



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Экспериментальные исследования в Центре лазерно-физических исследований РФЯЦ-ВНИИТФ

*Константин Сафронов,
начальник группы отдела лазерно-физических исследований
отделения экспериментальной физики РФЯЦ-ВНИИТФ*

Зимняя школа по ФВПЭ 2026, г. Снежинск

Центр лазерно-физических исследований (ЦЛФИ) РФЯЦ-ВНИИТФ РОСАТОМ

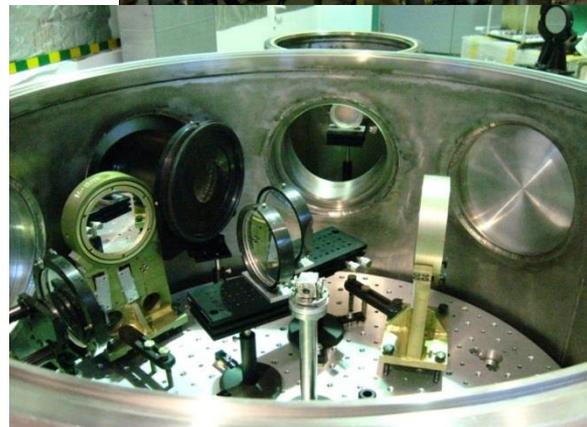
Лаборатории:

1. Лаборатория лазерных систем и оптической диагностики
2. Лаборатория лазерных мишеней и оптических покрытий
3. Лаборатория диагностики лазерной плазмы

Лазеры:

- нс – килоджоульный Nd:glass лазер
 - пс – мультитераваттный Nd:glass лазер
 - фс – мультитераваттный Ti:Sa лазер
- } общая МК

Интенсивность лазерного излучения на мишени до $5 \cdot 10^{20}$ Вт/см²



Лаборатория лазерных мишеней

1. Установки вакуумного нанесения тонкопленочных покрытий:
 - с электронно-лучевым испарением
 - с магнетронным распылением
 - с резистивным испарением
2. Установка плазмохимического травления
3. Лазерная сварка.
4. Шлифовально-полировальный комплекс.
5. Химическая лаборатория.
6. Широкоапертурный ионный источник для полировки и травления
7. Аналитическое и измерительное оборудование:
 - спектрофотометр
 - атомно-силовой микроскоп
 - оптический профилометр
 - Рентгеновские установки для анализа состава мишеней

Спектроскопия излучений лазерной плазмы

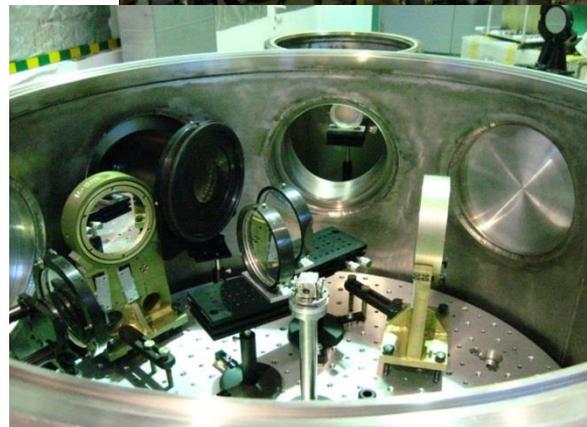


1. Кристалл-дифракционные спектрографы линейчатого рентгеновского излучения:
 - по схеме Иоганна на кристалле бифталата калия, диапазон $\varepsilon=0,6\div 5$ кэВ, спектральное разрешение $\varepsilon/\Delta\varepsilon=10^3$
 - на кристалле кварца, изогнутом по сфере $\varepsilon=2\div 10$ кэВ, спектральное разрешение $\varepsilon/\Delta\varepsilon\geq 10^3$
2. Спектрометр рентгеновского континуума $\varepsilon=10\div 100$ кэВ на селективных фильтрах и фильтрах Росса, спектральное разрешение $\varepsilon/\Delta\varepsilon\geq 3$ (измерения в нескольких спектральных интервалах – до 10-15)
3. Активационный спектрометр гамма-излучения на фотоядерных реакциях $\varepsilon\geq 5$ МэВ
4. Магнитный спектрометр релятивистских электронов $\varepsilon=0,5\div 100$ МэВ
5. Времяпролетный спектрометр быстрых ионов с энергией до 30 МэВ (по протонам)
6. Масс-спектрометр Томсона
7. Диагностика поглощения и отражения ЛИ мишенью – 3..5%.
8. Электронно-оптические камеры со щелевой разверткой для измерения временного хода светимости плазмы мишени в мягком рентгеновском и оптическом диапазоне с предельным временным разрешением 2 пс
9. Двухволновой спектральный интерферометр для измерения скорости разлета плазмы мишени

Центр лазерно-физических исследований (ЦЛФИ) РФЯЦ-ВНИИТФ РОСАТОМ

Направления исследований:

- Термодинамические свойства теплой плотной плазмы
- Излучательные свойства горячей плотной плазмы
- Неустойчивости Рихтмайера – Мешкова
- Радиография быстропротекающих процессов
- Стойкость микронэлектронных устройств к воздействию заряженных частиц космического пространства

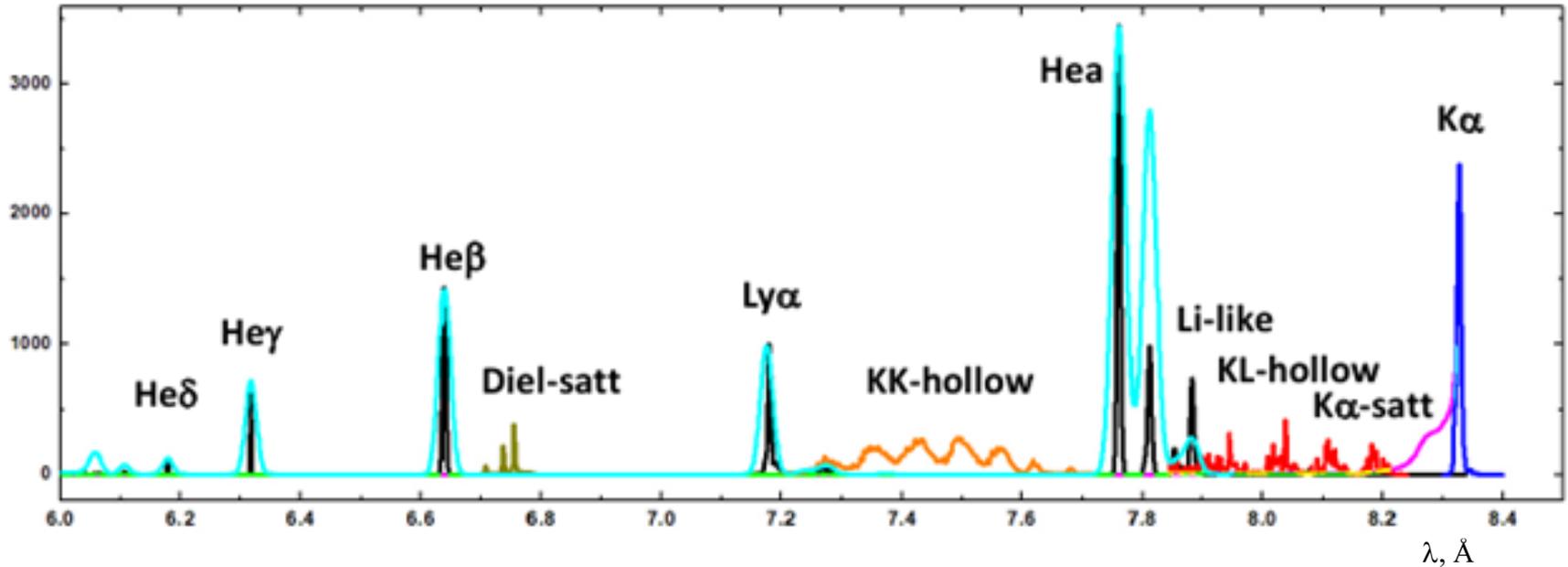


1

Излучательные свойства горячей плотной плазмы

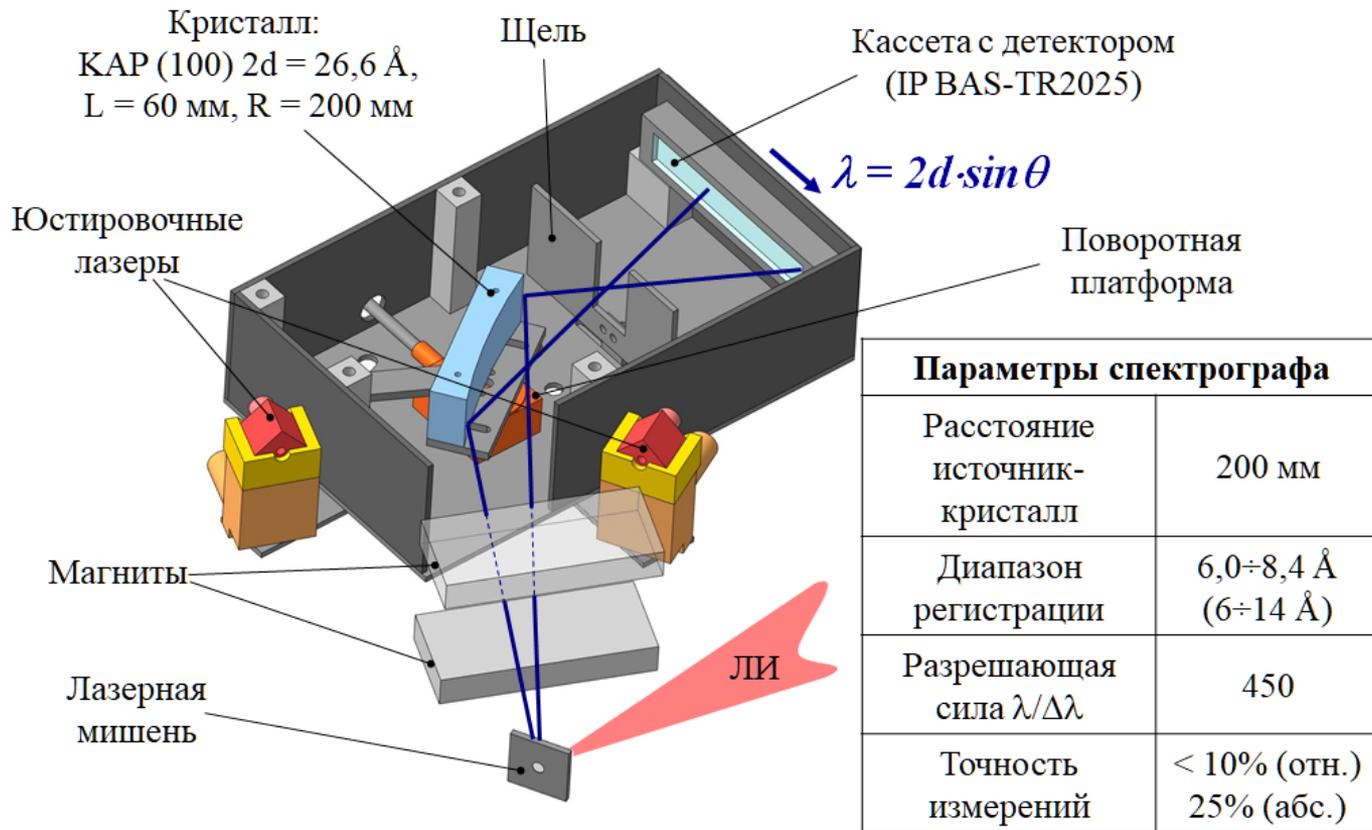


Линейчатый спектр лазерной плазмы



Теоретический вид спектра линейчатого излучения горячей плотной плазмы Al

Спектрограф рентгеновского излучения

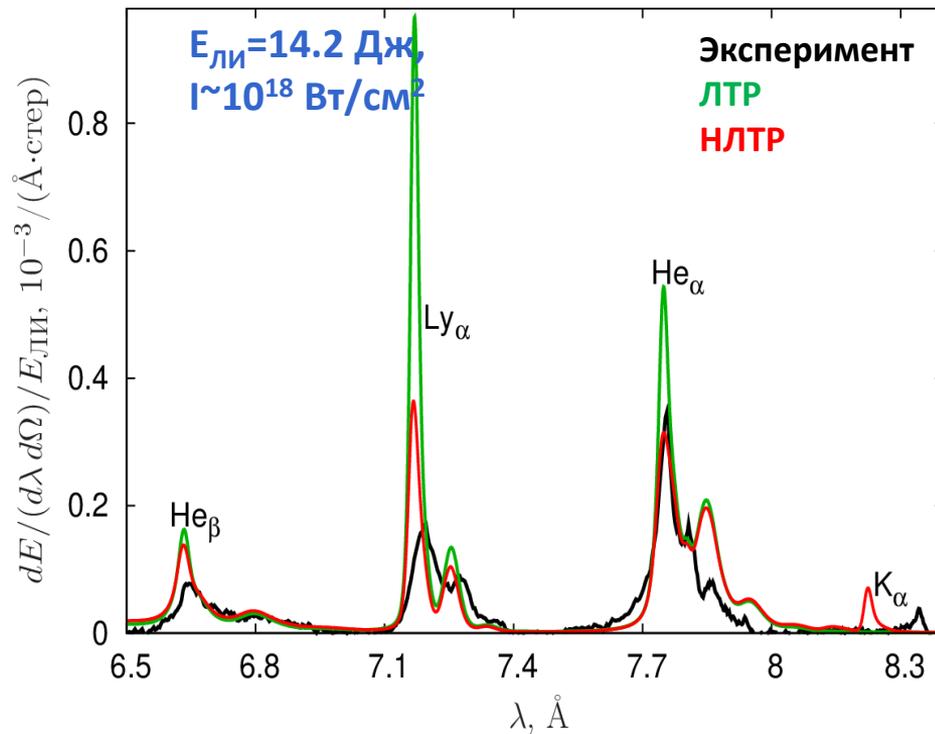
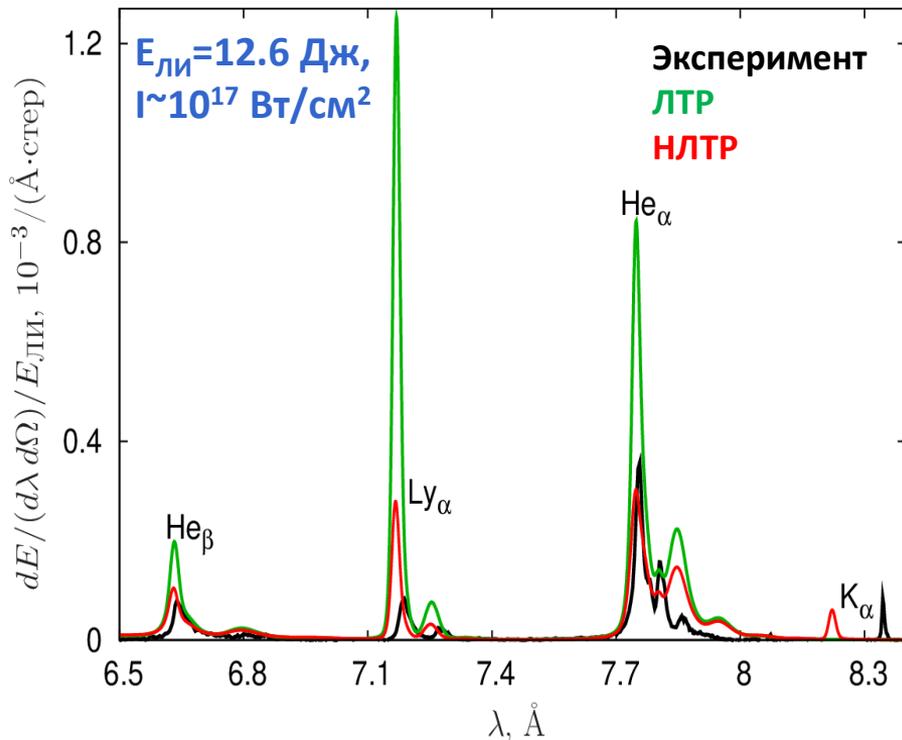


Сравнение экспериментальных и расчётных спектров

Толщина мишени 400 мкм



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

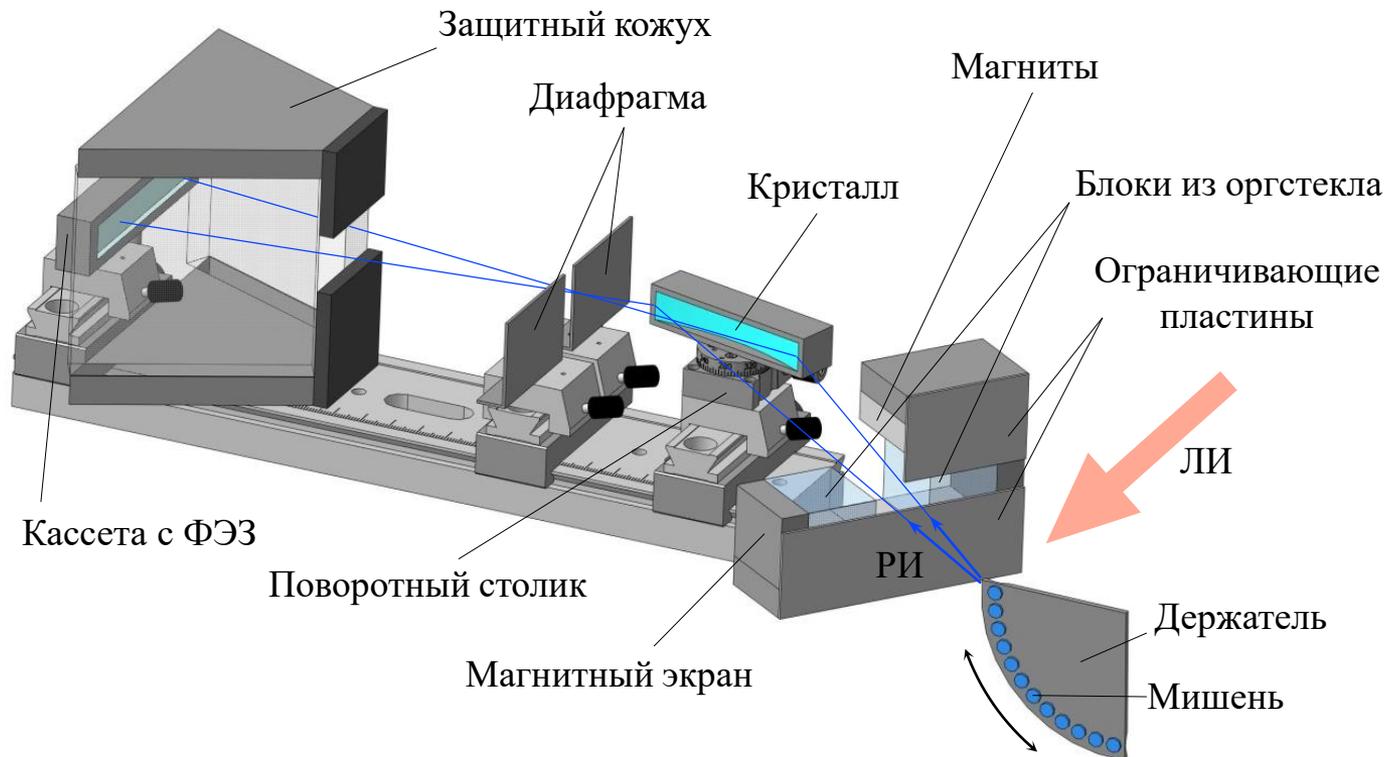


Моделирование экспериментов без подгоночных и эмпирических параметров с учётом отклонения состояния вещества от ЛТР — НЛТР.

Качественное согласие расчётных и экспериментальных спектров: $T(t)$ и $\rho(t)$ описываются, в целом, верно. Улучшение количественного согласия:

совершенствование модели. А.А. Овечкин, П.А. Лобода, Н.Г. Карлыханов, Д.С. Носуленко, Д.А. Вихляев и др. 38 международная конференция по взаимодействию интенсивных потоков энергии с веществом, п. Эльбрус, 1–6 марта 2023 г.

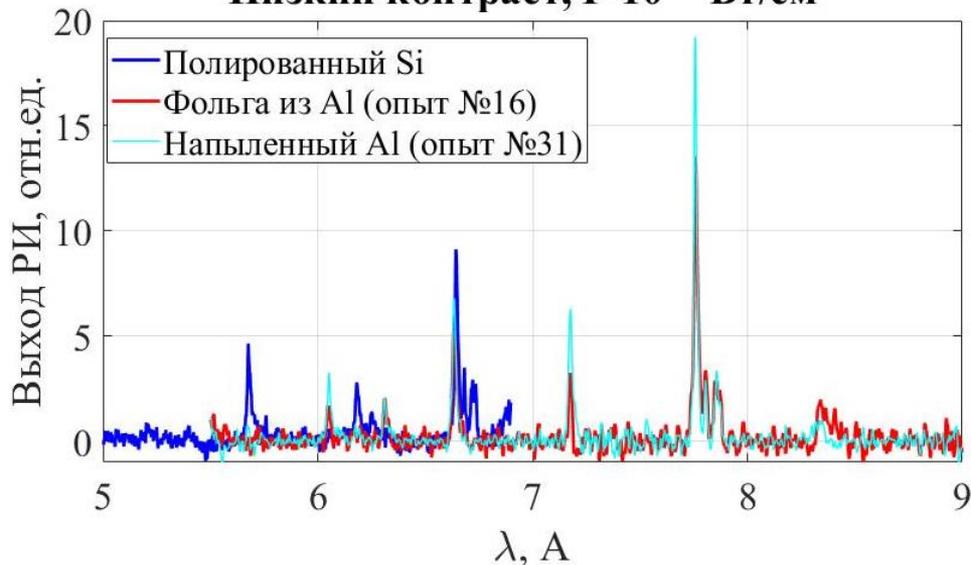
Спектрограф рентгеновского излучения с улучшенной защитой



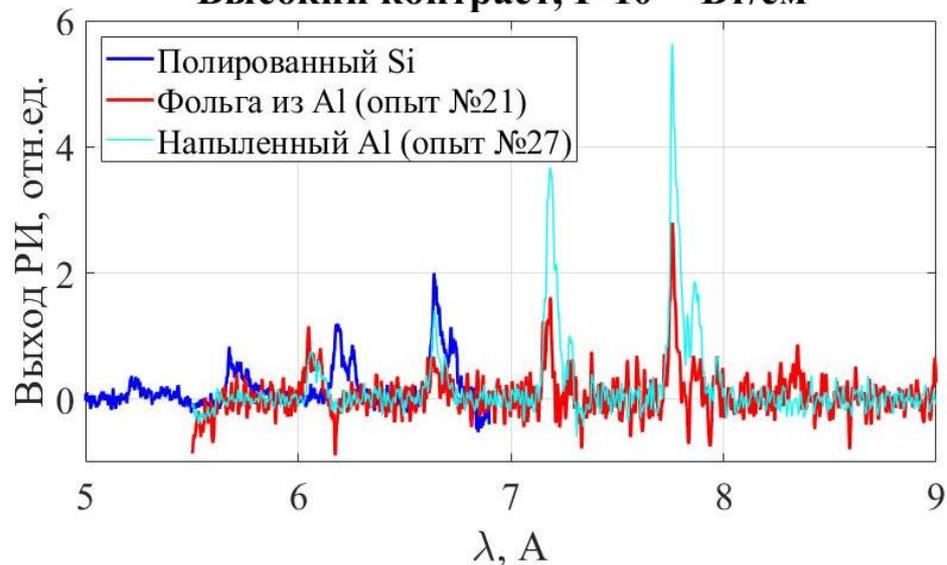
Исследование линейчатого излучения

$\lambda = 800 \text{ нм}$; $E_{\text{ЛИ}} = 0,7 \div 1,4 \text{ Дж}$; $\tau \sim 26 \text{ фс}$

Низкий контраст, $I \sim 10^{20} \text{ Вт/см}^2$



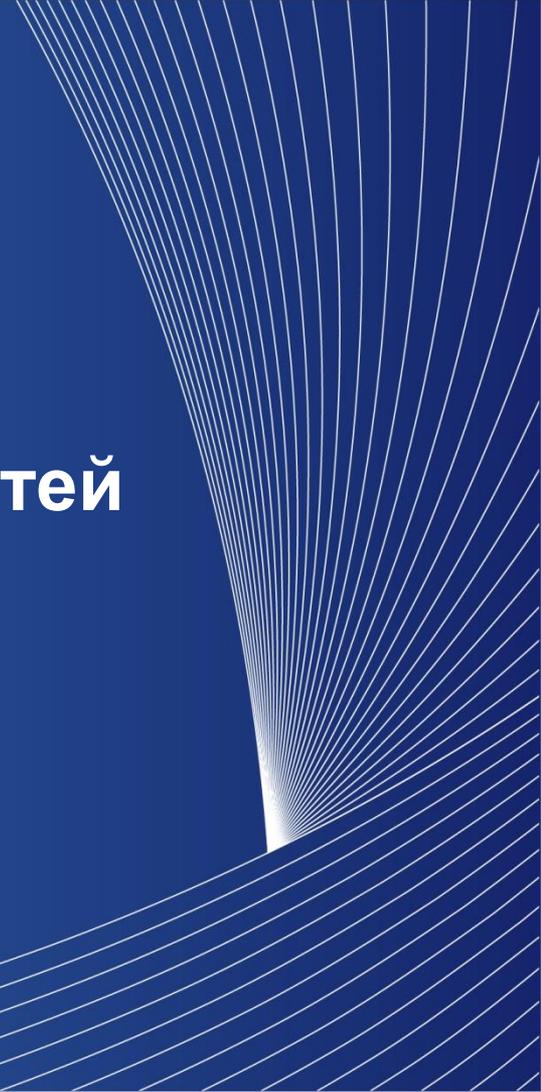
Высокий контраст, $I \sim 10^{20} \text{ Вт/см}^2$



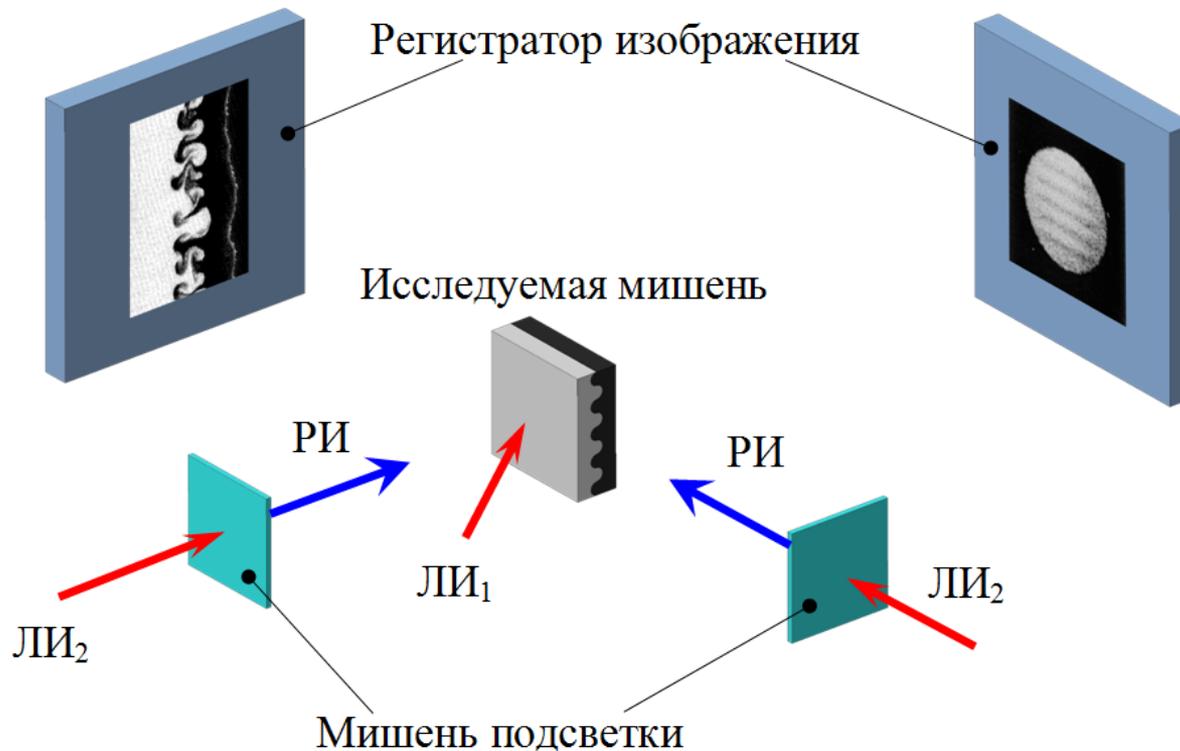
Спектры характеристического излучения кремниевых и алюминиевых мишеней, нормированные на суммарную энергию лазерных импульсов

2

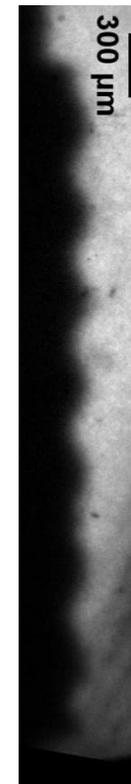
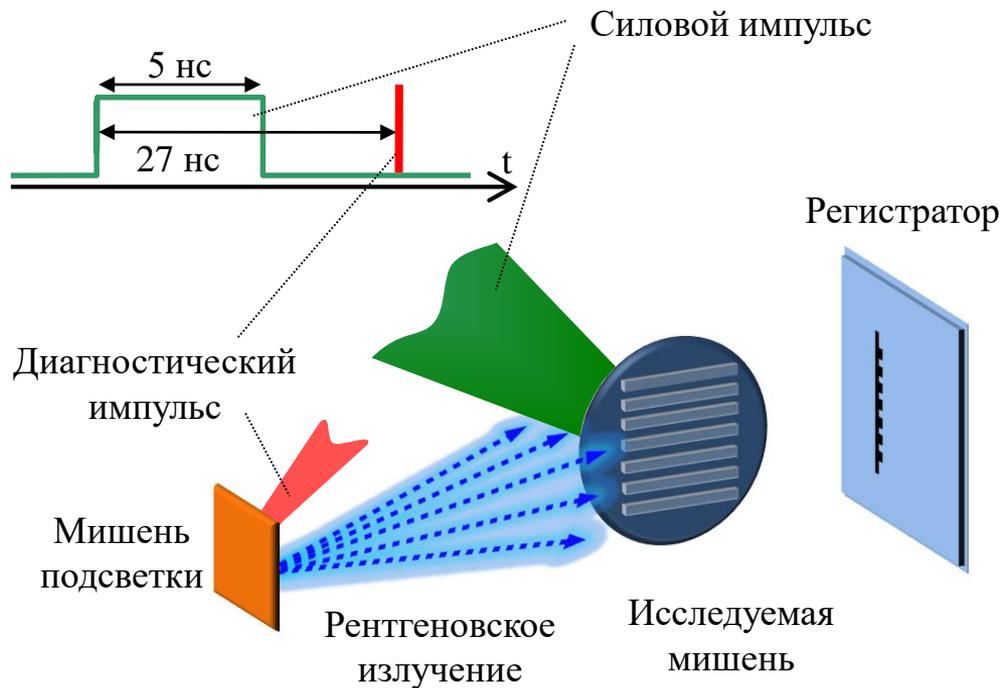
Визуализация неустойчивостей



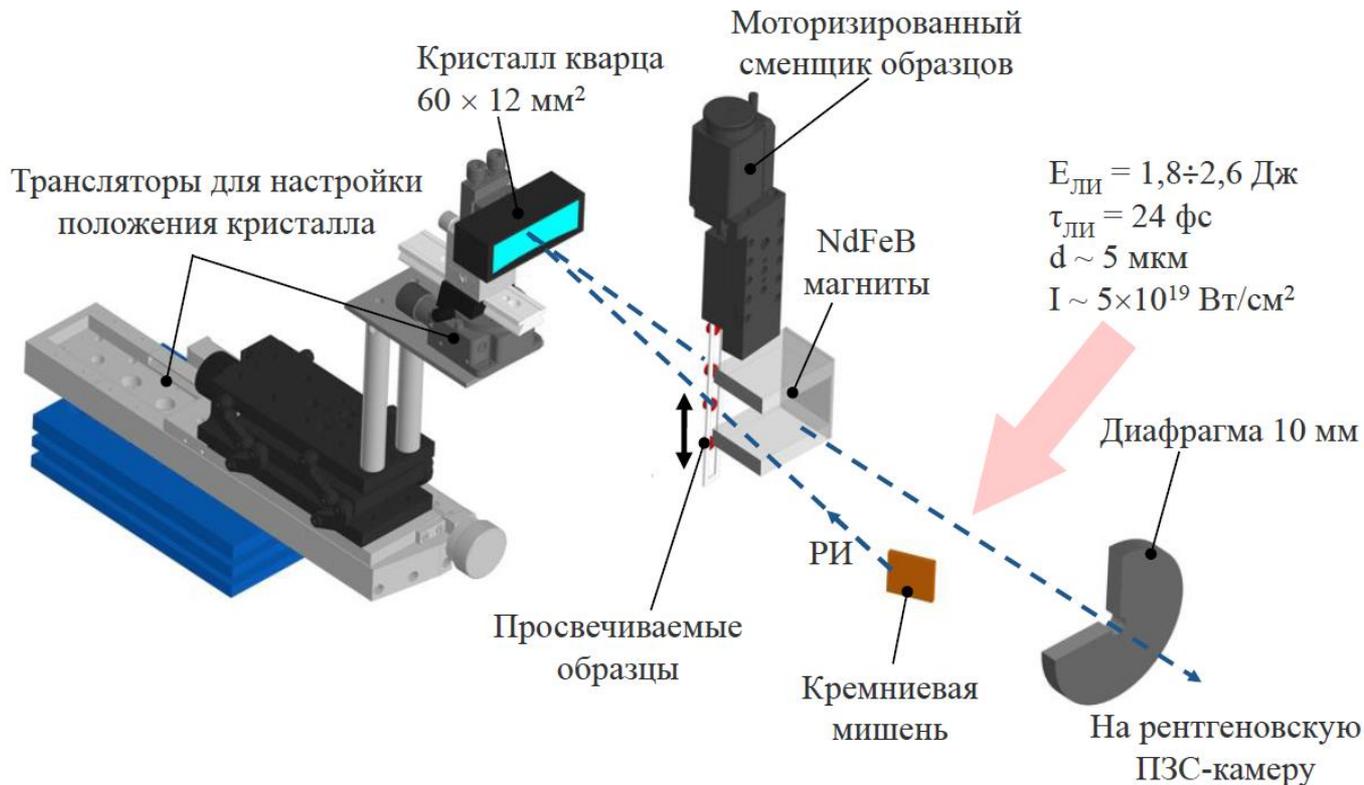
Рентгеновское зондирование неустойчивых контактных границ



Рентгеновское зондирование неустойчивых контактных границ



Регистрация изображений с помощью рентгеновского микроскопа



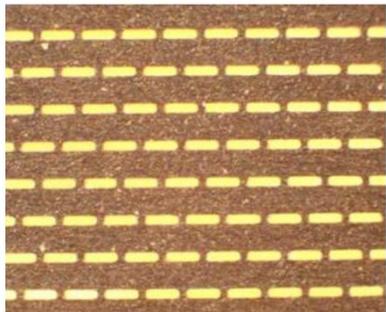
Параметры рентгеновского микроскопа

Кристалл (отражающая плоскость)	$\text{SiO}_2 (10\bar{1}1)$
Удвоенное межплоскостное расстояние	$2d = 6,68 \text{ \AA}$
Спектральная линия (длина волны)	$\text{Si-He}_\alpha (\lambda = 6,67 \text{ \AA})$
Брэгговский угол	$\theta = 86,4^\circ$
Радиус изгиба кристалла	$R = 250 \text{ мм}$
Коэффициент увеличения	$M = 10$
Расстояние от объекта до центра кристалла	$p = 137,5 \text{ мм}$
Расстояние от центра кристалла до регистратора	$q = 1375 \text{ мм}$
Расстояние от источника подсветки до объекта	$r = 40 \text{ мм}$

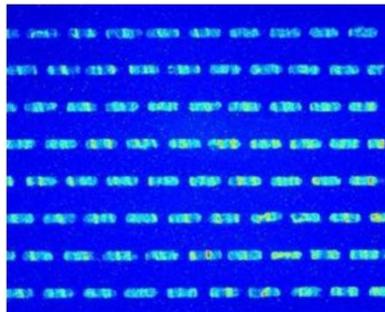
Примеры зарегистрированных изображений

Металлическая сетка с отверстиями
размером 200×50 мкм и периодом по вертикали и
горизонтали 220 мкм и 240 мкм соответственно

Изображение объекта
в видимом свете



Рентгенограмма

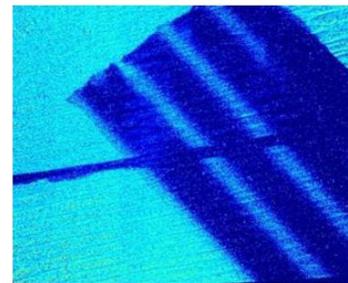
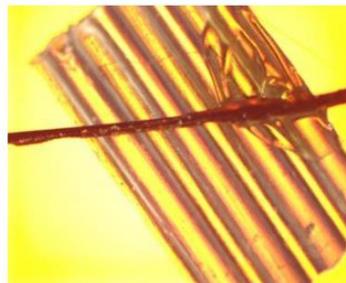
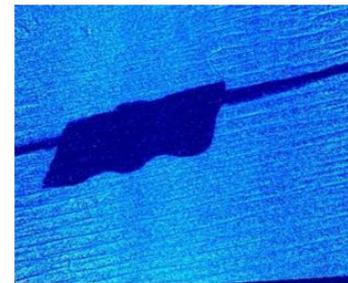


Пластиковая мишень для исследования
гидродинамических неустойчивостей с периодом
возмущений 440 мкм и амплитудой 60 мкм

Изображение объекта
в видимом свете



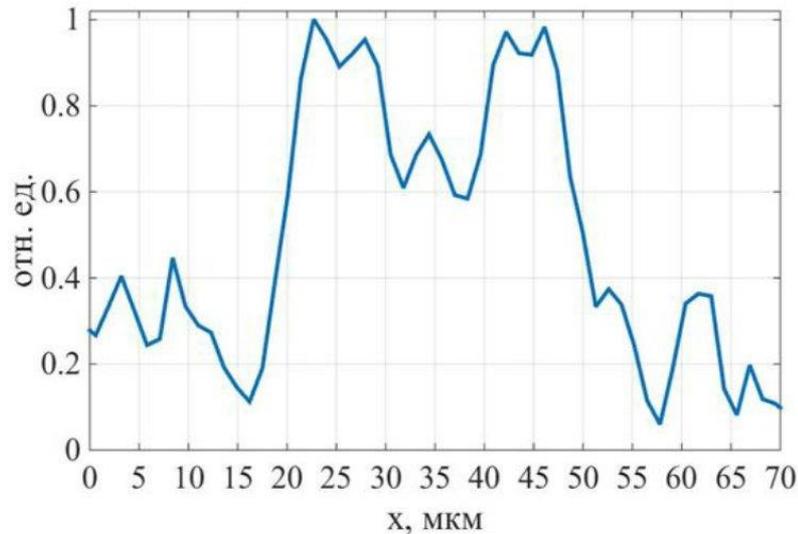
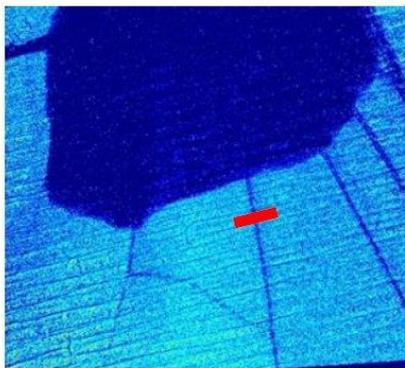
Рентгенограмма



Разрешение микроскопа - 10 мкм в
сагиттальном и меридиональном направлениях

Примеры зарегистрированных изображений

Видимое и рентгеновское
изображения крыла мухи



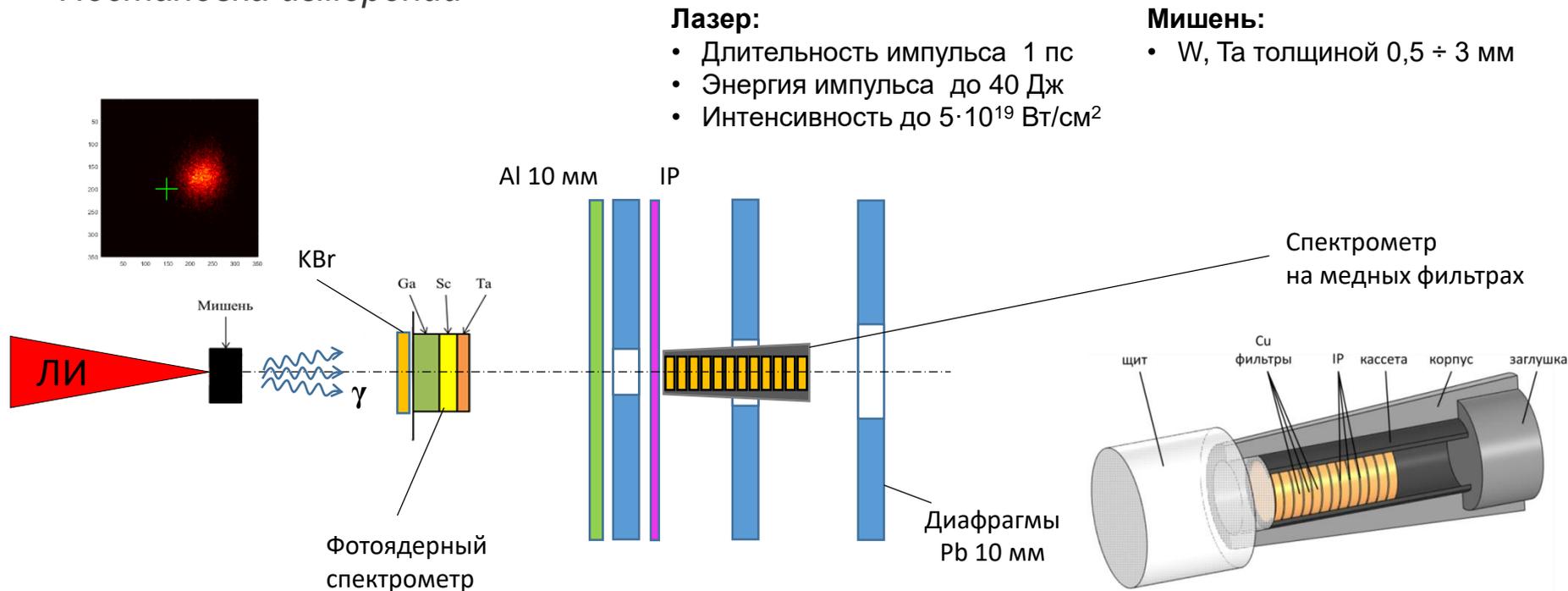
**Жилка крыла мухи имеет трубчатую
структуру с внешним диаметром равным
30 мкм и внутренним – 10 мкм**

3 Лазерный радиографический комплекс с легкогазовой пушкой

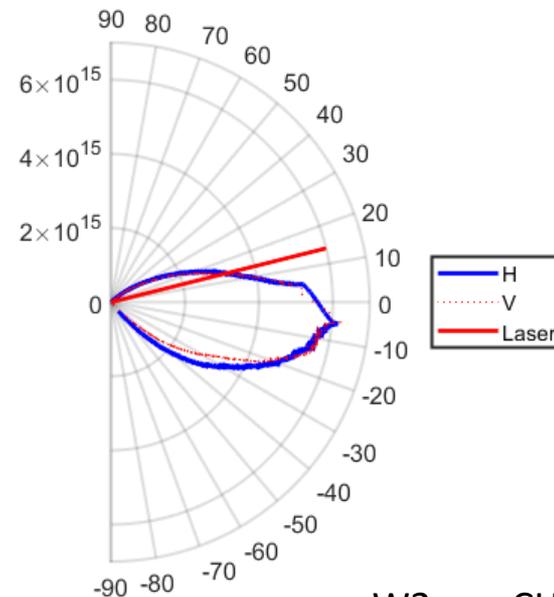
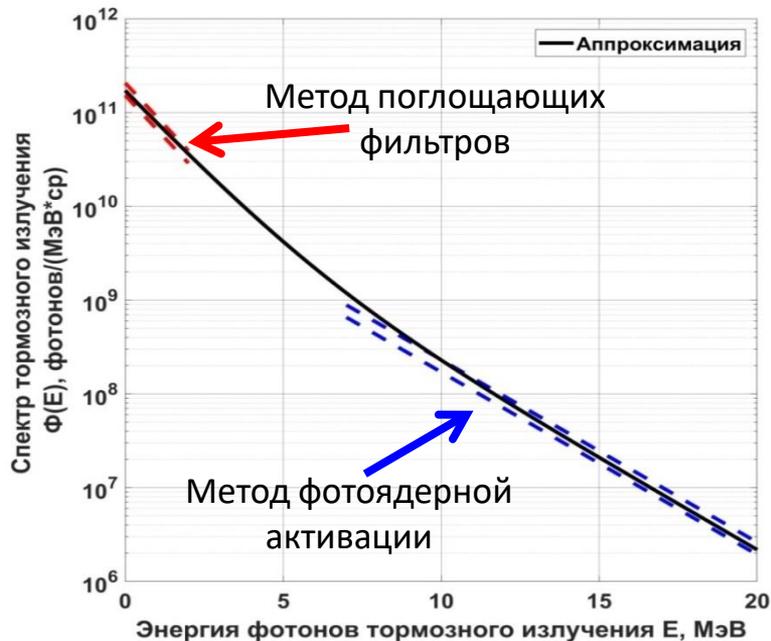


Генерация тормозного излучения в твердотельных мишенях

Постановка измерений



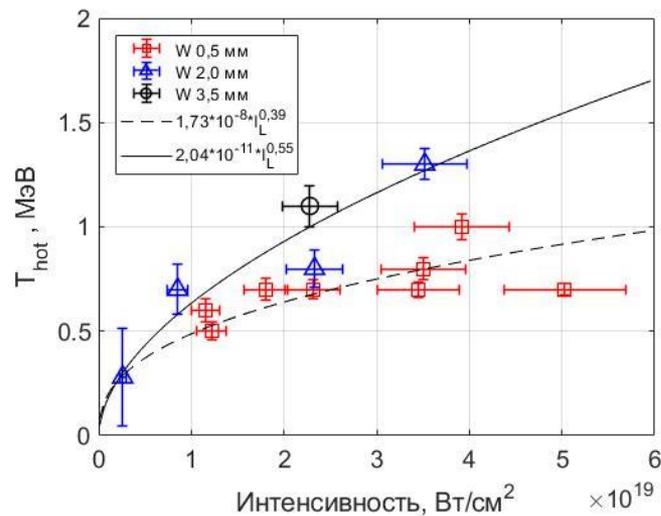
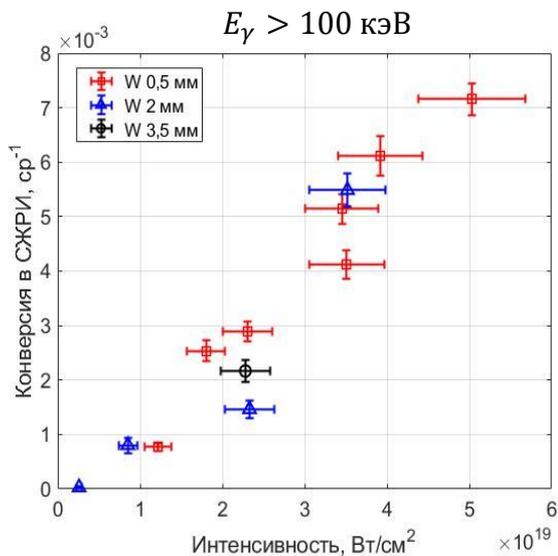
Результаты измерения спектрально-угловых параметров тормозного излучения



W2мм+CH 1 мкм
33,8 Дж;
 $1,5 \times 10^{19}$ Вт/см²

Генерация тормозного излучения в твердотельных мишенях

Параметры импульса гамма-излучения (угол регистрации 45°)

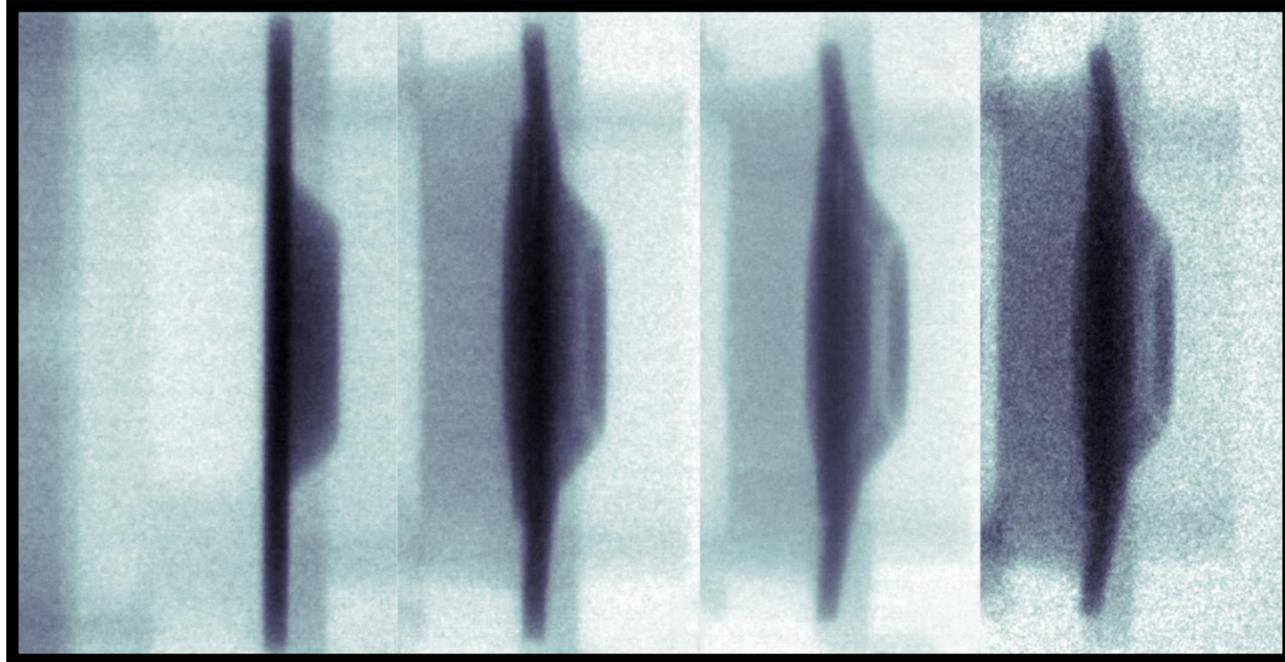


$$T_{hot}[0,5 \text{ мм}] \sim I_L^{(0,39 \pm 0,15)}$$

$$T_{hot}[2 \div 3,5 \text{ мм}] \sim I_L^{(0,55 \pm 0,18)}$$

Первое «кино» снятое с помощью ЛРГК

$V_{уд} \approx 414 \text{ м/с}$



0

4066

6042

6980

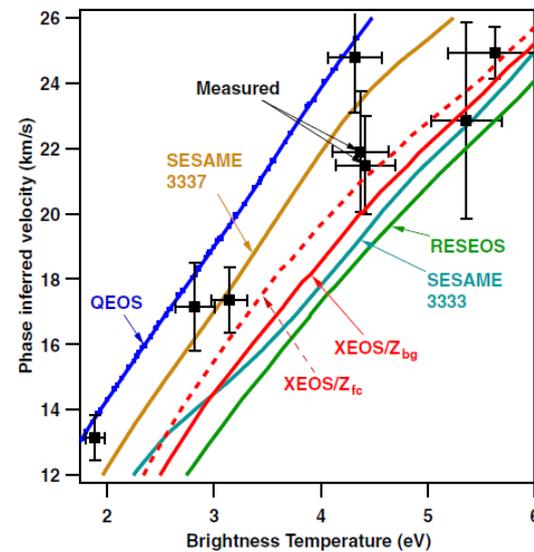
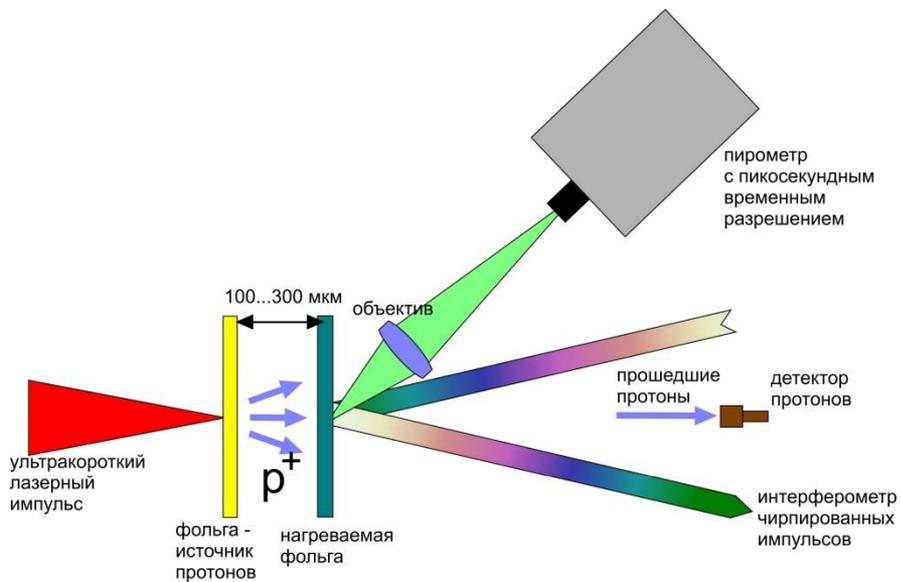
н а н о с е к у н д ы

4

**Исследование WDM при
изохорическом нагреве тонких
фольг пучками лазерно-
ускоренных протонов**

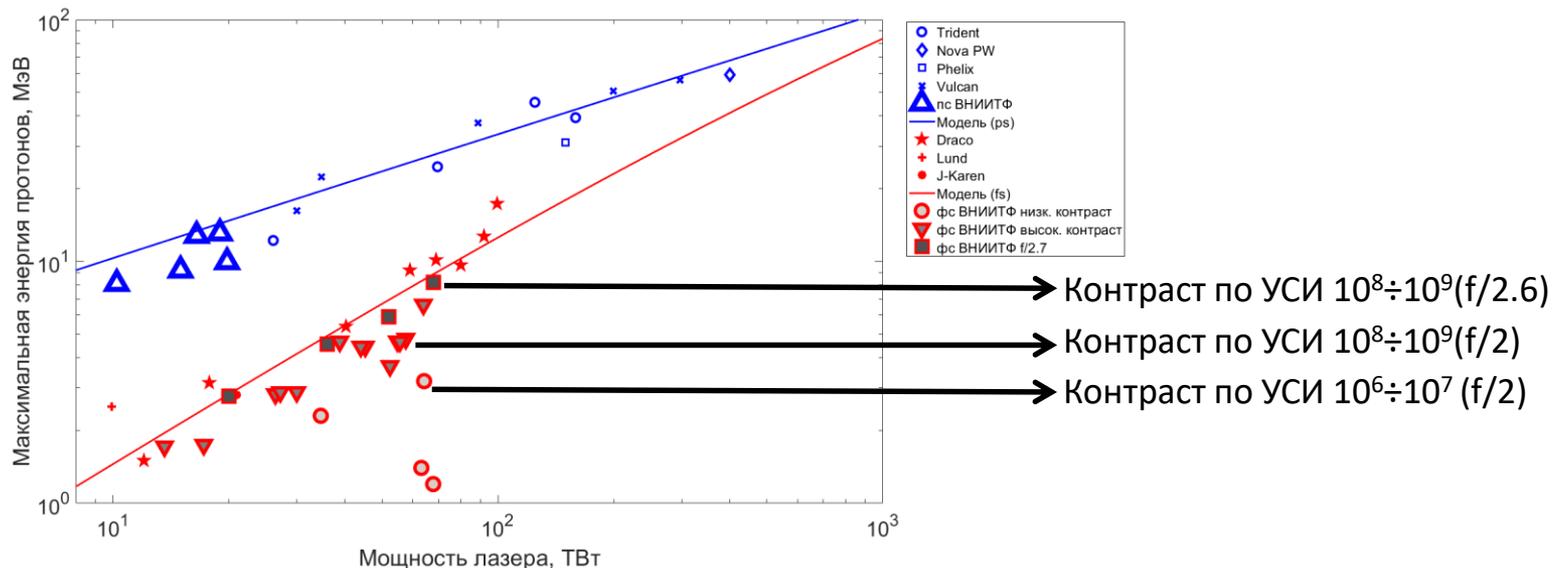


Постановка экспериментов



S. Feldman et al., Phys. Rev. E **95**, 031201(R) (2017)

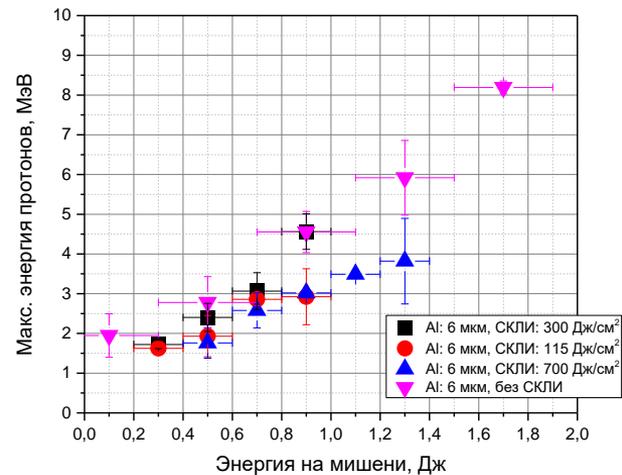
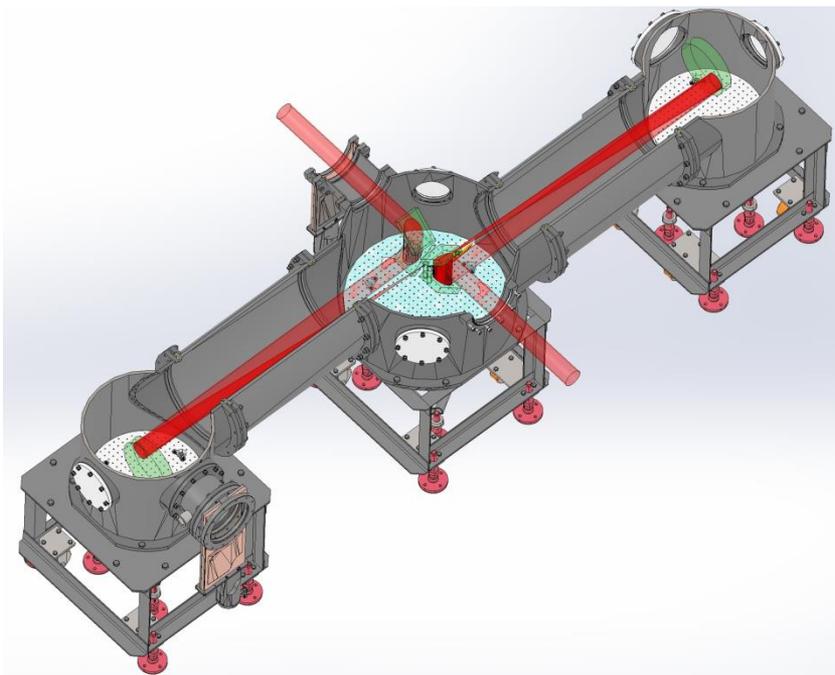
Лазерное ускорение протонов



K. Zeil et al., New Journal of Physics 12, 045015 (2010)

J. Schreiber et al., Phys. Rev. Lett. 97, 045005 (2006)

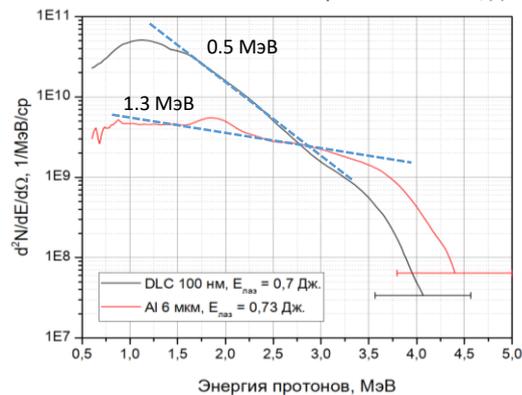
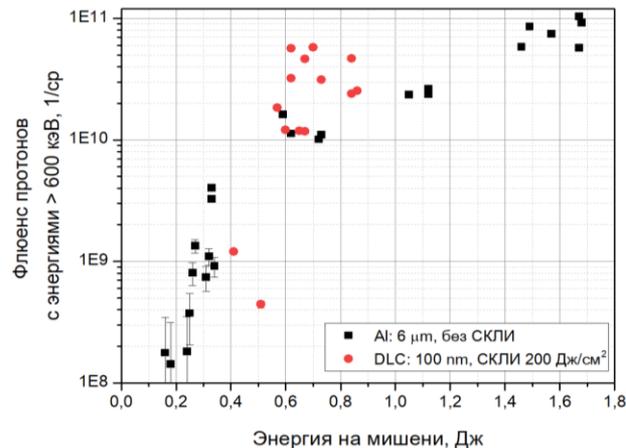
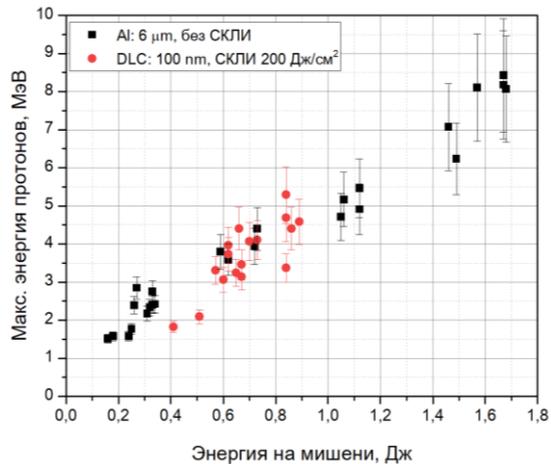
Двойное плазменное зеркало



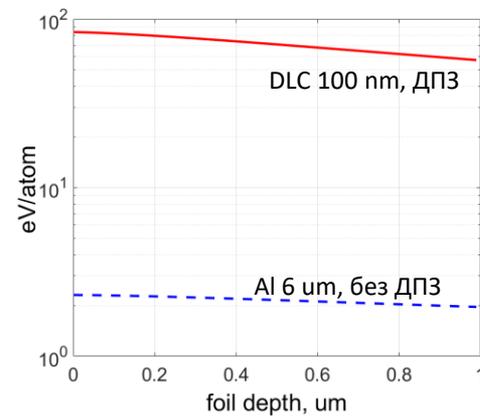
Максимальная энергия протонов в экспериментах без ДПЗ в 1,5 раза выше

Двойное плазменное зеркало

Al 6 мкм vs DLC 0.1 мкм



Изохорический разогрев протонами
1 мкм медной фольги на расстоянии 100 мкм



5

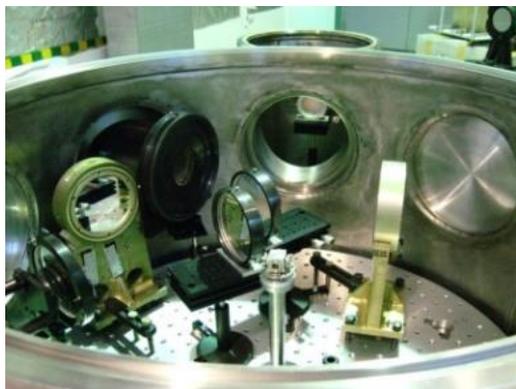
Стойкость микроэлектронных устройств к заряженным частицам космического пространства



Испытание микроэлектронных устройств на стойкость к воздействию заряженных частиц космического пространства

Преимущества лазер-плазменных ускорителей:

1. Малые размеры
2. Различные типы заряженных частиц на одной установке
3. Возможность имитации спектров заряженных частиц на определенной орбите



Вакуумная мишенная камера
фемтосекундной лазерной установки

VS



Вакуумная камера 10 МВ тандемного ускорителя BNL

Постановка экспериментов

Лазер:

- Энергия импульса от 0,1 Дж до 2 Дж;
- Длительность импульса ~25 фс;
- Фокусировка $f/2$;
- Интенсивность до $5 \cdot 10^{20}$ Вт/см²

Мишень:

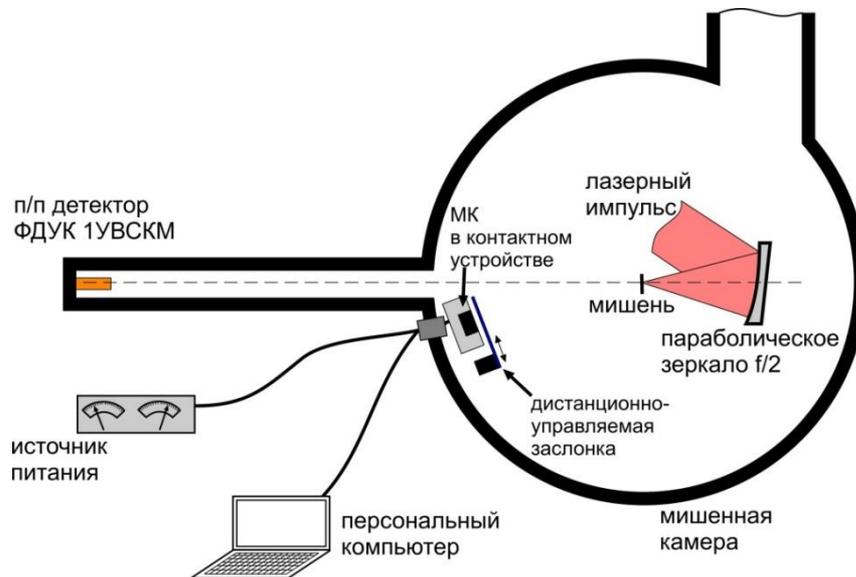
- Al фольга толщиной 6 мкм.

Времяпролетный спектрометр протонов:

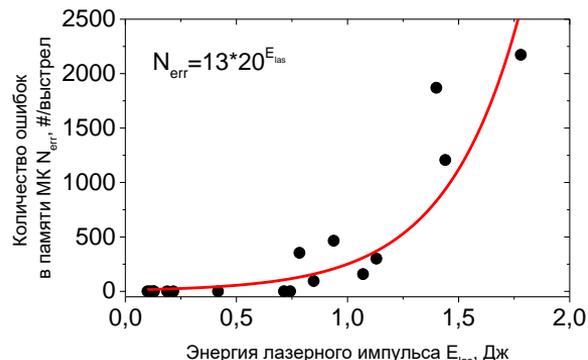
- Времяпролетная база 1,45 м;
- Детектор - кремниевый pin-диод ФДУК-1УВСКМ;
- Фильтр перед диафрагмой Al 6 мкм;
- Угол наблюдения относительно нормали мишени 0° , либо 11° .

Объект воздействия:

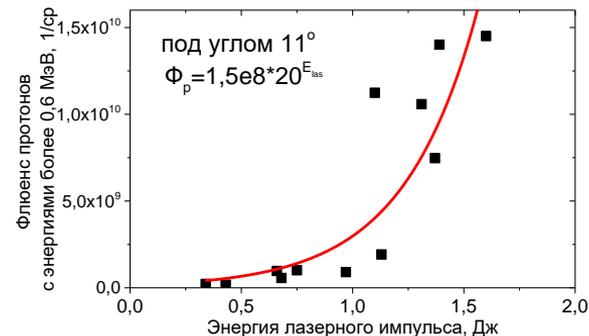
- Микроконтроллер производства «Миландр» с ARM ядром;
- Топологическая норма 180 нм;
- Объем внутренней памяти 32 кБ;
- Перед облучением протонами лазерного ускорителя алюминиевая крышка МК удалялась механическим способом



Реакция микроконтроллера на облучение протонами лазерного ускорителя



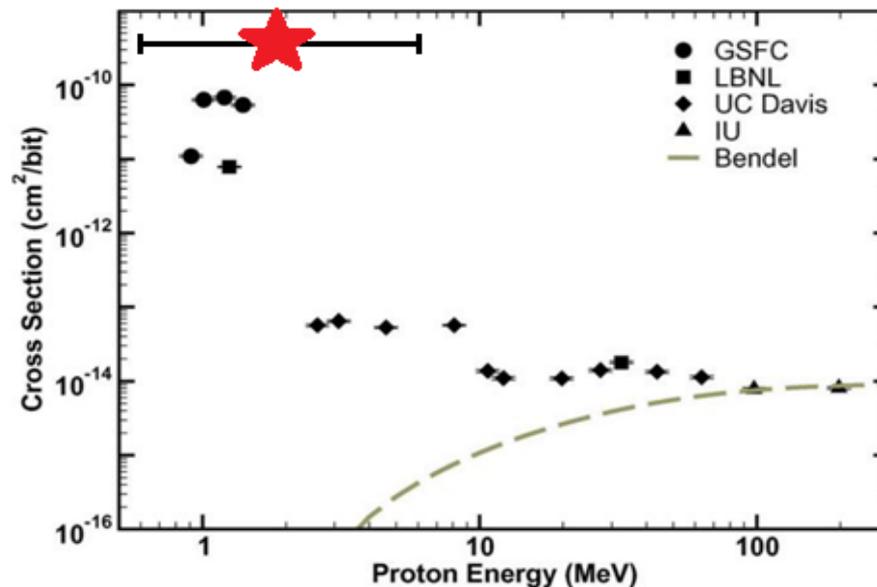
Зависимость количества ошибок в памяти МК от энергии лазерного импульса



Зависимость флюенса протонов в направлении МК от энергии лазерного импульса

$$\sigma_p^{err} = \frac{N_{err}}{\Phi_p} \frac{R^2}{N_{бит}} = (5 \pm 1) \cdot 10^{-10} \text{ см}^2 / \text{бит}$$

Сечение одиночных сбоев под действием низкоэнергетических протонов



1. М. В. Марчук и др. «Определение доминирующего механизма сбоев в оперативном запоминающем устройстве микроконтроллера 0.18 μm при импульсном воздействии протонов низких энергий», ЖТФ 94:2, 248–254 (2024).
2. К.В. Сафронов и др. «Применение лазер-плазменного ускорителя протонов для исследования одиночных радиационных эффектов в микроэлектронном устройстве», Приборы и техника эксперимента №5, 106-112 (2024).

Ускорение электронов в кильватерном режиме

Постановка экспериментов

Лазер

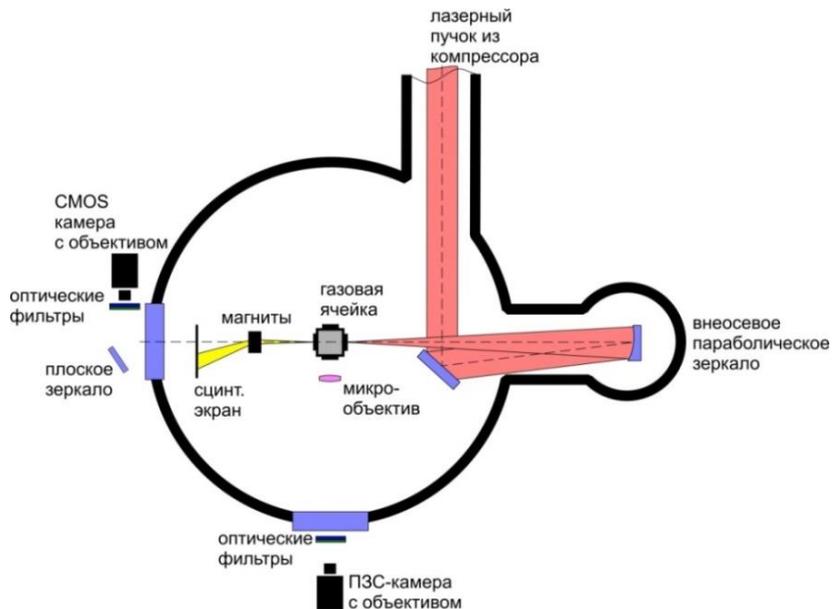
- Энергия в импульсе до 2,5 Дж
- Длительность импульса 25 фс
- Пиковая мощность до 100 ТВт
- Фокусировка $f/(20 \div 16)$

Мишень

- Газовая ячейка
- Длина $0,6 \div 0,8$ мм
- Газ гелий + ~5% воздуха
- Концентрация гелия $(1,5 \div 2) \cdot 10^{18}$ см⁻³

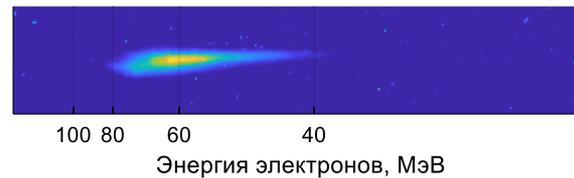
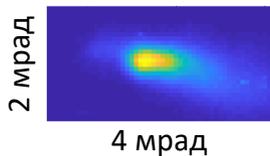
Диагностика

- Магнитный спектрометр с регистрацией на сцинтилляционный экран Lanex
- Стопка дозиметров ПСТ (Al₂O₃) толщина 1 мм

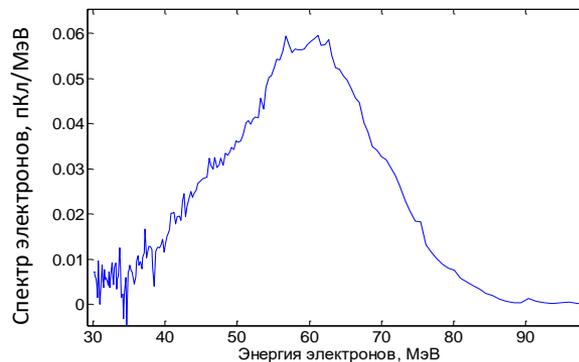


Ускорение электронов в кильватерном режиме

Параметры электронного пучка

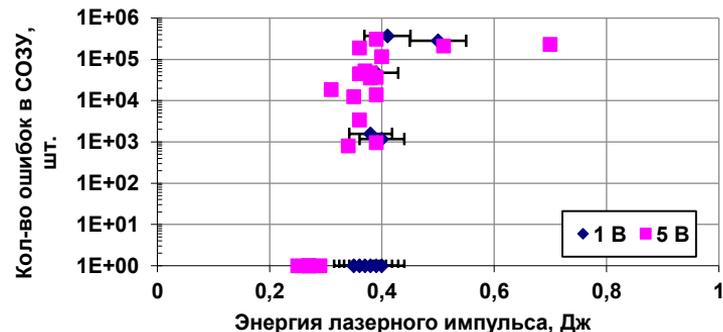


- Мощность лазерного импульса (20÷40) ТВт
- Среднеквадратичное отклонение угла вылета в горизонтальном направлении 6 мрад
- В вертикальном направлении 4 мрад
- Заряд пучка 5÷30 пКл
- Средняя энергия электронов 60 МэВ
- $\Delta E/E_m \sim 50\%$



Ускорение электронов в кильватерном режиме

Облучение микросхемы памяти



Порог массового сбоя ячеек памяти при облучении электронным пучком лазерного ускорителя ($\tau < 1$ пс) составляет $(0,1 \pm 1)$ P.

При облучении импульсами рентгеновского излучения ($\tau = 25$ нс) на ускорителе прямого действия порог сбоев микросхемы составляет (9 ± 5) P.



Заключение

В ЦЛФИ РФЯЦ-ВНИИТФ с использованием мощных лазеров пикосекундной и фемтосекундной длительности импульса созданы яркие источники ионизирующих излучений для всевозможных применений

Спасибо за внимание

Сафронов Константин Владимирович
Начальник научно-исследовательской группы

E-mail: dep5@vniitf.ru
www.vniitf.ru