

Многоканальный Yb:YAG лазер с большой средней и пиковой МОЩНОСТЬЮ

И.И. Кузнецов, С.А. Чижов, Д.С. Трунов, Н.И. Карпов, О.В. Палашов

[*kuznetsov@ipfran.ru](mailto:kuznetsov@ipfran.ru)

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук
г. Нижний Новгород

Отдел импульсных лазеров с высокой средней мощностью



ЗНЧ 2025, г. Снежинск

Содержание

1. Введение

2. Усилитель расходящегося пучка

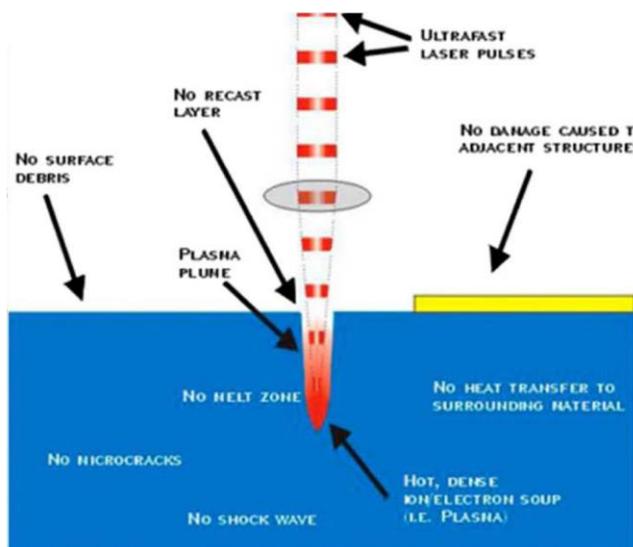
3. Многоканальный усилитель

4. Заключение

Актуальность. Промышленность

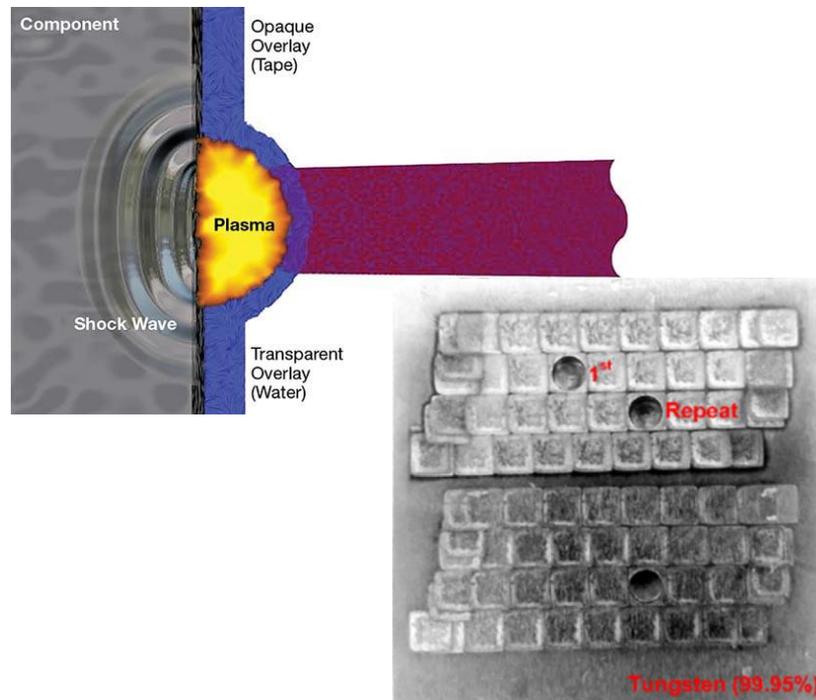
Микрообработка в режиме абляции

[Phillips K. C. et al. Advances in Opt. and Phot. 7 (4) pp. 684-712 (2015)]



Ударная обработка поверхности

[Banerjee, S. et. al. Optics Letters, 47(18), 4736-4739 (2022)]



Требования к лазерам:

Длительность <math>< 1 \text{ пс}</math>
Энергия <math>< 1 \text{ мДж}</math>

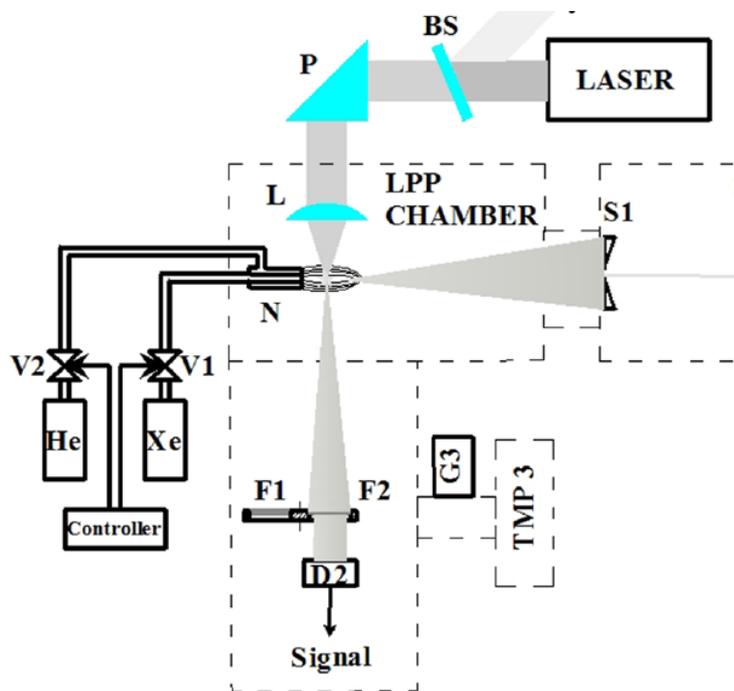
Длительность 1-10 нс
Энергия >1 Дж

Средняя мощность: чем больше, тем лучше

Актуальность. Микроэлектроника

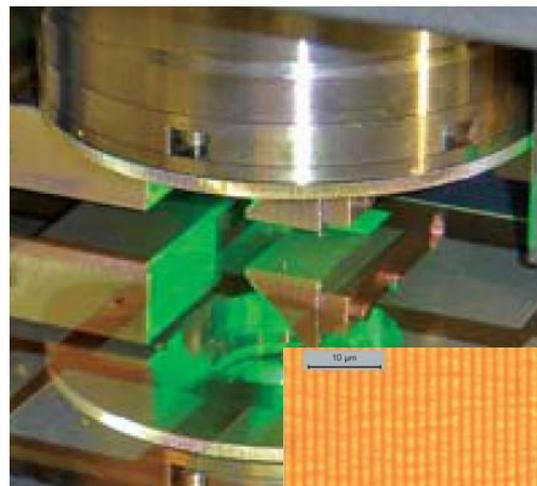
Источник ЭУФ для литографии

[Chkhalo, N. I., et al. *AIP Advances* 8 (10), 105003 (2018)]



Отжиг кремниевых пластин

[From INNOVAVENT brochure]



Требования к лазерам:

Длительность >1 нс
Энергия >100 мДж

Длительность >10 нс
Энергия >10 мДж

Средняя мощность: чем больше, тем лучше

Актуальность. Наука

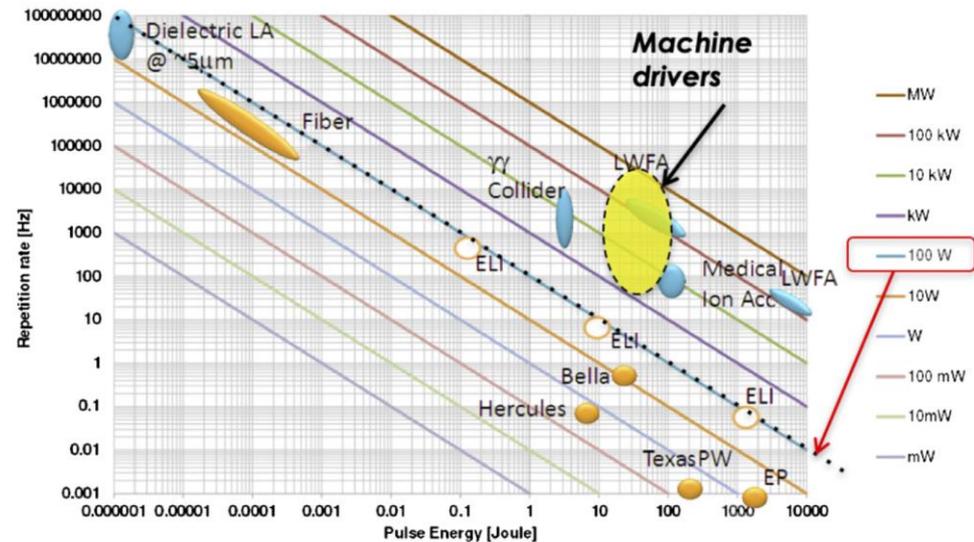
Спектроскопия

R. Pohl, et al. "The size of the proton"
Nature 466 (7303) pp. 213-216 (2010)



Лазерные ускорители

[A. Félicie, et al. "2020 roadmap on plasma accelerators."
New Journal of Physics 23 (3) pp. 031101 (2021)]



Требования к лазерам:

Длительность ~70 нс
Энергия ~100 мДж

Длительность фс - нс
Энергия мкДж - кДж

Средняя мощность: чем больше, тем лучше

Проблема

Пиковая мощность

Запасание энергии
Извлечение импульсов



- Увеличение апертуры пучка
- Подавление усиленного спонтанного излучения

Средняя мощность

Тепловые эффекты

- Уменьшение эффективности
- Уменьшение качества пучка
- Деполяризация
- Разрушение



- Минимизация тепловыделения
- Повышение эффективности охлаждения

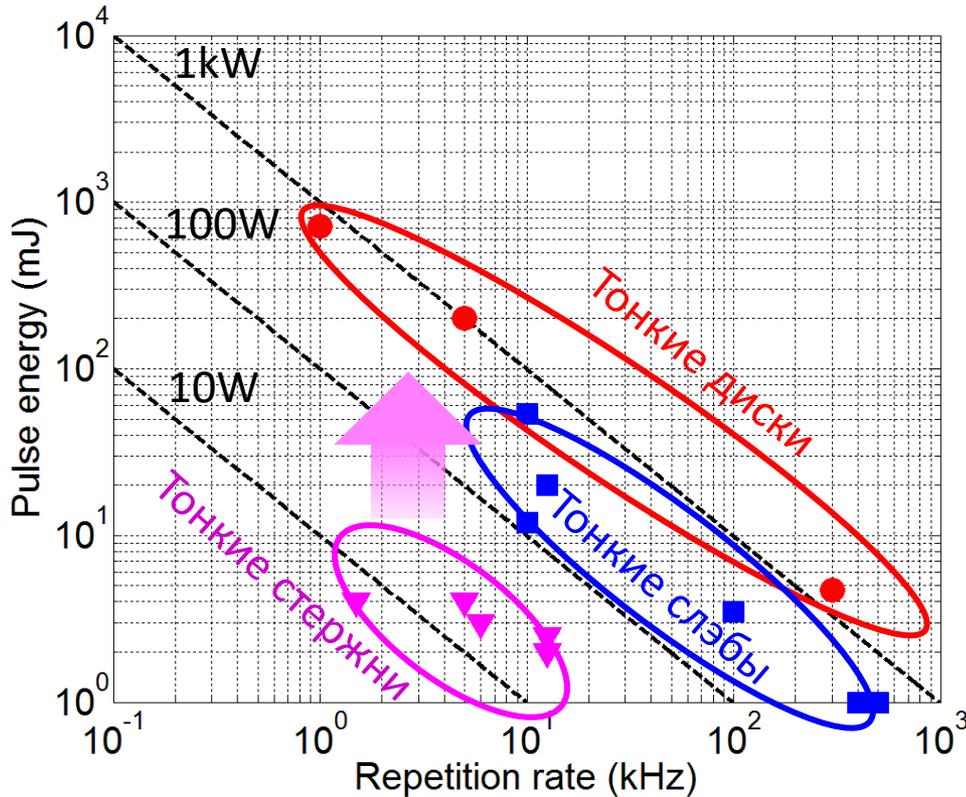


Введение. Проблема

Геометрия активного элемента (АЭ)

Иттербиевые лазеры

Энергия импульсов + Средняя мощность + Качество пучка



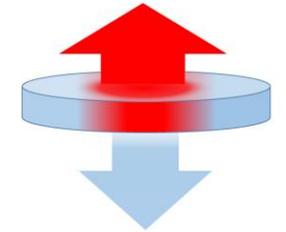
Тонкие стержни

Самая простая и надежная геометрия
Расширение их ниши актуально

Ось увеличения энергии, мощности и сложности

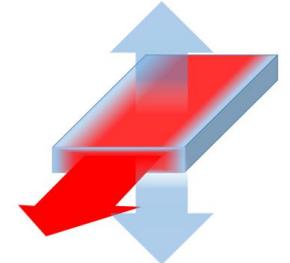
>100мДж
>1кВт

Тонкие диски



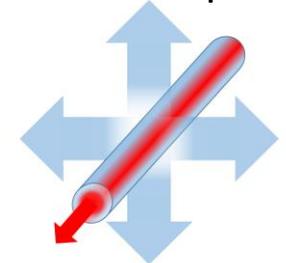
>10мДж
>300Вт

Тонкие слэбы



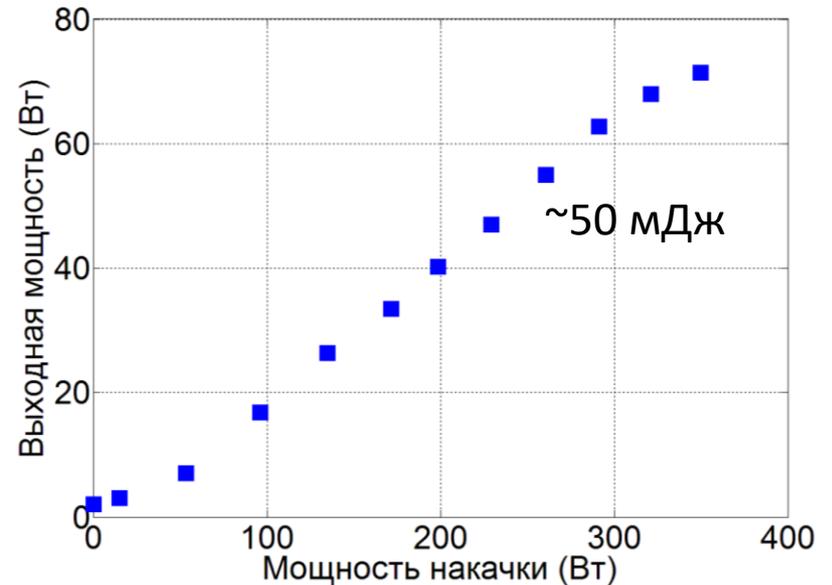
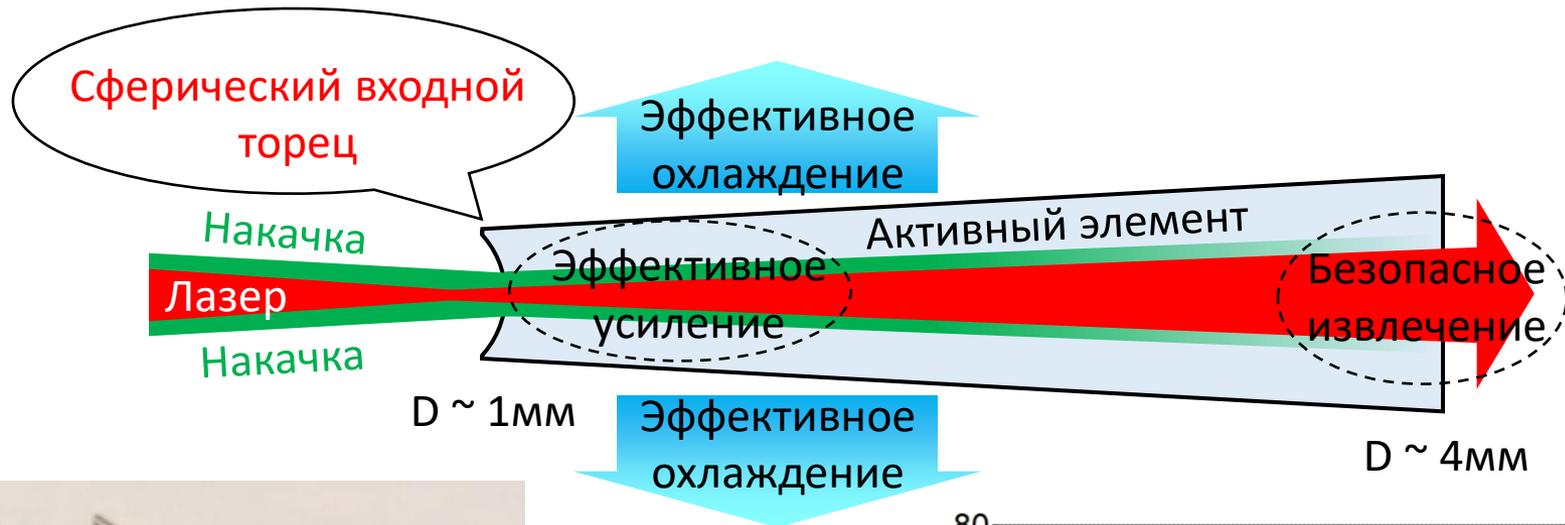
>1мДж
>100Вт

Тонкие стержни



Усилитель расходящегося пучка

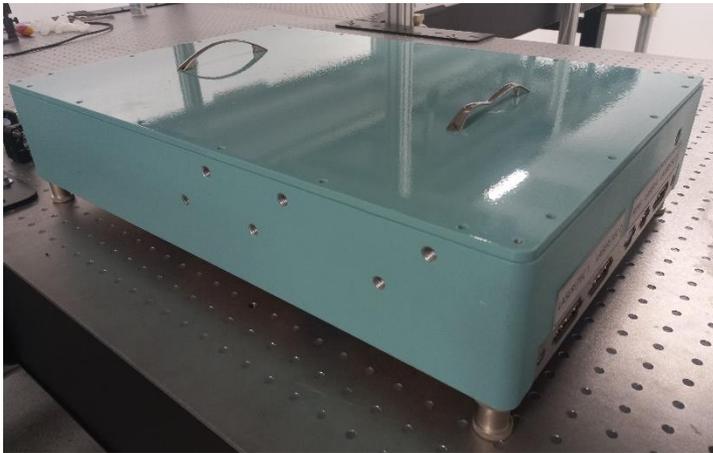
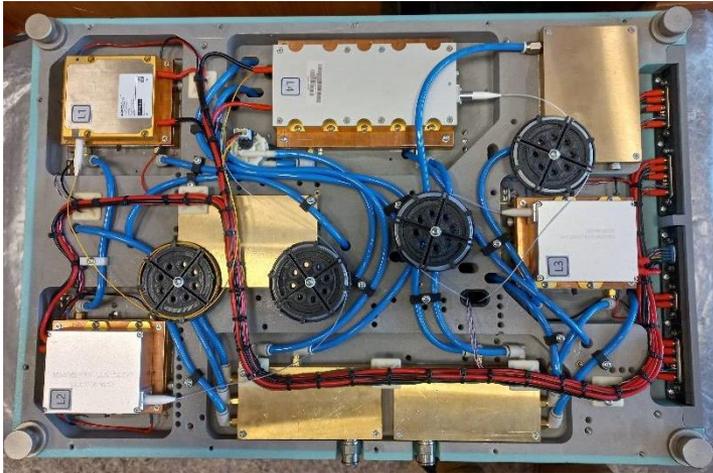
Усилитель расходящегося пучка



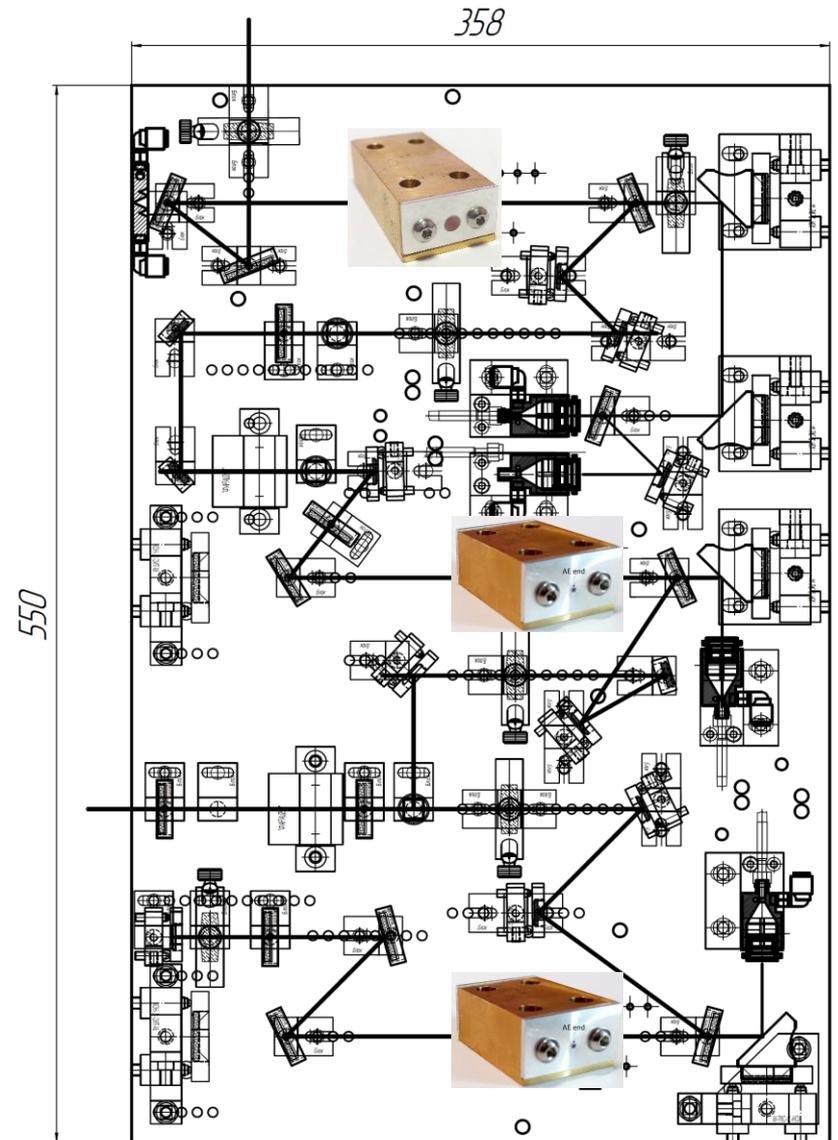
[I. Kuznetsov et. al., "Yb:YAG diverging beam amplifier with 20 mJ pulse energy and 1.5 kHz repetition rate," Opt. Lett. 48, 1292-1295 (2023)]

Усилитель расходящегося пучка

Лазер рентгеновского источника для литографии



Энергия импульсов 50-60 мДж
Средняя мощность до 100 Вт
Длительность импульсов от 1 до 4 нс
Качество пучка $M^2 < 1.5$

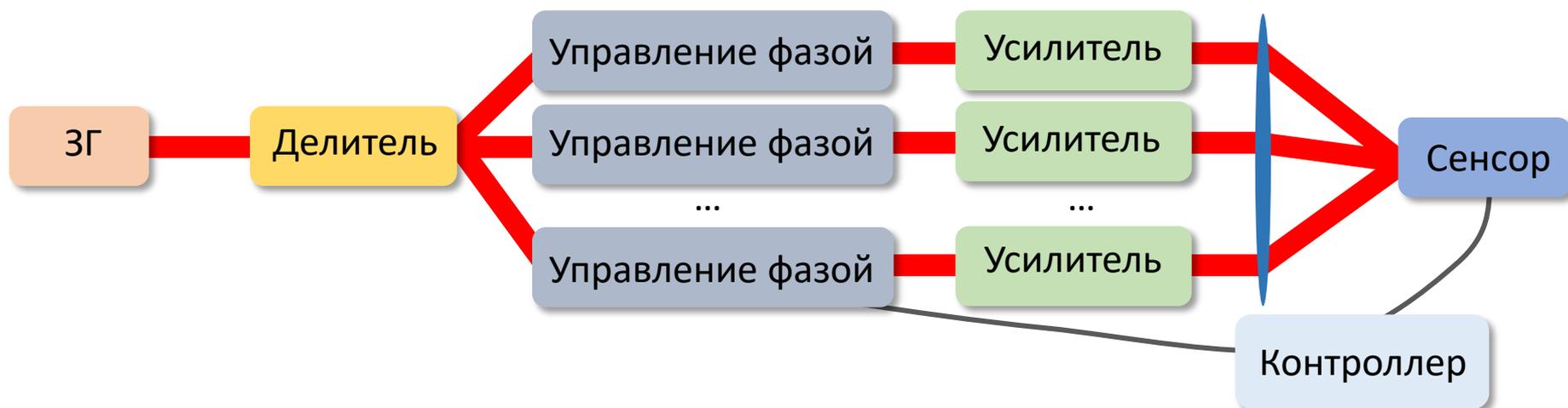


Многоканальный усилитель

Многоканальный усилитель

Схема когерентного сложения

Когерентное сложение пучков - другой путь масштабирования мощности



Технически сложно!

Актуально только когда:

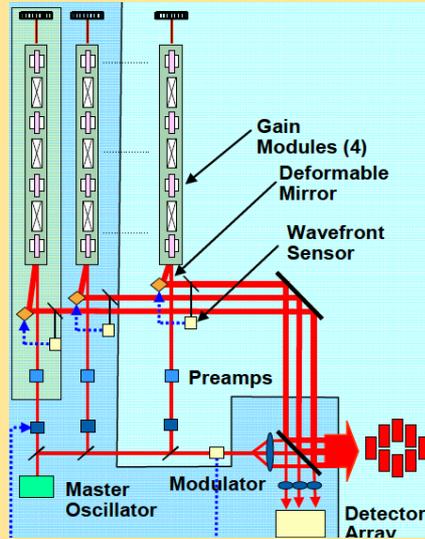
- Мощность действительно ограничена
- Копировать каналы не слишком сложно

Когерентное сложение актуально:

Экстремальная средняя мощность

~100 кВт CW
Nd слэбы

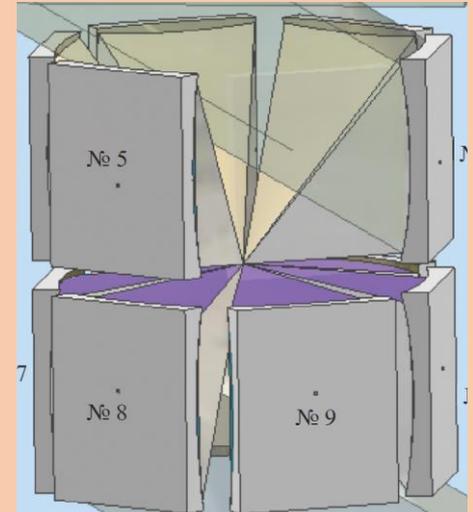
[Goodno, G. D., et al. *Opt lett* 31 (9), 1247-1249 (2006)]



Экстремальная пиковая мощность

~600 ПВт
Проект XCELS

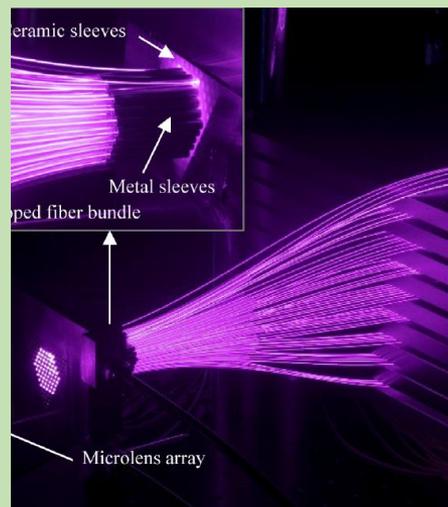
[Khazanov et. al. *High Power Laser Sci Eng* 11, e78 (2023)]



Волоконные лазеры

>100 каналов
Просто
копировать

[I. Fsaifes, et al., *Opt Exp* 28 (14), 20152-20161 (2020)]



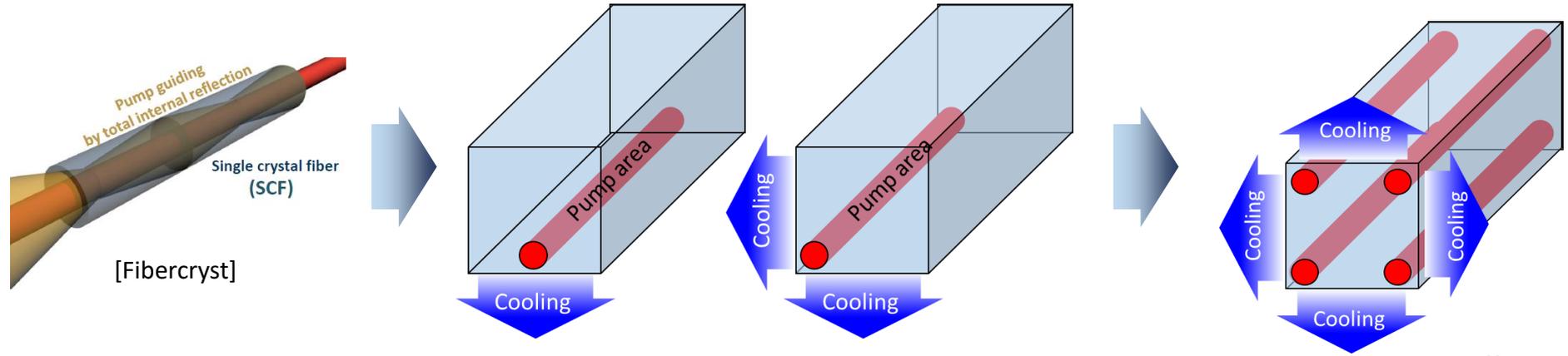
Высокая средняя и пиковая мощность



**Почти нет
результатов!**
хотя

- ✓ Мощности ограничены
- ✓ Высокая частота следования – быстрая обратная связь
- ? Как копировать каналы

Усилитель с накачкой вдоль грани



Получено >100 Вт при $M^2 < 1.4$

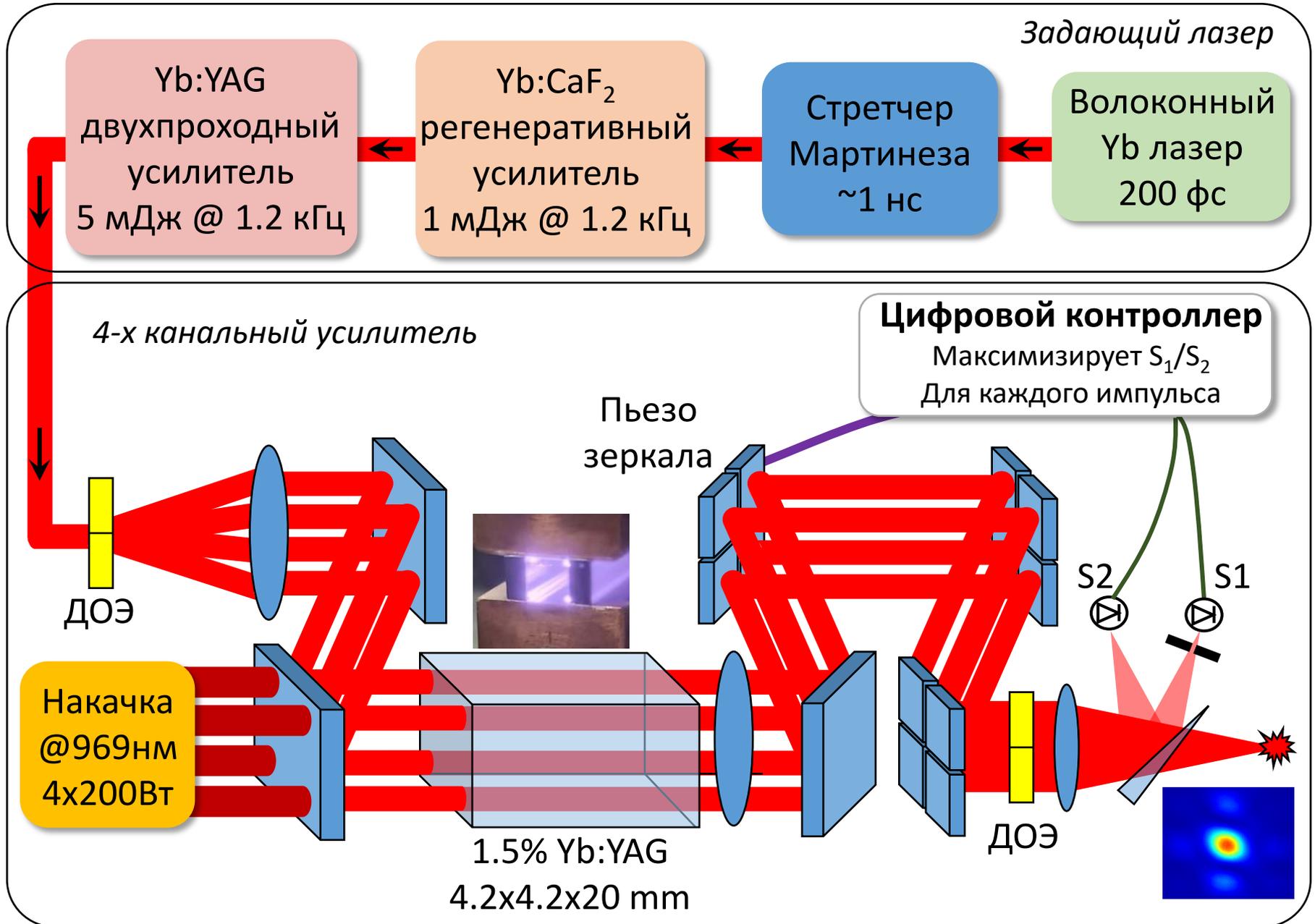
[I. Kuznetsov, N. Emelyanov, S. Chizhov, O. Palashov, "High-average-power ultrafast laser amplifier with along-the-side end pumping" JOSA B 39, 1565-1570 (2022)]

4-канальный
усилитель с одним
кристаллом

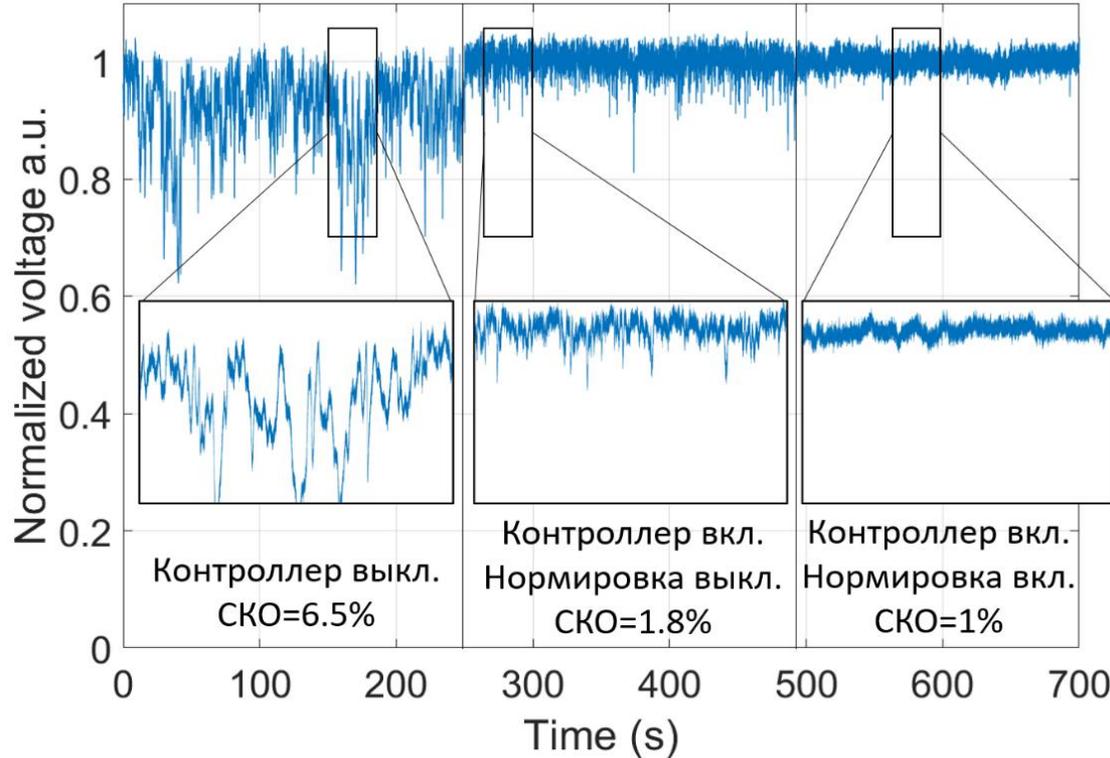
- Стержень стандартных размеров
- Яркая торцевая диодная накачка
- Смещение области накачки к охлаждаемой боковой грани

- Эффективное усиление
- Эффективное охлаждение
- Незначительный астигматизм ($<10\%$)
- Простое изготовление

Схема лазера

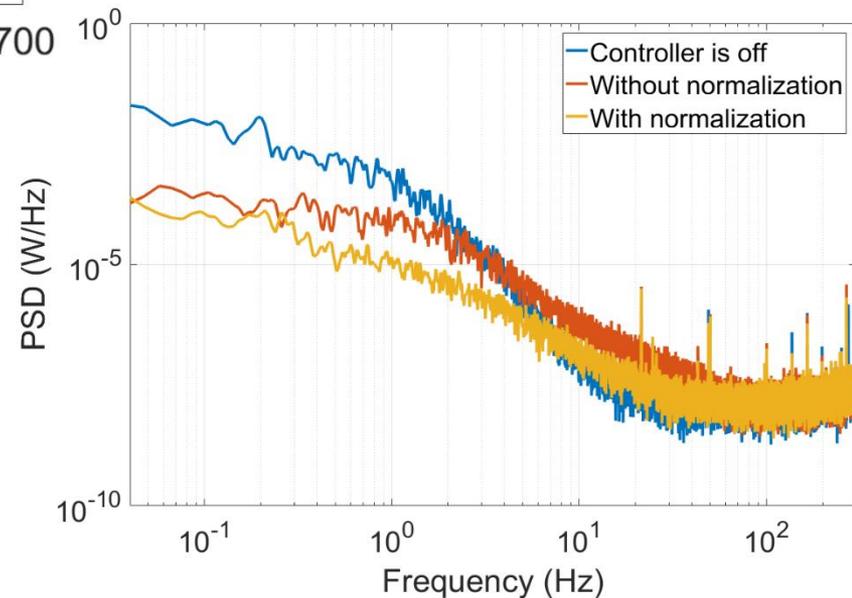


Стабилизация фазы

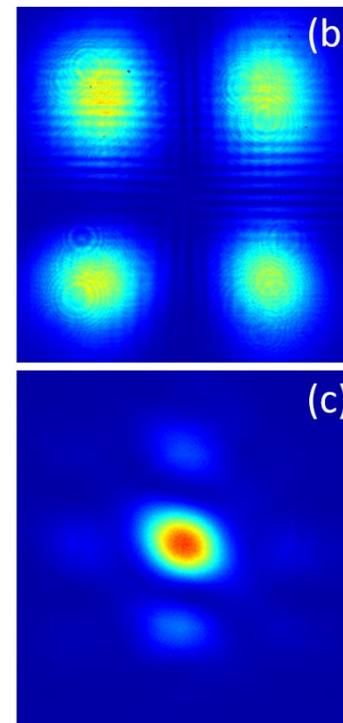
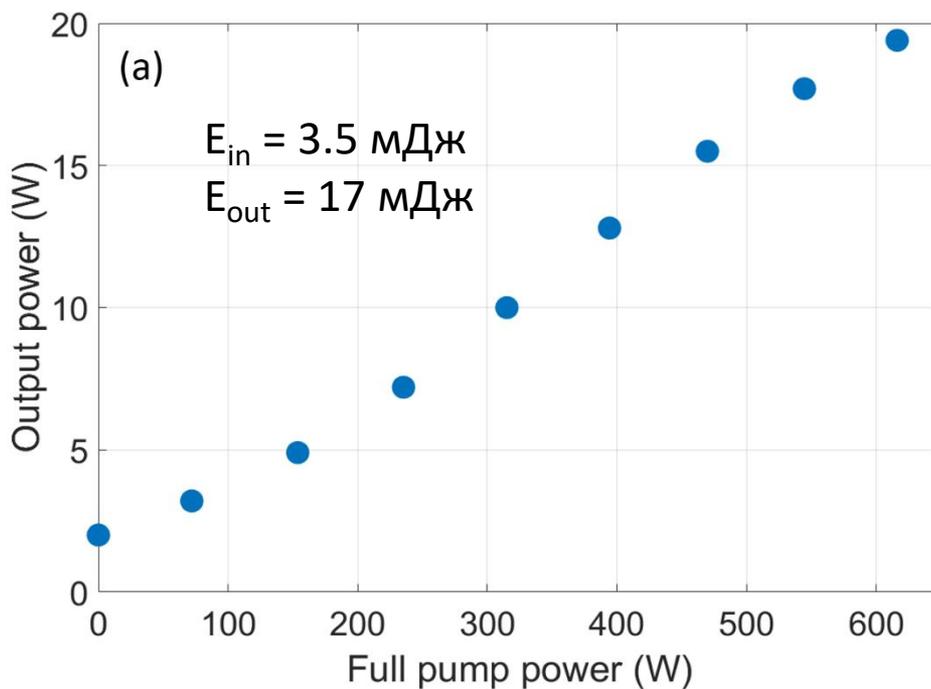


Флуктуации системы
сосредоточены в полосе до
10 Гц

Остаточные флуктуации имеют **СКО 1%**,
что соответствует флуктуациям энергии
импульсов



Выходная мощность



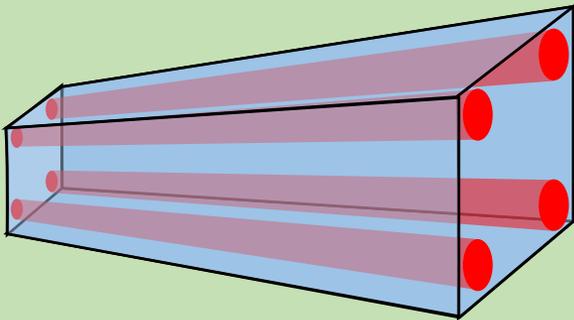
[I. Kuznetsov et. al., "MOPA laser system with a 4-channel Yb:YAG single-rod amplifier and coherent beam combining," Opt. Lett. 50, 3158-3161 (2025)]

Полученная энергия втрое больше, чем предельная для 1 канала

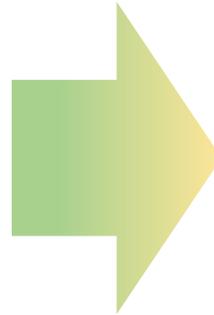
Мощность в центральной доле составила 57%

Дальнейшее масштабирование

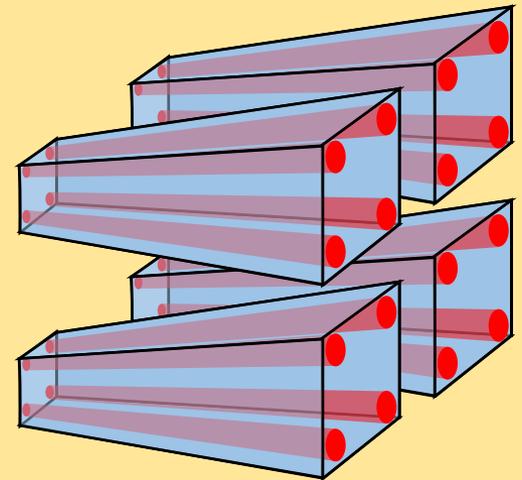
Многоканальный усилитель +
Усилитель расходящегося пучка



4 x 50 мДж

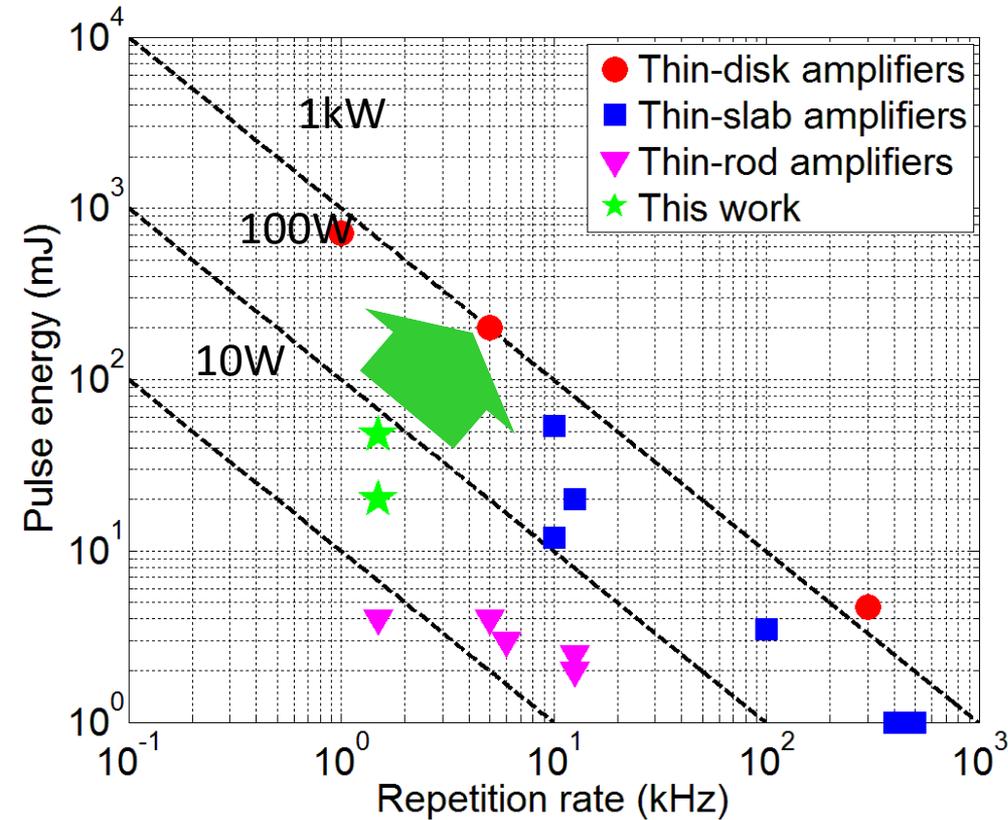


Увеличение числа каналов



16 x 50 мДж

Заключение



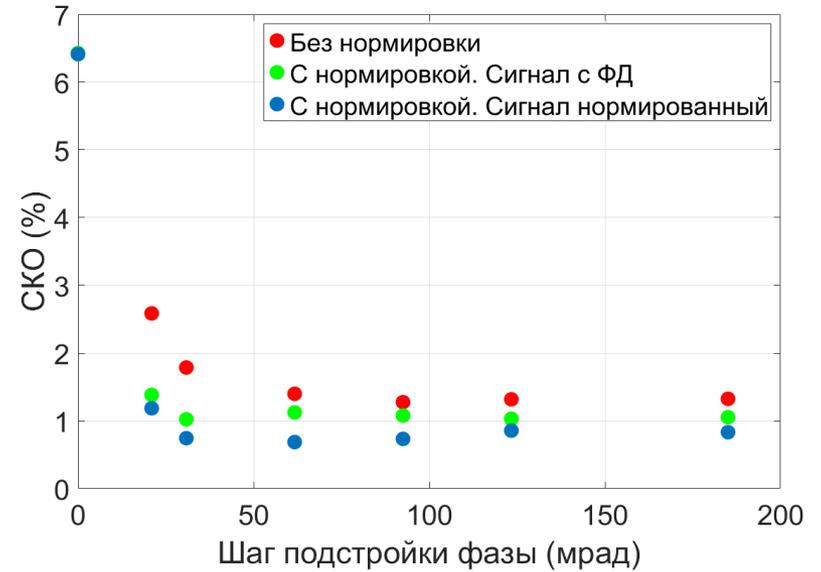
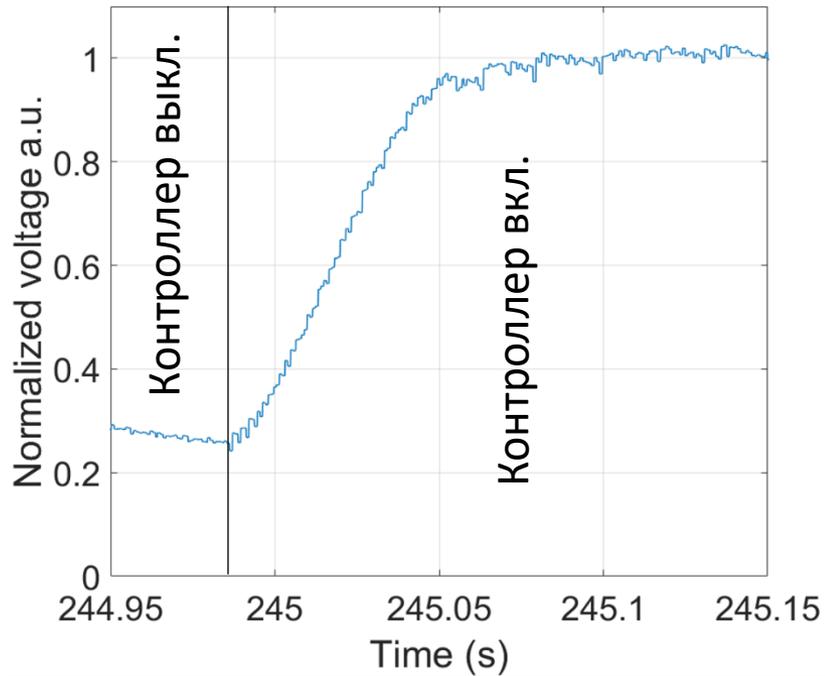
- **Усилитель расходящегося пучка**
 - 50 мДж
 - 75 Вт
- **4-х канальный усилитель**
 - 17 мДж
 - 20 Вт
 - Стабильность 1%СКО

Планы

- 4-х канальный усилитель расходящегося пучка
- 16-ти канальный усилитель

Стабилизация фазы

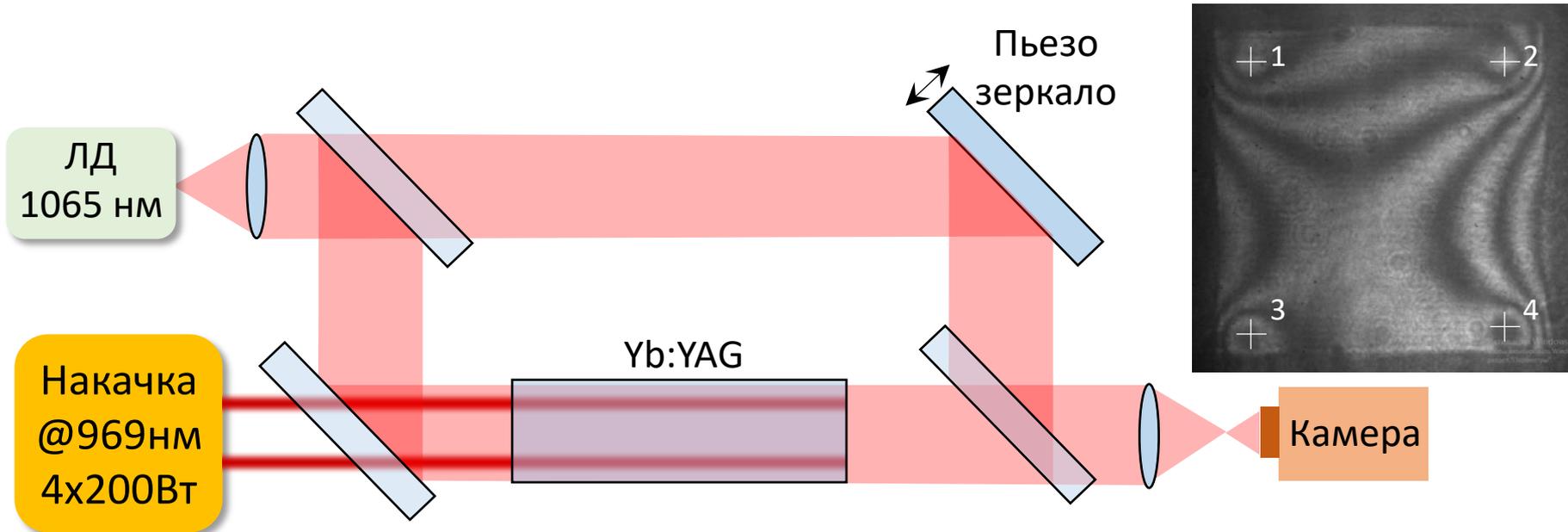
Остаточные флуктуации



Исследование системы

Схема измерения фазовых флуктуаций

Фазово-сдвиговая интерферометрия

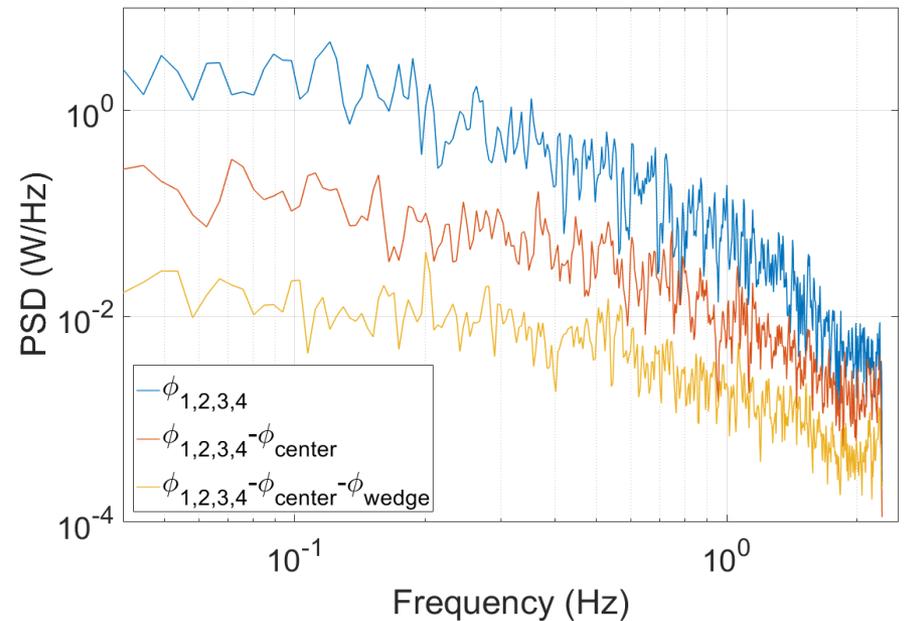
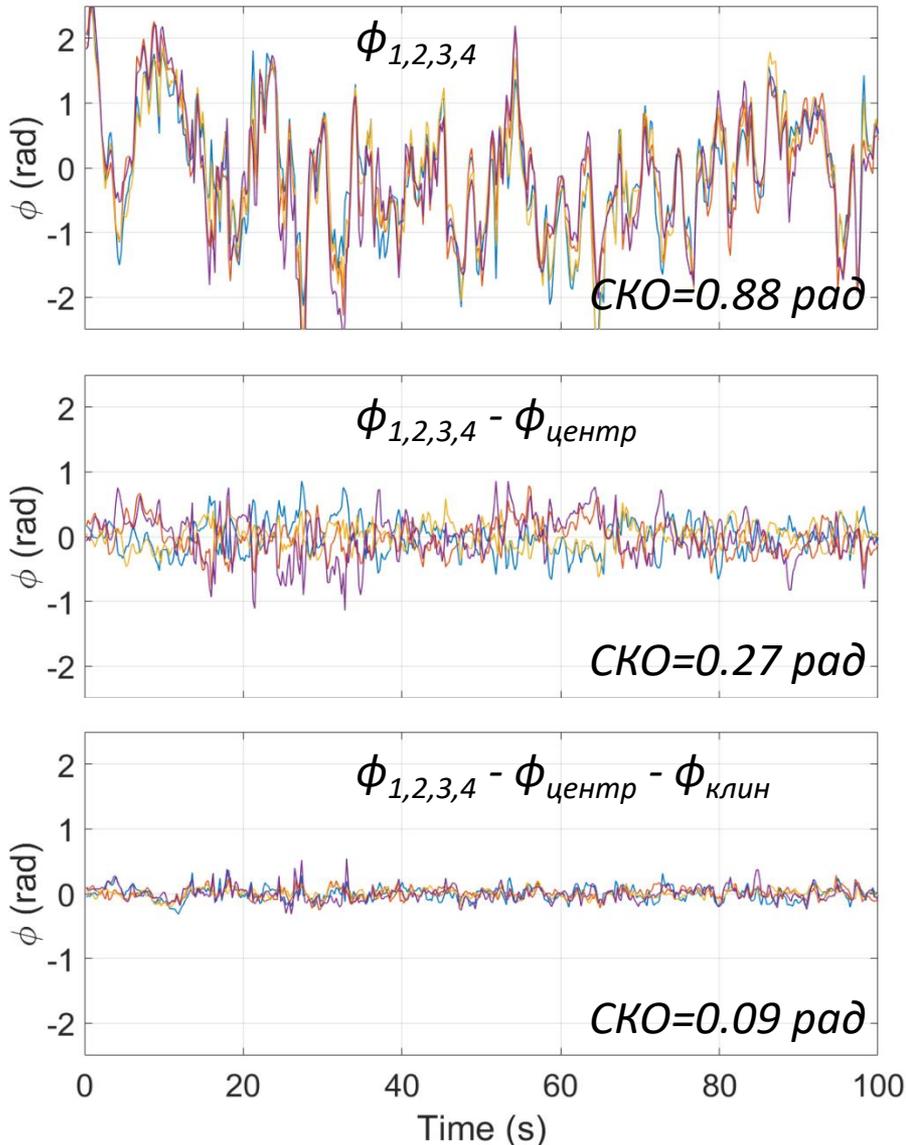


- Частота камеры ~25 кадров/с
 - Для вычисления одного фазового профиля требуется 5 кадров
- ➔ Полоса измерения до 5 Гц

Фаза анализировалась в 4-х точках, соответствующих центрам пучков накачки

Исследование системы

Фазовые флуктуации



Фазовые флуктуации во всех точках похожи

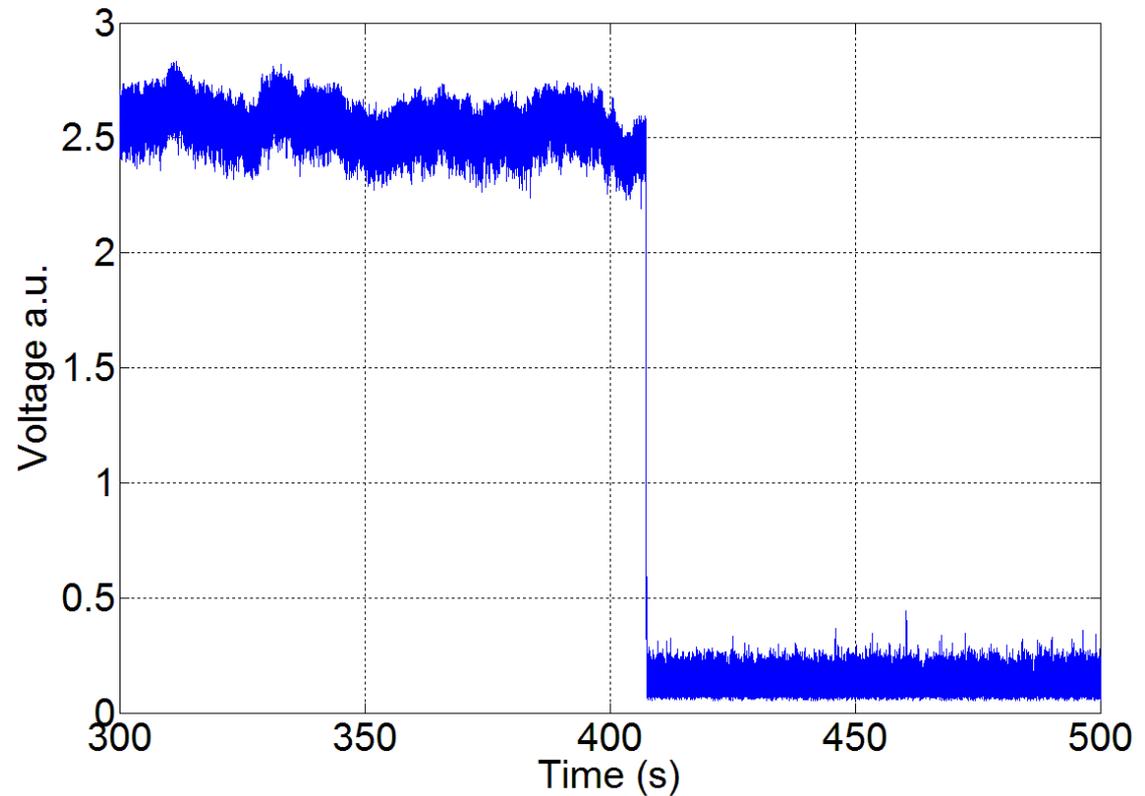
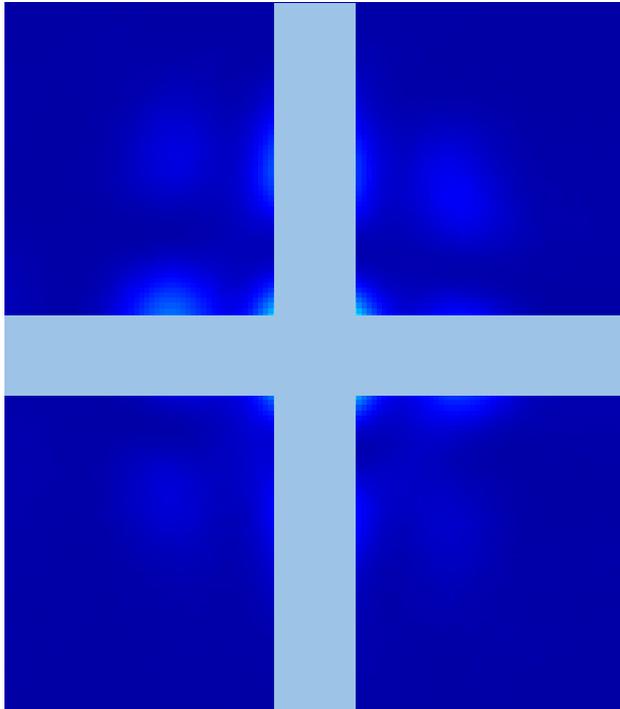
Можно вычесть постоянную ($\varphi(x,y)=\text{const}$) и линейную ($\varphi(x,y)=ax+by$) составляющие фазы

Относительные флуктуации фазы между точками в 10 раз меньше абсолютных

Стабилизация фазы

Алгоритм минимизации сигнала

Крестообразная маска
вместо пинхола



Остаточный шум ниже