



# Волоконные лазеры с когерентным суммированием пучков

**Андрианов А.В.**

*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород*

# План

- Ведение, мотивация
- Концепция когерентного суммирования
- Особенности суммирования ультракоротких импульсов
- Методы стабилизации фазы
- Оптические схемы суммирования
- Примеры
- Работы в ИПФ РАН
  - мощные волоконные усилители
  - многосердцевинные волокна, автофазировка в нелинейном режиме
  - повышение эффективности суммирования в схеме с мозаичной апертурой

**Выводы, перспективы**

# Мотивация – увеличение мощности

**Средняя мощность**  
(непрерывные лазеры) –  
технологические приложения.  
Волоконные лазеры >10 кВт с  
одномодовым качеством пучка

**Пиковая мощность** (лазеры  
ультракоротких импульсов) –  
взаимодействие сверхсильного  
излучения с веществом  
Твердотельные системы >1ПВт,  
низкая частота повторения

Волоконные системы ~4ГВт,  
высокая частота повторения >кГц

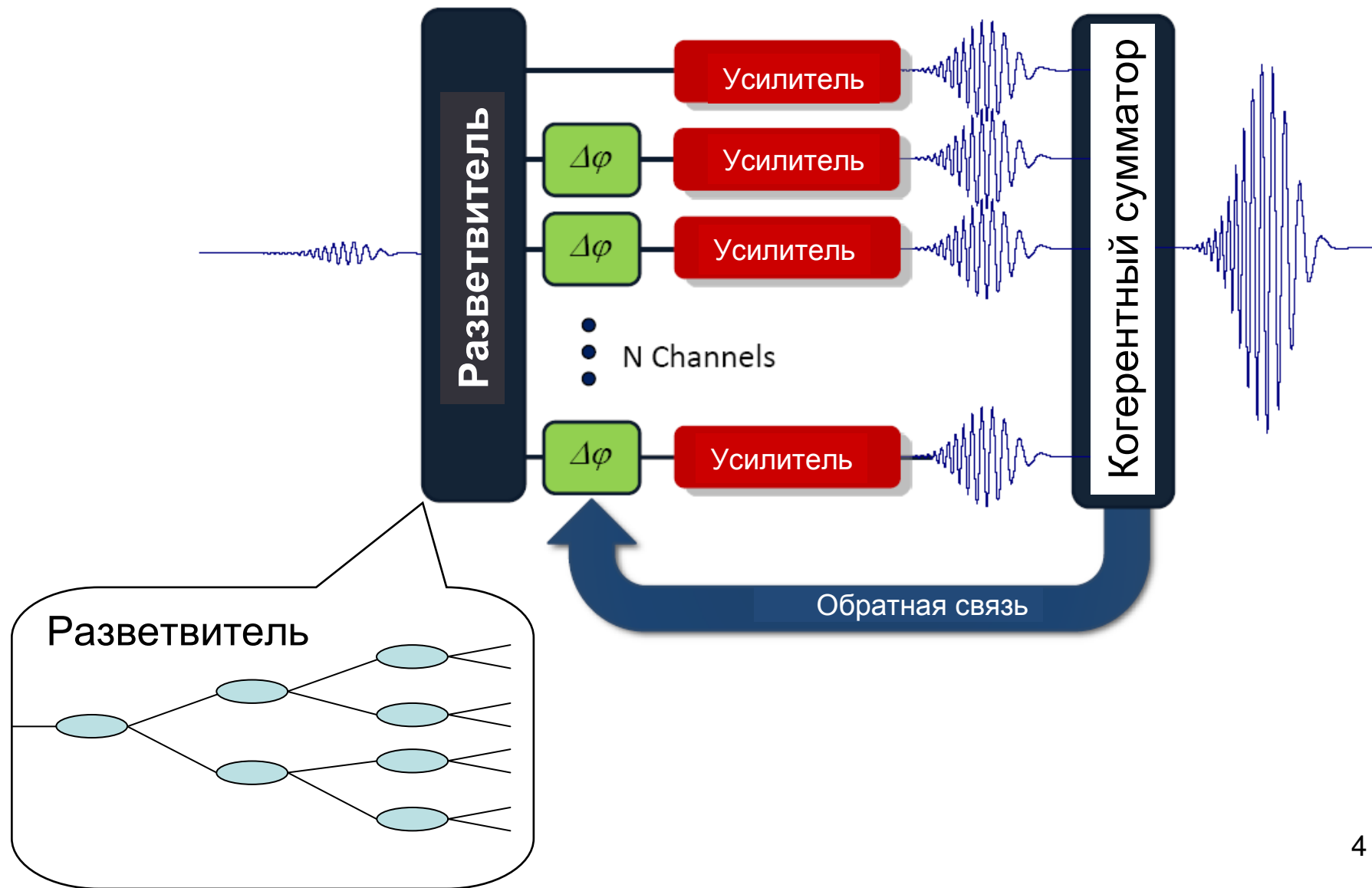
**Высокая пиковая +  
высокая средняя  
мощность**

**Когерентное  
суммирование**

**Gerard Mourou  
Coherent amplification  
network = CAN**

суммирование  
тысяч волоконных каналов

# Принцип когерентного суммирования оптических пучков



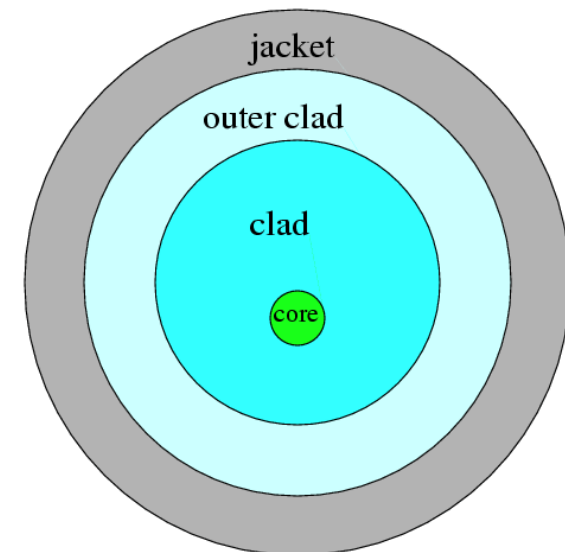
# Особенности волоконных лазеров и усилителей

## Плюсы

- Хорошее качество пучка (для одномодовых волокон)
- Высокий коэффициент усиления
- Хороший теплоотвод
- Отработанные технологии производства
- Повторяемость параметров

## Минусы

Малая площадь моды и большая длина  
=> **нелинейность!**  
ограничения по энергии и мощности

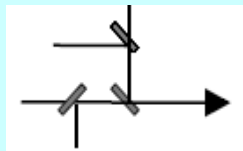


# Основные принципы суммирования

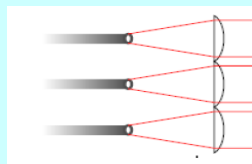
## Оптические схемы суммирования

### Пространственные:

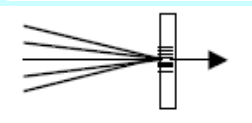
- Попарное суммирование



- Мозаичная апертура



- Дифракционные оптические элементы



- Фокусировка из большого телесного угла

### С разделением по времени

## Принципы фазировки

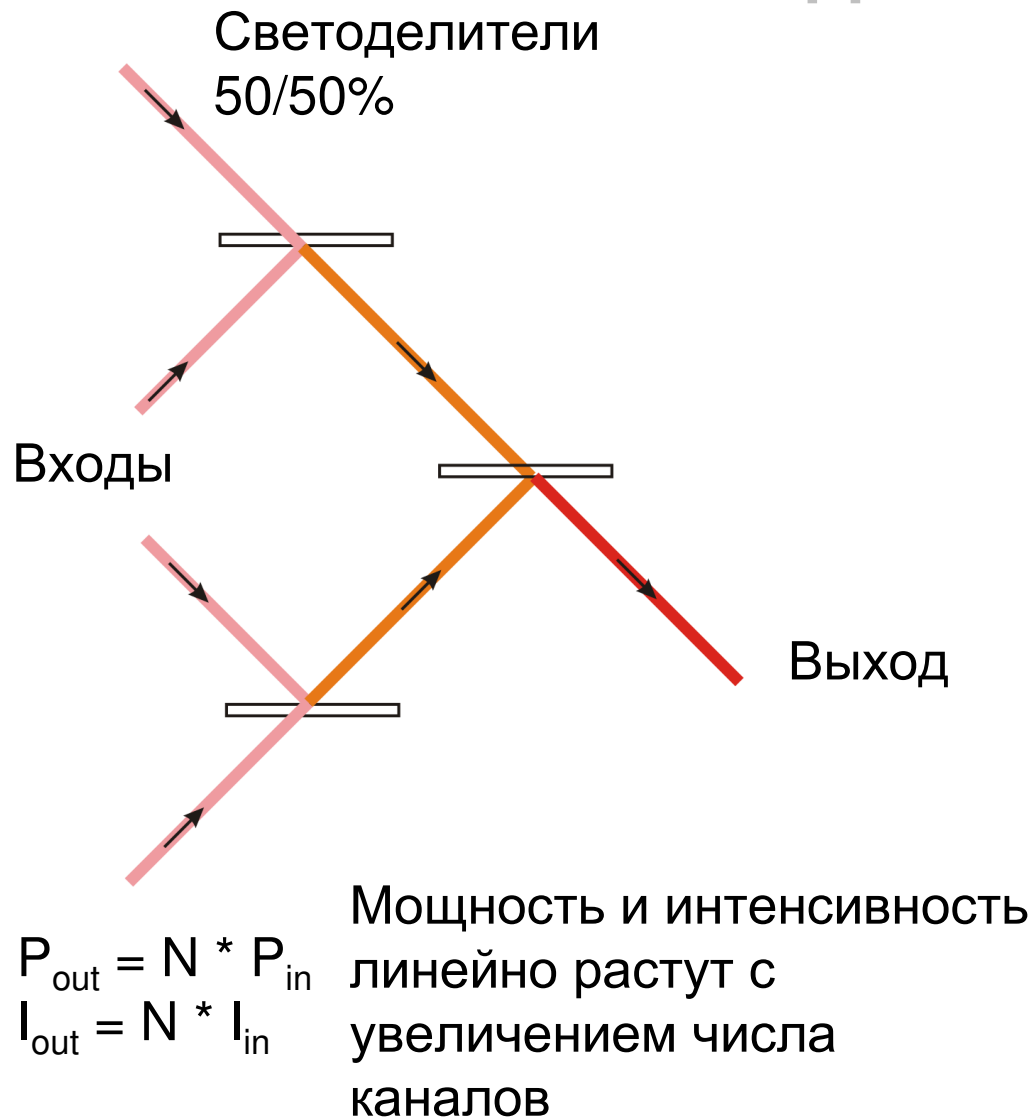
### Активная (обратная связь):

- На основе финального результата суммирования
- По интерференции между парами пучков
- По интерференции относительно опорного пучка

### Пассивная (самоорганизация):

- В связанных резонаторах
- В нелинейных связанных волноводах

# Оптические схемы: суммирование на светоделителях



+ Высокая эффективность для небольшого числа каналов

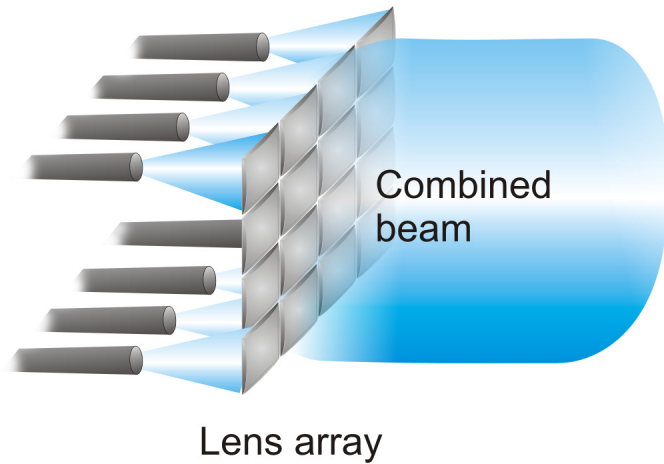
+ Сохранение качества пучков

- Сложность настройки

- Снижение эффективности при увеличении числа каналов

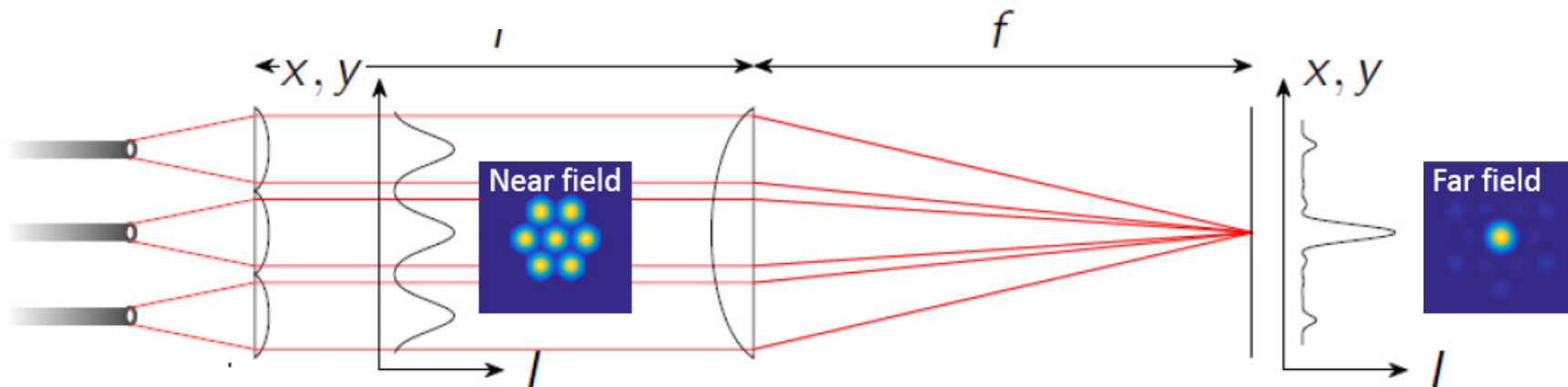
Особенность – сохраняется размер пучка, линейный рост интенсивности

# Мозаично заполненная апертура



Поле в дальней зоне дифракции = преобразование Фурье от ближнего поля

Инверсия масштабов:  
размер просуммированного пучка  $d \sim 1/D$ ,  $D$  = размер заполненной апертуры

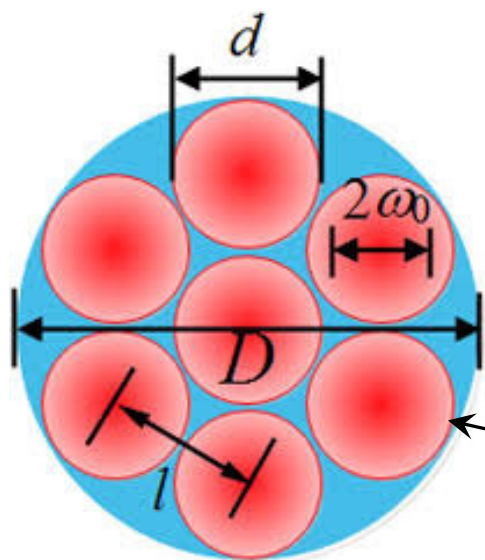


Интенсивность возрастает  
квадратично с ростом числа пучков!

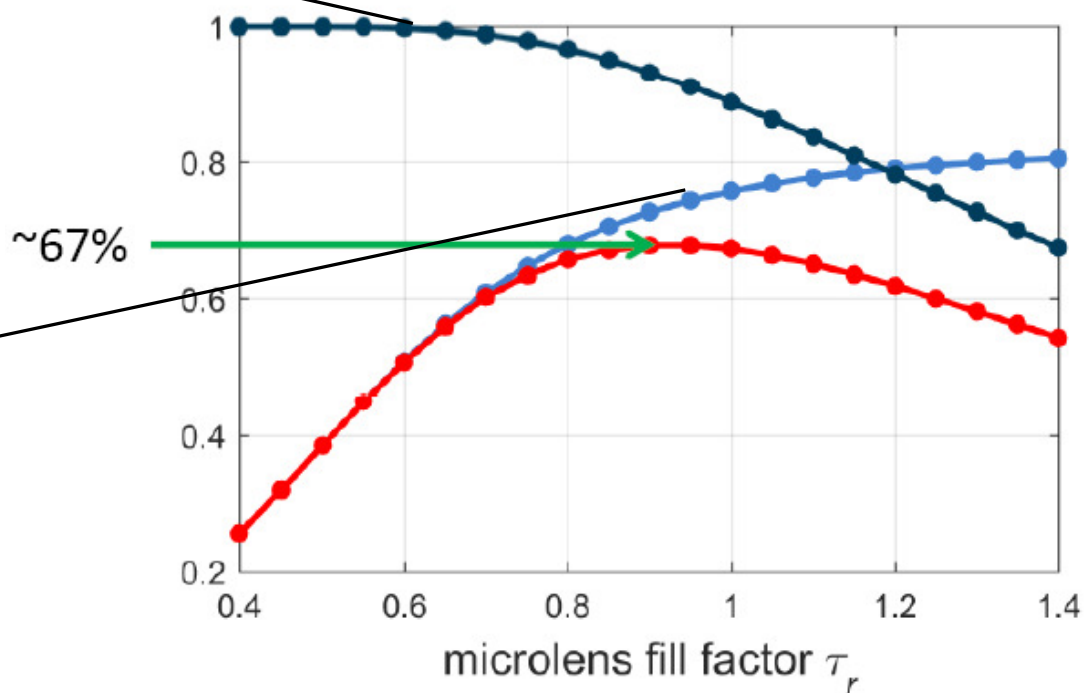
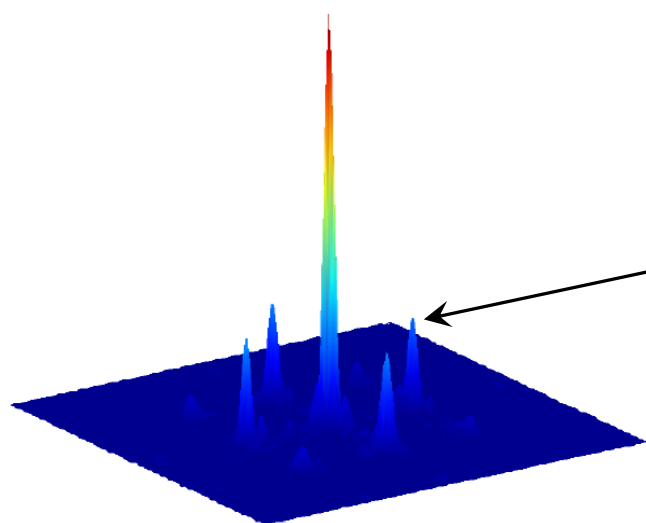
$$I_{out} = N^2 I_{in}$$



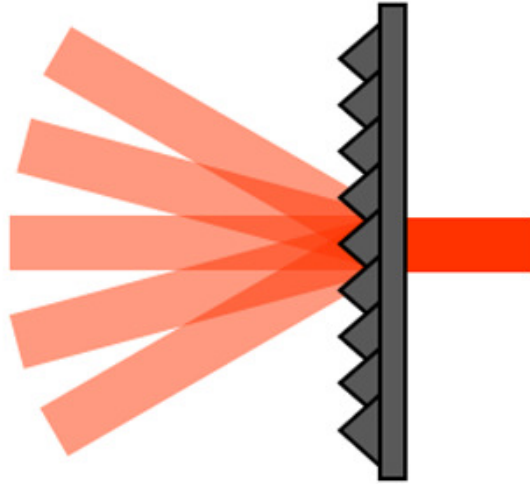
# Мозаично заполненная апертура



- + Легко масштабируемый метод
- + Квадратичное увеличение интенсивности пучка
- + Работает без изменений для ультракоротких импульсов
- Относительно низкая эффективность

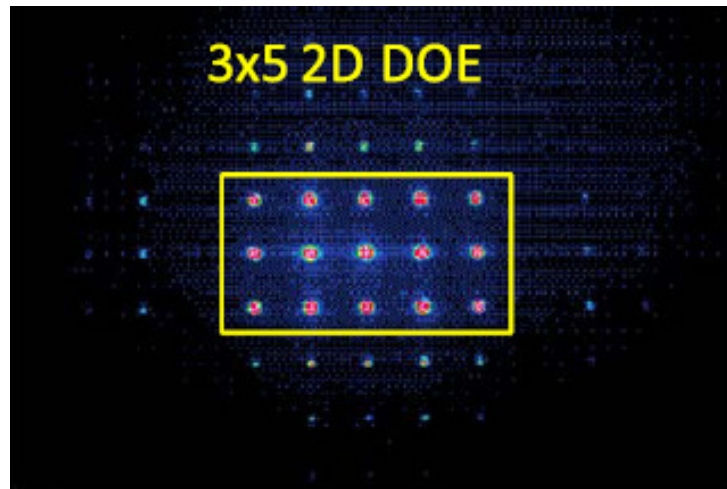


# Суммирование на дифракционном элементе



**Дифракционная решетка:**

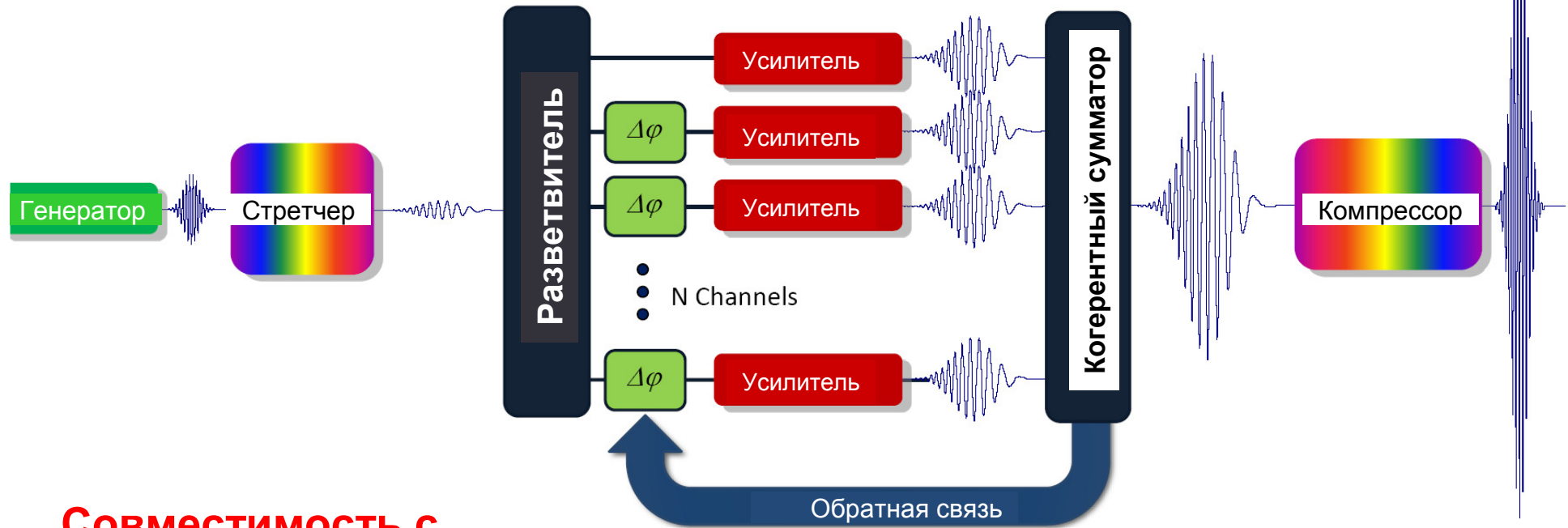
один пучок разделяется на несколько пучков с поперечными волновыми векторами  $k_n = k_0 \sin(\phi) + nk_g$   
**Процесс обратимый!**



- + Относительно простая схема
- + Достигнута высокая эффективность суммирования >90%
- + Сохраняет качество пучка

- Сложность изготовления дифракционного элемента
- Плохая масштабируемость
- Не пригодна для ультракоротких импульсов

# Суммирование ультракоротких импульсов

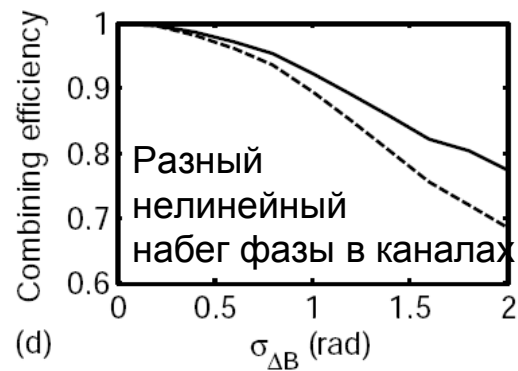
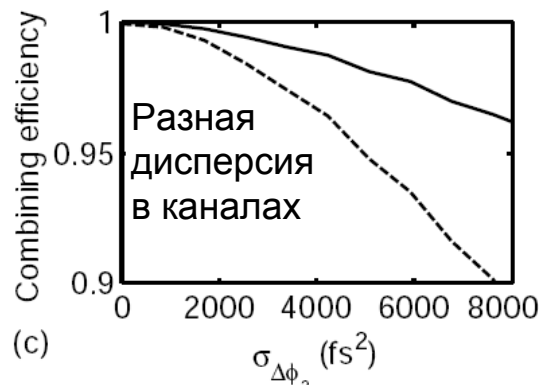
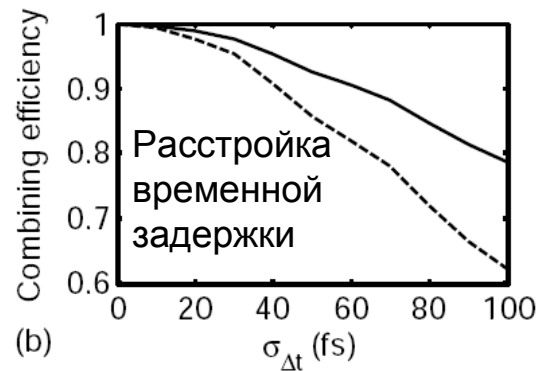
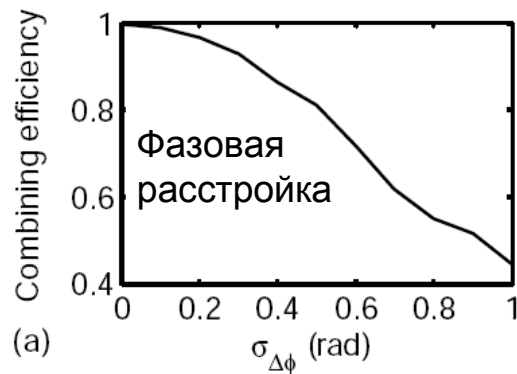


**Совместимость с концепцией усиления чирпированных импульсов**

Необходимо стабилизировать дополнительные параметры

Дополнительные требования к оптической схеме суммирования

# Суммирование ультракоротких импульсов



$$E(t) = \sqrt{I(t)} \exp(-i\phi(t))$$

$$\tilde{E}(\omega) = \sqrt{S(\omega)} \exp(-i\phi(\omega))$$

$$\phi(\omega) = \phi_0 + \phi_1\omega + \frac{1}{2}\phi_2\omega^2 + \dots$$

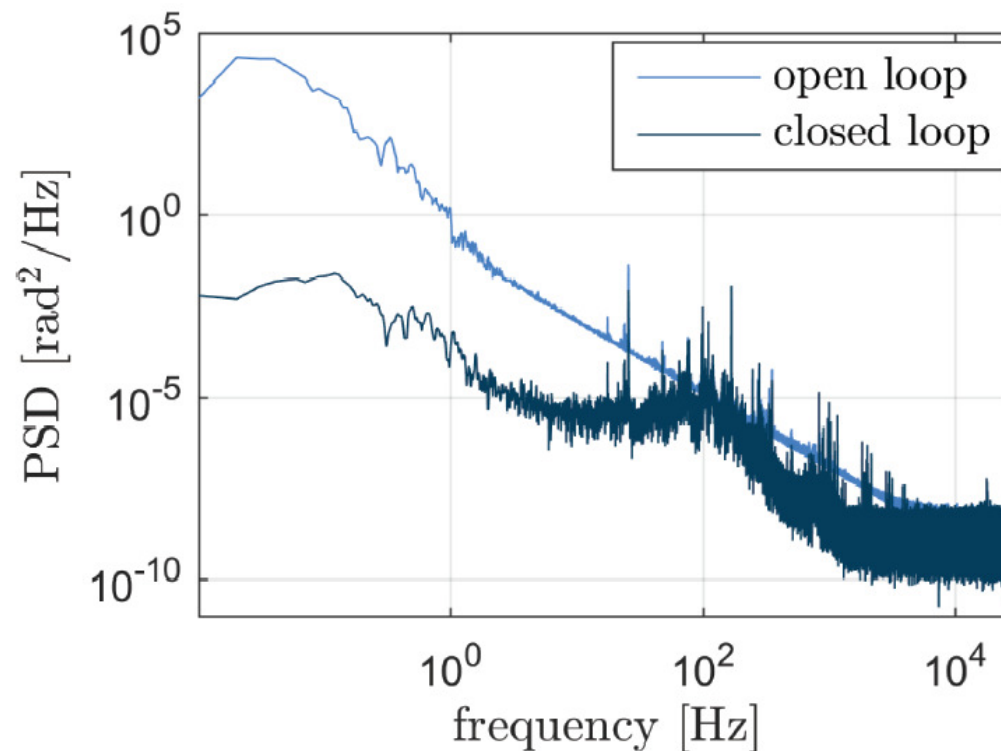
$$B = \int_0^L \gamma P_{\text{peak}}(z) dz$$

Моделирование суммирования 200 фс импульсов на длине волны 1 мкм:  
 Для достижения эффективности >95% надо стабилизировать:  
 фазу с точностью <0.1 рад, временную задержку ~30 фс,  
 дисперсию групповых скоростей ~10000 фс<sup>2</sup>, B-интеграл ~0.5 рад

# Проблемы: Стабилизация фазы

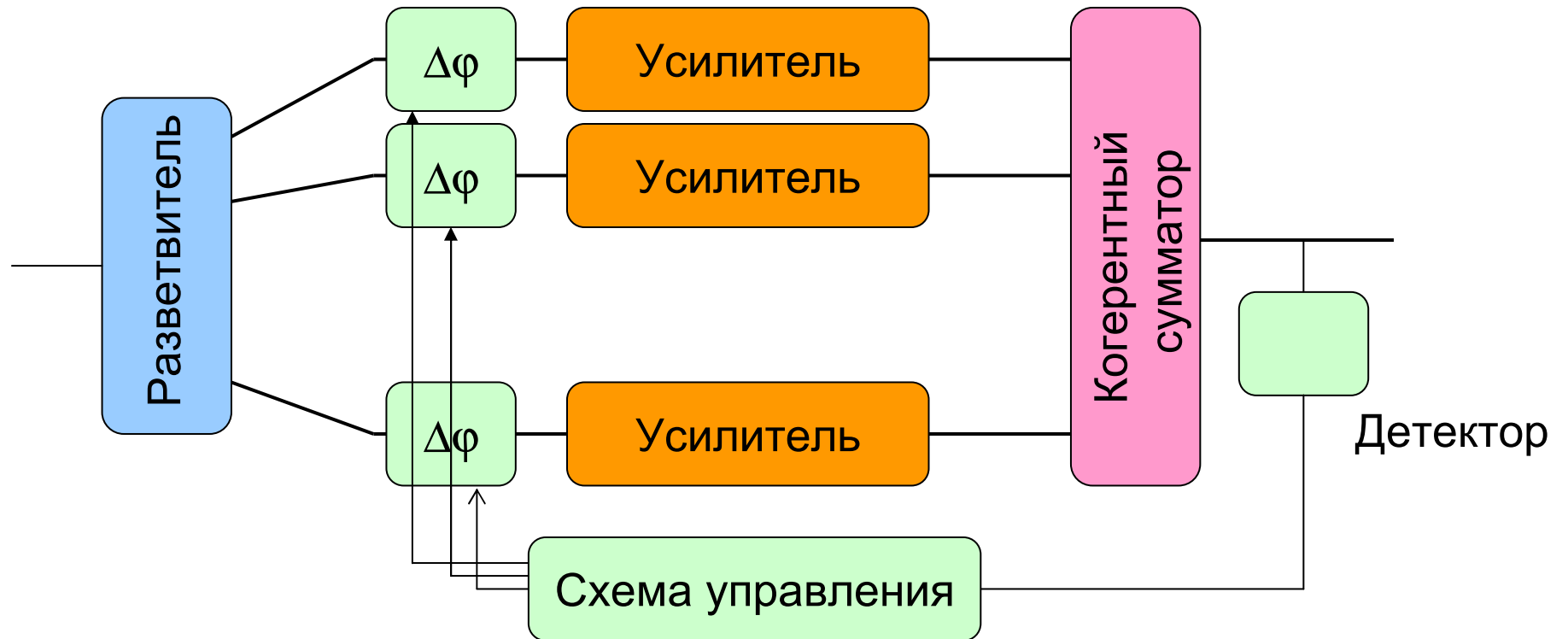
## Источники нестабильности фазы:

- изменения температуры (очень медленные,  $<1$  Гц)
- вибрации (относительно медленные,  $1 \sim 100$  Гц)
- акустические шумы (относительно быстрые,  $10$  Гц  $\sim 1$  кГц)
- нелинейные эффекты - преобразование амплитудных шумов в фазовые (от очень медленных до очень быстрых)



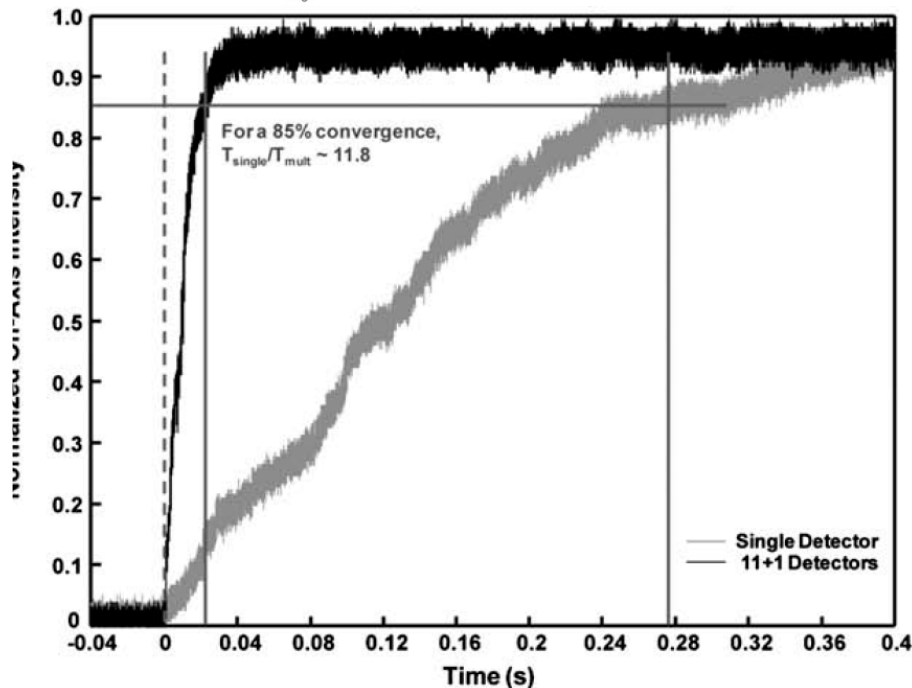
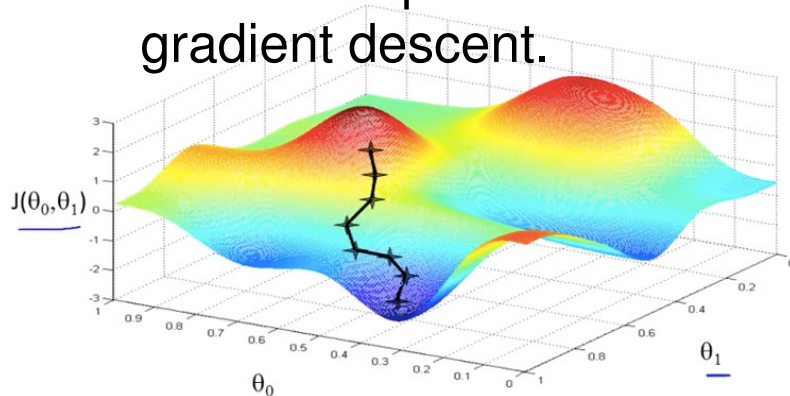
# Стабилизация фазы

Ищем максимум функции  $I_{out}(\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2 \dots \Delta\varphi_N)$



# Стабилизация фазы: метод градиентного спуска

SPDG –  
Stochastic parallel  
gradient descent.



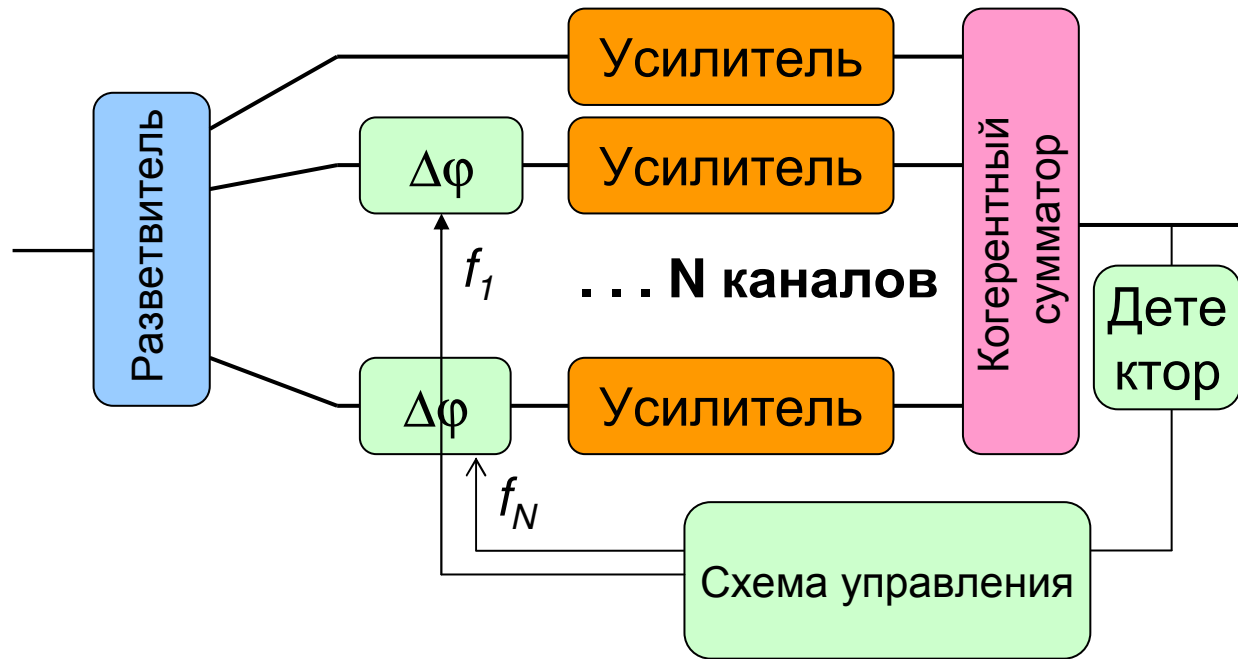
+ Простейшая оптическая схема  
(1 детектор)

+ Компенсируются все внешние  
возмущения

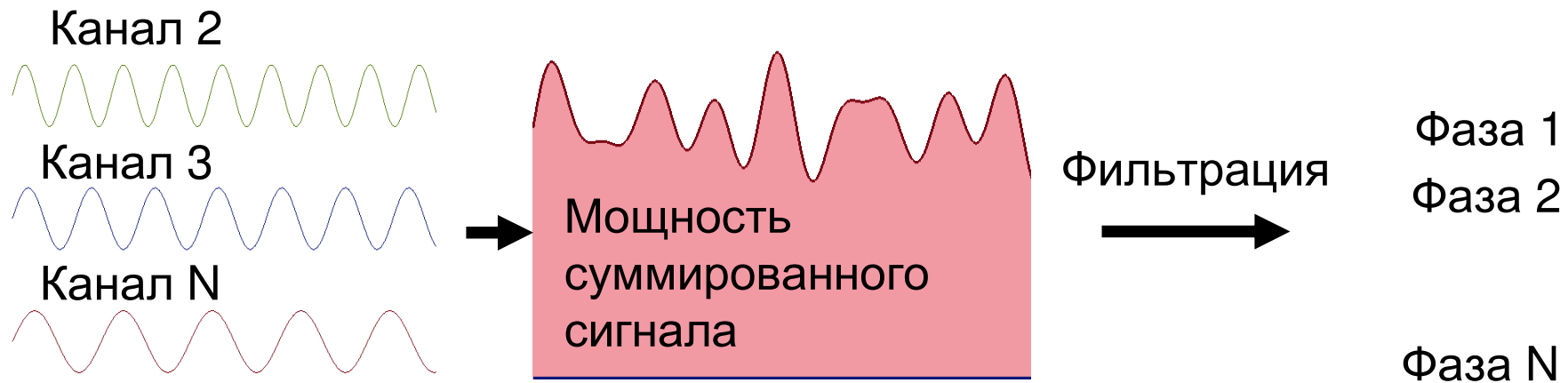
- Нужна быстрая  
программная/аппаратная обработка

- Уменьшение скорости при  
увеличении числа каналов.  
Ширина полосы  $\sim 1/N$   
( $\sim 10$  кГц при  $N=10$ )

# Стабилизация фазы: частотные метки

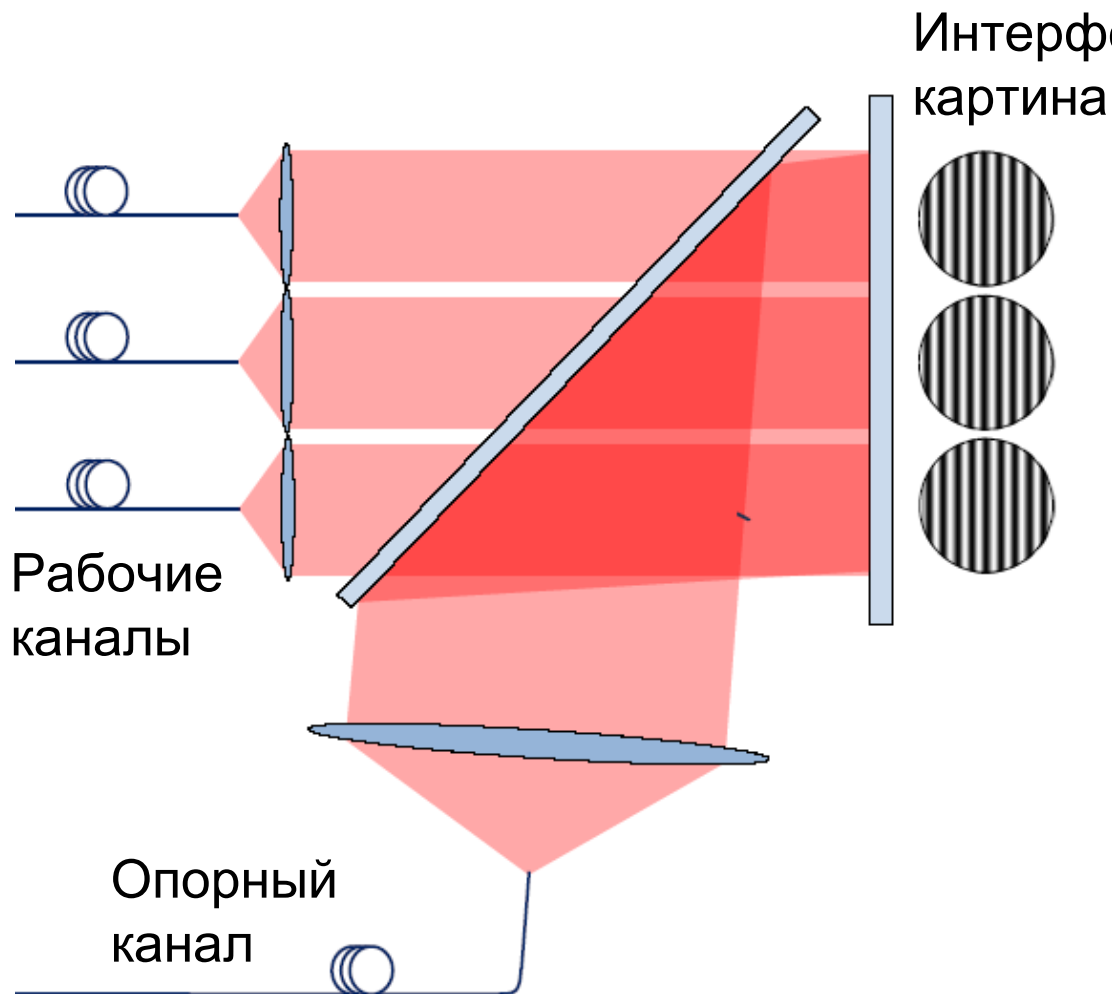


Идея: намеренно внесем небольшую фазовую модуляцию на уникальной частоте в каналы





# Стабилизация фазы: Интерференция с опорным пучком



+ Независимое измерение для каждого канала

+ Хорошо совместима с мозаичной апертурой

+ Много дополнительной информации (период интерференционных полос, контраст)

- Нужен детектор на каждый канал

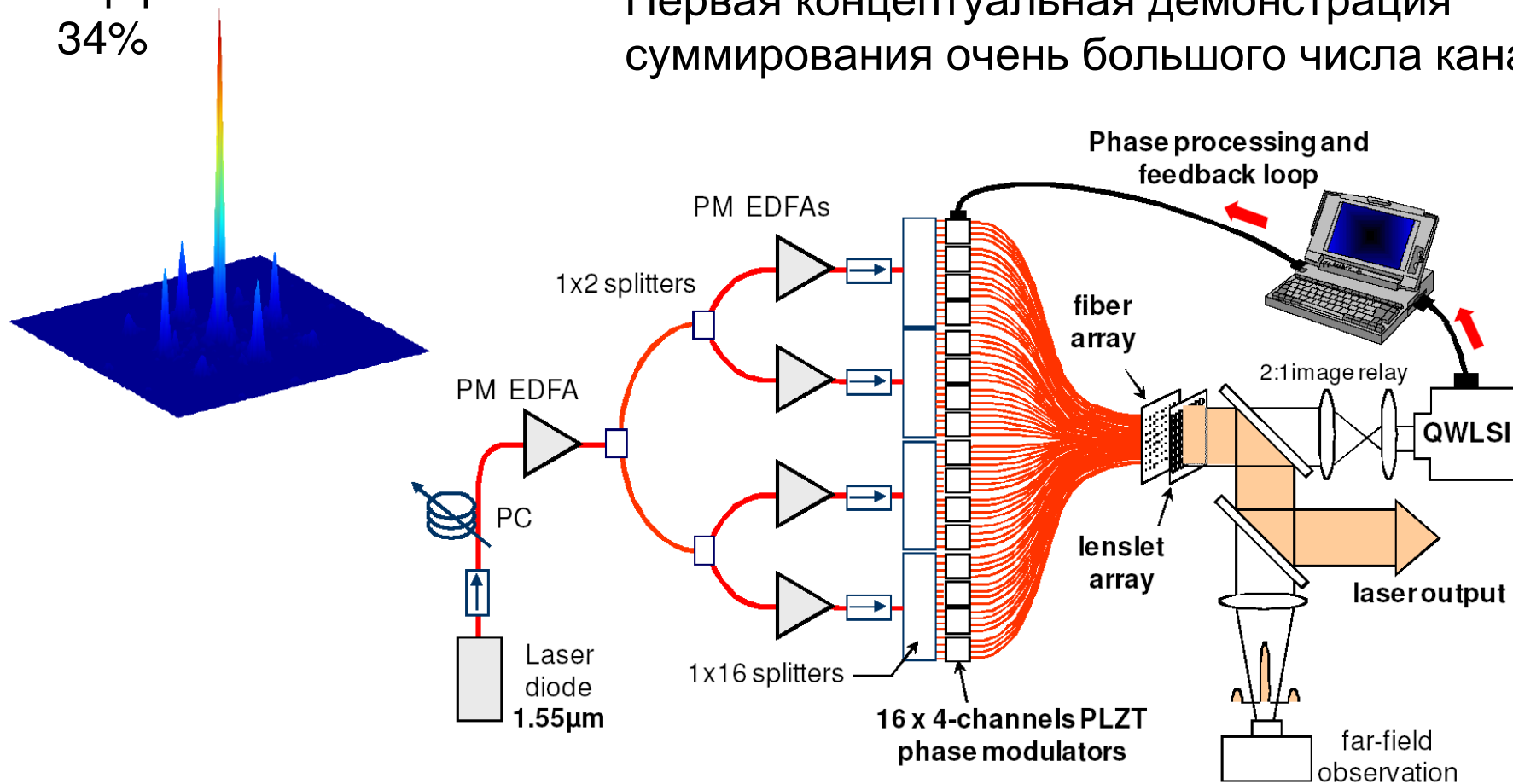
# Collective coherent phase combining of 64 fibers

Jérôme Bourderionnet,<sup>1,\*</sup> Cindy Bellanger,<sup>1,2</sup> Jérôme Primot,<sup>2</sup>  
and Arnaud Brignon<sup>1</sup>

OPTICS EXPRESS, 19, 17053 (2011)

Эффективность  
34%

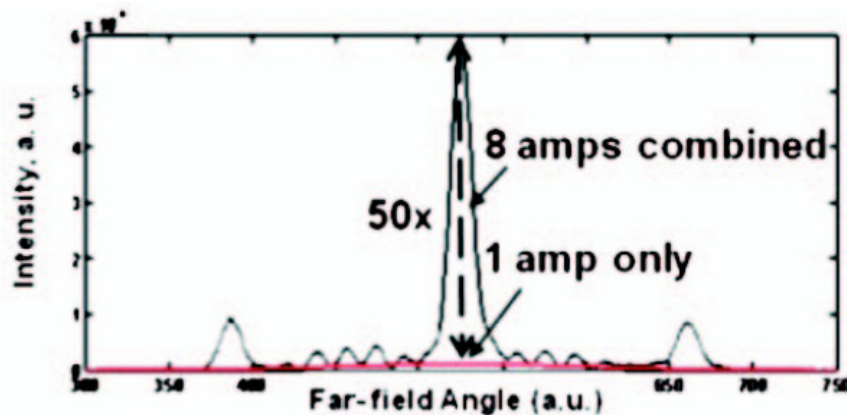
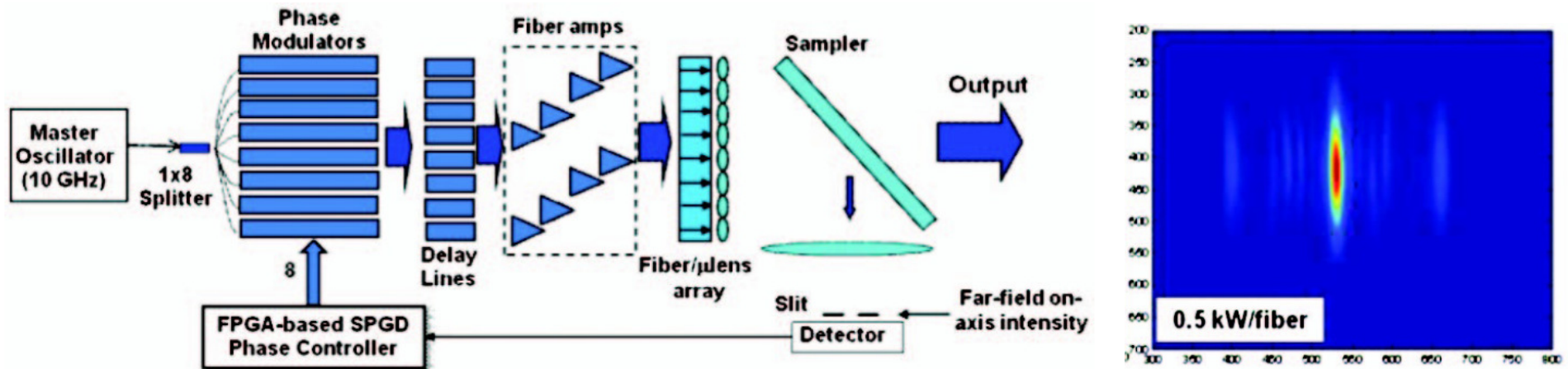
Первая концептуальная демонстрация  
суммирования очень большого числа каналов



# Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array

OPTICS LETTERS, 36, 2686 (2011)

C. X. Yu,\* S. J. Augst, S. M. Redmond, K. C. Goldizen, D. V. Murphy, A. Sanchez, and T. Y. Fan



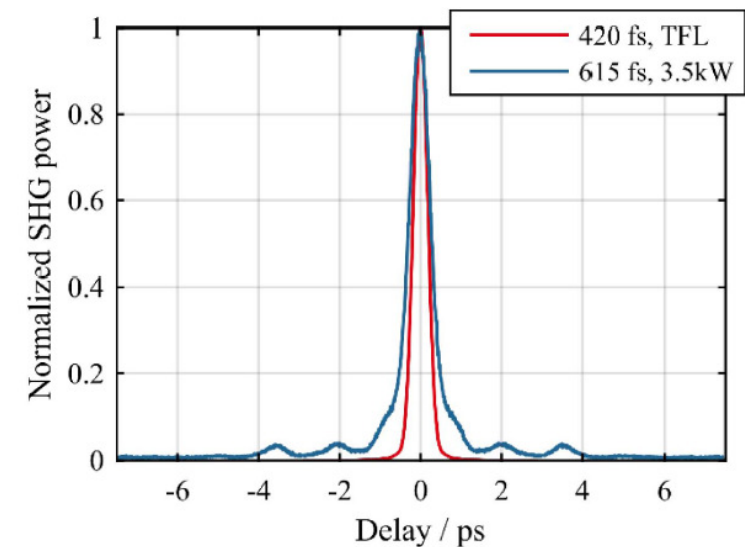
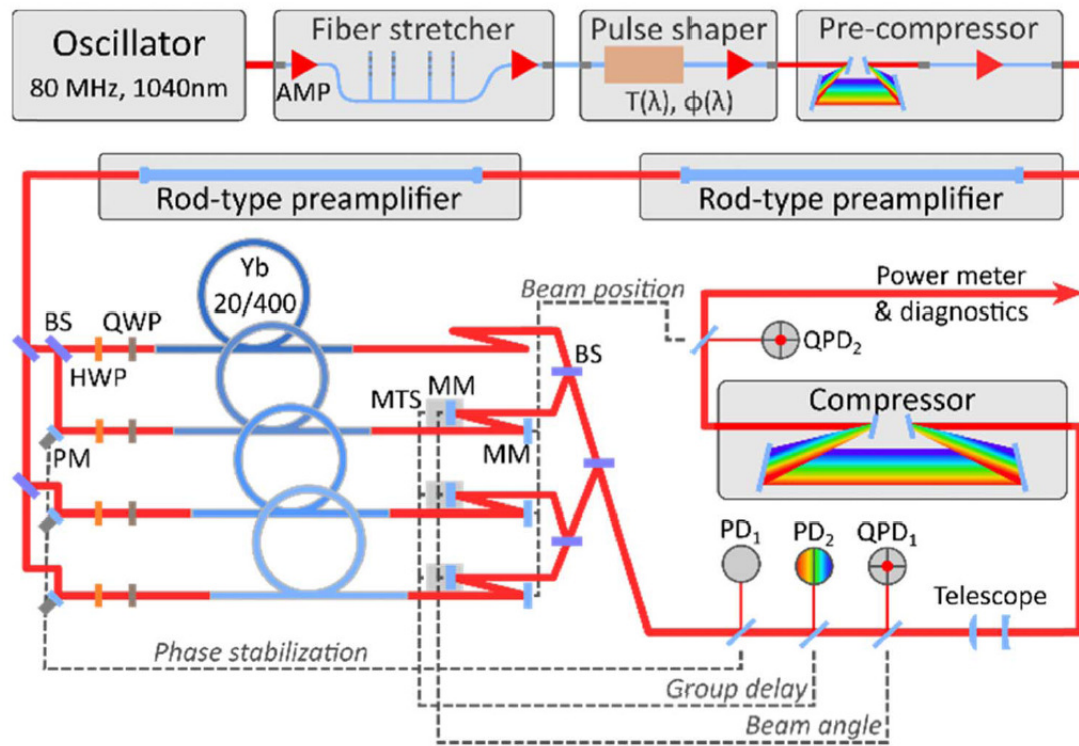
Рекордная эффективность для мозаичной апертуры – 57%

Рекордная суммарная мощность для мозаичной апертуры 4 кВт

# 3.5 kW coherently combined ultrafast fiber laser

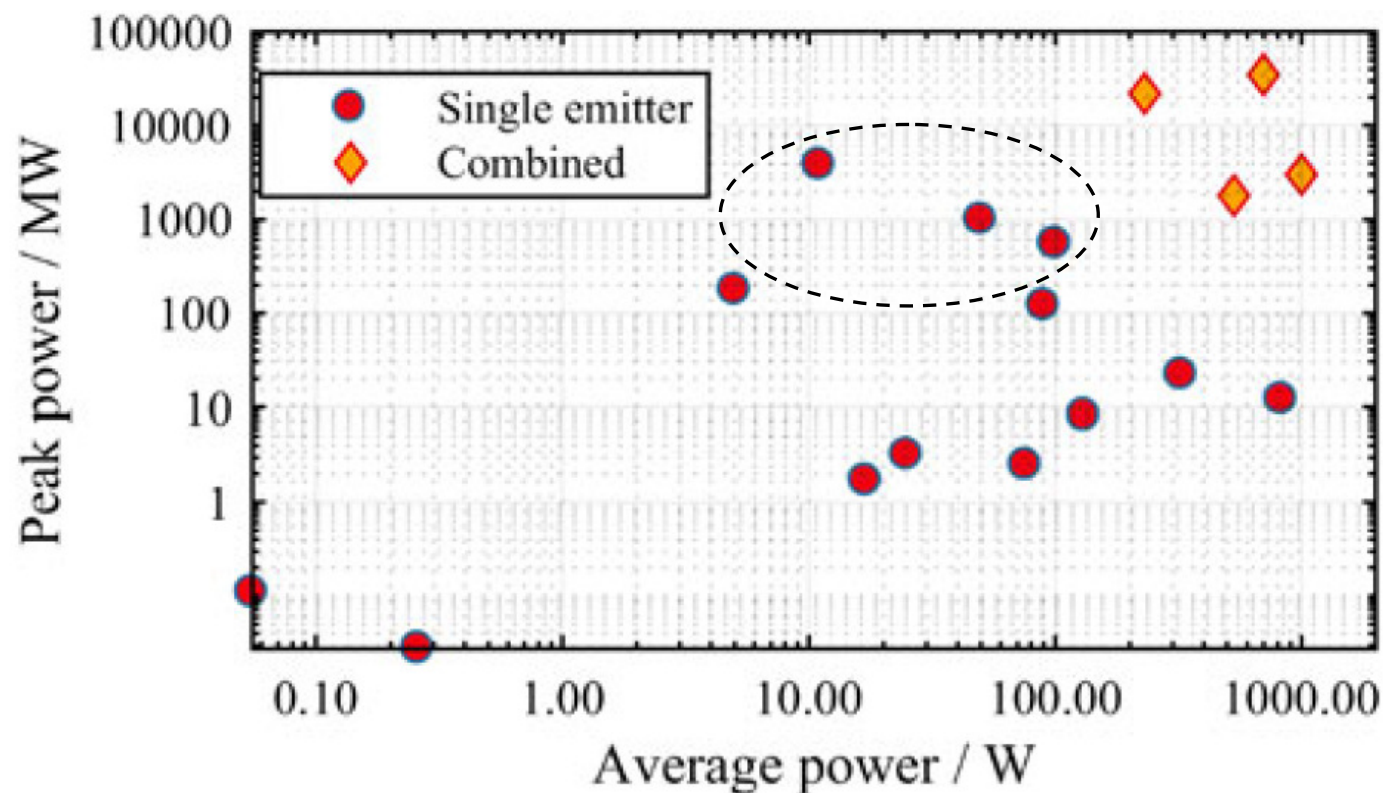
MICHAEL MÜLLER,<sup>1,\*</sup> ARNO KLENKE,<sup>1,2</sup> ALBRECHT STEINKOPFF,<sup>1,3</sup> HENNING STARK,<sup>1</sup>  
ANDREAS TÜNNERMANN,<sup>1,2,3</sup> AND JENS LIMPERT<sup>1,2,3</sup>

*Optics Letters*, 43(24), 6037-6040 (2018)



# Coherent Beam Combination of Ultrafast Fiber Lasers

Arno Klenke <sup>ID</sup>, Michael Müller <sup>ID</sup>, Henning Stark <sup>ID</sup>, Marco Kienel, Cesar Jauregui, Andreas Tünnermann, and Jens Limpert



**Рекорды для  
ультракоротких  
импульсов**

Пиковая  
мощность 22 ГВт,

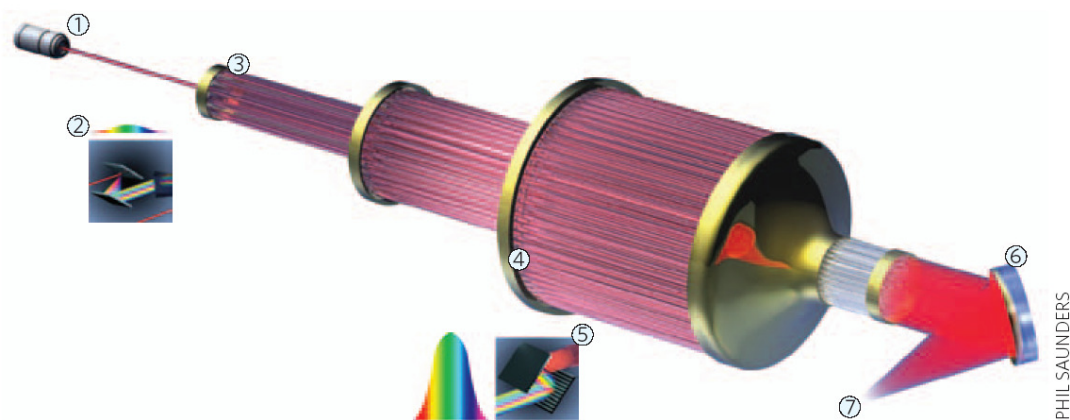
Средняя  
мощность 3.5 кВт

## Проекты ICAN и XCAN

# The future is fibre accelerators

Gerard Mourou, Bill Brocklesby, Toshiki Tajima and Jens Limpert

ICAN - International Coherent Amplification Network



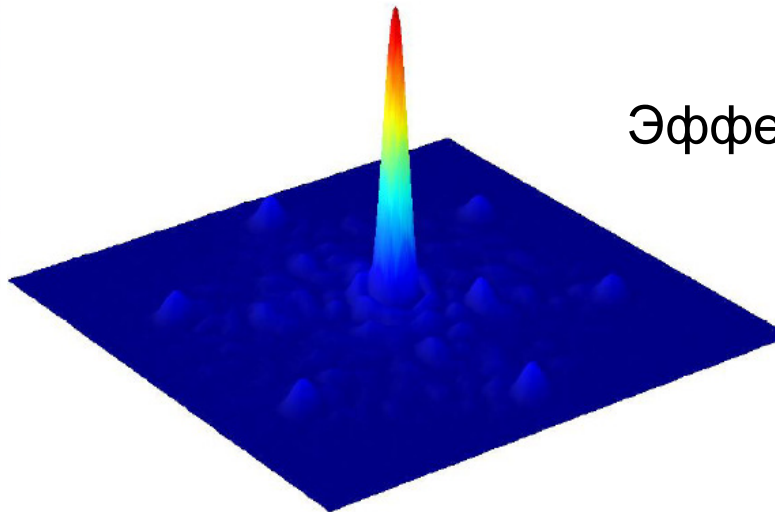
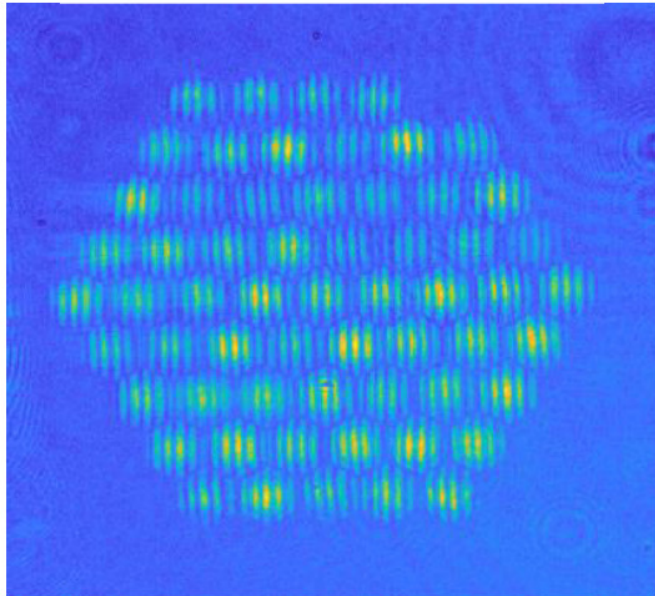
Целевые параметры  
Энергия 1-10 Дж,  
Частота 1-10 кГц,  
Длительность 200-400 фс,  
Длина волны 1030 нм,

**~10000 волоконных  
каналов**

**Figure 1** | Principle of a coherent amplifier network. An initial pulse from a seed laser (1) is stretched (2), and split into many fibre channels (3). Each channel is amplified in several stages, with the final stages producing pulses of ~1 mJ at a high repetition rate (4). All the channels are combined coherently, compressed (5) and focused (6) to produce a pulse with an energy of >10 J at a repetition rate of ~10 kHz (7).

# Проекты ICAN и XCAN

J.-C. Chanteloup, A. Heilmann, L. Daniault, I. Fsaifes, S. Bellanger,  
A. Brignon, J. Bourderionnet, É. Durand, É. Lallier, C. Larat



Целевые параметры  
Энергия 3 мДж,  
Частота 200 кГц,  
Длительность 300 фс,  
Длина волны 1030 нм,

**61 волоконных каналов**

Эффективность 53%

# Работы в ИПФ РАН

Мощные волоконные усилители на основе конусных волокон

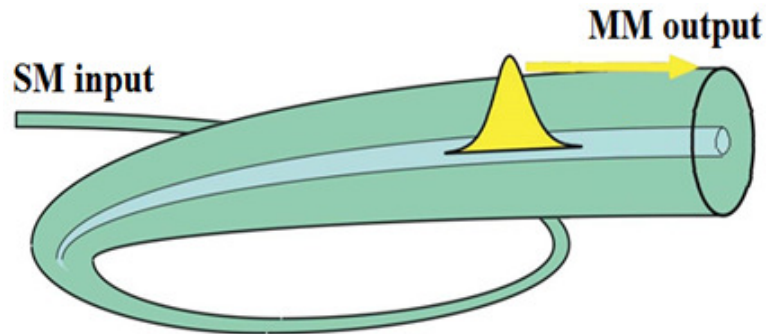
Многосердцевинные волокна

Повышение эффективности когерентного суммирования

Особенности квантовых свойств излучения при когерентном суммировании



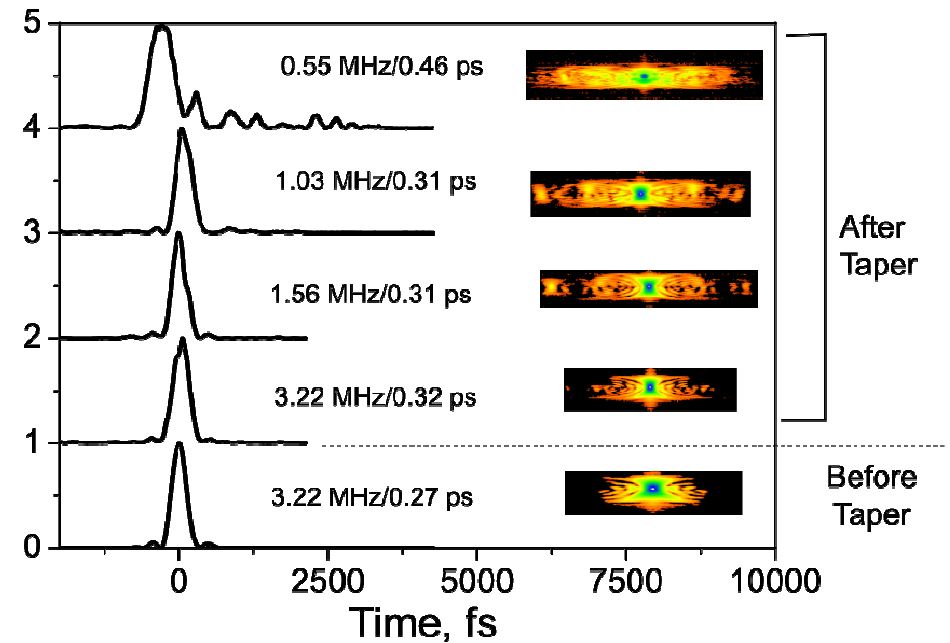
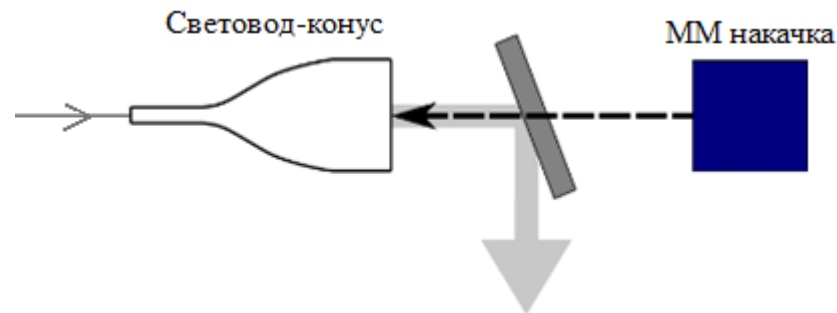
# Усилители на основе конусных волокон для систем с когерентным суммированием



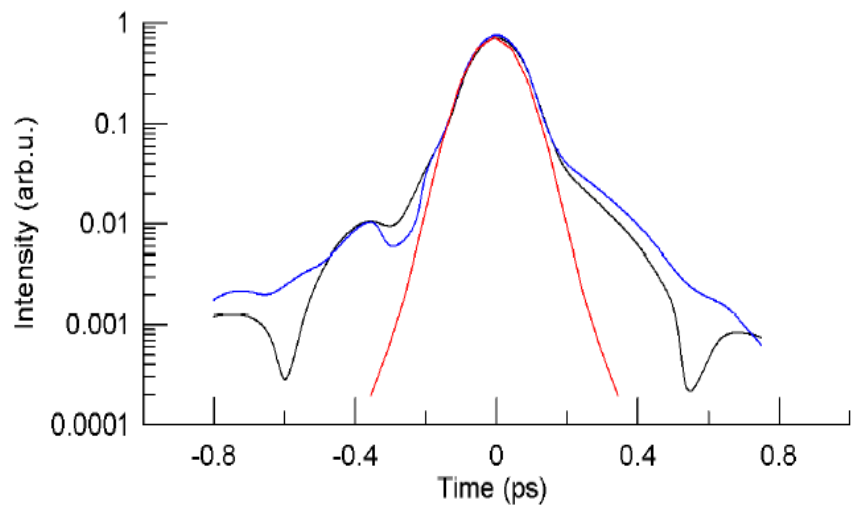
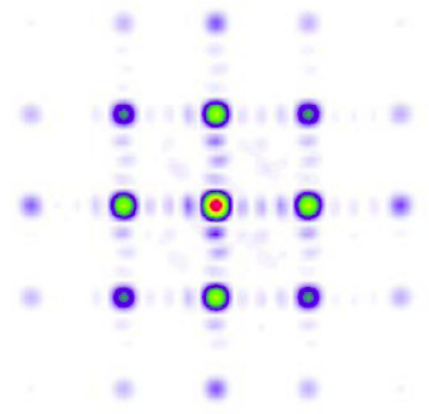
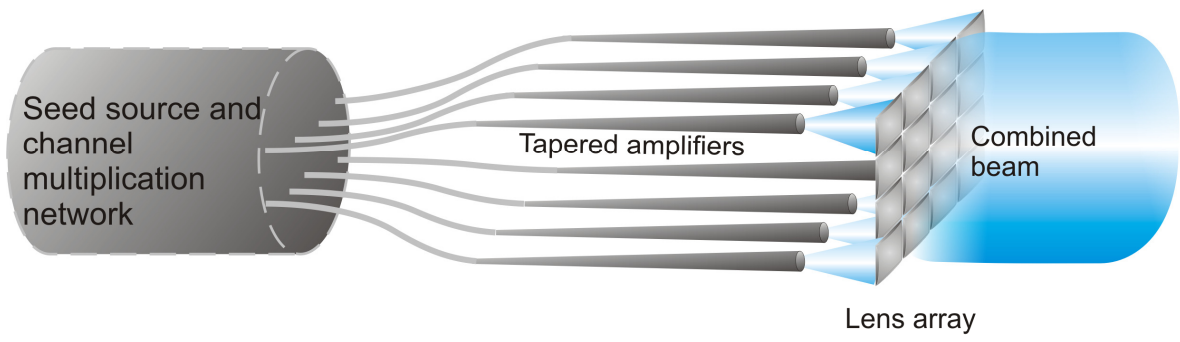
Длина волны 1.06 мкм  
 Пиковая мощность 23 МВт  
 Частота 0.55 МГц  
 Длительность ~400 фс

НЦВО РАН, ИХВВ РАН

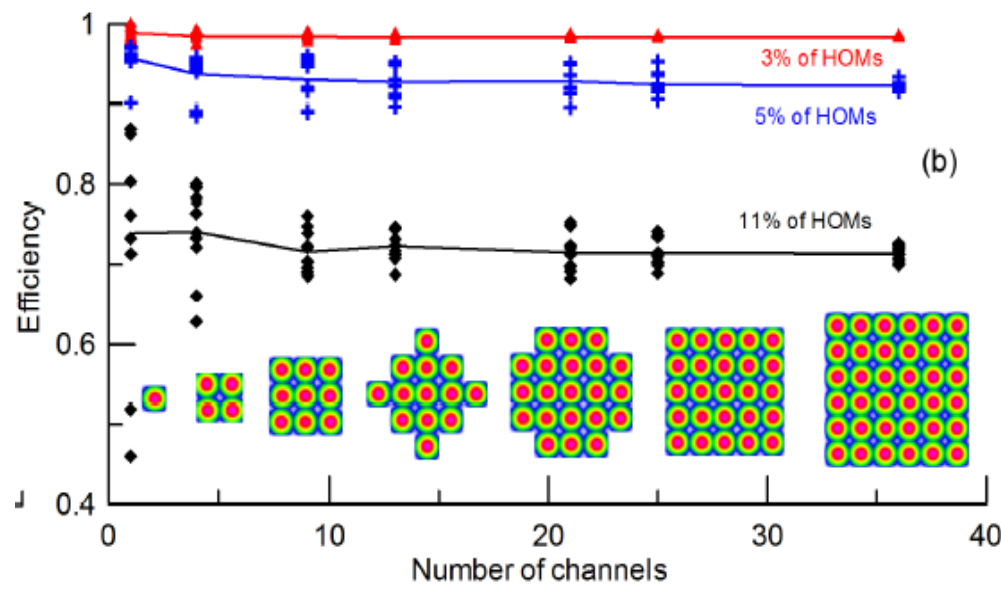
28 пс/1064 нм  
 3.22-0.55 МГц



# Когерентное сложение конусных усилителей (численное моделирование)

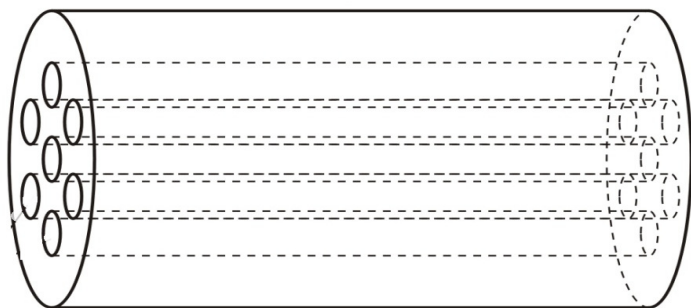


Эффективность =  $\frac{I_{\text{peak}} \text{ (с возмущениями)}}{I_{\text{peak}} \text{ (идеальный)}}$



Andrianov A., Anashkina E., Kim A., Meyerov I., Lebedev S., Sergeev A., Mourou G., Opt. Express, 22, 28256 (2014).

# Многосердцевинные волокна (МСВ) – новая платформа для лазеров с когерентным суммированием пучков



Много активных сердцевин может  
быть упаковано в одном волокне

+ упрощается техническая  
реализация многоканальной системы  
+ улучшается стабильность

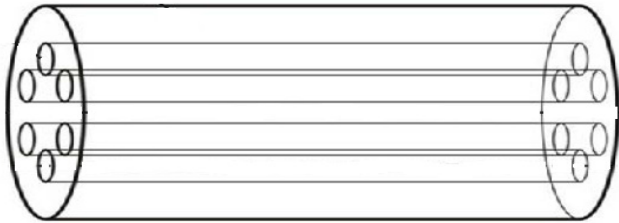
- сложнее вводить излучение  
- хуже теплоотвод

**Если между сердцевинами есть связь, можно реализовать  
когерентное распространение без дополнительной стабилизации!**

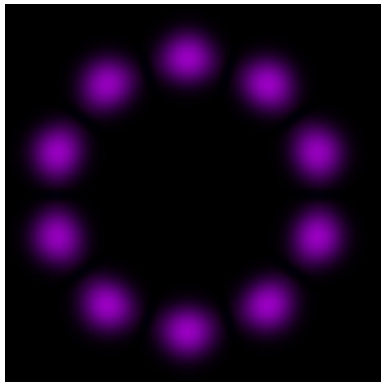
# Нелинейность – друг или враг?

МСВ с четным числом сердцевин

A. Balakin, S. Skobelev, E. Anashkina, A. Andrianov,  
A. Litvak, Phys. Rev. A, 2018, **98**(4), 043857



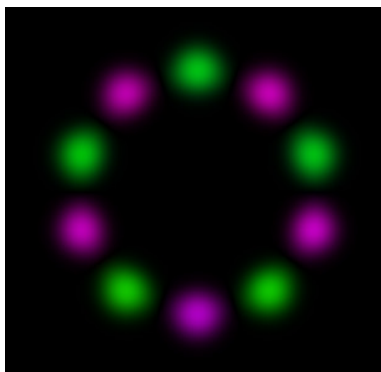
$$i \frac{\partial \mathcal{A}_n}{\partial z} = \gamma |\mathcal{A}_n|^2 \mathcal{A}_n + \sum_{m=0}^N \chi_{mn} \mathcal{A}_m$$



$$A_n = a$$

Основная мода (синфазная мода) становится неустойчивой при достижении порога  $P > P_{cr}$

$$P_{cr} \sim \frac{\chi}{\gamma} \frac{2\pi^2}{N} \quad \gamma = \frac{\omega_0 n_2}{c A_{eff}}$$



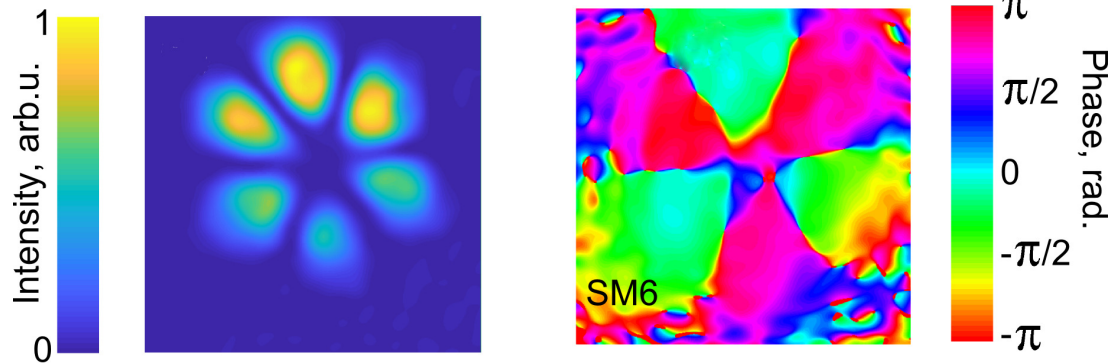
$$A_n = a(-1)^n$$

Мода высшего порядка (противофазная мода, “плюс-минус”) устойчива при любой мощности вплоть до самофокусировки в каждой сердцевине  $P < N * P_{sf}$

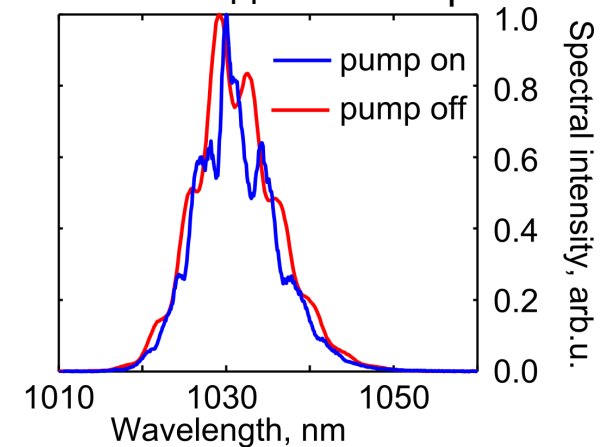
$P_{sf}$  = критическая мощность для одной сердцевинны

# Экспериментальная демонстрация усиления противофазной моды

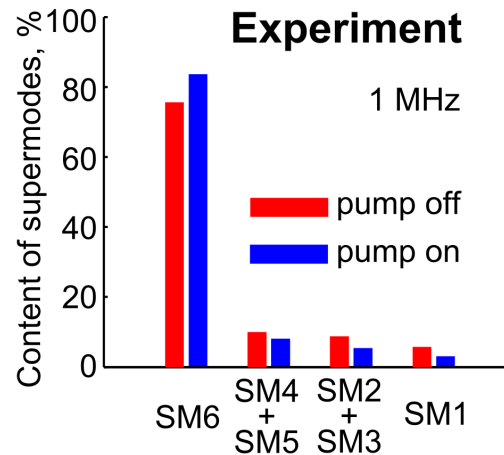
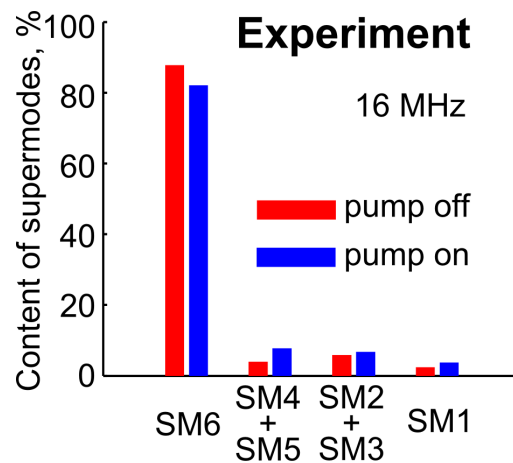
Измеренные интенсивность и фаза на выходе усилителя



Выходной спектр



Содержание различных мод в выходном излучении



Энергия импульса 0.9 мкДж

Средняя мощность 0.9 Вт  
при частоте повторения 1 МГц

Пиковая мощность ~18 кВт

A. Andrianov et al., J. Lightwave  
Technol, (2020)  
doi:10.1109/JLT.2020.2966025

# Перспективы

Демонстрация работоспособности концепции ✓

Схемы стабилизации фазы (и задержки для импульсов)

для небольшого числа каналов – хорошо отработаны ✓

для большого числа каналов – продемонстрированы ✓?

*Перспективы пассивных систем автофазировки*

Эффективные оптические схемы суммирования

для небольшого числа канала - хорошо отработаны ✓

масштабируемые для большого числа каналов  
и ультракоротких импульсов ?? *Но есть перспективы*

**Спасибо за внимание!**