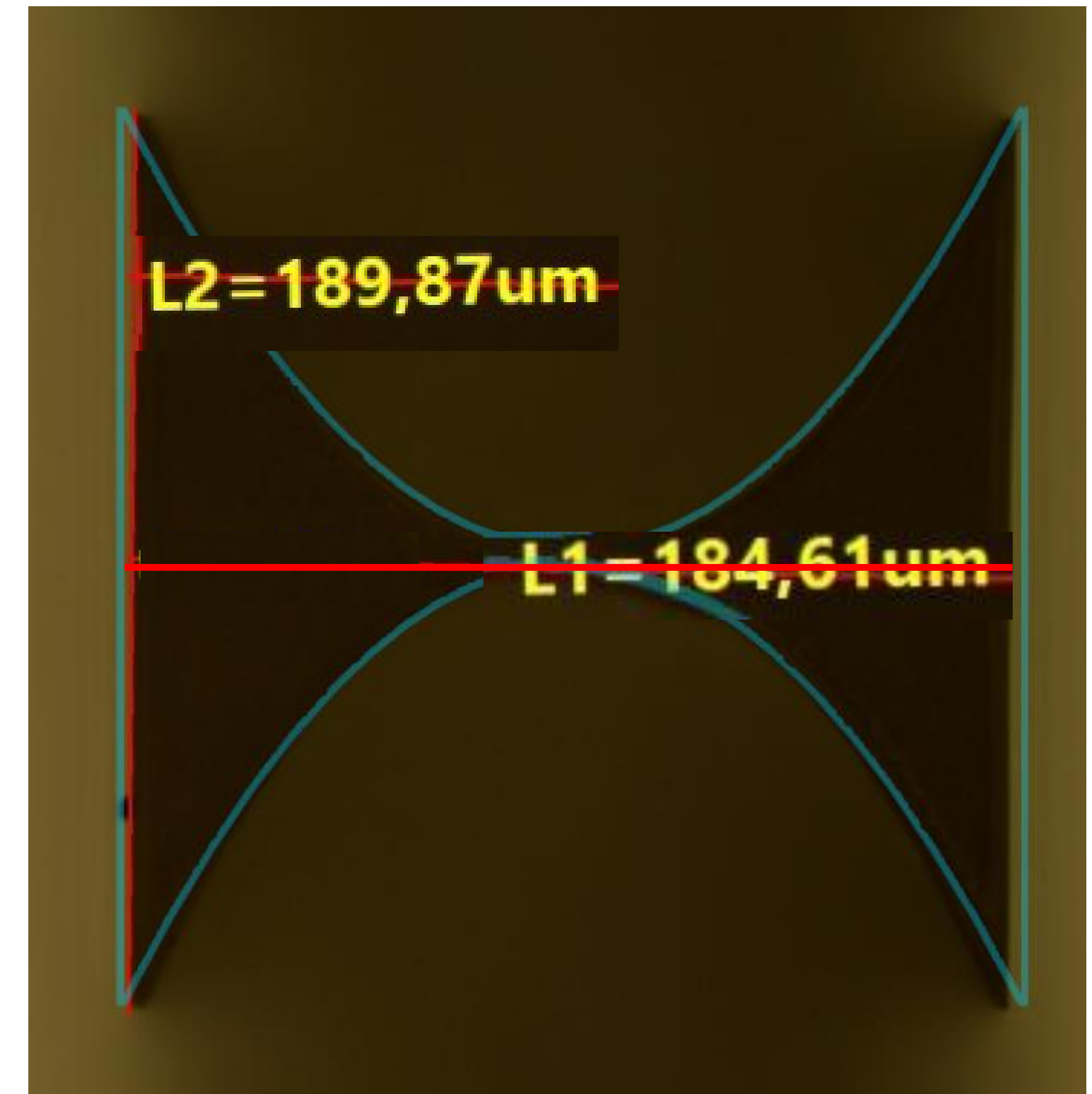
Исследование в пучке синхротронного излучения



	$E = 8 \text{ кэВ}$	$E = 12 \text{ кэВ}$
$F_{\text{теор}}, \text{ м}$	0,349	0,786
$F_{\text{эксп}}, \text{ м}$	$0,40 \pm 0,04$	$0,92 \pm 0,01$

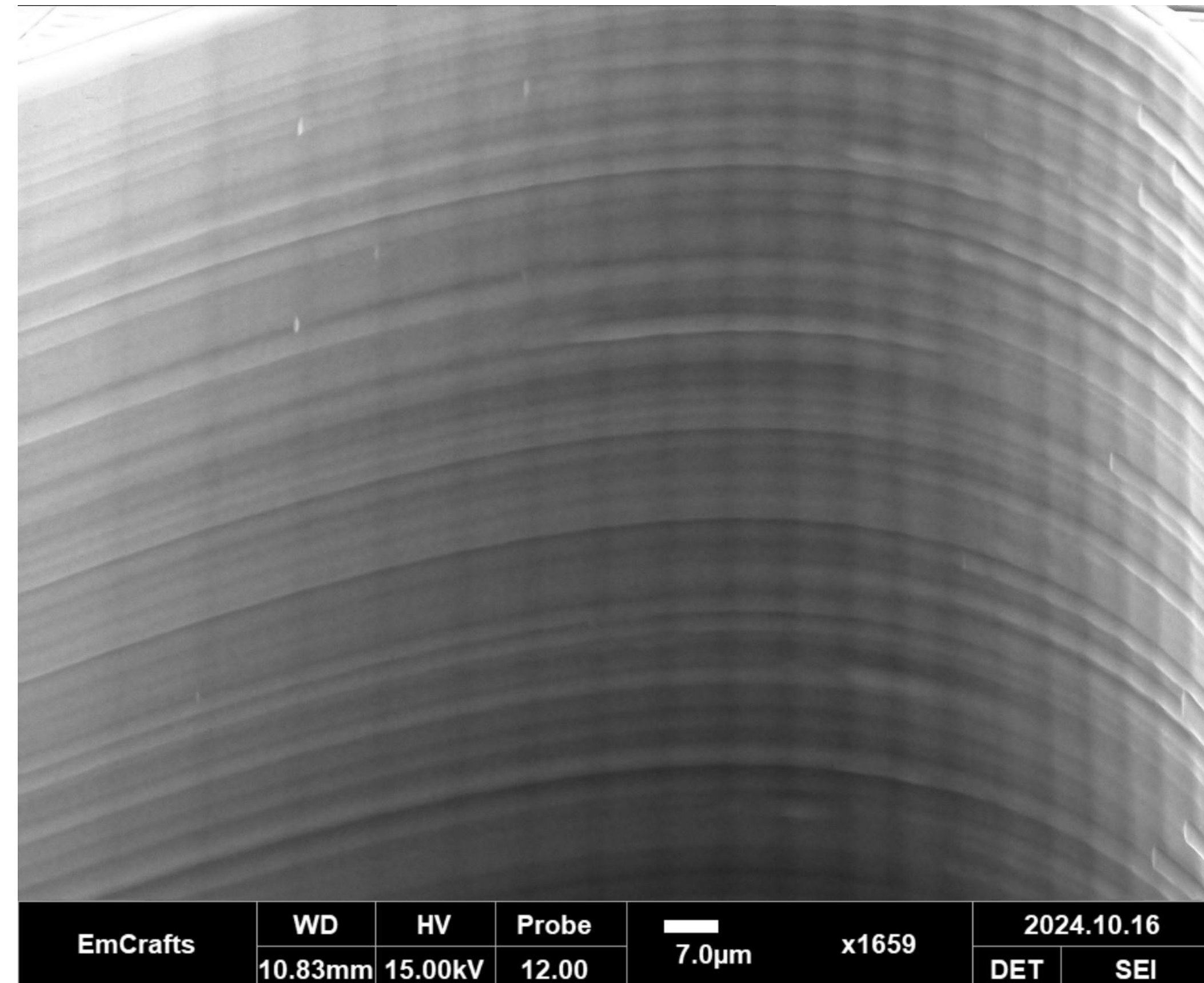
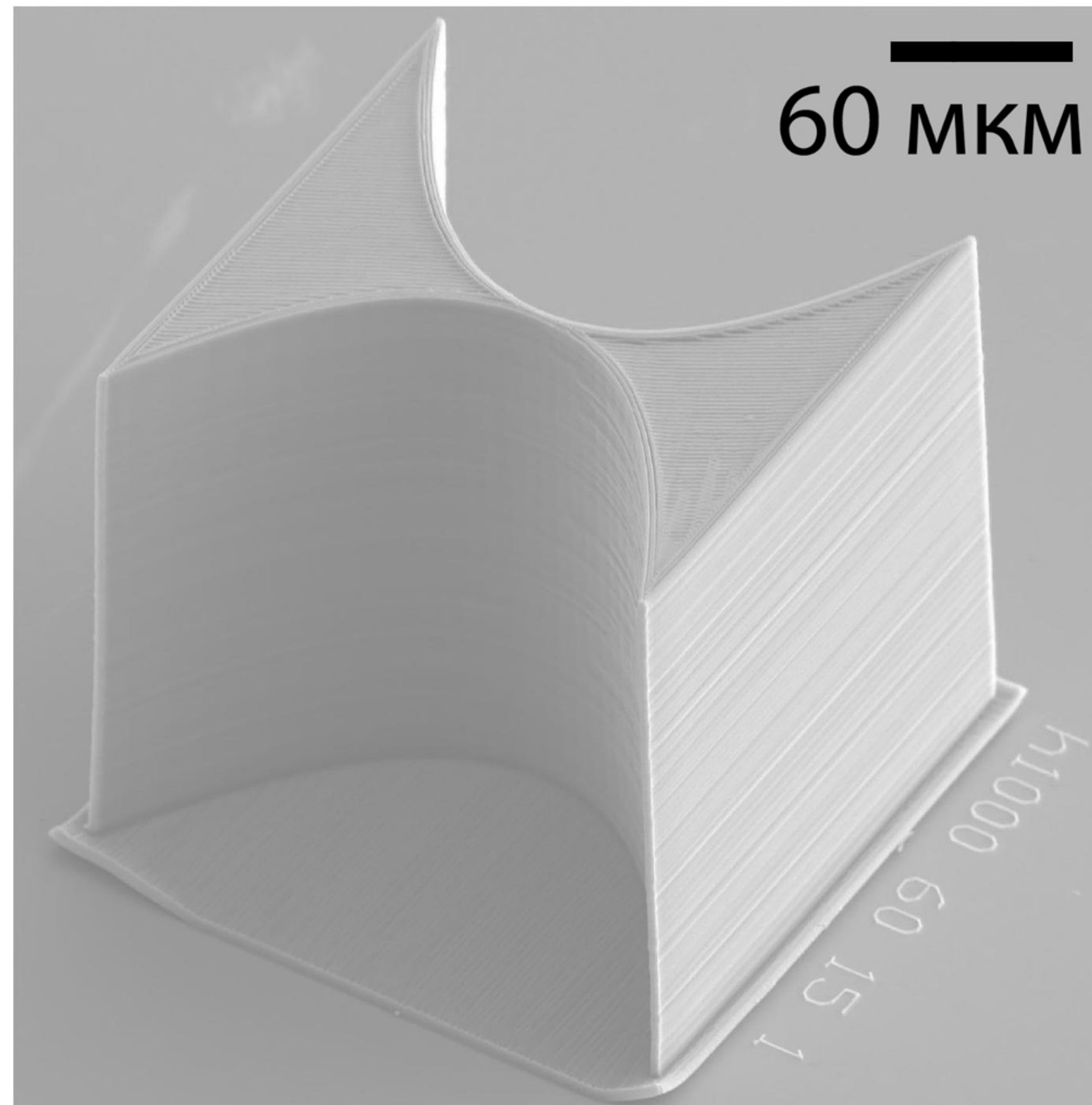
Анализ морфологии полимерных СПЛ

Размеры	A, мкм	L, мкм	R, мкм
Модель	205	202	50
Напечатанная структура	$184,59 \pm 0,71$	$188,53 \pm 1,43$	$45,16 \pm 0,67$
Напечатанная структура/ Модель	0,90	0,93	0,90

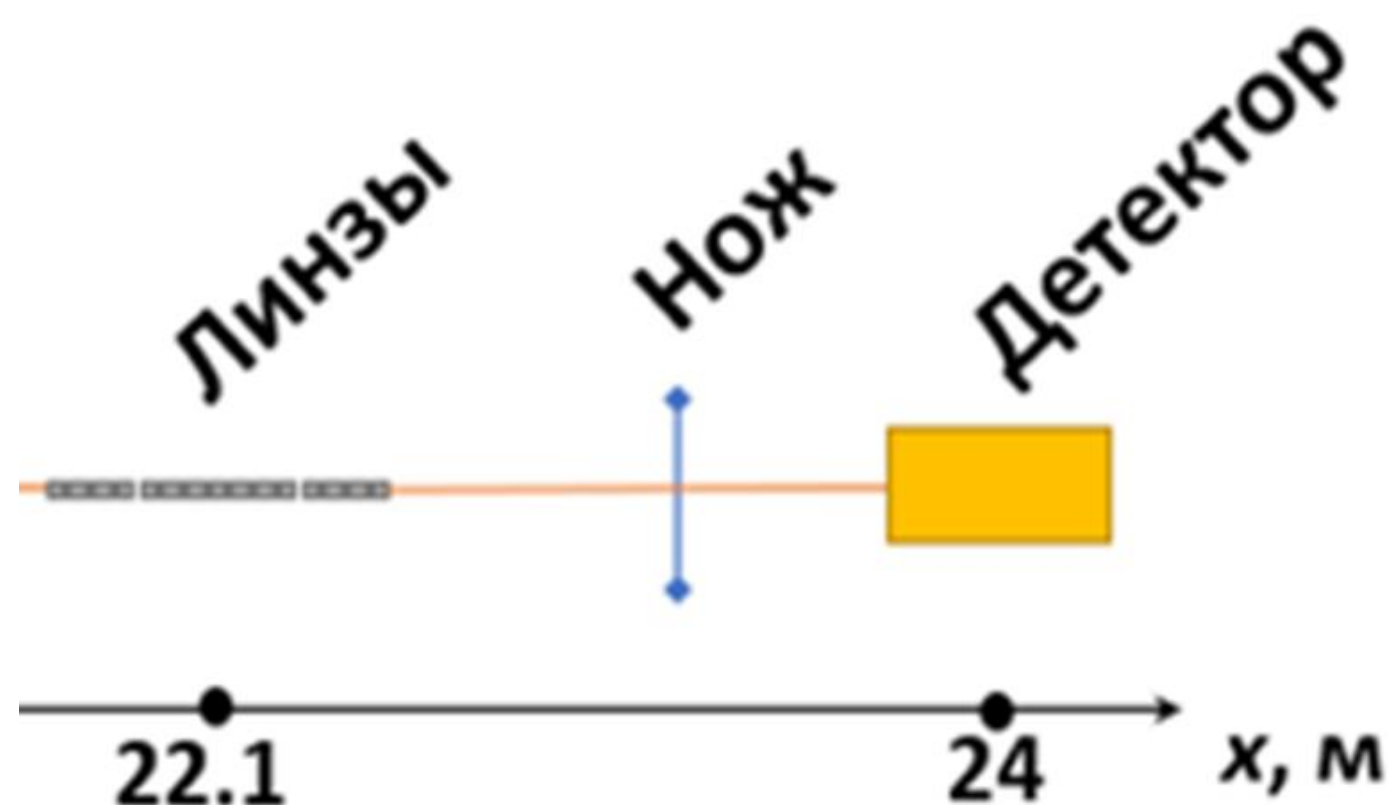
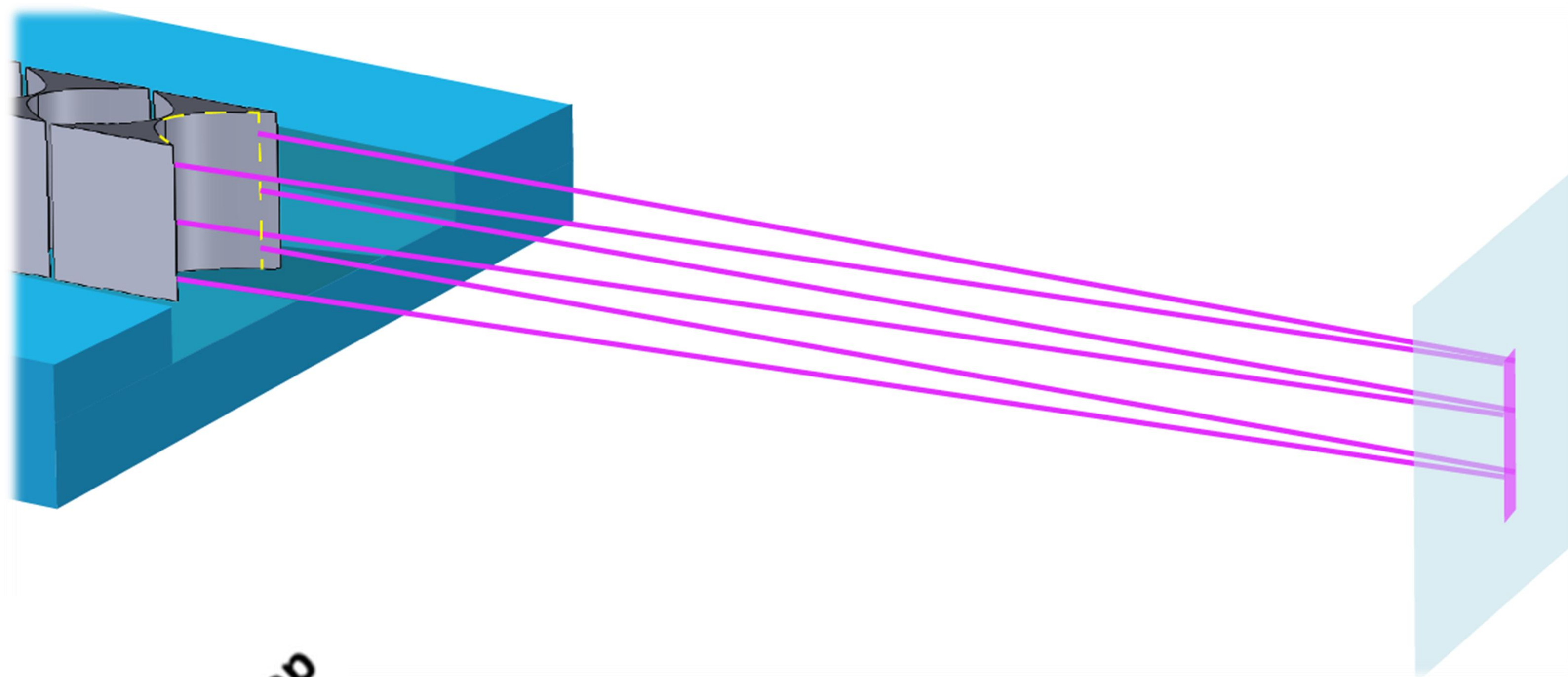


Анализ морфологии полимерных СПЛ

Шероховатость параболического профиля – 0,3 мкм (входит в допустимый диапазон для рентгеновских линз)



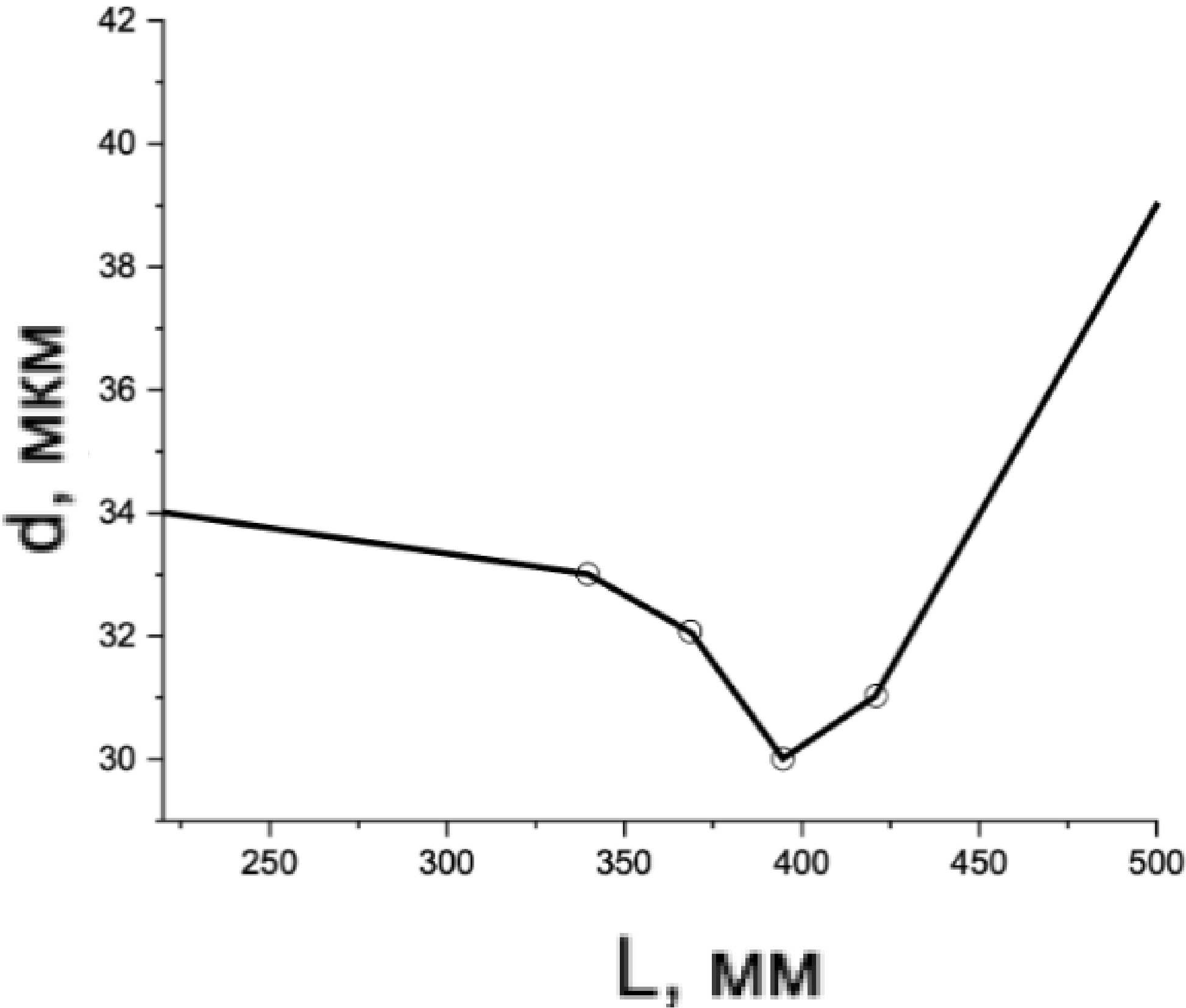
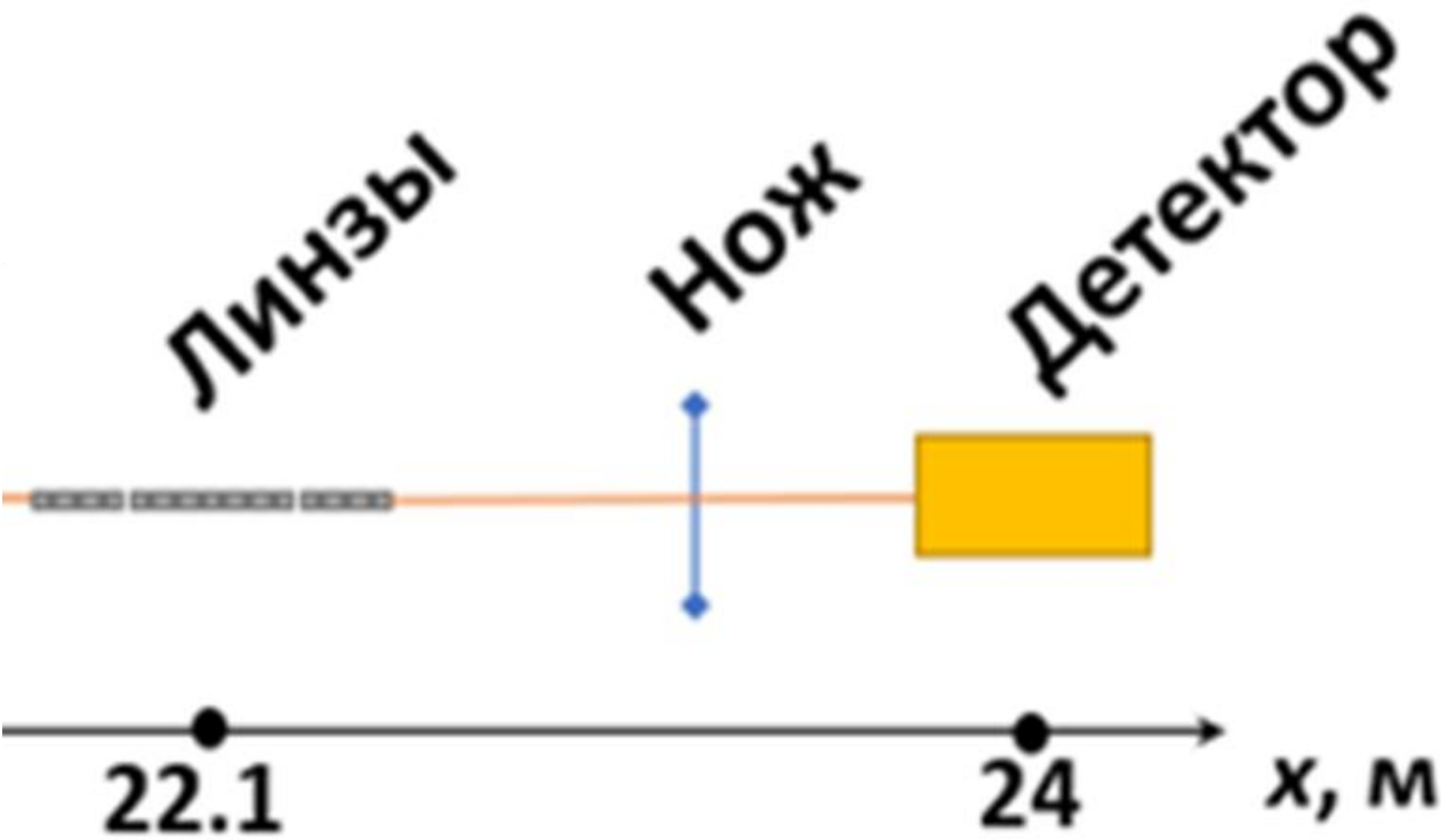
Анализ преломляющих свойств СПЛ



Положение фокуса и размер фокального пятна определялся методом **ножевого сканирования** (золотая проволока толщиной 100 мкм)

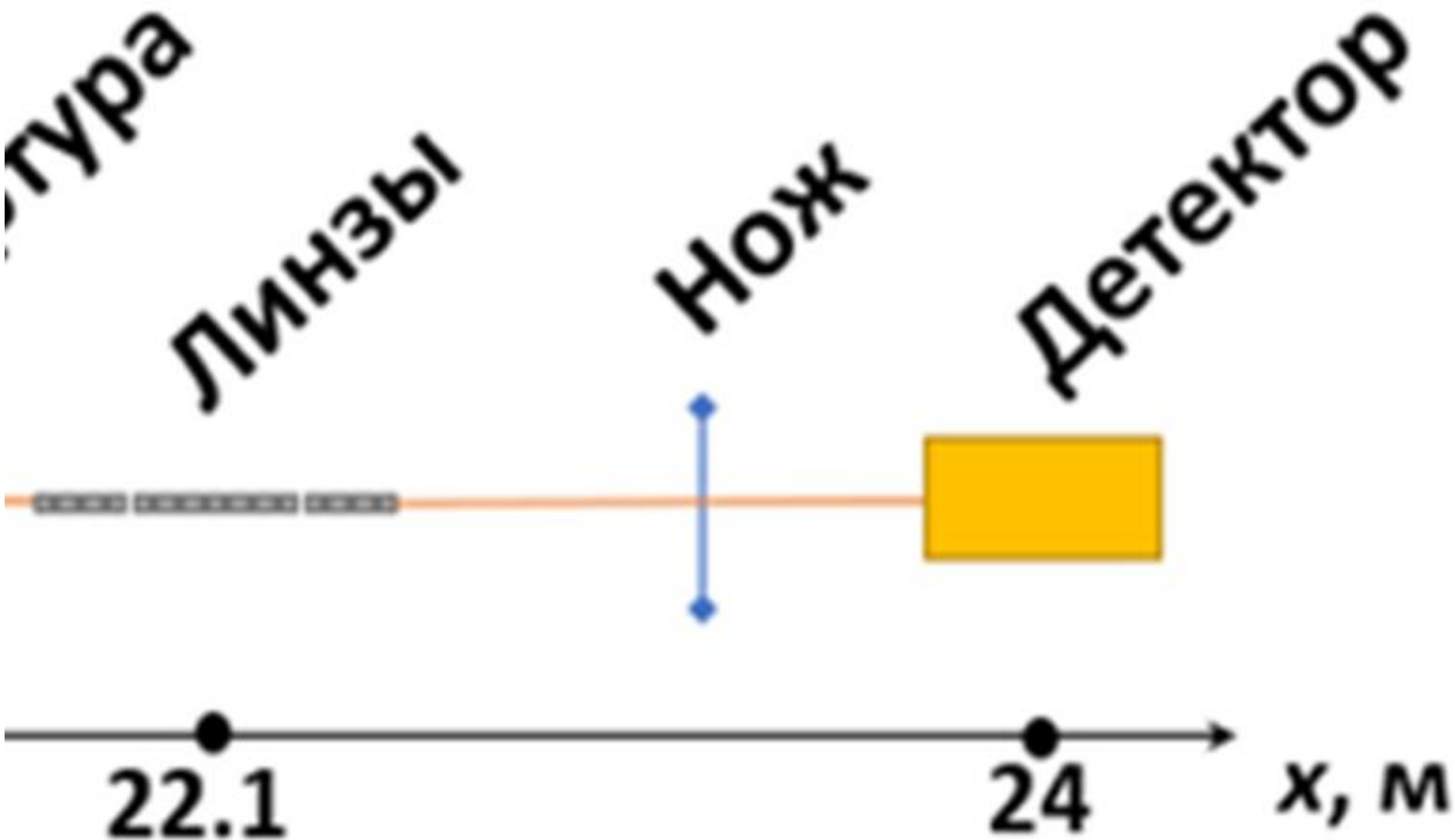
Измерение положения фокуса

	$E = 8 \text{ кэВ}$	$E = 12 \text{ кэВ}$
$F_{\text{теор}}, \text{ м}$	0,349	0,786
$F_{\text{эксп}}, \text{ м}$	$0,40 \pm 0,04$	$0,92 \pm 0,10$



Анализ преломляющих свойств СПЛ

Размер фокального пятна оценивался как полуширина графика производной в области спада интенсивности при ножевом сканировании



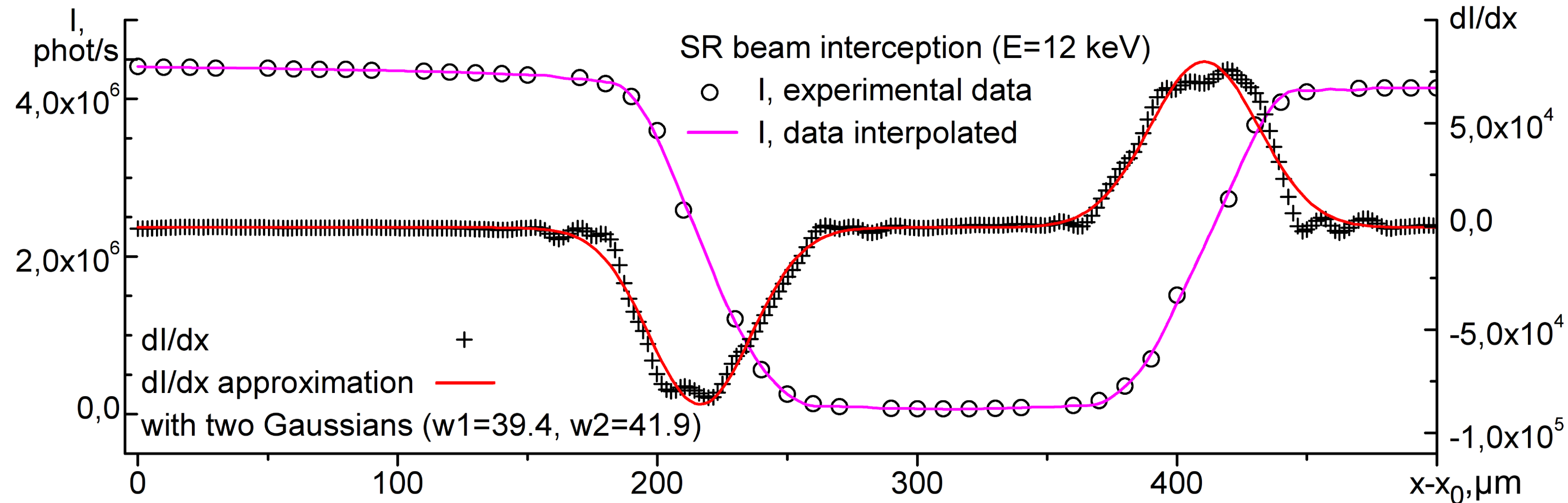
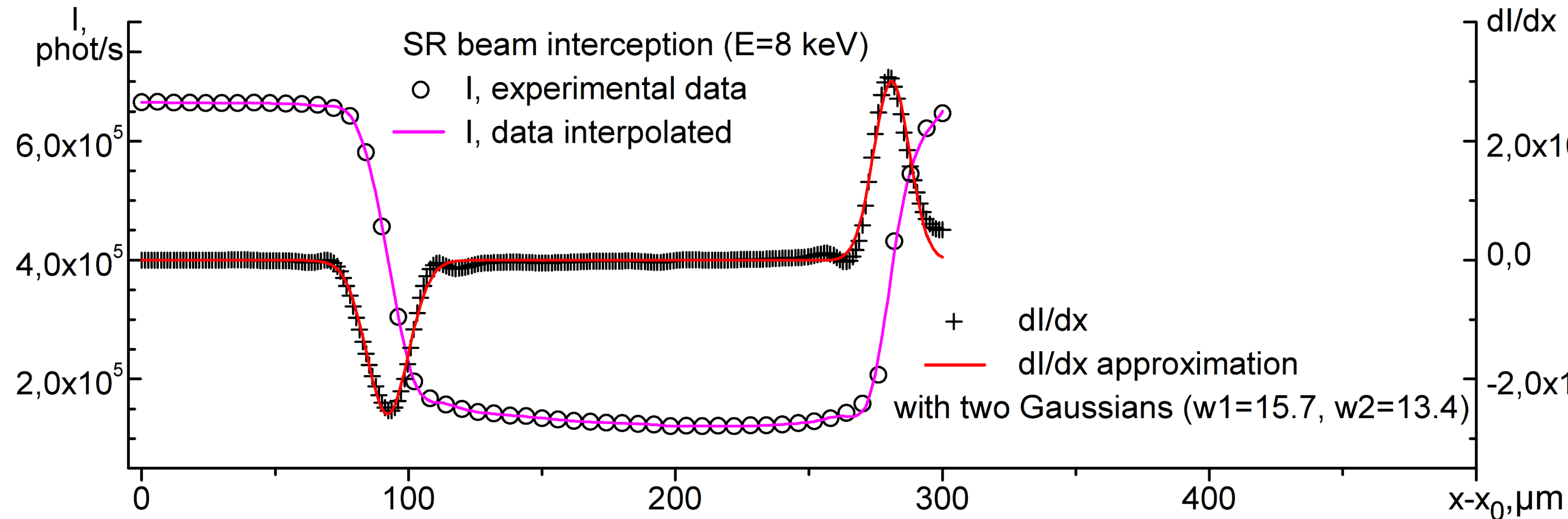
	E = 8 кэВ	E = 12 кэВ
d _{теор} , мкм	0,25	0,20
d _{эксп} , мкм	14,6 ± 1	40,7 ± 1

$$I(x) = (I_1 * T)(x)$$

$$\frac{d}{dx} I(x) = \frac{d}{dx} T(x) * I_1(x)$$

T(x) - функция толщины проволоки, I₁(x) – интенсивность пучка

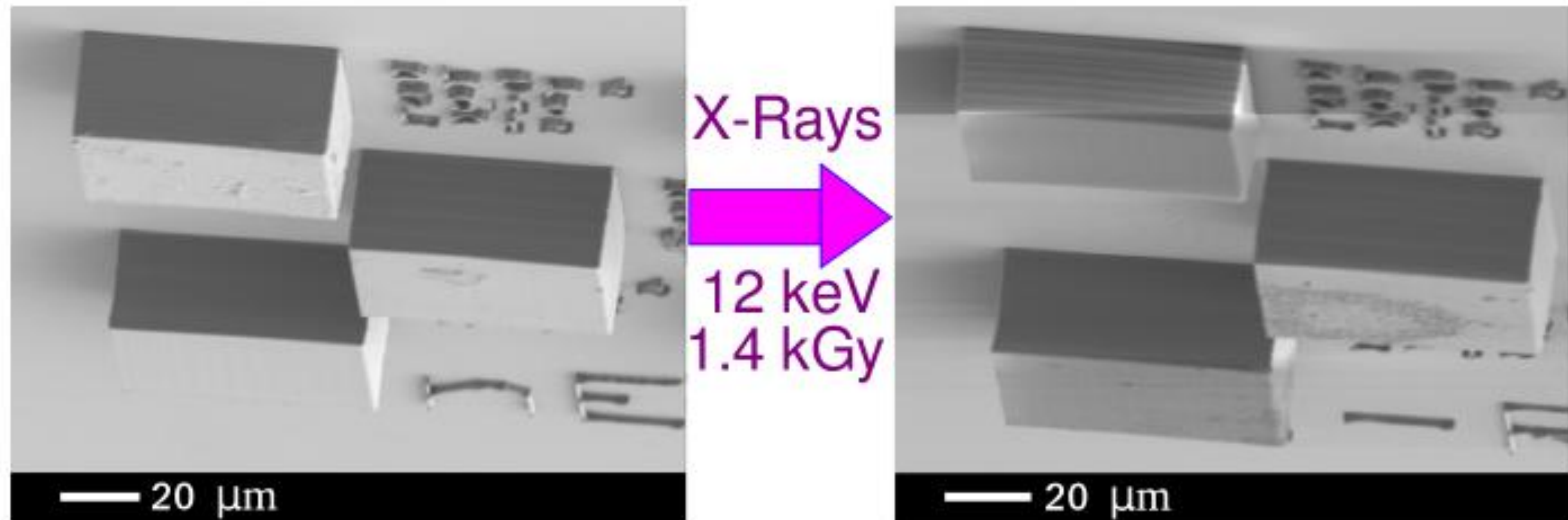
Анализ преломляющих свойств СПЛ



Размер фокального
пятна оценивался
как полуширина
графика
производной в
области спада
интенсивности при
ножевом
сканировании

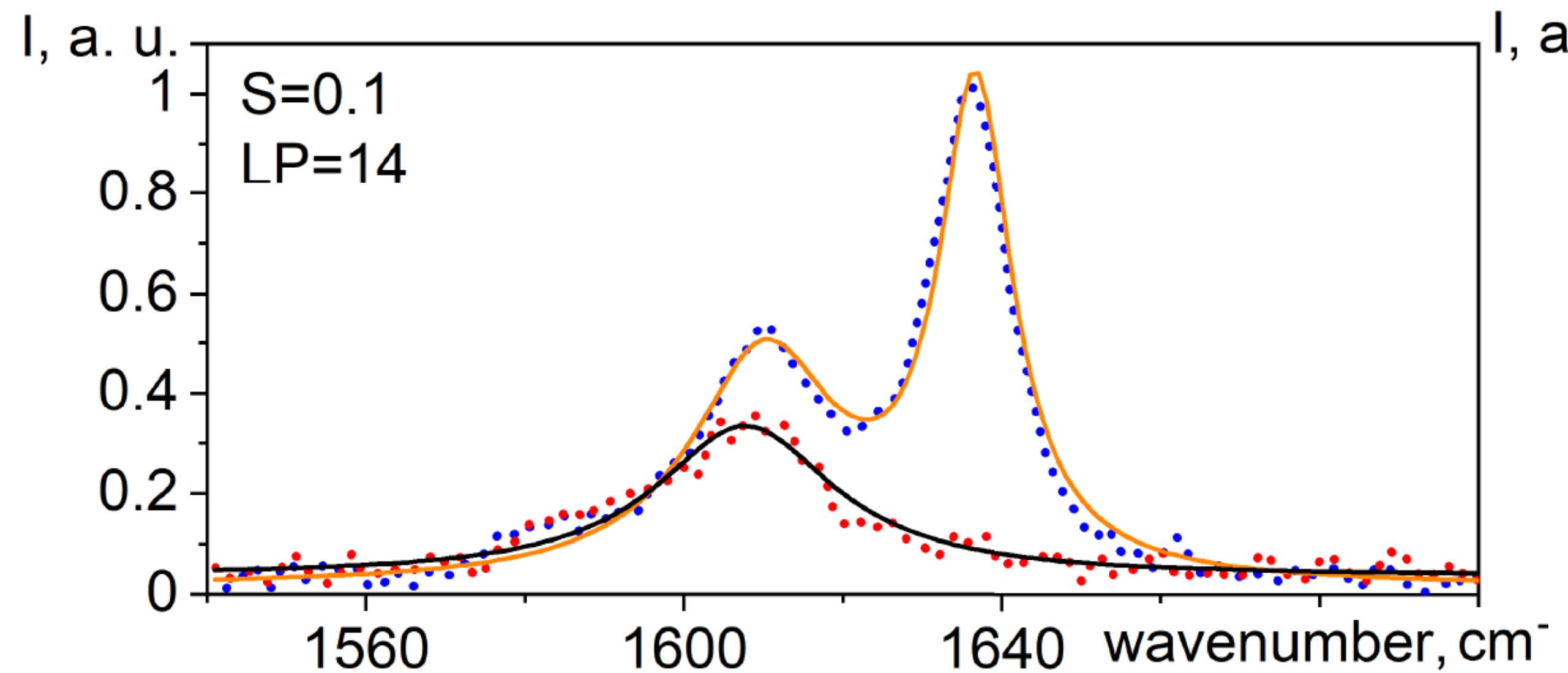
Анализ радиационной стойкости полимерных структур

Исследована радиационная стойкость 6 полимерных кубов ($50 \times 50 \times 50 \text{ мкм}^3$) из (49,5 % PETA, 29,7 % Bis-GMA, 19,8 % TEGDMA)

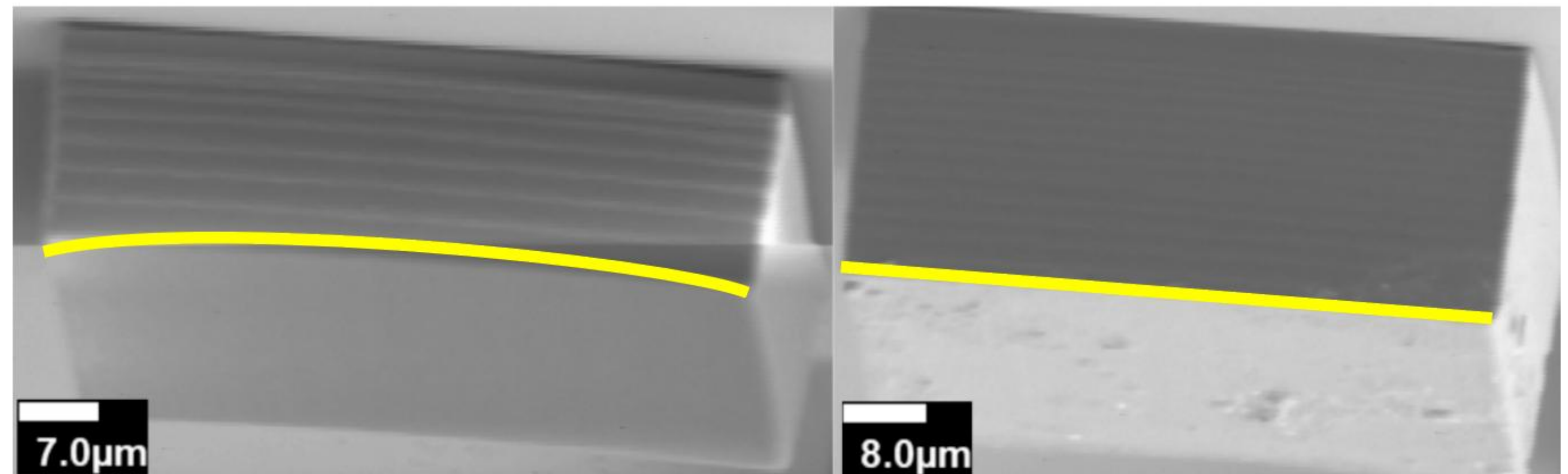


Danilkin M. et al. Do the laser-printed 3D-structures withstand the X-ray synchrotron radiation beam?
//Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2025. – T. 558. – C. 165559.

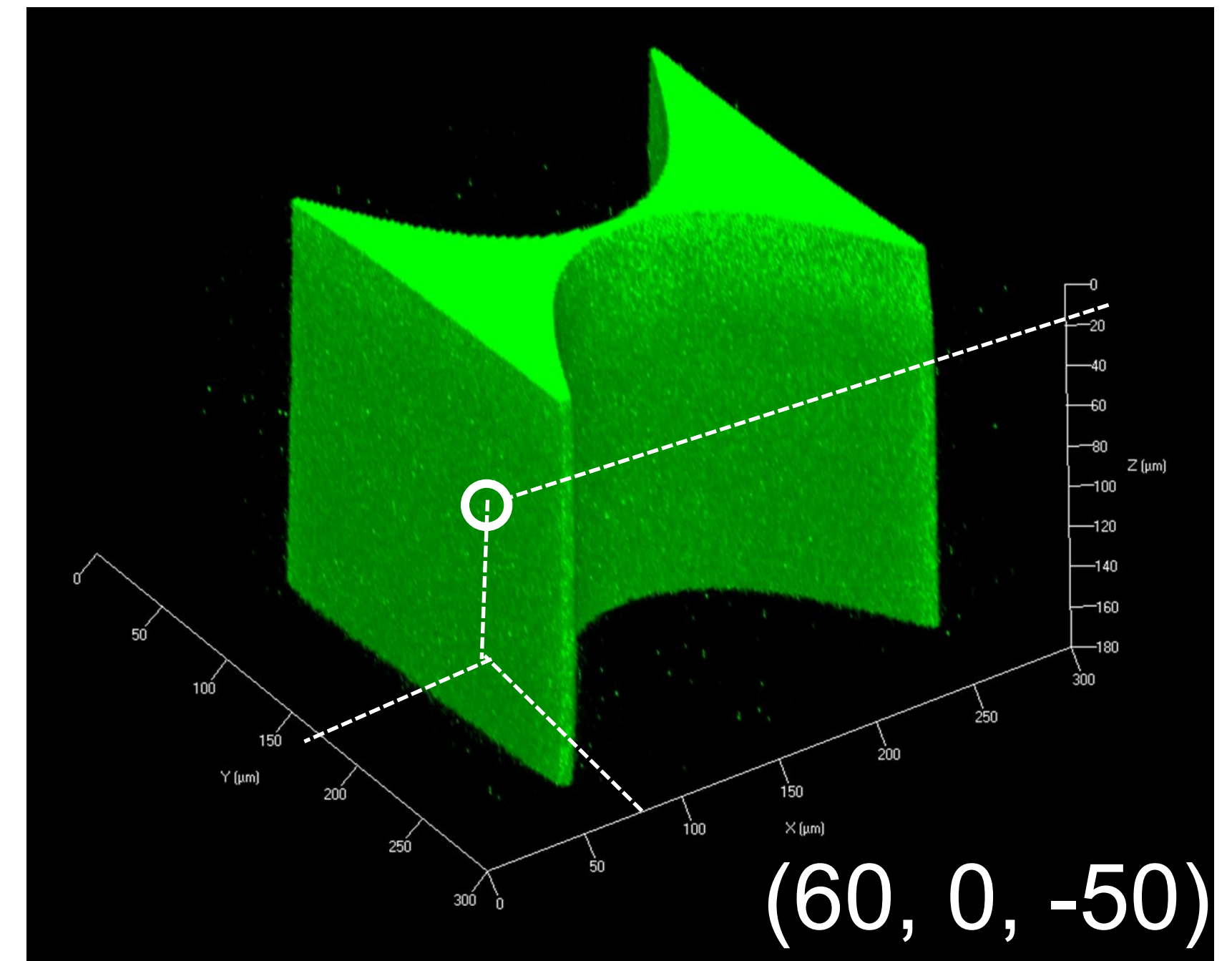
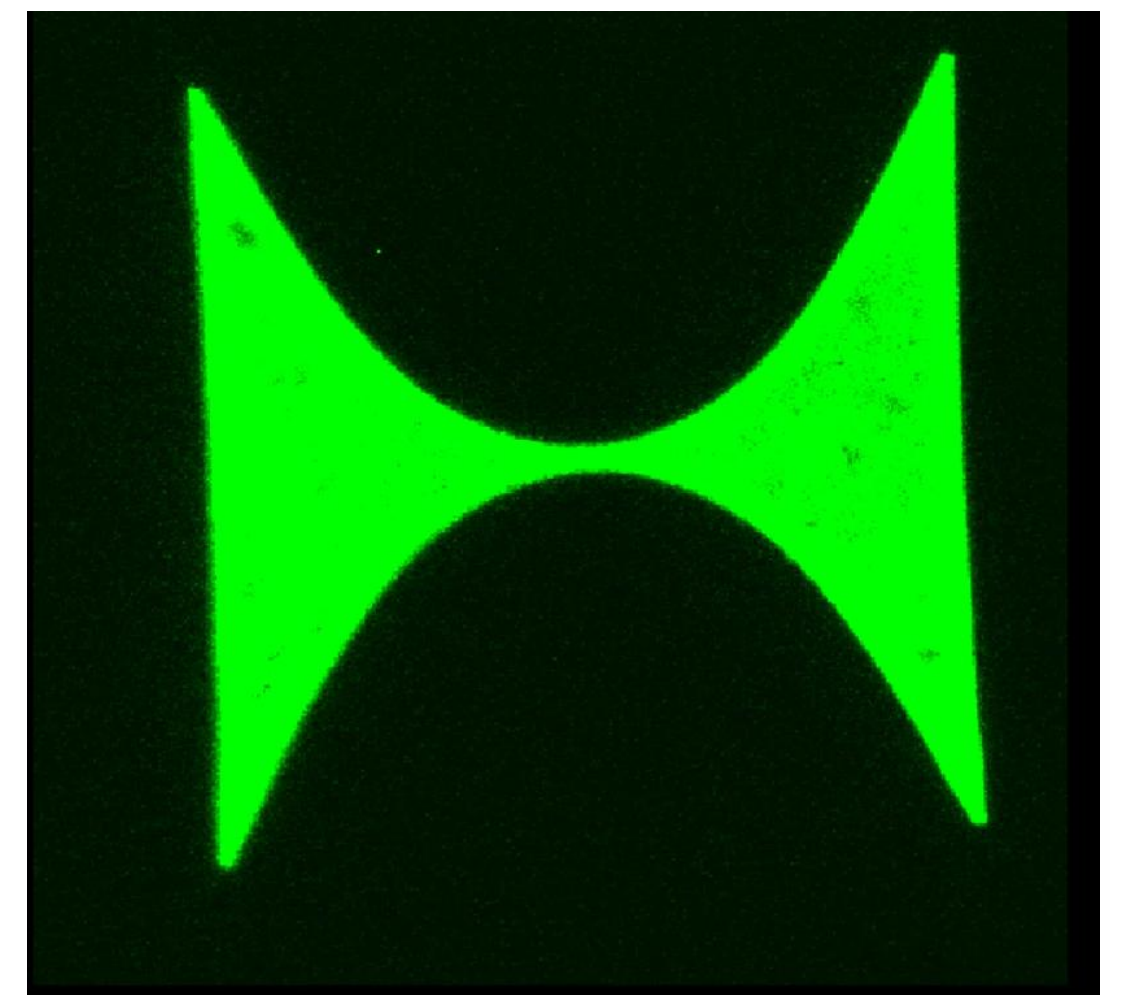
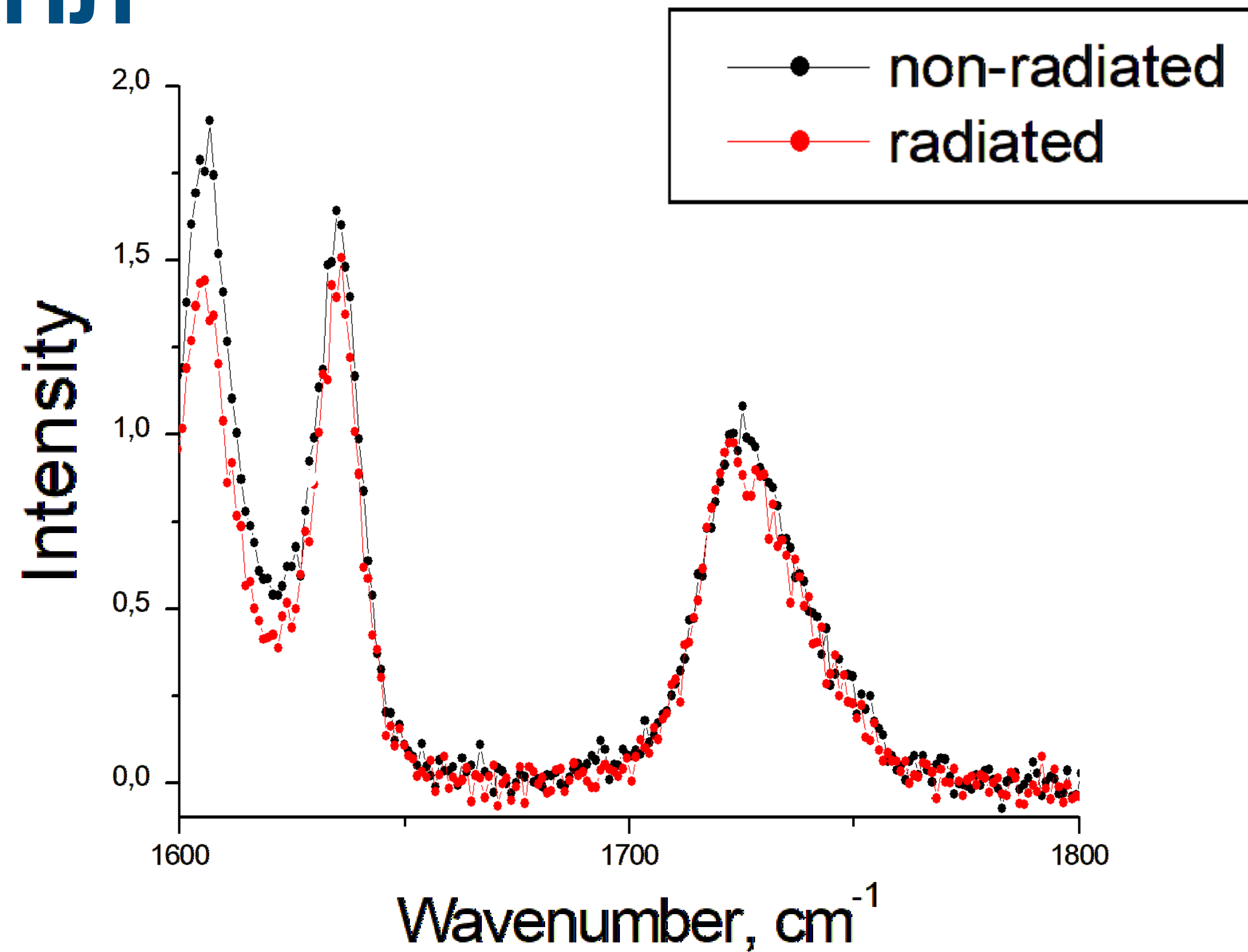
Анализ радиационной стойкости полимерных структур



После облучения (слева) и до облучения (справа) СИ 12 кэВ.

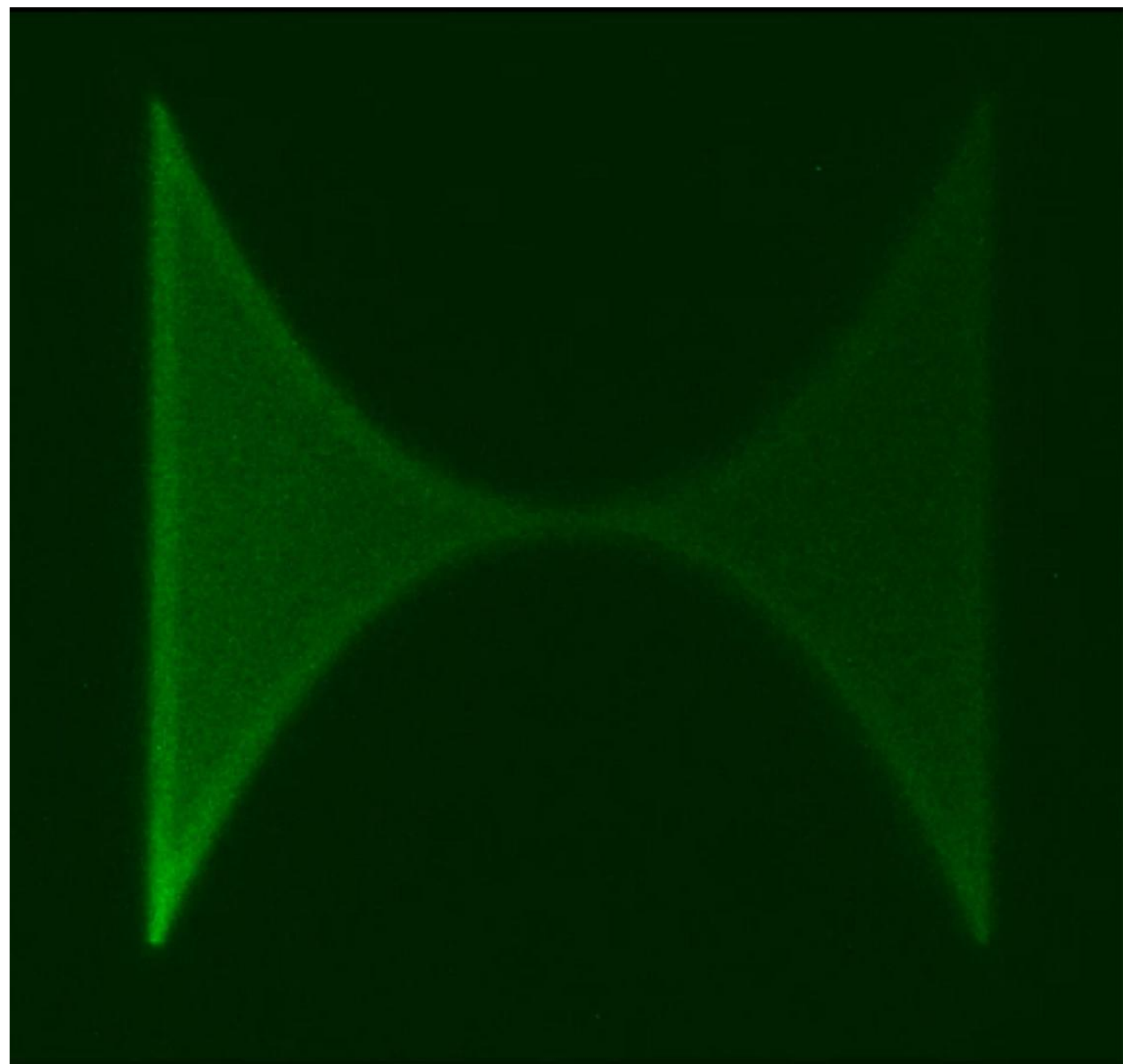


Анализ радиационной стойкости СПЛ

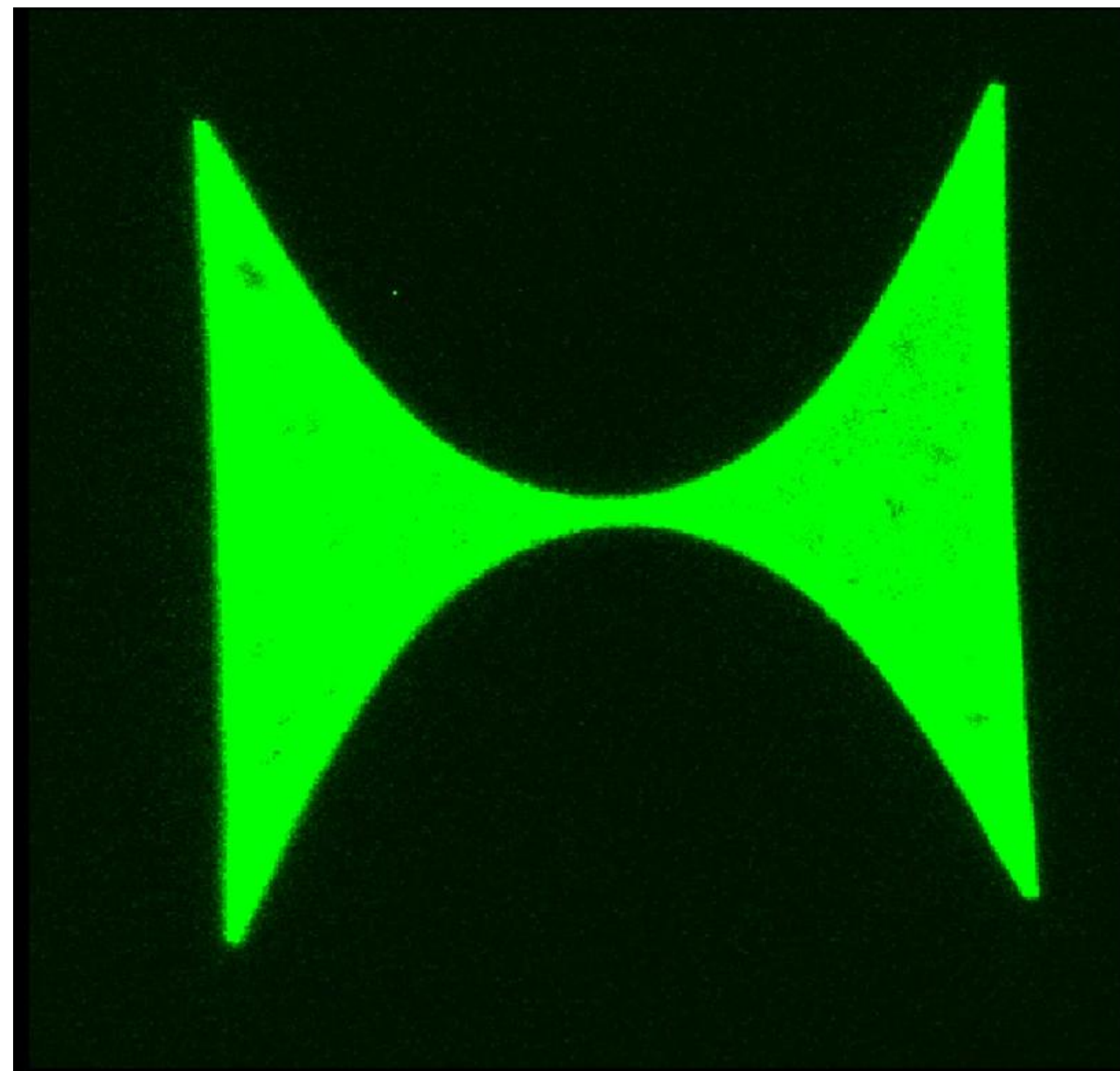


Для эксперимента с СПЛ полимеризация материала под действием СИ идёт в меньшей степени (сохраняется пик 1635 cm^{-1} , соответствующий C=C связям)

Сравнение двух линз до и после облучения СИ ($E = 8$ и 12 кэВ)



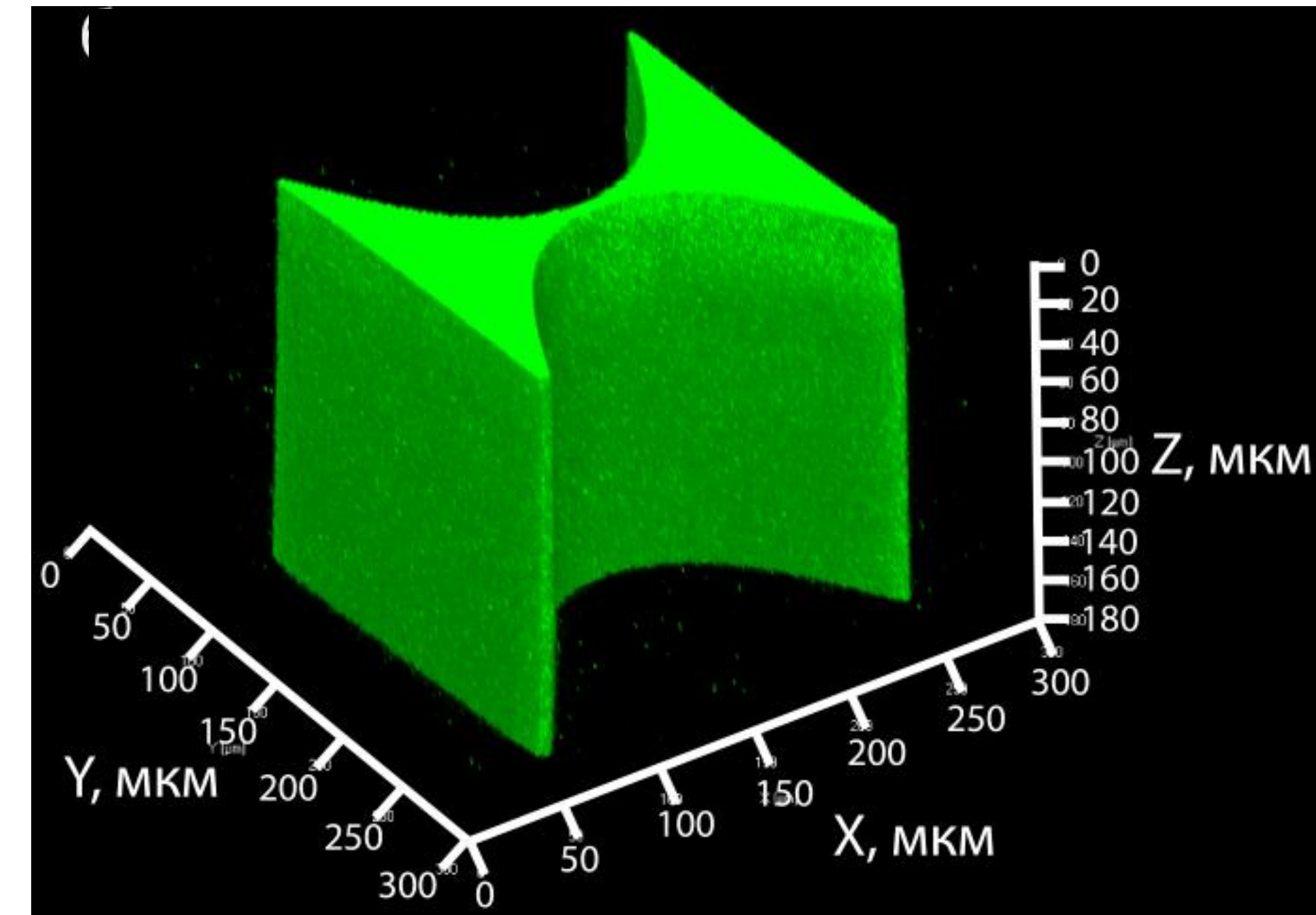
До облучения СИ



После облучения СИ

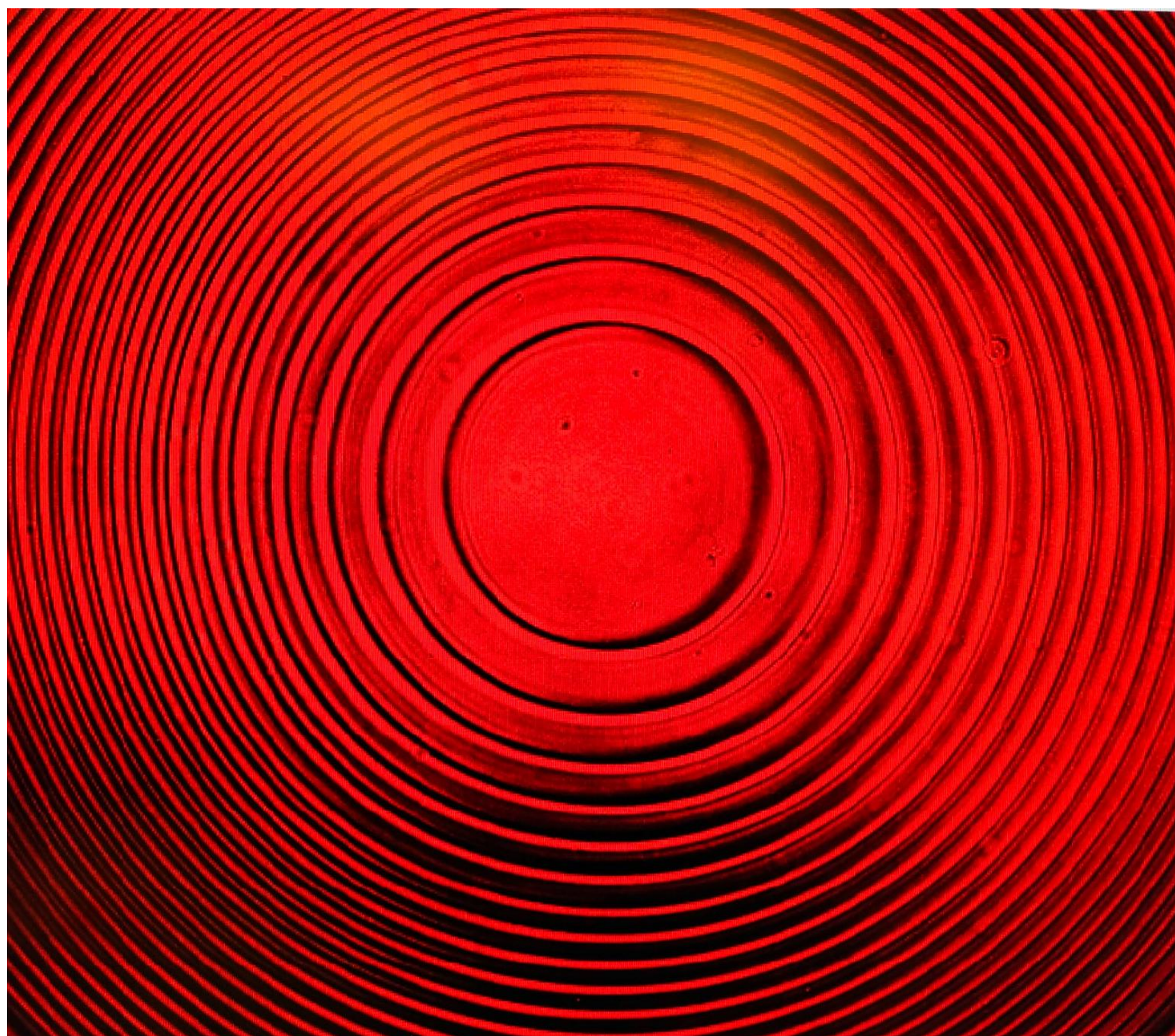
Заключение

1. Технология двухфотонной лазерной литографии (ДЛЛ) обеспечивает требуемые радиус кривизны и качество поверхностей.
2. Неоднородности структуры можно уменьшать путём уплотнения печати, но это приводит к значительному увеличению времени литографического процесса.
5. Неполимеризованная структура полимеризуется под рентгеном, создавая неоднородности и неравномерное сжатие.
6. Искажения структуры линз под действием радиации можно нивелировать, если заранее облучать изготовленные линзы рентгеном, а также изготавливать методом ДЛЛ не самих линз, а их прототипов либо форм для **последующего копирования**.

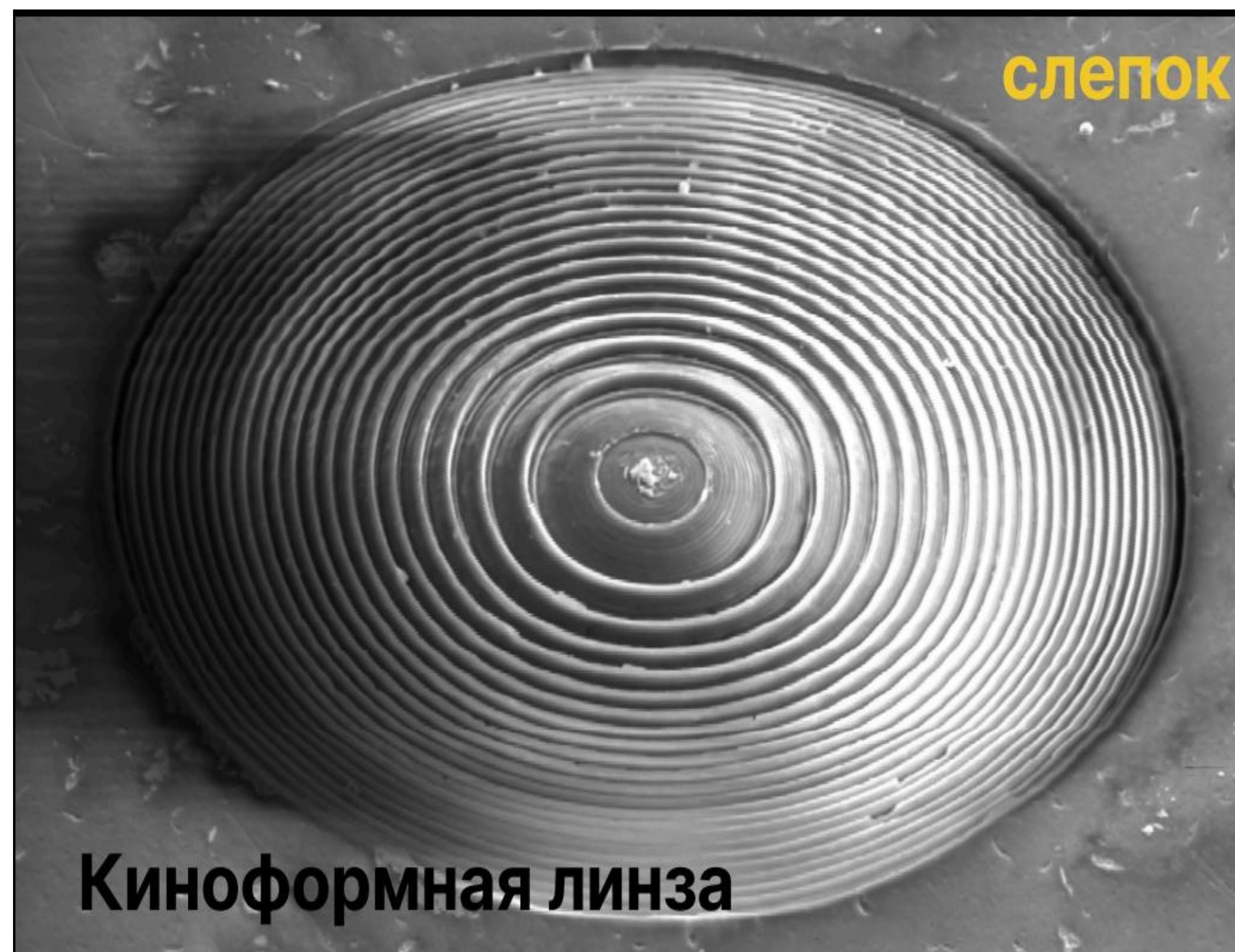


Перспективы

Проект РНФ 2025-2028 гг. «Наноимпринт литография для массового создания 2.5D элементов микрооптики и оптоэлектроники»



Киноформная линза,
изготовленная методом
DLW



Отпечаток из ЕТРТА по методу
template stripping

Хочу поблагодарить моих коллег из Лаборатории 3D-печати функциональных микроструктур МФТИ, ФИАНа, синхротрона «КИСИ-Курчатов»

Д. А. Колымагин, А. Г. Витухновский, М. И. Данилкин, Г. В. Пруцков

Публикации:

- 1) **Диплом победителя Конкурса научных работ для поступающих в аспирантуру МФТИ (ФЭФМ) в рамках 67-й Всероссийской научной конференции МФТИ**
- 2) **Статьи:**
 - a) Patolyatov A. D. et al. Refractive X-Ray Lenses Made by the Two-Photon Laser Lithography Method //Physics of Wave Phenomena. – 2022. – Т. 30. – №. 5. – С. 325-329.
 - b) M. Danilkin et. al. Do the laser-printed 3D-structures withstand the X-ray synchrotron radiation beam? //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volume 558, 2025.
- 3) **Патент №230974 «Накладка на предметный столик для регулировки угла наклона плоскости подложки образца» в рамках ОКР «Однолучевой оптический литограф с превышением дифракционного предела».** Авторы: Данилкин М. И., Патолятов А. Д. (RU), Витухновский А. Г. (RU), Колымагин Д. А. (RU), Агапов М. Н. (RU)
- 4) **Конференции**
 - a) Modern X-ray Optics, 2024. с. 13
 - b) XIII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ. СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ. Москва, 2024, с. 99-100
 - c) VIII International Conference on Ultrafast Optical Science "UltrafastLight 2024, Moscow, p. 76
 - d) XIV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ. СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ. Москва, 2025, с. 191-193

#3D-LAB



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
"КУРЧАТОВСКИЙ
ИНСТИТУТ"

