



# **Волоконные лазеры со случайной распределённой обратной связью на рэлеевском рассеянии**

С. А. Бабин, Е. В. Подивилов, Д. В. Чуркин, С. И. Каблуков,  
S. K. Turitsyn<sup>2</sup>, A. E. El-Taher<sup>2</sup>, P. Harper<sup>2</sup>, J. D. Ania-Castanon

1 – Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

2- Photonics Research Group, Aston University, Birmingham, UK

# Мотивация

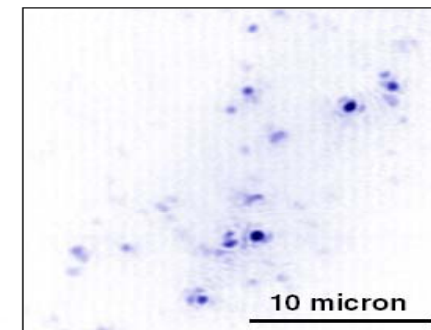
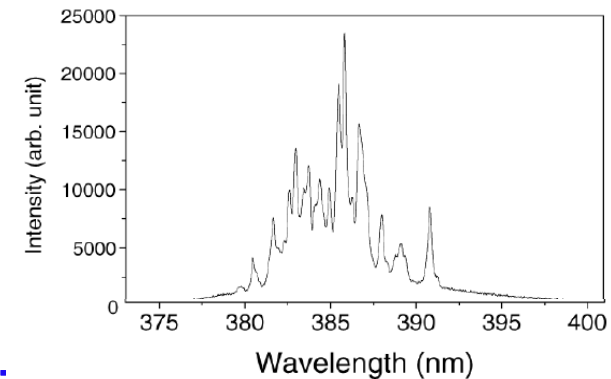
- ✚ **Рэлеевское рассеяние (RR):** упругое рассеяние на случайных неоднородностях показателя преломления в кварцевом стекле.
- ✚ **RR** определяет **потери** при распространении излучения в световоде ( $\alpha \sim 0.2$  дБ/км @ 1.55 мкм для **SMF**), OTDR.
- ✚ **RR назад** очень мало ( $Q \sim 10^{-3}$ ), однако может вносить возмущения при передаче сигнала по ВОЛС: двойное RR в рамановских усилителях может приводить к **генерации случайных импульсов** при увеличении мощности накачки.  
C.Chen, H.Lee, Y.Cheng, OFC 2003, TuC2.
- ✚ Можно ли получить **стабильную непрерывную генерацию** на «случайном» рэлеевском рассеянии?

# «Случайные» лазеры

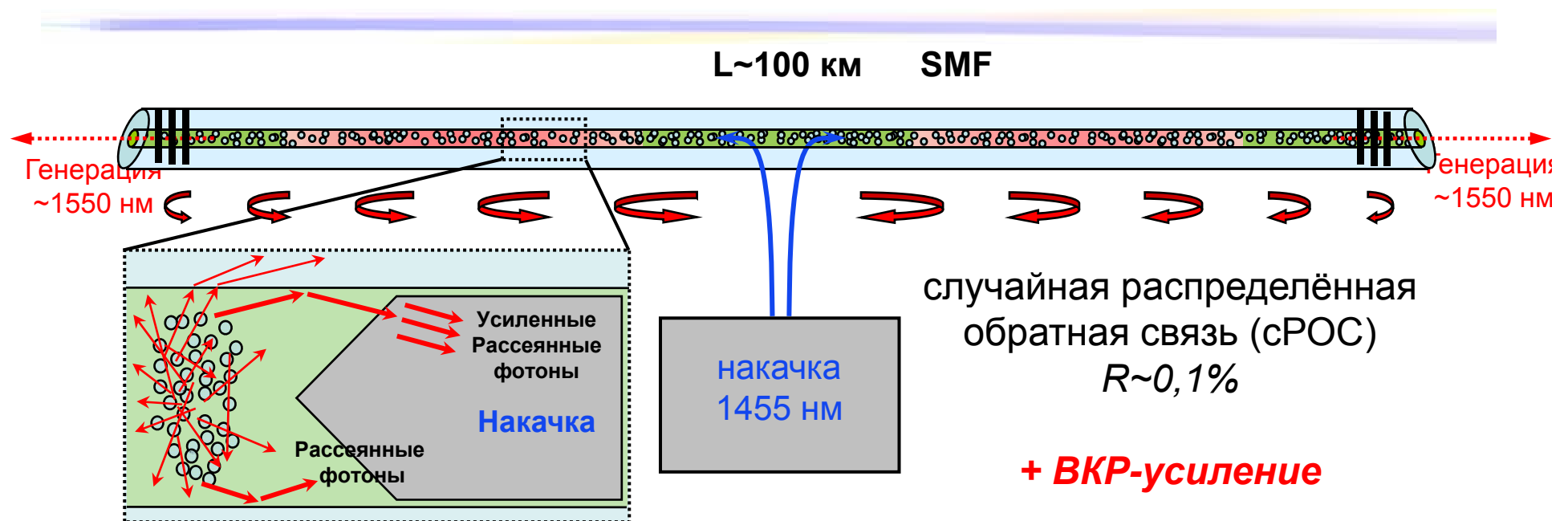
- ✚ **Обычный лазер:** усиливающая среда + оптический резонатор  
*конфигурация резонатора определяет структуру лазерных мод*
- ✚ **«Случайные» лазеры:** усиливающая среда без резонатора  
*Обратная связь из-за многократного рассеяния фотонов в неупорядоченной усиливающей среде (напр. порошки ЛК)*
  - генерация случайных импульсов
  - нестабильный спектр
  - сложная структура пучка

D. S. Wiersma, *Nature Physics*, 2008

- ✚ **Уменьшение размерности (2D,1D)**  
позволяет получить направленный пучок:  
*дырчатый световод (4мм), наполненный красителем и рассеивающими частицами*  
C.J.S. de Matos, et al, *Phys. Rev. Lett.*, 2007



# Генерация без зеркал

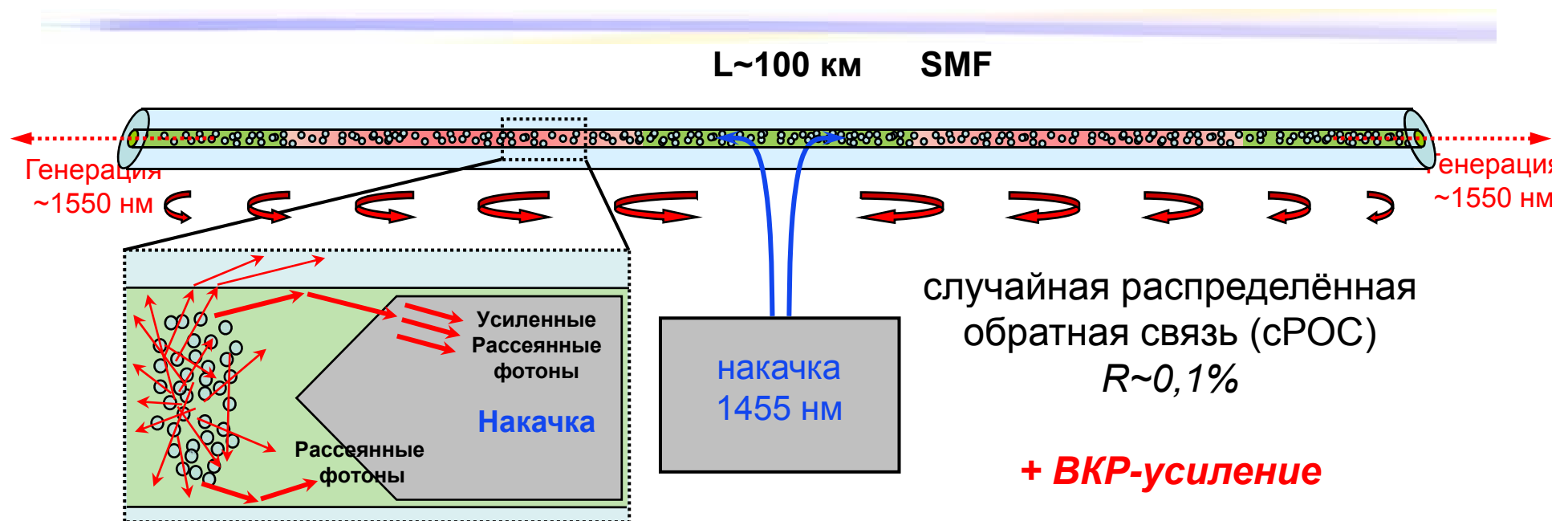


- ВКР-лазер: линейный резонатор на ВБР - моды  $c/2nL \sim 400$  Гц  $L_{\max} = 270$  км
- при  $L > 270$  км на генерацию влияет рэлеевское рассеяние, мод нет

S.A.Babin et al. Opt. Lett., 2007

K.Turitsyn et al., Phys. Rev. Lett., 2009

# Генерация без зеркал



- Убираем точечные отражатели (ВБР, торцы, соединения, ...)

Волоконный лазер без резонатора

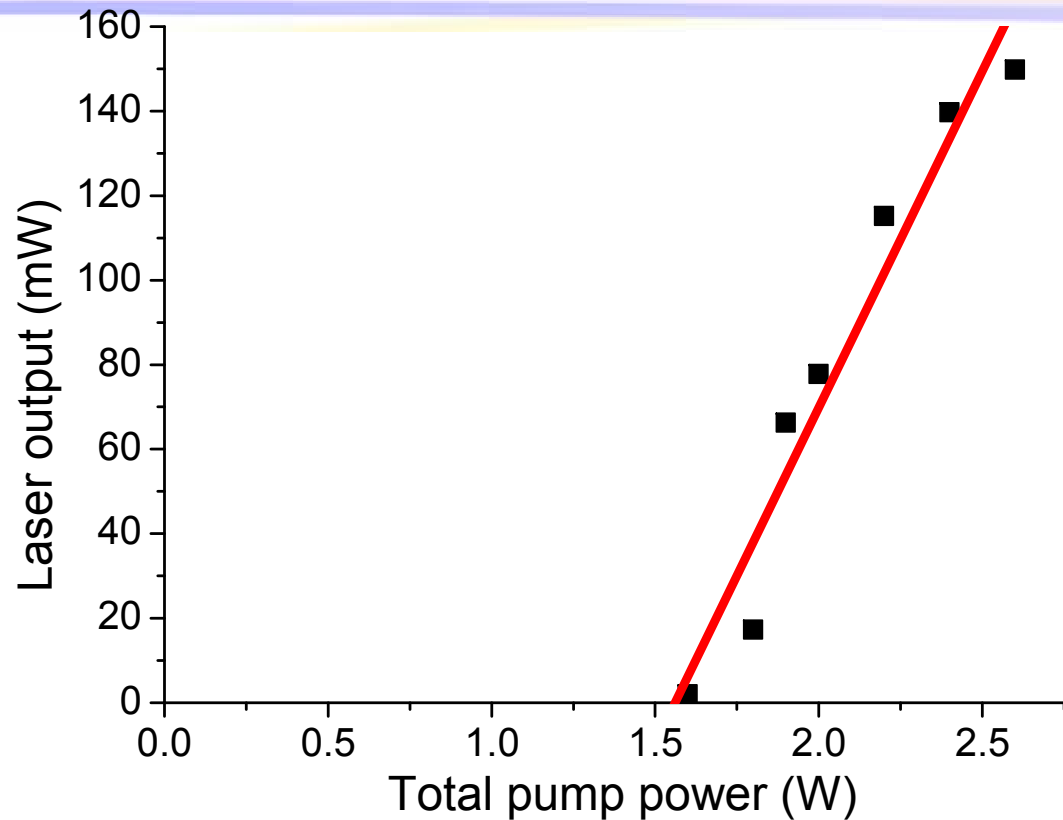
II

1-мерный «случайный» (random) лазер:

Усиление – ВК Рассеяние. Обратная связь – Рэлеевское Рассеяние.

стабильная лазерная генерация?

# Мощность генерации



Порог генерации достигается при умеренной накачке ( $P_{th} \sim 1.6$  Вт).

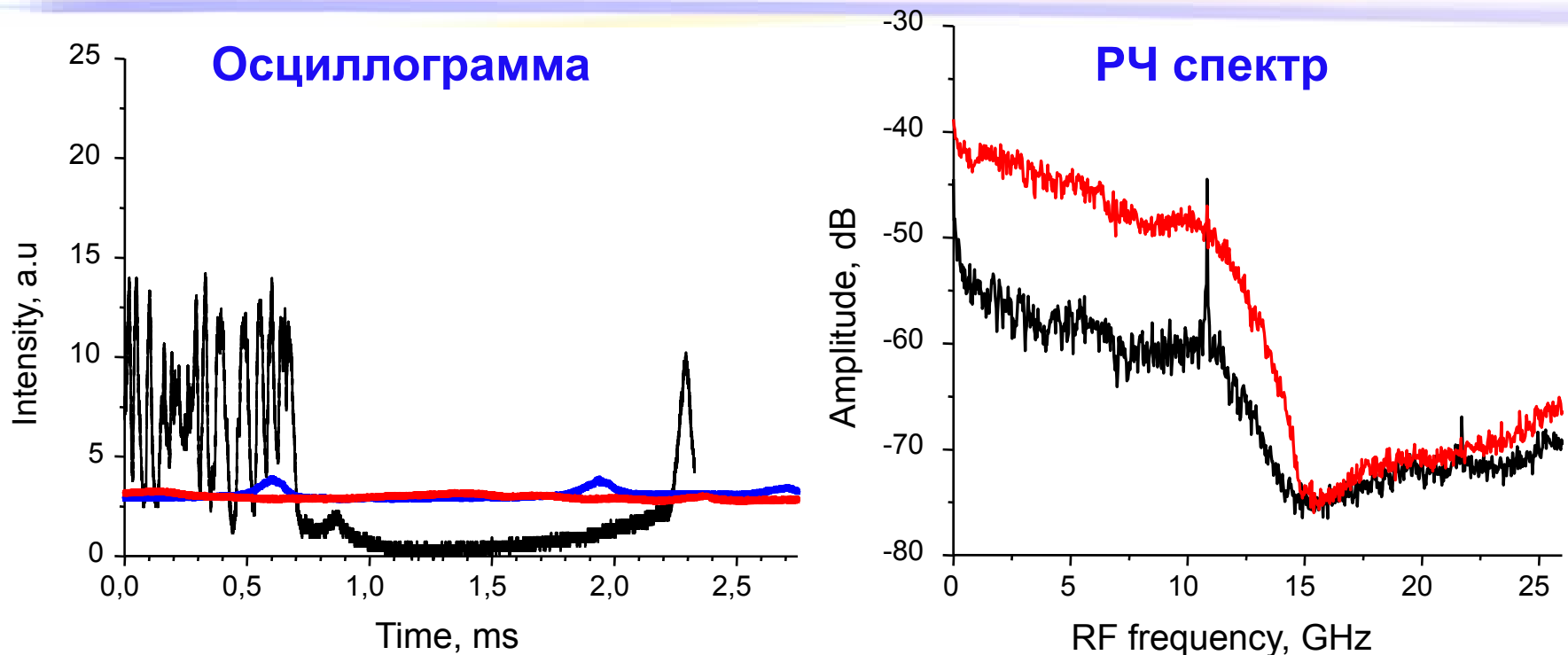
Выходная мощность  $> 150$  мВт с каждого конца.

Дифф. эффективность  $\eta \sim 15\% \times 2 = 30\%$ .

S. K. Turitsyn, S. A. Babin, A. E. El-Taher et al,  
Nature Photonics, 2010

ВКВО 2011, Пермь

# Непрерывная «безмодовая» генерация



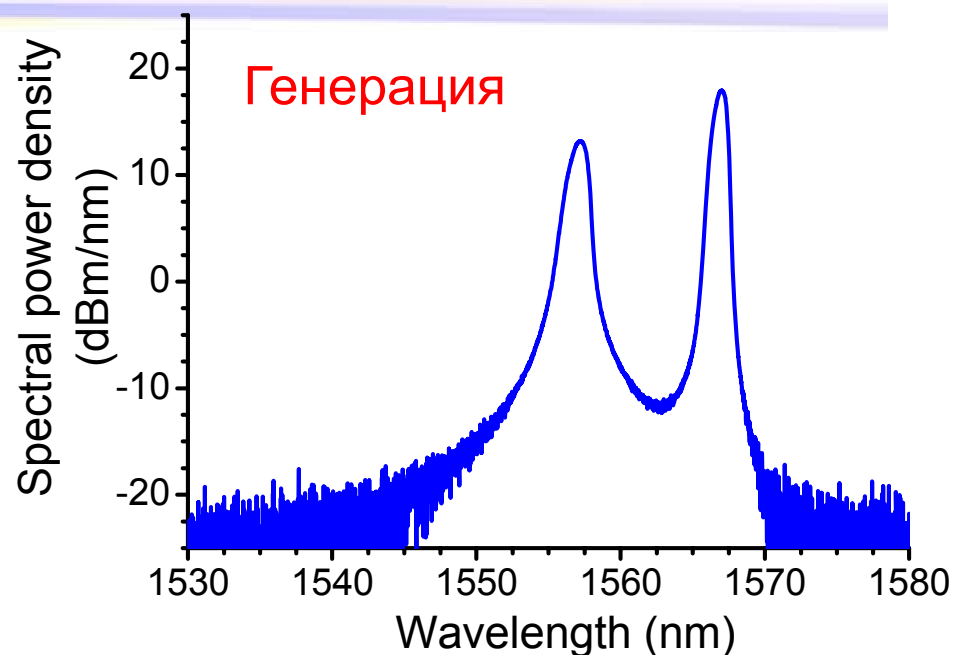
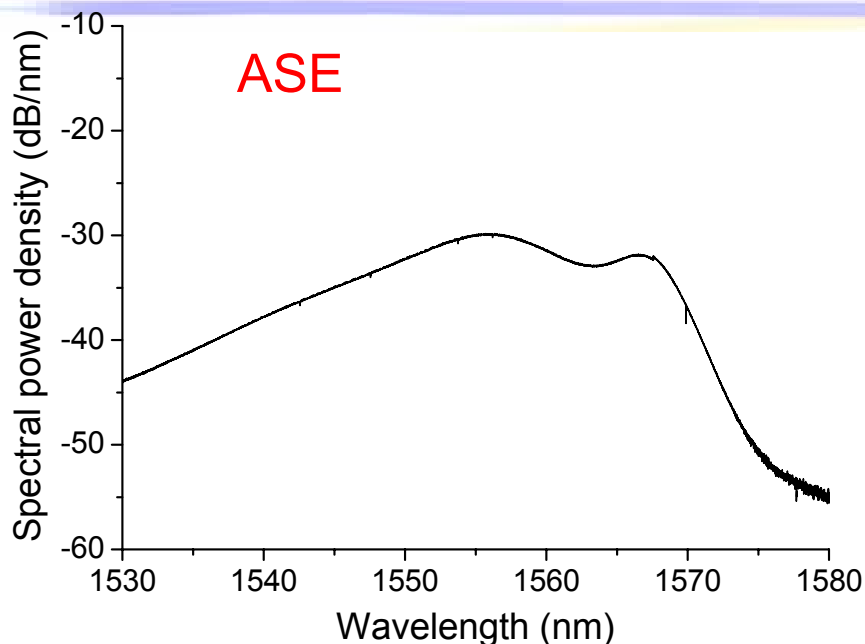
**Случайные импульсы (ВРМБ-РР) на пороге** A.Fotiadi, R.Kiyan, Opt. Lett. 1998

**Стабильная генерация** в с - мкс диапазоне высоко над порогом

**Процесс ВРМБ-РР подавляется** ( $f \sim 11$  ГГц пропадает)

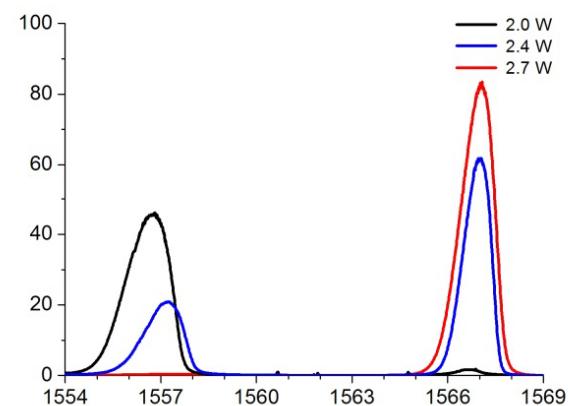
**Нет модовой структуры** в спектре биений  $c/2nL$  ( $L=83$  km)

# Спектр генерации



- Спектр локализован в максимуме усиления
- Ширина (-3 дБ) ~1.5 нм
- 35 дБ относительное подавление ASE

Случайная обратная связь на основе РР дает:  
**непрерывный режим генерации,**  
**узкий спектр,**  
**высокое качество пучка  $M^2 \sim 1$**





# Модель СРОС-лазера



$$g_R P_0 \exp(-\alpha_p L_{RS}) = \alpha$$

Оценка эфф.  
длины

$$L_{RS} = \frac{1}{\alpha_p} \ln \left( \frac{g_R P_{th}}{\alpha} \right) \approx 30 \text{ km}$$

$$L \sim 2 L_{RS}$$

Увеличение длины  $L > 2 L_{RS}$  не принципиально  
для лазерной генерации

# Оценка порога генерации

$$\frac{dP^{\pm}}{dz} = \mp \alpha P^{\pm} \pm g_R (P_p^+ + P_p^-) P^{\pm} \pm \varepsilon P^{\mp} \quad \varepsilon \sim 5 * 10^{-5} \text{ km}^{-1}$$

*Равенство усиления и потерь за обход*

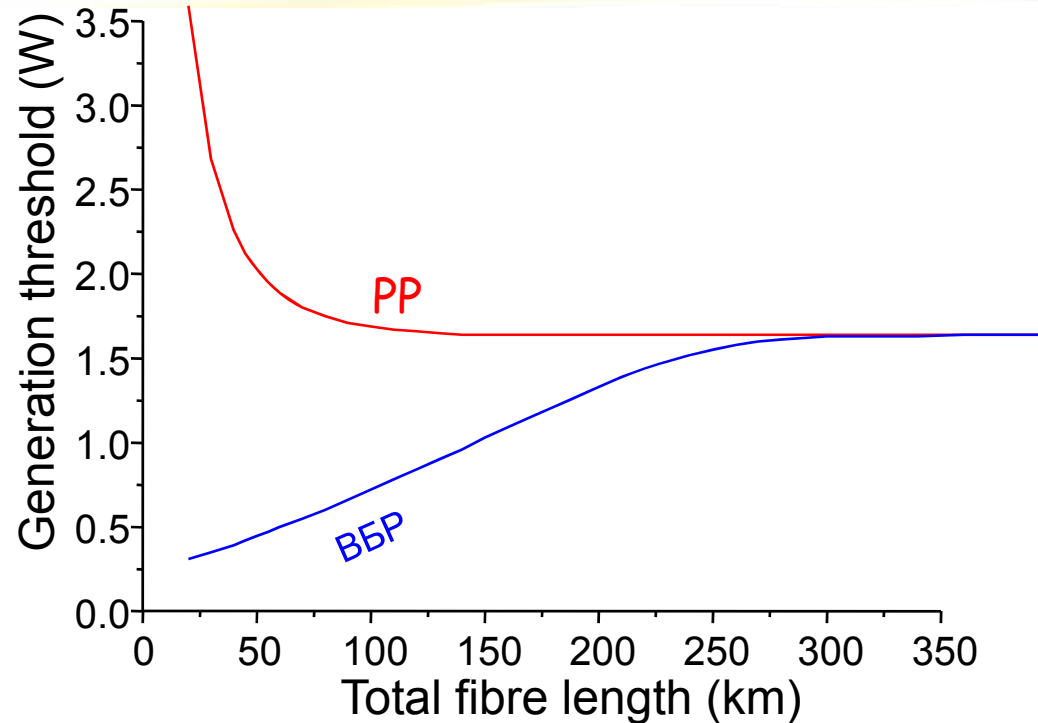
$$1 = \varepsilon \int_0^{L/2} \exp \left( -2\alpha z + 2g_R P_0 \frac{1 - e^{-\alpha_p z}}{\alpha_p} \right) dz$$

*Порог генерации  $L \gg L_{RS}$*

$$P_{th} = 2 \frac{\alpha}{g_R} \left( 1 + \ln \left( \frac{g_R P_{th}}{\alpha} \right) \right) + \frac{\alpha_p}{g_R} \ln \left( \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{\alpha_p}{\pi \alpha}} \right) \approx 1.8 W$$

**согласуется с экспериментом**

# Сравнение с обычным ВКР-лазером



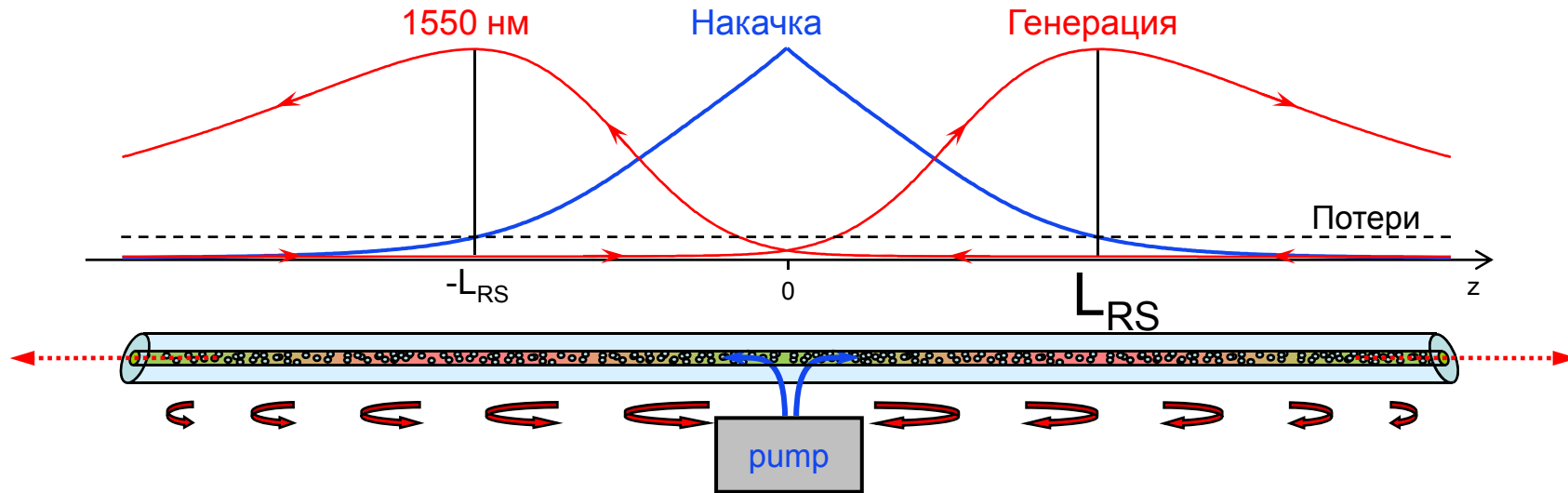
- **PP:** порог не зависит от длины при  $L > 70$  км

- **ВБР резонатор:**

*при  $L > 200$  км на порог влияет PP*

*$L \sim 300$  км – предельная длина резонатора с точечными зеркалами*

# Распределение мощности



Распределение определяется отношением **усиления к потерям**

Аналогично распределению в обычном **РОС-лазере без  $\pi$ -сдвига**

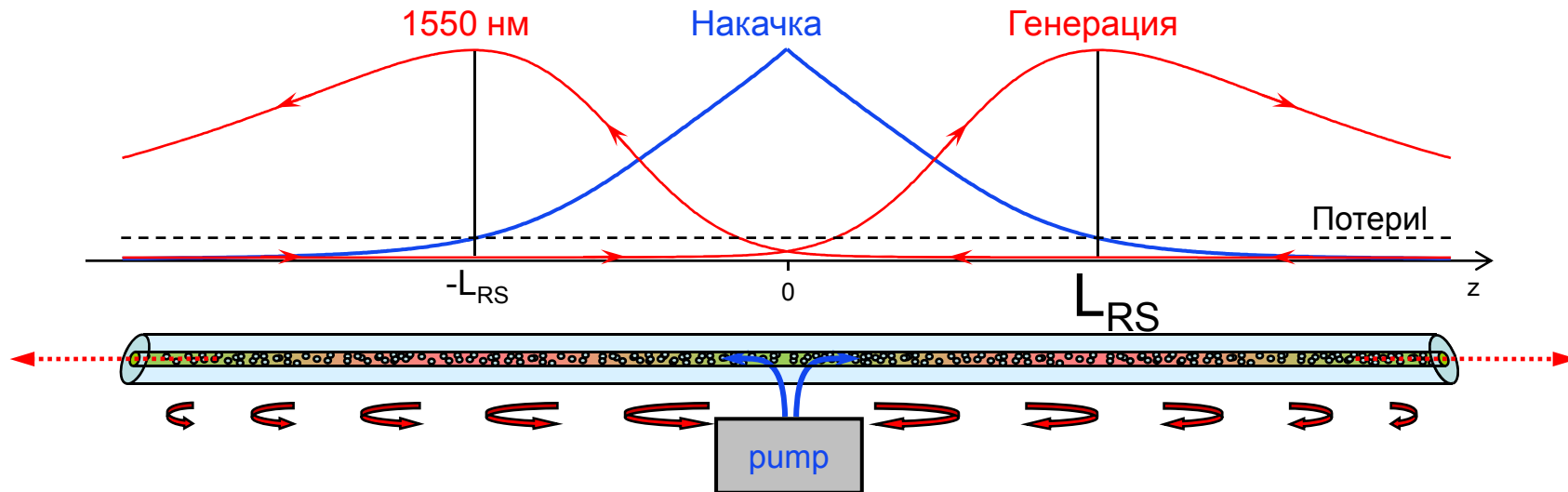
*Случайная решётка  $n(z)$*

*может быть представлена суммой регулярных*



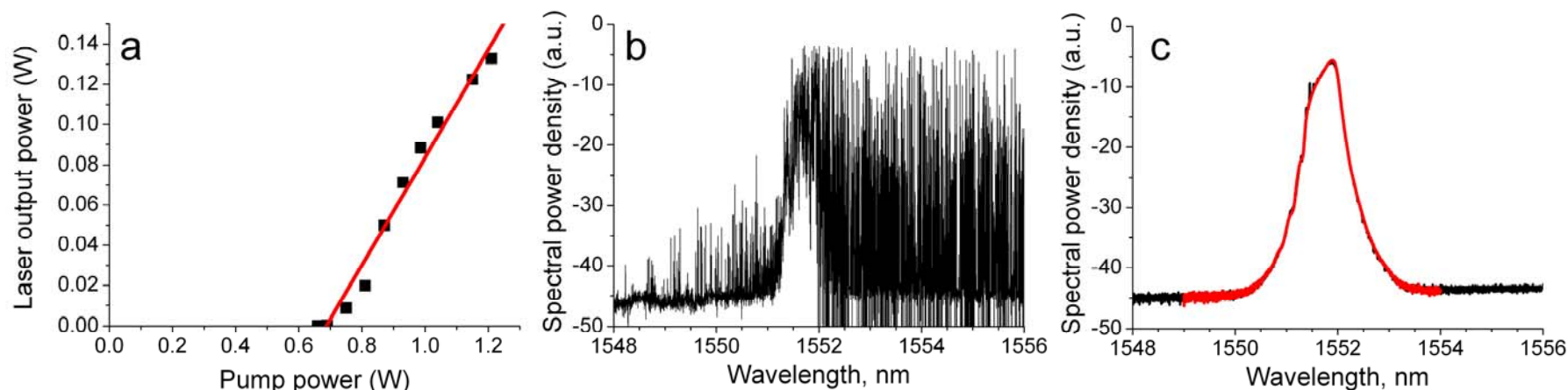
Насыщение усиления + нелинейное взаимодействие частот (FWM) -> **эффективная мода с узким спектром ( $\sim 1$  нм)** в максимуме усиления

# Другие варианты схем СРОС-лазера



- Оптимальная длина  $L/2 \sim L_{RS} \sim 20$  км
- Полусимметричный СРОС-лазер  $L/2$  + ВБР
- Многоволновой СРОС-лазер + линейка ВБР
- Перестраиваемый СРОС-лазер + перестраиваемый АО  
фильтр

# Полусимметричный СРОС-лазер



F

L=41 км, 1 накачка, 1 ВБР R=99%  
меньше  
(1конец)

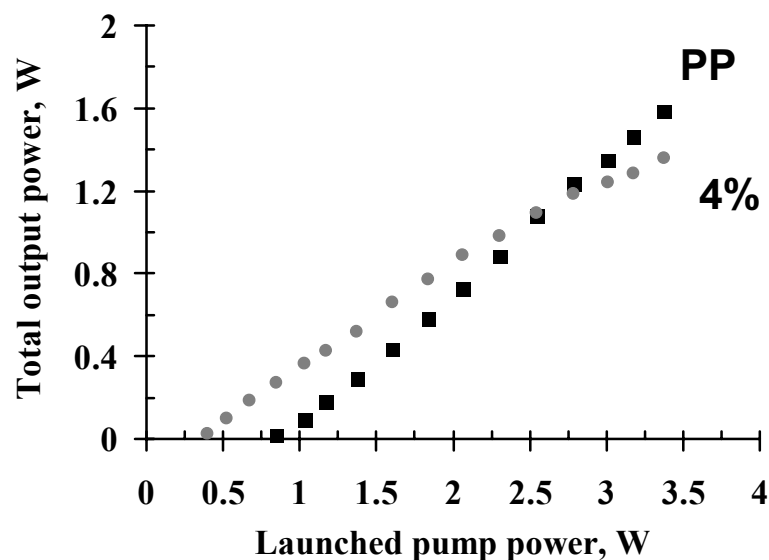
*порог по накачке в 2 раза*

*та же выходная мощность*

Увеличение длины 41-160 км:

*спектр не меняется*  
D.V.Churkin, S.A.Babin, A.E.El-Taher  
et al., Phys. Rev. A (2010)  
*уменьшение выходной мощности*

# Многоволновой СРОС-лазер



**22 ВБР + PP (или 4%)**

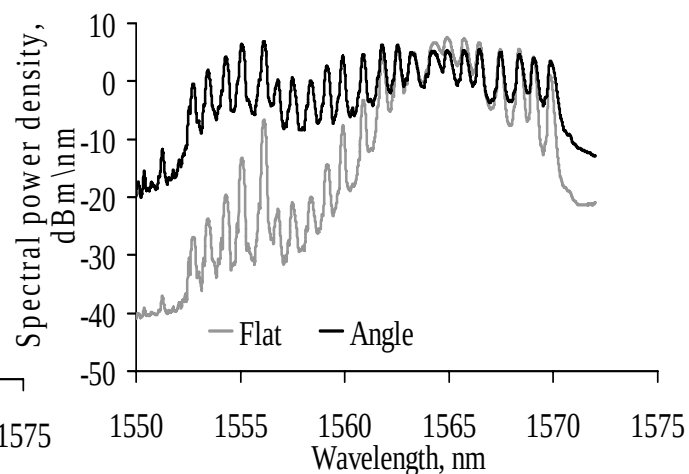
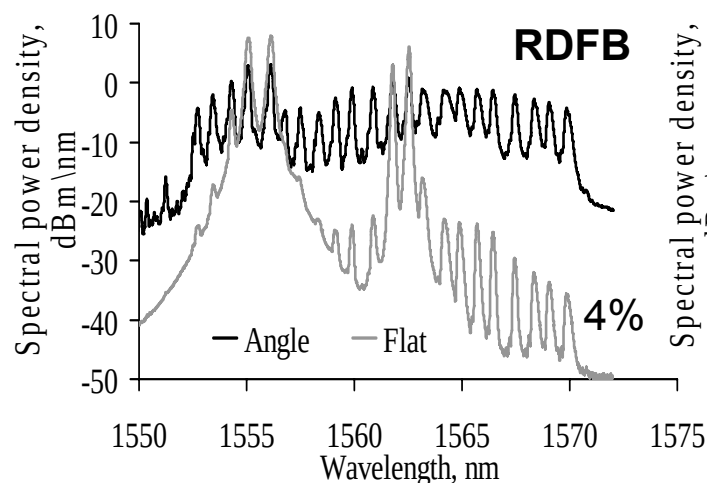
**Порог** меньше для 4%, но

**дифф. эффективность** больше для PP (~65%)  
(и мощность в максимуме) - **меньше нел. потери**

**+однородное распределение мощности в линия**

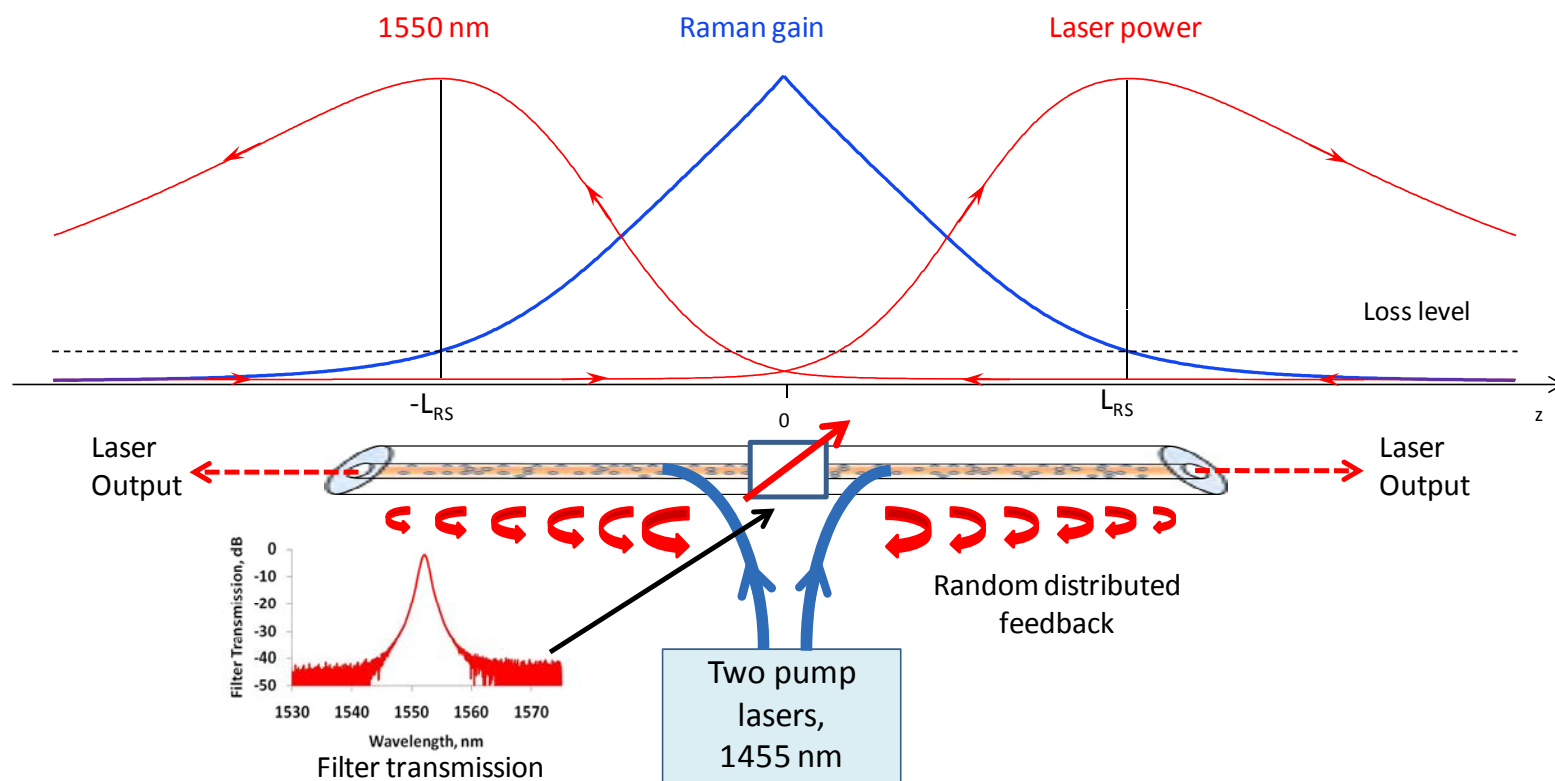
**Конкуренция линий** идет по-другому

**(само-организация)**



A.E.El-Taher, D.V.Churkin, S.A.Babin  
et al., Opt. Lett. (2011)

# Перестраиваемый СРОС-лазер



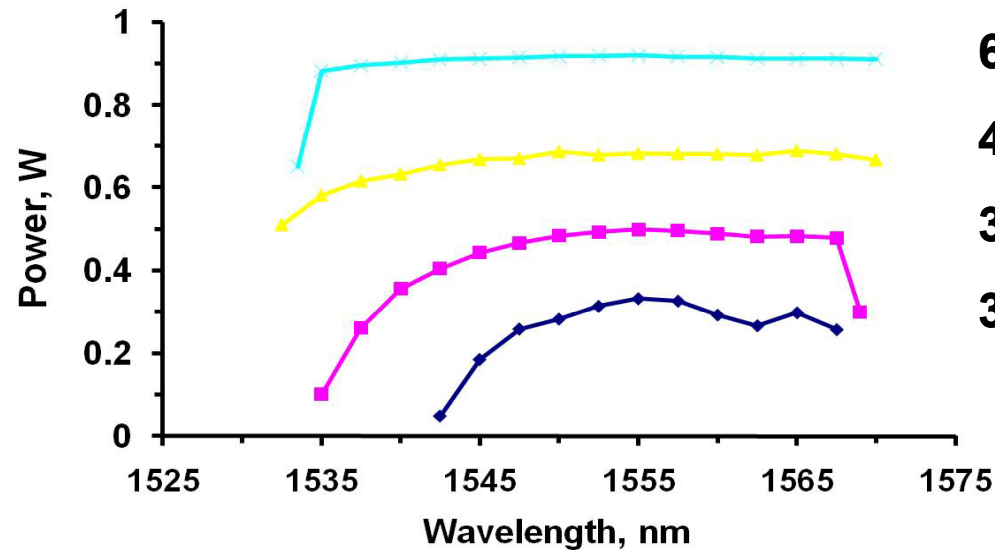
- Оптимальная длина  $L \sim 2L_{RS} \sim 2 \times 20$  км
- Перестраиваемый АО фильтр в середине

$\Delta\lambda \sim 1.5$  нм       $\delta \sim 2$  дБ ( $T \sim 65\%$ )

S.A.Babin, A.E.El-Taher, P.Harper  
et al., Phys. Rev. A (2011)



# Перестроечные характеристики

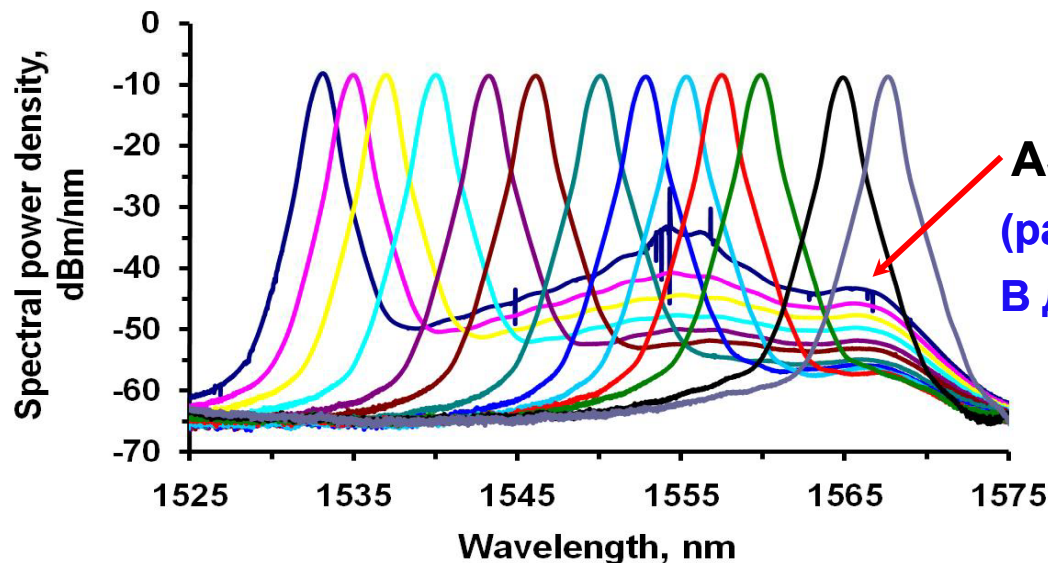


6 Вт (равномерность ~0.1 дБ)

4,5 Вт

3,5 Вт

3 Вт накачки @ 1455 нм

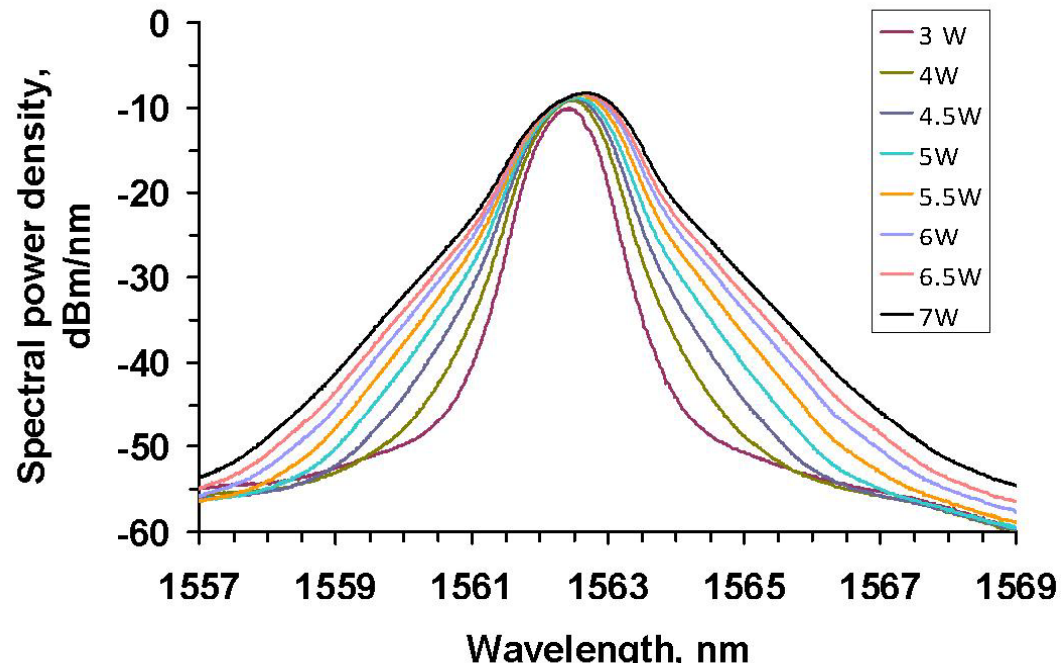


ASE

(равномерность ~10 дБ  
в диапазоне 1535-1570 нм)

1-3 дБ в обычных  
ВКР-лазерах

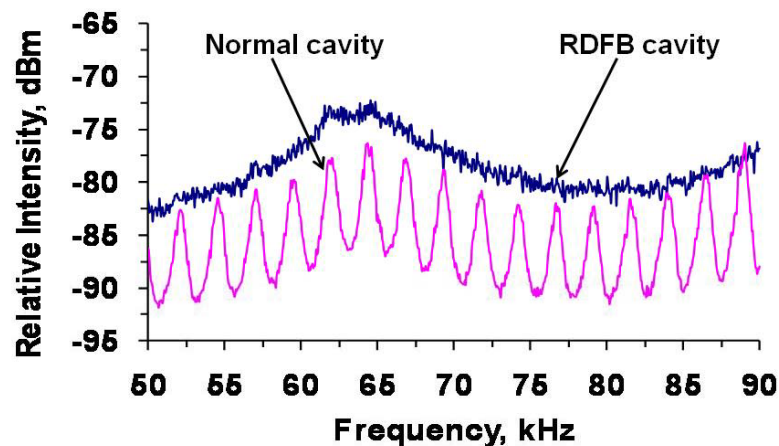
# Форма спектра



Двухмасштабный контур:

Центр (- 3 дБ ширина = 0.6-1.2 нм)  
определяется фильтром

Крылья (<-10 дБ) экспоненциальные  
уширяются с мощностью

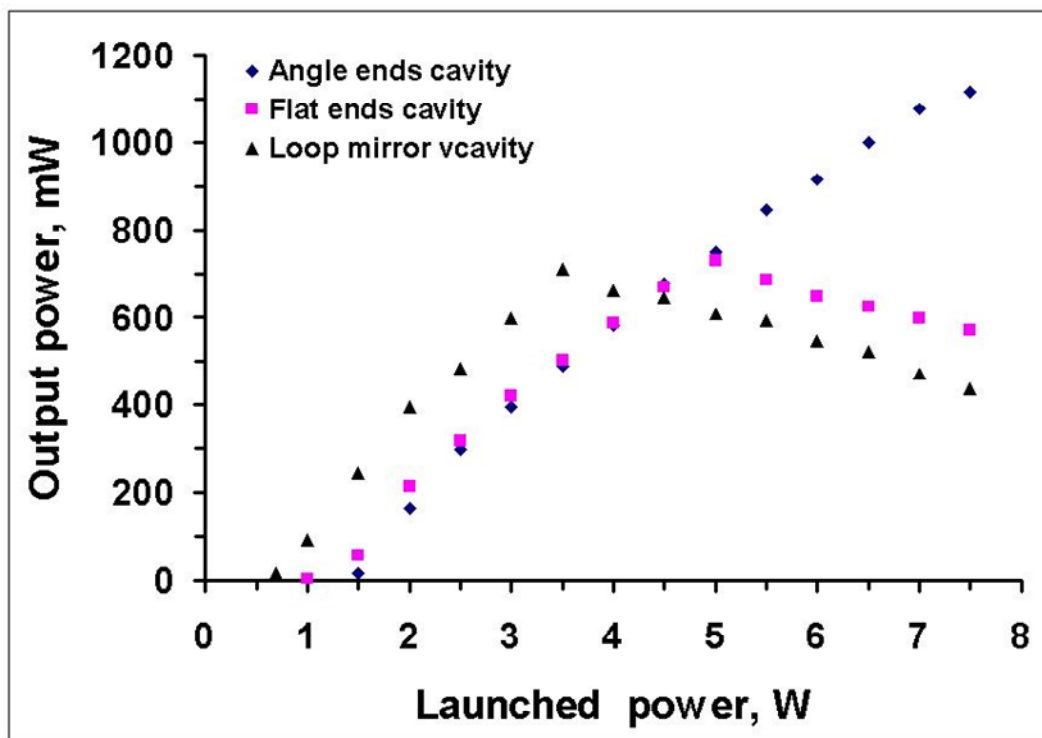


Спектр “без модовый”  
в отличие от ВКР-лазера

Случайная частота, фаза и амплитуда

# Мощность и эффективность

С одного конца



СРОС лазер ( $R_{1,2} \sim 0,1\%$ )

x 2

выше порог 2го Стокса

выше дифф. эффективность

Френелевское зеркало ( $R_{1,2} \sim 4\%$ )

x 2

$R_1 \sim 4\%$   $R_2 \sim 100\%$  (зеркало Саньяка)

Получена мощность 2.2 Вт с >40% дифф. эффективностью

перестройка от 1535 до 1570+ нм с равномерностью ~0.1 дБ

# Модель

Моделируем РР слабым отражателем  $R \rightarrow 0$   
( $R \sim 10^{-3}$ )

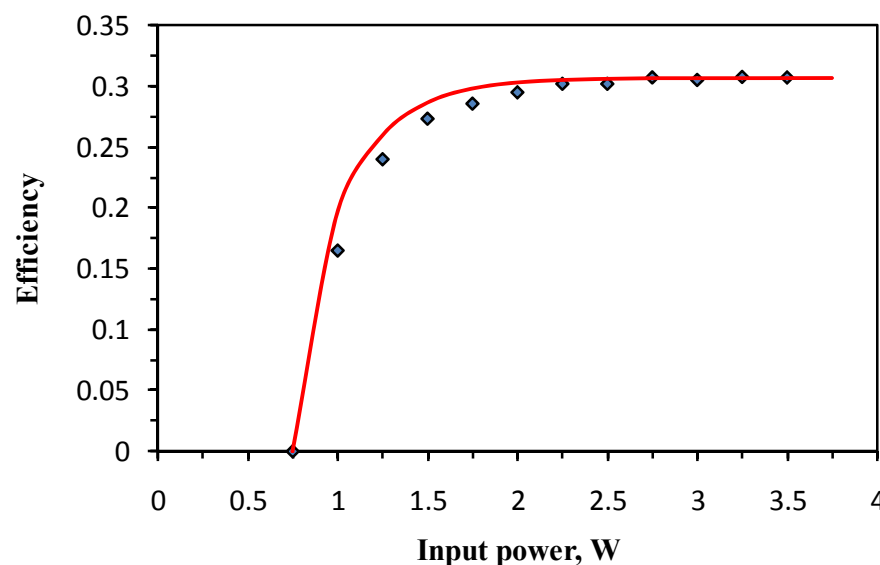
Порог зависит от к-та усиления, а эффективность нет:

$$P_{in}^{th}(\lambda) = \frac{1}{2} \times \frac{\alpha \exp(\delta_1) [\ln(1/R) + \alpha L]}{g_R(\lambda) (1 - \exp[-\alpha L / 2])}$$

$$\eta = \frac{I_{out}}{P_{in}} = \exp(-\delta_1 - \delta_2 - \alpha L / 2) \times \frac{g_R}{g_P} \times [1 - \exp(g_R [P_{th} - P_{in}]) \frac{1 - \exp(-\alpha L / 2)}{\alpha}]$$

# Сравнение с экспериментом

$$\eta = \frac{I_{out}}{P_{in}} = \exp(-\delta_1 - \delta_2 - \alpha L / 2) \times \frac{g_R}{g_P} \times [1 - \exp(g_R [P_{th} - P_{in}]) \frac{1 - \exp(-\alpha L / 2)}{\alpha}]$$



При  $P_{in} > P_{th}$

Эффективность экспоненциально приближается к предельному значению, не зав. от  $\lambda$

-> **равномерная перестройка**

Мах. эффективность ( $\delta_i=0$ ):

$\eta = \exp(-\alpha L / 2) \sim 0.4$  for  $L=40$  km

$L$  можно уменьшить (**истощение накачки**)

# Выводы

**Пассивный волоконный световод (SMF и др.) с накачкой = лазер**

распределённое усиление (ВКР)

случайная распределённая обратная связь (РР)

**Волоконный СРОС-Лазер** может превосходить по параметрам СЛ и В ВКР-

лазер стабильная генерация с высокой дифф.

эффективностью (40-65%)

узкий спектр ( $\sim 1$  нм)

высокое качество пучка  $M^2 \sim 1$

широкая перестройка (напр. C-band) с равномерностью  $\sim 0.1$  дБ

+ **Фундаментальные задачи:** много-волновая генерация с однородным распределением

механизм стабильной генерации

механизм формирования стаб. узкого спектра из «случайных мод» ( $I$ ,  $\varphi$ ,  $\omega$ )

конкуренция линий (само-организация)

динамика на высоких частотах, статистика фотонов

+ **Практические задачи:**

другие спектральные диапазоны ( $\epsilon \sim \lambda^{-4}$ ) А9-3 (И.Ватник)

каскадная накачка увеличение длины 1000+ км

телекоммуникации, сенсорные системы