



РОСАТОМ

РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР ВНИИЭФ

Лазерная установка на Nd стекле с предельными характеристиками по концентрации энергии излучения для проведения исследований экстремальных состояний вещества и в интересах ЛТС

Деркач В.Н., Гаранин С.Г., Бельков С.А., Воронич И.Н., ИЛФИ ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ
Кузнецов А.П., Губский К.Л. НИЯУ МИФИ

Некоторые факты:

- 90% энергии генерируется в 4 проходе, остальные проходы ведут к избыточному накоплению аберраций. Штатный режим работы NIF основан на работе 16 (вместо 18) модулей¹. В некоторых режимах – 14 модулей.
- Более 50% запасенной энергии остается в усилителях. При создании китайской установки рассматривается вариант с повышенным КПД генерации излучения за счет усиления двух импульсов в одном усилительном канале одновременно. Эффект: +30% энергии с каждого канала².

¹ C. A. Haynam, P. J. Wegner, J. M. Auerbach et al, National Ignition Facility laser performance status, Applied Optics, v.46, **16**, 3276-3303 (2007)

² X.M. Zhang, X.F. Wei, M.Z. Li et al, Bidirectional amplifying architecture with twin pulses for laser fusion facilities, Laser Phys. Lett. **10**, 1-6 (2013).

- ❑ Демонстрация новой усилительной схемы для проектируемой лазерной установки НИЯУ МИФИ.
- ❑ Реализация основных конструктивных решений с использованием элементной базы установки «Луч».

Основные цели разработки:

- повысить КПД генерации излучения из запасенной энергии;
- увеличить выходную энергию канала;
- снизить расходимость;
- повысить функциональные возможности установки;
- увеличить частоту проведения экспериментов;
- улучшить эргономику размещения;
- снизить стоимость канала;
- уменьшить эксплуатационные расходы.

Ограничения традиционных многопроходных схем усиления



Ограничение	Природа ограничений	Метод решения
Мелкомасштабная самофокусировка	физическая	Обнуление В-интеграла при прохождении угловой апертурной диафрагмы в ПФ
Лучевая прочность покрытий и материалов системы транспортировки	технологическая	Повышение качества деталей, упрочнение покрытий
Ограничение энергии на элементах реверсора, уменьшенная световая апертура	схемная	Транспортировка излучения в параллельных пучках

Ограничение энергии в схеме реверсора

1 Поперечное расстояние между диафрагмами и наклонное распространение излучения определяют смещение и виньетирование пучка в усилительном тракте

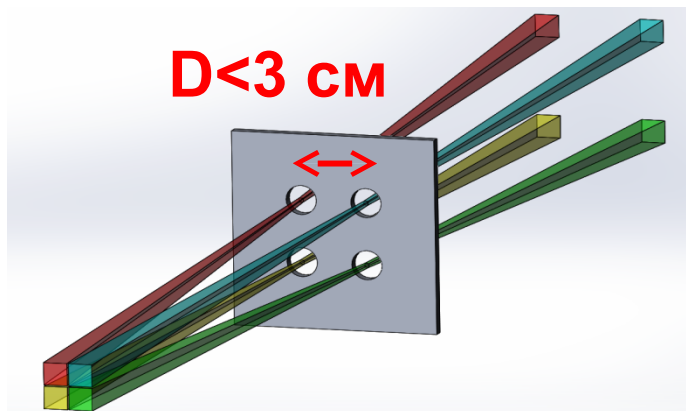


2 Расстояние между отверстиями ограничено допустимым размером световой апертуры оптических элементов



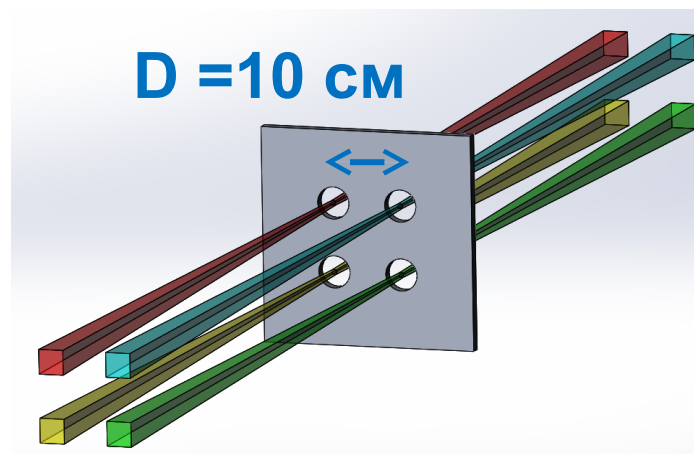
3 Зеркала в ПФ имеют малый размер, энергия излучения перед 3 проходом ограничена допустимой нагрузкой

Традиционная схема транспортировки



Размер пучка на зеркале < 3 см

Предлагаемая схема транспортировки



Размер пучка в реверсоре до 10 см

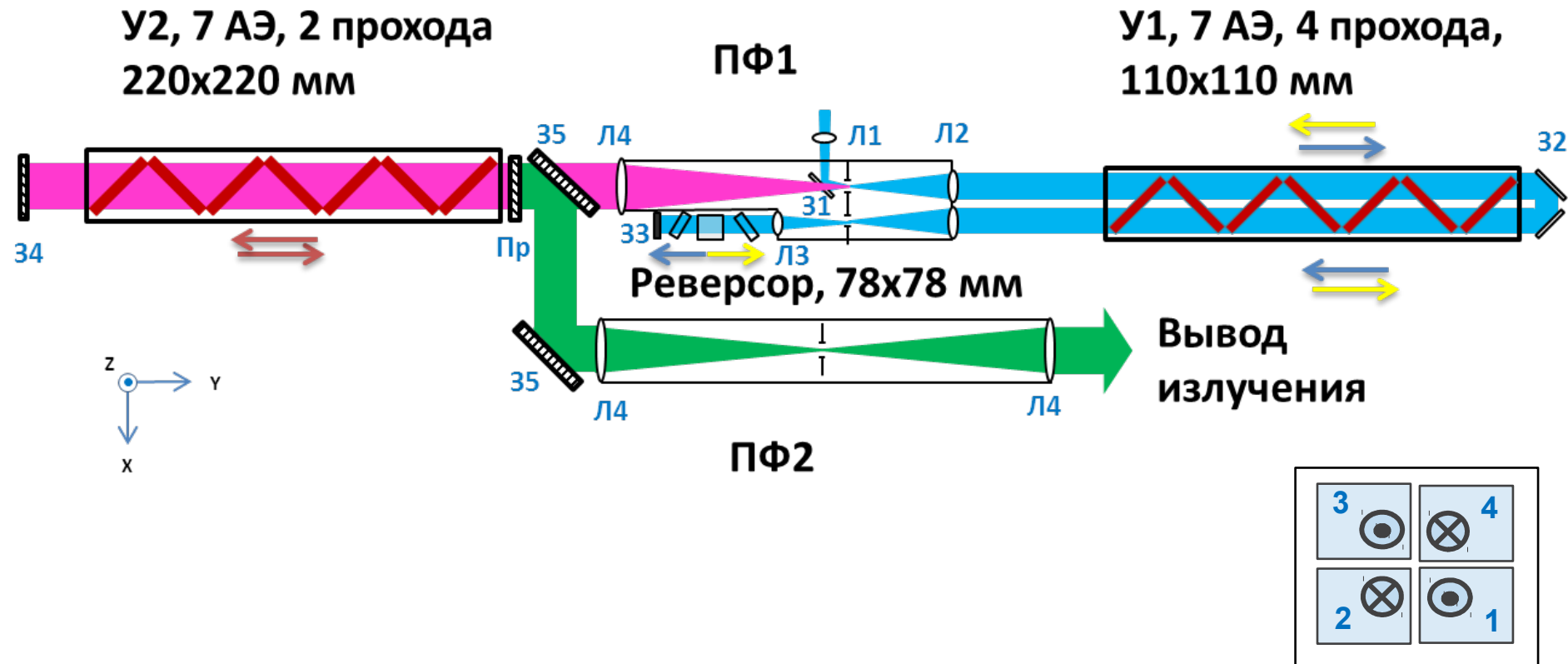
Уменьшение размера пучка создает возможность параллельной трассировки излучения в разных проходах и позволяет разнести их пространственно

Алгоритм увеличения качества ВФ. Должны быть:

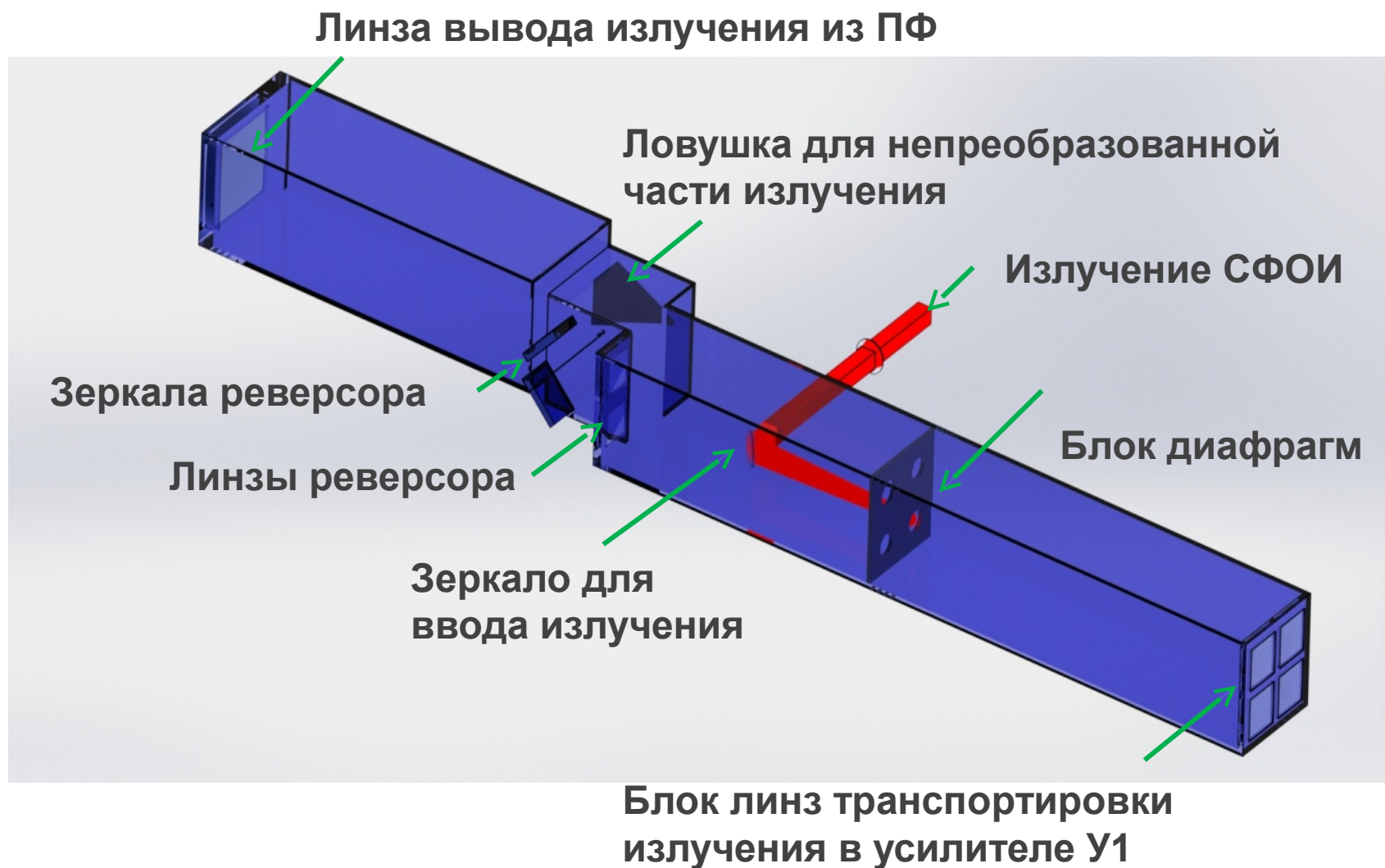
- уменьшены aberrации, вносимые каждой оптической деталью;
- уменьшено количество деталей, участвующих в усилении и транспортировке излучения;
- уменьшена апертура усиливаемого пучка на тех стадиях, когда энергия пучка сопоставима с порогом лучевой прочности оптических деталей;
- транспортировка излучения по многопроходному тракту осуществляется по разному оптическому пути в каждом из проходов.

Во всех проведенных расчетах используются данные для оптических элементов установки «Луч»

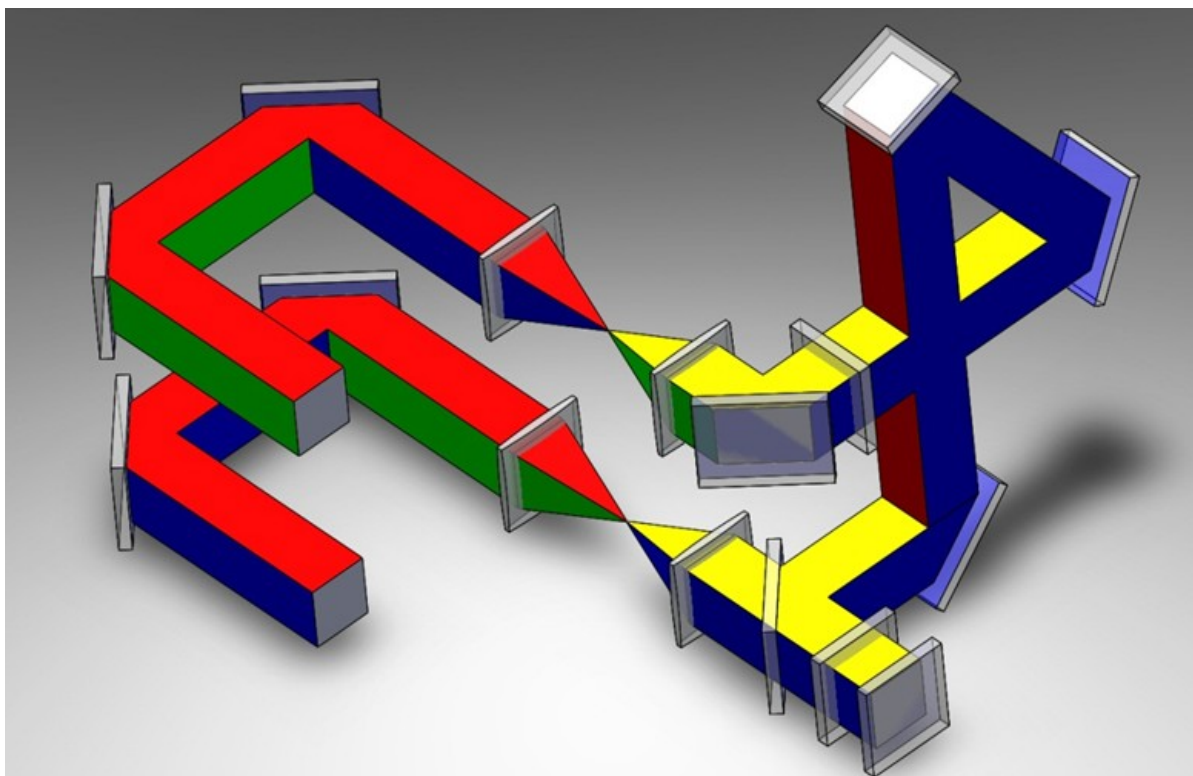
Принципиальная схема усилительного канала



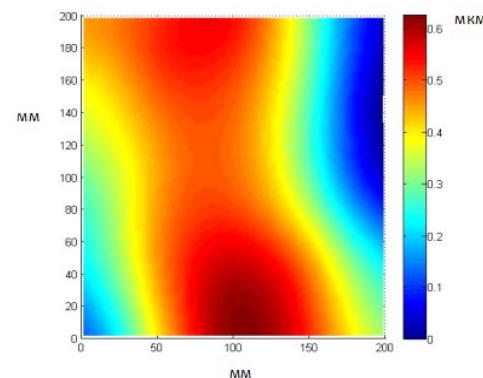
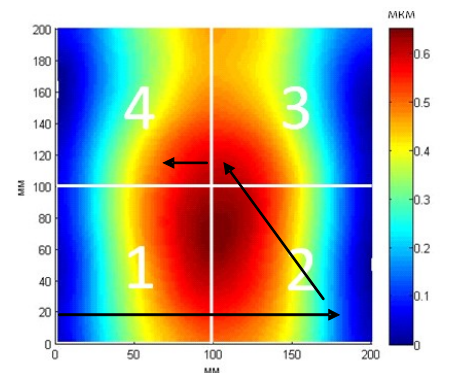
Вывод излучения осуществляется посредством преобразования частоты излучения непосредственно в усилительном канале.



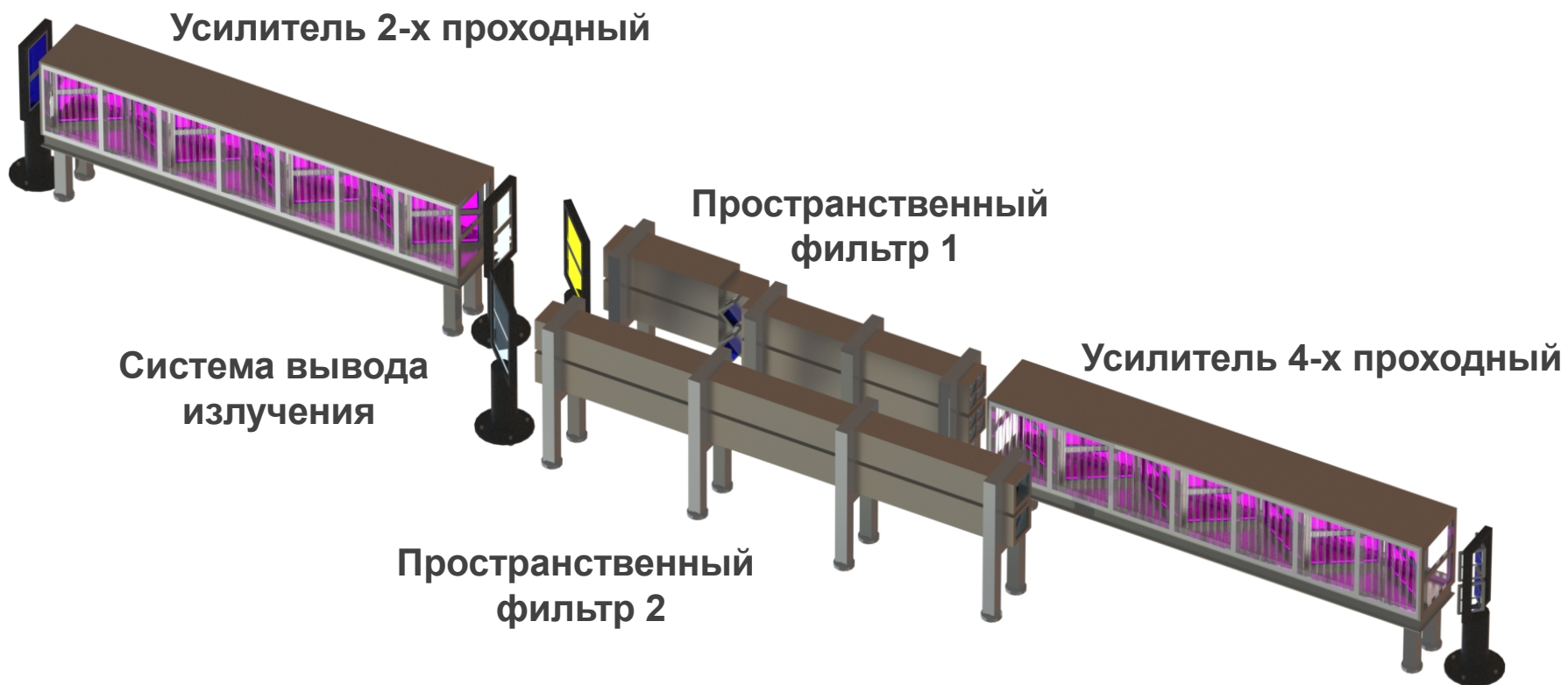
Организация режима в четверть волны с разворотом пучка



Тепловые aberrации У1



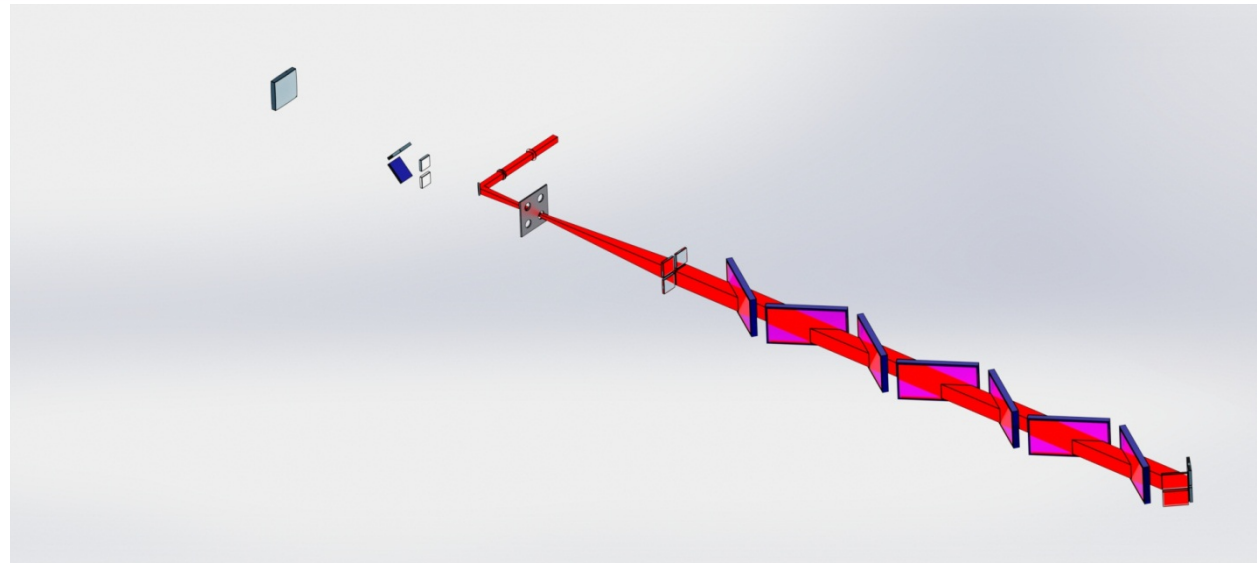
Искажения ВФ до 7 раз меньше за 4 прохода У1 и не зависят от энергии накачки



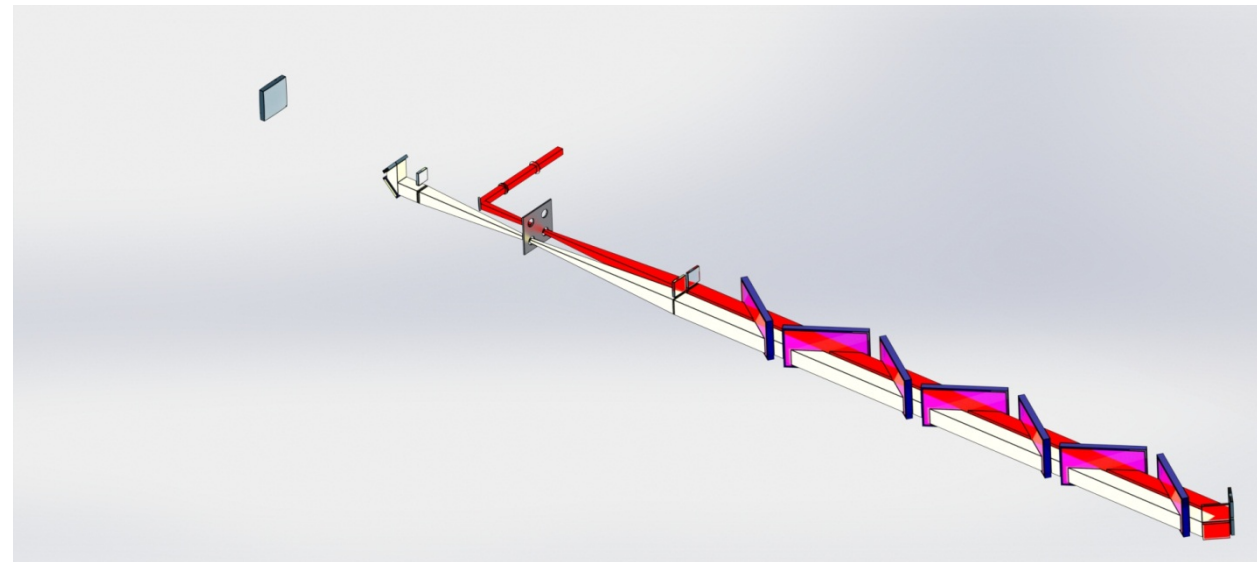
Установка из 2х каналов размещается на площади **25×1,5 м²**

Трассировка пучка (1)

-1 проход усилителя У1,
пучок 10х10 см

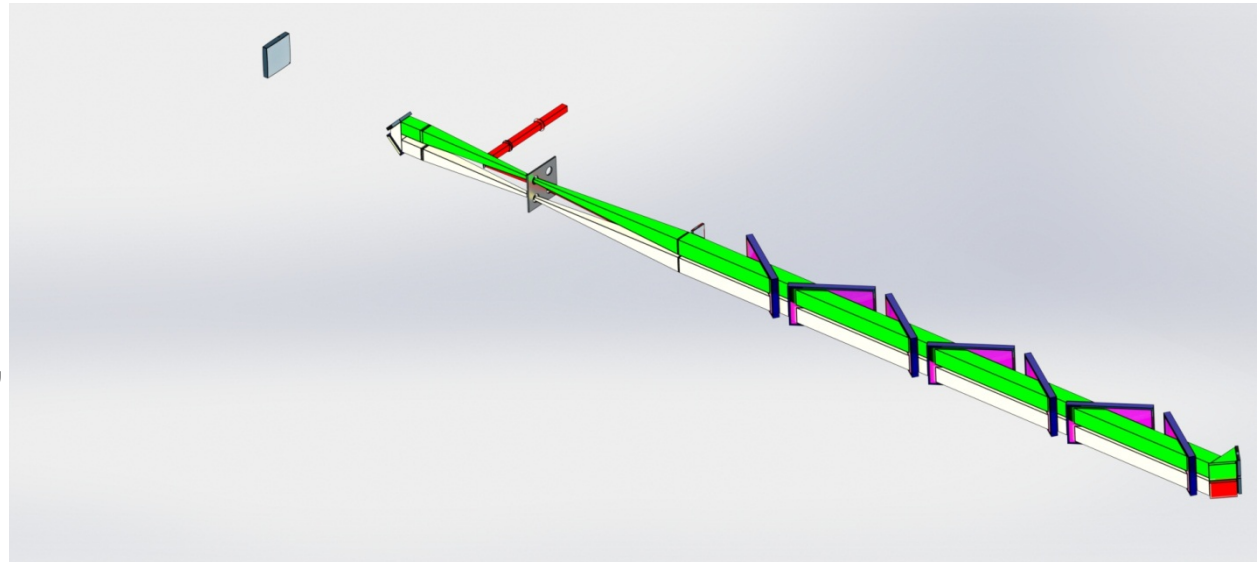


- 2 проход усилителя У1
- вывод в реверсор,
пучок 7х7 см

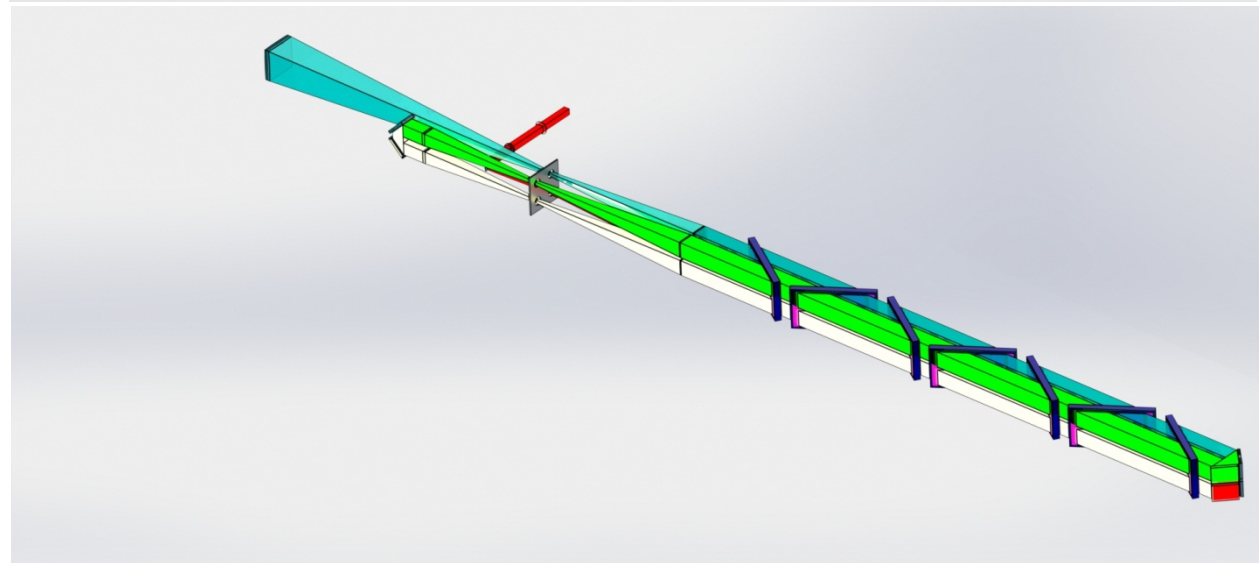


Трассировка пучка (2)

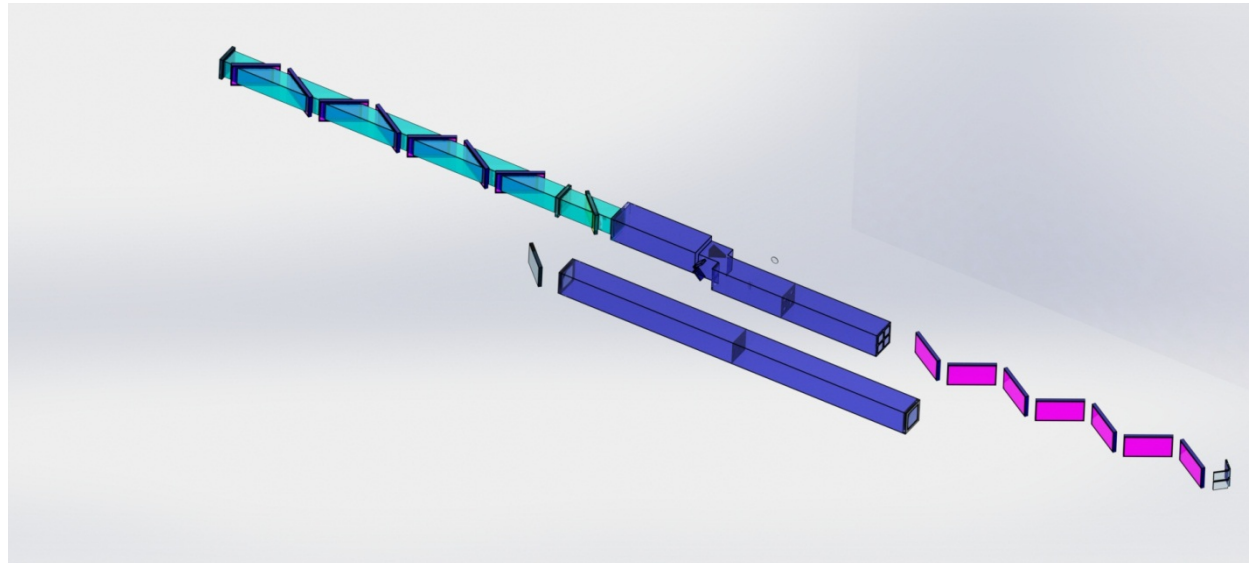
- Вывод излучения из реверсора
- 3 проход усилителя У1, размер пучка 10x10 см



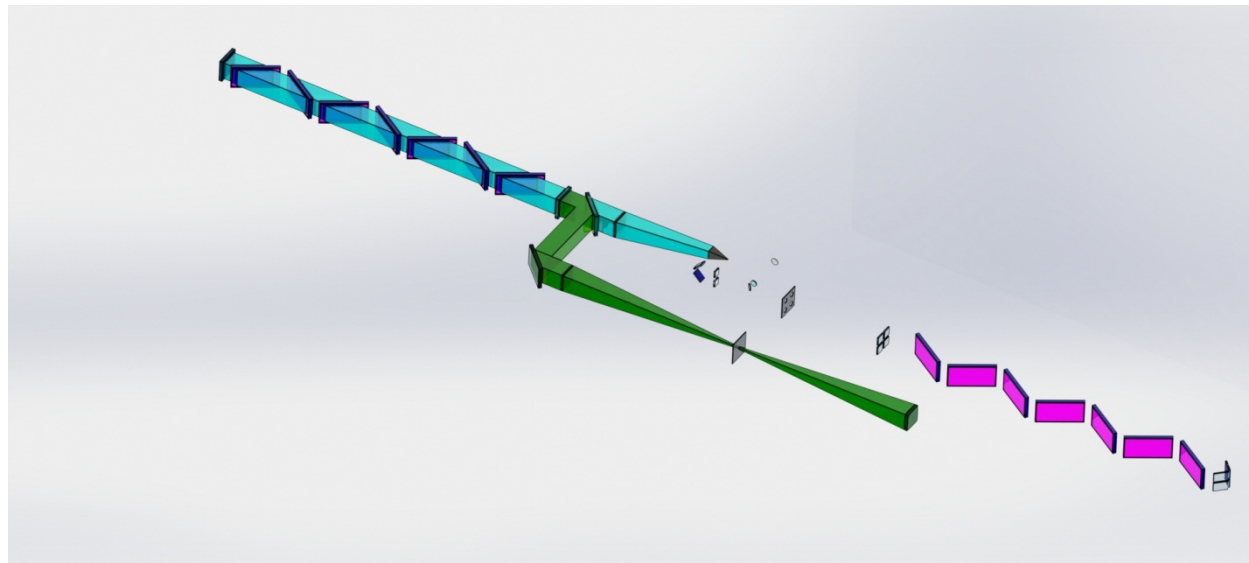
- 4 проход усилителя У1
- Вывод излучения из ПФ в усилитель У2, размер пучка 20x20 см



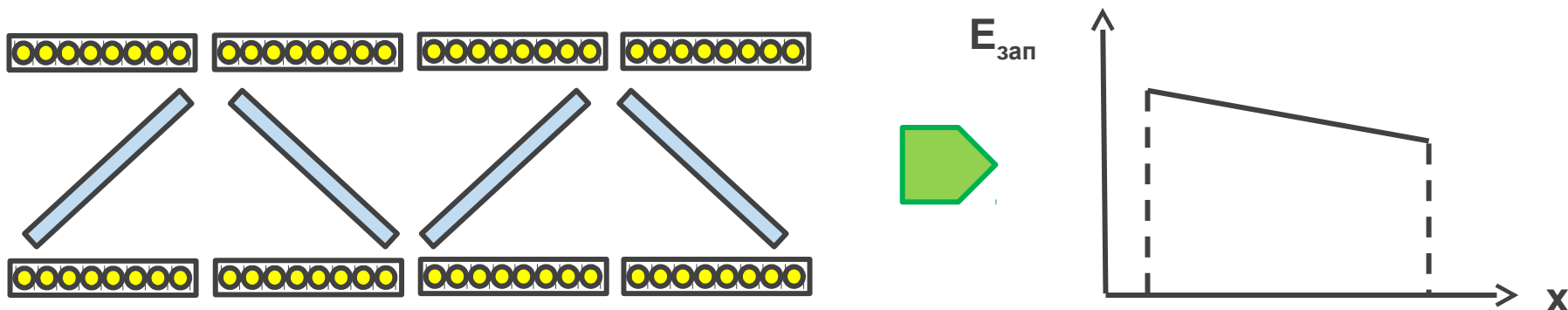
1 проход усилителя У2



- 2 проход усилителя У2,
- Вывод излучения на длине волны 0,527 мкм в ПФ2
- Поглощение непреобразованного ЛИ в ловушке

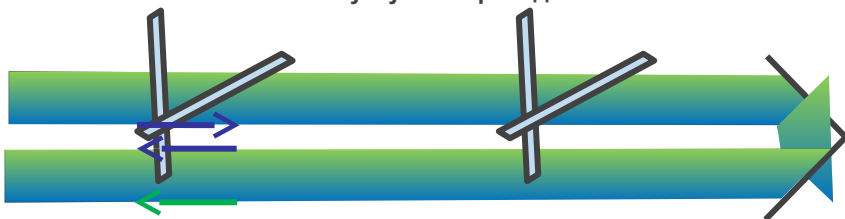


Распределение запасенной энергии при четной конфигурации АЭ



Решение для предварительного усилителя

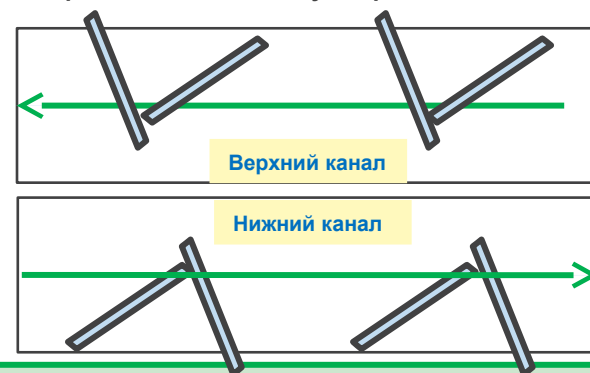
- При обходе усилителя в 1-2 и 3-4 проходах левая и правая стороны пучка меняются при отражении от зеркал транспортной системы
- После выхода из реверсора в 3 проход ориентация левой и правой сторон противоположна по отношению к пучку во 2 проходе



Решение для основного усилителя

- 1 и 2 проходы осуществляются по разным каналам (верхний и нижний пучки меняются местами);
- ориентации АЭ в верхнем и нижнем модуле противоположные

Вид сверху



- Оба усилителя в составе установки могут иметь четное количество дисковых АЭ
- Повороты пучка компенсируют тепловые абберации предварительного усилителя

Расчеты усиления в канале

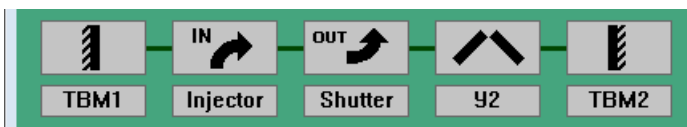
Полная схема системы усиления:

Source – первая диафрагма ПФ1

Target – вход преобразователя частоты



Схема 2-х проходного усилителя



Бюджет пассивных потерь

- Коэффициенты отражения:
 - зеркал 0,98;
 - просветляющего покрытия 0,005;
- Поглощение для стекла К8 10^{-3} см^{-1} ;
- Пропускание затвора Поккельса 0,85;
- Пропускание преобразователя частоты 0,9.



Использовано ПО «Френель»

При длительности импульса $\tau=6 \text{ нс}$, $E_{\text{выхода}}=6 \text{ кДж}$

Динамика расходимости в процессе усиления

Форма импульса

Гауссовая

Расходимость

- В-интеграл обнуляется при проходе транспортного фильтра;
- Адаптивное зеркало компенсирует неоднородности ВФ $>D/4$;
- Оптическое качество оптических деталей и дисковых элементов аналогично, используемым на установке «Луч».

Оценка для разных схем усиления:

конфигурация дисковых АЭ	Расходимость (усл.ед.)
18шт×4 прохода	17
5шт×2 прохода + 11шт×2 прохода	17,7
7шт×4 прохода×Δ/2 + 7шт×2 прохода	<8

Расчет



- Расходимость уменьшается до 4×10^{-5} радиан
- При улучшении качества оптических компонент расходимость уменьшается кратно

- ❑ Предложен вариант модернизации усилительной схемы установки на дисковых элементах из неодимового стекла. Уменьшено число проходов через дисковый активный элемент с 72 (4x18) до 42 (4x7+2x7)
- ❑ Реализован режим транспортировки излучения в параллельных пучках
- ❑ Транспортная развязка пространственного фильтра снимает требование к нагрузке на зеркало реверсора и ограничение на его устройство
- ❑ Проведены расчеты усилительной системы, габаритный расчет оптической схемы, оценочный расчет расходимости излучения. Получено:
 - схема усиления на основе 14 активных элементов может обеспечить энергию излучения до 6 кДж при длительности импульса 6 нс и до ≈ 8 кДж при длительности импульса 10 нс;
 - расходимость излучения на выходе системы составляет $< 4 \times 10^{-5}$ радиан при условии использования оптических элементов с параметрами, принятыми при изготовлении оптики для установки «Луч»;
 - величина тепловых аберраций системы усиления уменьшена до 4 раз, нагрузка на адаптивную систему уменьшена в несколько раз.
- ❑ Промежуток между опытами может быть снижен до 1 часа
- ❑ 2-х канальная установка размещается на площади $25 \times 1,5$ м²

- Каналы могут объединяться в единую эргономическую конструкцию;
- Усилительный канал масштабируются к большей апертуре с пропорциональным увеличением генерируемой энергии излучения без изменения конструктивных решений;
- Возможна четная конфигурация расположения активных элементов в обоих усилителях, что позволяет существенно упростить монтажную юстировку системы;
- Дополнительное снижение расходимости может обеспечиваться за счет изменения пути транспортировки излучения при втором проходе основного усилителя – верхний и нижний пучки зеркалами транспортной системы меняются местами;
- Для разработки конструктивных решений новой усилительной системы будут максимально использованы оптико-механические узлы и системы, используемые на установке «Луч», что позволит сократить время реализации предложения.



РОСАТОМ

РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР ВНИИЭФ

Спасибо за внимание!