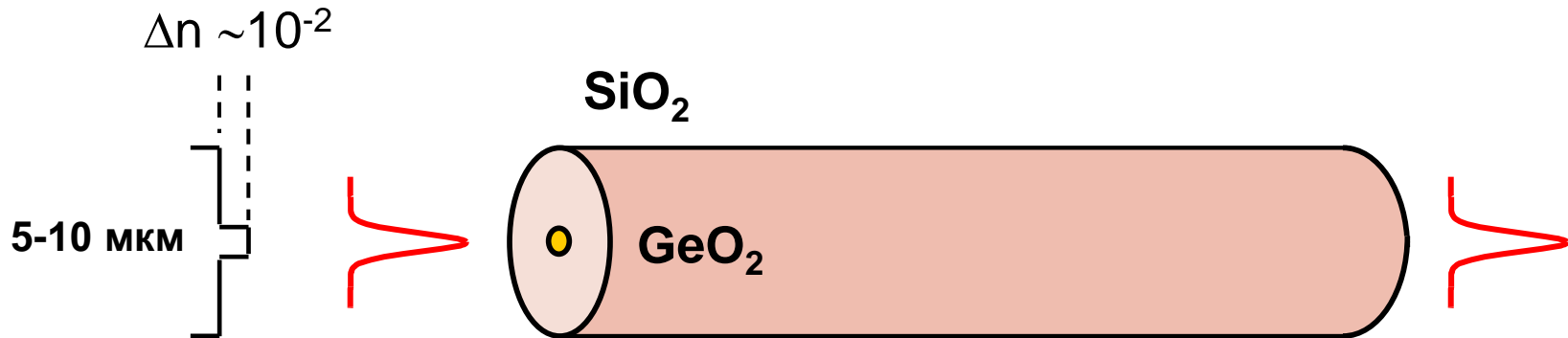




# Новые режимы генерации в волоконных лазерах

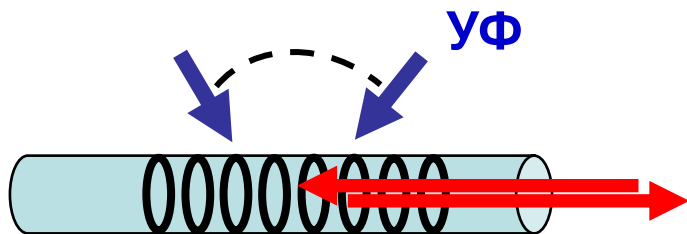
Е.В.Подивилов

# Оптическое волокно



- Распространение на большие расстояния (**0,2 дБ/км – Рэлей**)
- Эффективный теплоотвод, качество пучка
- Высокая интенсивность x большая длина **1Вт x 100км**
- Нелинейные эффекты: **ВКР, ВРМБ, ЧВС, ...**
- Фоточувствительность: **ВБР- периодическая структура  $n(z)$**

**период  $\Lambda=300-500\text{нм}$**



$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2 \cdot n_{\text{eff}}(T) \cdot \Lambda(T, \varepsilon)$$

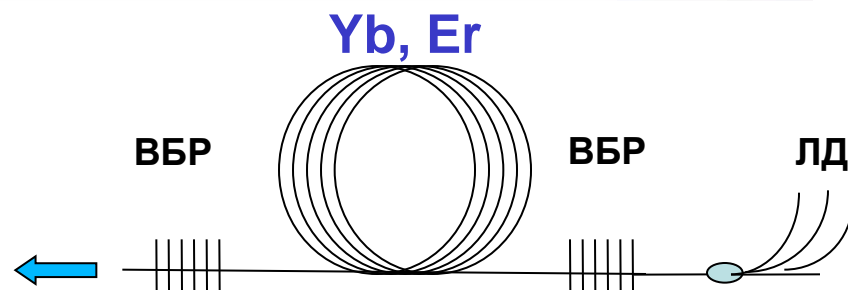
**датчики и лазерные зеркала**

# Волоконные лазеры



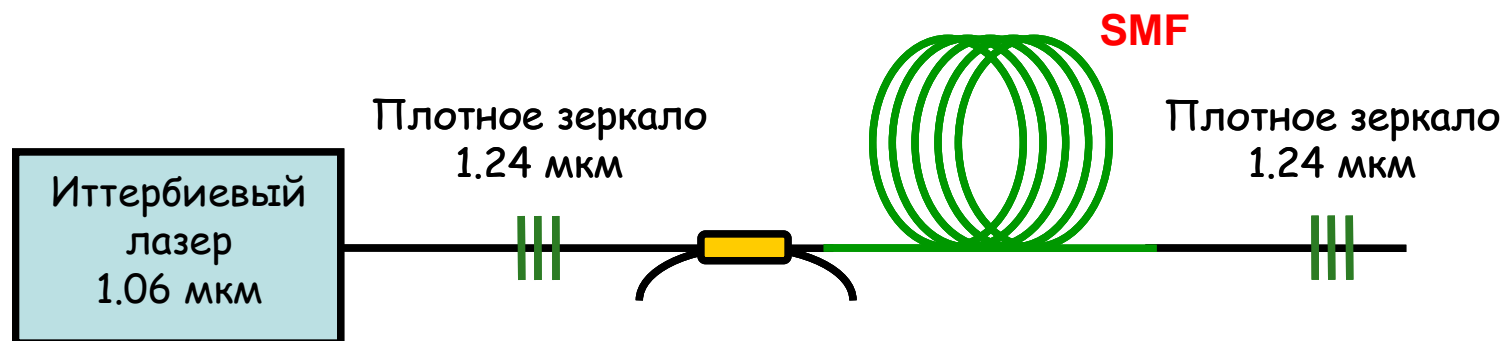
## Волоконные лазеры

- не требуется юстировка зеркал
- высокая эффективность (~70%) и стабильность генерации
- высокое качество пучка ( $M^2 \sim 1$ )



## волоконные ВКР – лазеры

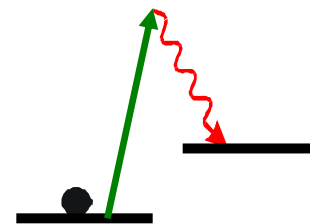
генерация в широком диапазоне спектра 1,1 - 1,7 мкм



Dianov E.M. et al. *Electr. Lett.* 33, 236 (1997).

Квант. электр. 35, 1083 (2005)

ВКР- усиление:  
 $g \sim 1$  дБ/(км Вт)



# Форма спектра ВКР-лазера



$$i(\partial_z - \hat{g})\psi_+ = \beta\partial_t^2\psi_+ + \frac{\gamma}{2}\psi_+|\psi_+|^2, \text{ обобщ. НУШ}$$

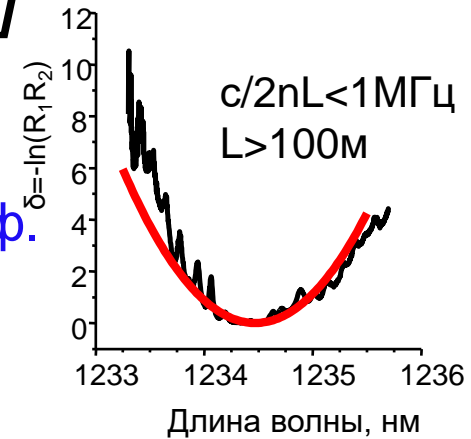
$$I(\Omega) = \frac{2I_0}{\pi \Gamma \cosh(2\Omega/\Gamma)}$$

где  $\Gamma \sim \sqrt{2\mathcal{M}/\beta_2}, \Omega_{FBG}\mathcal{M}L$

$N \sim 10^6$  мод

4ВС+дисперсия = с.ф.

Слабая волновая турбулентность

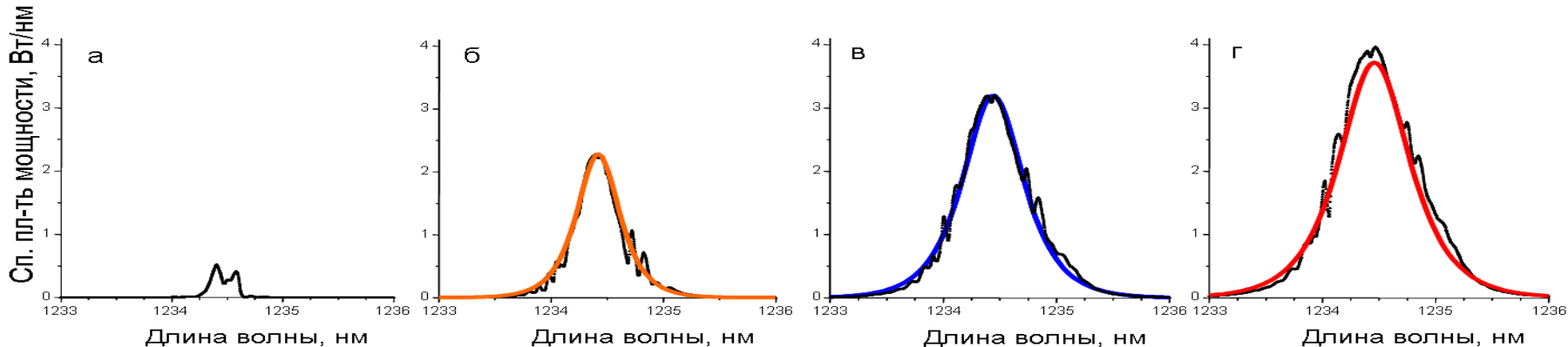


$P_0 = I_0 S = 0,4 \text{ W}$

$P_0 = 1 \text{ W}$

$P_0 = 2 \text{ W}$

$P_0 = 3 \text{ W}$



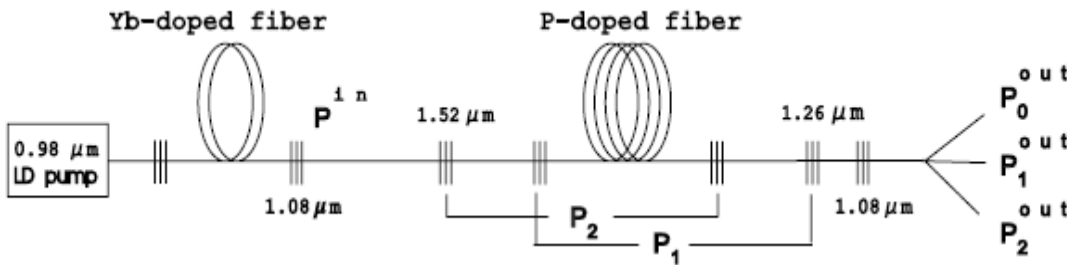
Babin S.A., Churkin D.V., Ismagulov A.E., Kablukov S.I.,

Podivilov E.V. *Opt. Lett.* 2006; *JOSA B* 2007. > 350

Kablukov S, Zlobina E., Podivilov E., Babin S. *Opt.Lett.* 2012 Output spectrum of Yb-doped fiber lasers > 60

Без подгоночных параметров!

# Многокаскадные Волоконные лазеры



$$P_0^{\text{out}} = t_0 P_0^+(L) = t_0 P_0^{\text{in}} \exp\left(-\alpha_0 L - \frac{g_0 \lambda_1}{g_1 \lambda_0} (\alpha_2 L + \delta_2)\right)$$

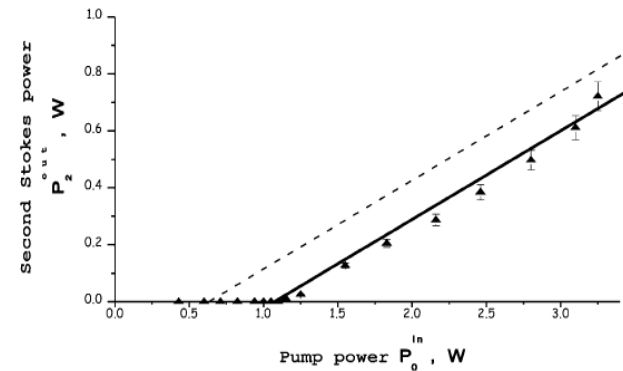
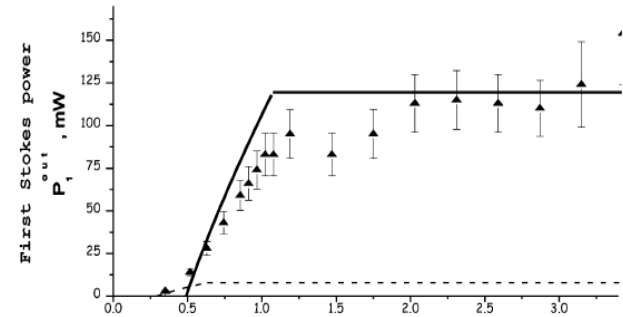
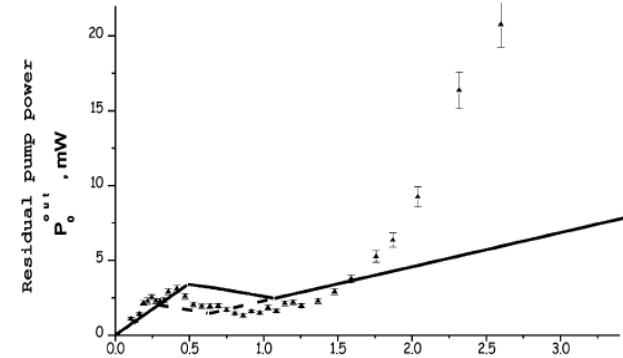
$$P_1^{\text{out}}(P_0^{\text{in}}) = P_1^{\text{out}}(P_{\text{th}2}) = t_1 \frac{\alpha_2 L + \delta_2}{2g_1 L} = \text{const}$$

$$P_2^{\text{out}} = t_2 P_2^+(L) = t_2 \frac{\delta_2 (\alpha_1 L + \delta_1) \exp(\delta_2^{\text{out}}/2)}{2 \frac{\lambda_2}{\lambda_1} g_1 L [\sinh(\delta_2^{\text{out}}/2) + \sinh(\delta_2^{\text{in}}/2)]} \left(\frac{P_0^{\text{in}}}{P_{\text{th}2}} - 1\right)$$

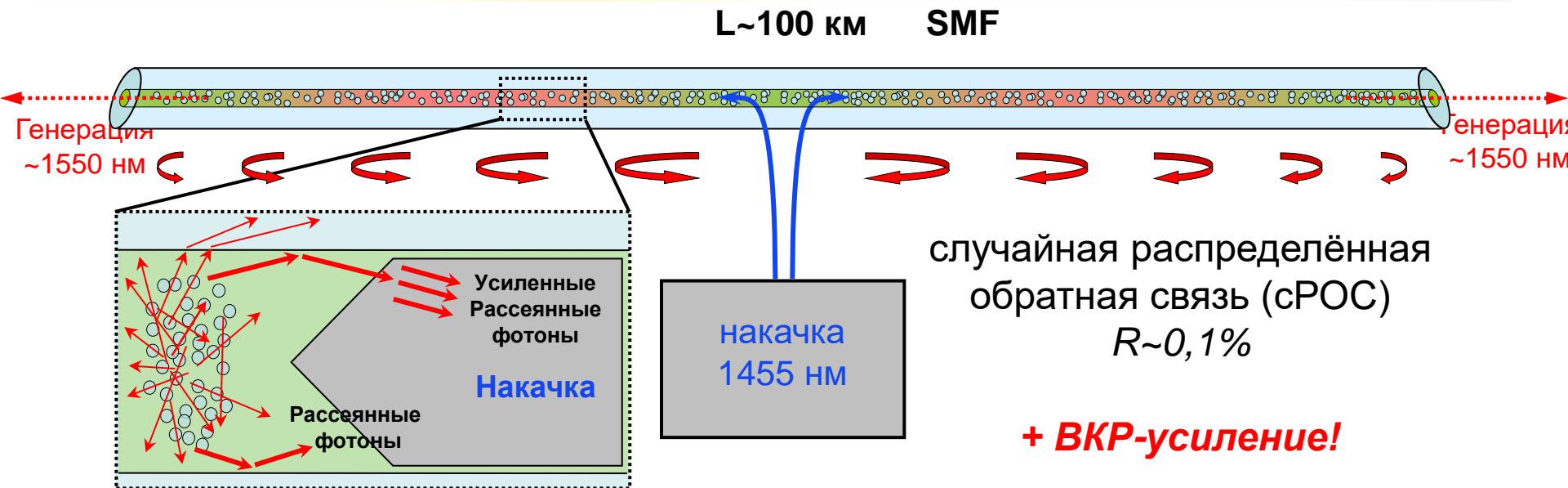
**Отклонение от константы, отличие во 2 пороге  
Уширение спектра генерации с мощностью.**

S.A.Babin, D.V. Churkin, E.V. Podivilov Opt. Comm. 2003 > 60

Самый длинный в мире лазер 270км



# Генерация без зеркал



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

Волоконный лазер без резонатора

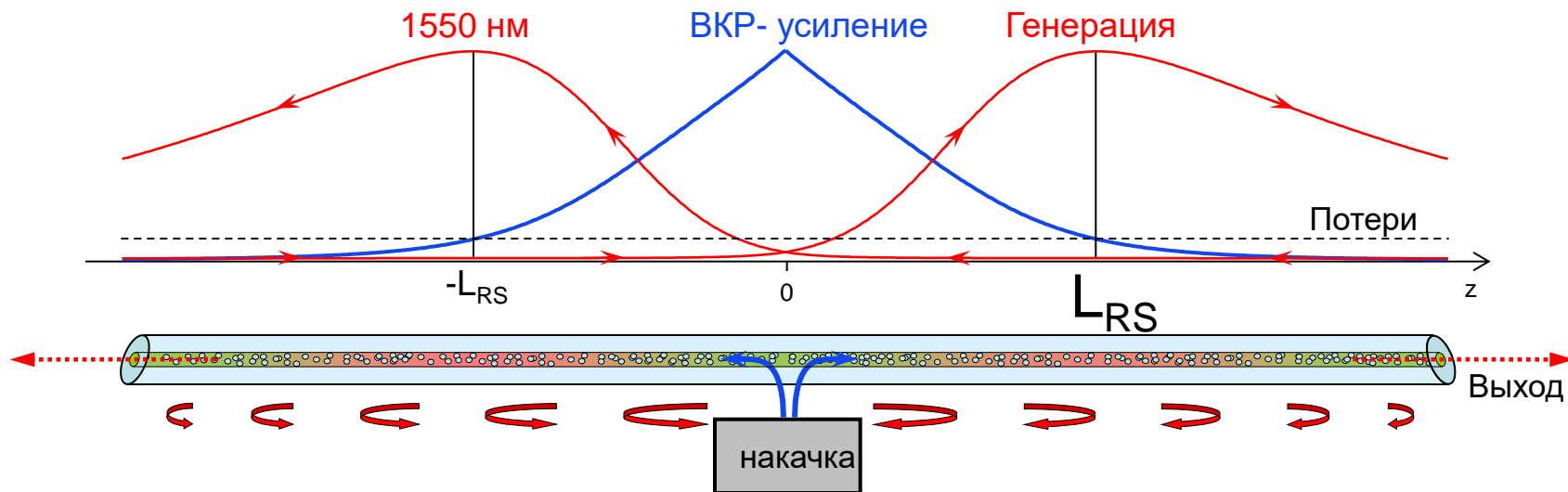
II

1-мерный «случайный» (random) лазер:

Усиление – ВК Рассеяние. Обратная связь – Рэлеевское Рассеяние.

лазерная генерация?

# Механизм генерации Релеевого ВКР лазера



**Баланс**

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

**Оценка  $L_{RS}$**

$$L_{RS} = \frac{1}{\alpha_p} \ln\left(\frac{g_R P_{th}}{\alpha}\right) \approx 35 \text{ км} \quad L \sim 2 L_{RS}$$

**Порог**

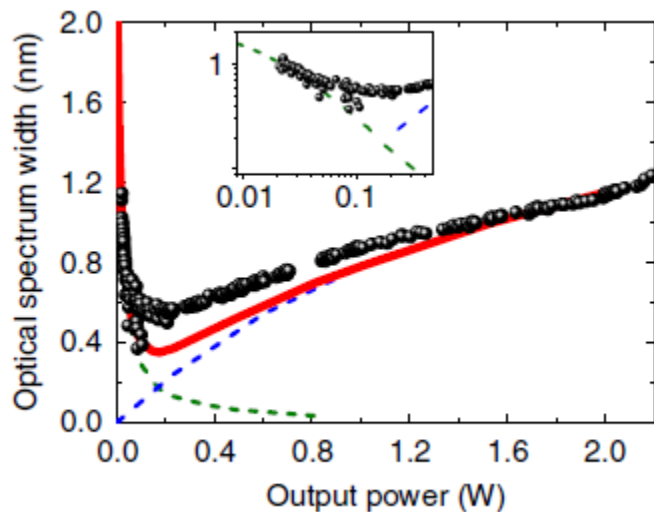
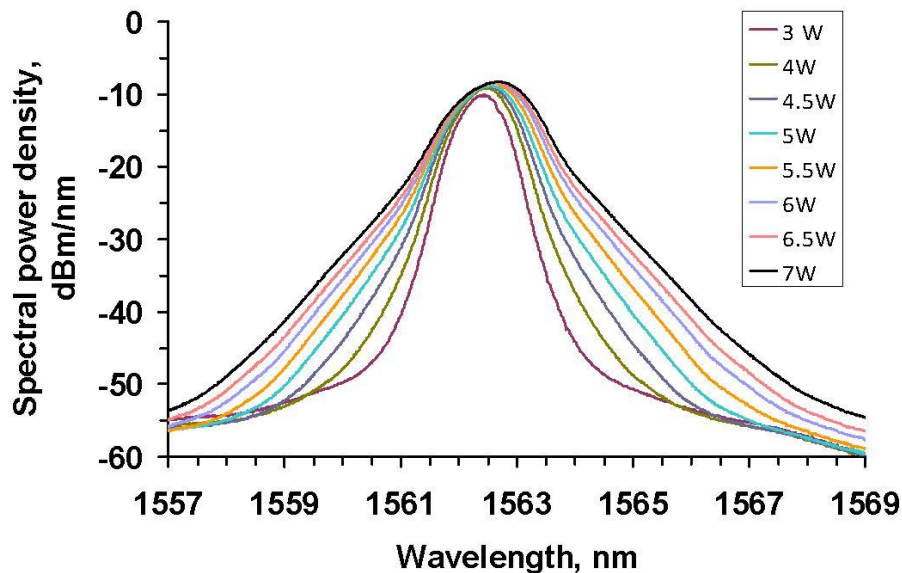
$$P_{th} = 2 \frac{\alpha}{g_R} \left( 1 + \ln\left(\frac{g_R P_{th}}{\alpha}\right) \right) + \frac{\alpha_p}{g_R} \ln\left(\frac{1}{Q} \sqrt{\frac{\alpha_p}{\pi \alpha}}\right) \approx 1.8 \text{ Вт}$$

Turitsyn S. et al, Nature Photonics 2010 > 1000

Построена теория многокаскадных без зеркальных лазеров

Описаны спектры таких лазеров

# Форма спектра



Двухмасштабный контур:

Центр (-3 дБ ширина = 0.6-1.2 нм)

определяется фильтром

Крылья (<-10 дБ) экспоненциальные

уширяются с мощностью

Сужение линии на пороге генерации – обобщение теории Шавлова Таунса

Автомодельный контур линии

Генерации при большой мощности

$$\Gamma \sim \Omega_{FBG} \mathcal{M} L, \sqrt{\mathcal{M} / \beta}, \sqrt[3]{\mathcal{M} \Omega_a / \beta}$$

Churkin D.V., Kolokolov I.V., Podivilov E.V., et al.

*Nature Com.*, 2015,

**(в 1% по физике высокоцитируемых)**

Теория

Kolokolov I.V., Lebedev V.V., Podivilov E.V., et al. *ЖЭТФ*, 2014,



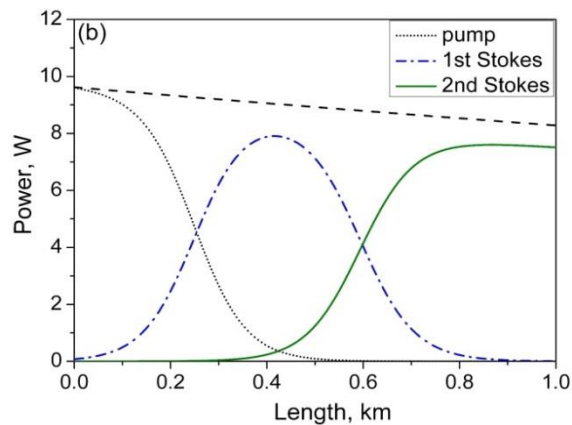
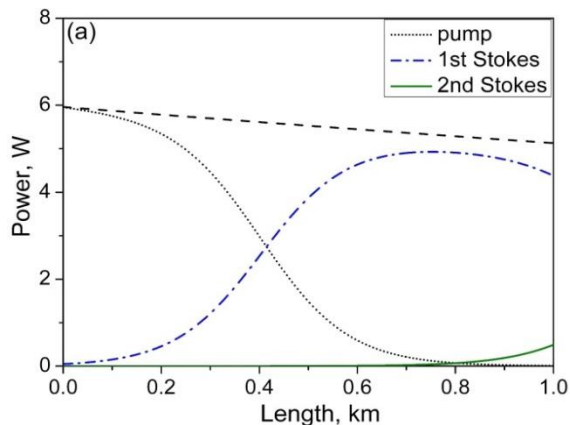
# Теория многокададного Релеевского ВКР лазера



$$P_0(x) = (P_{in} / 2) \exp(-\alpha x) (1 - \tanh [g_{R1} P_{in} (\tilde{x}(x) - x_1) / 2])$$

$$P_j(x) = (P_{in} / 2) (\lambda_0 / \lambda_j) \exp(-\alpha x) (\tanh [g_{R1} P_{in} (\tilde{x}(x) - x_j) / 2] - \tanh [g_{R1} P_{in} (\tilde{x}(x) - x_{j+1}) / 2])$$

$$P_k(x) = (P_{in} / 2) (\lambda_0 / \lambda_k) \exp(-\alpha x) (1 + \tanh [g_{R1} P_{in} (\tilde{x}(x) - x_k) / 2])$$

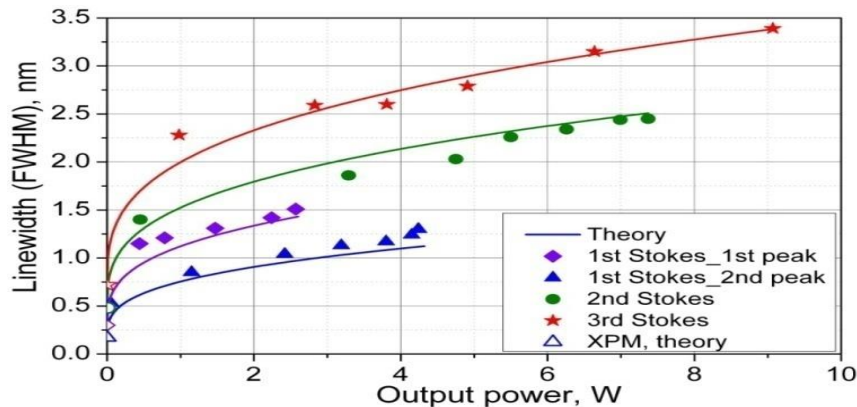
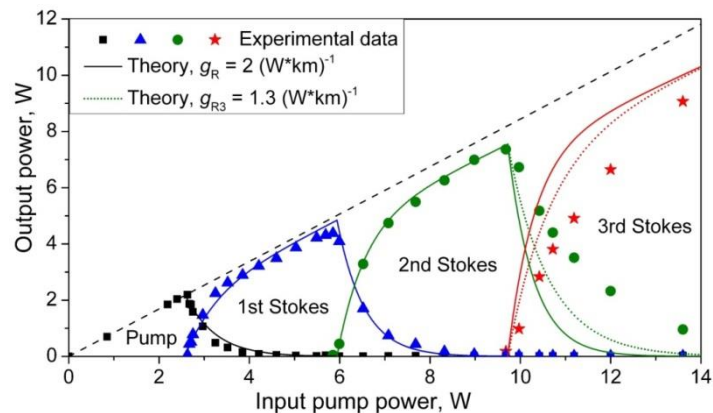


Распределение мощности  
Вдоль оптоволокна

S. Babin, E. Zlobina, S. Kablukov,  
E. Podivilov Sci. Rep. **6**,  
22625 (2016) > 60

Зависимость выходной мощности

Сравнение кинетической теории с экспериментом

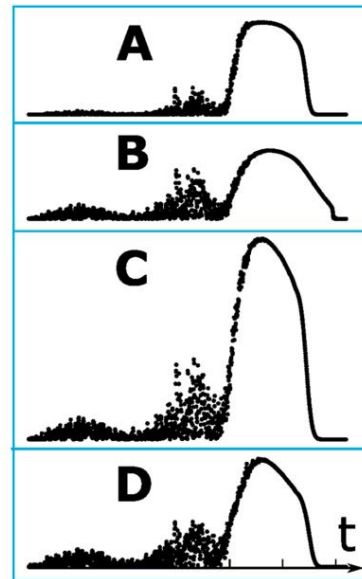
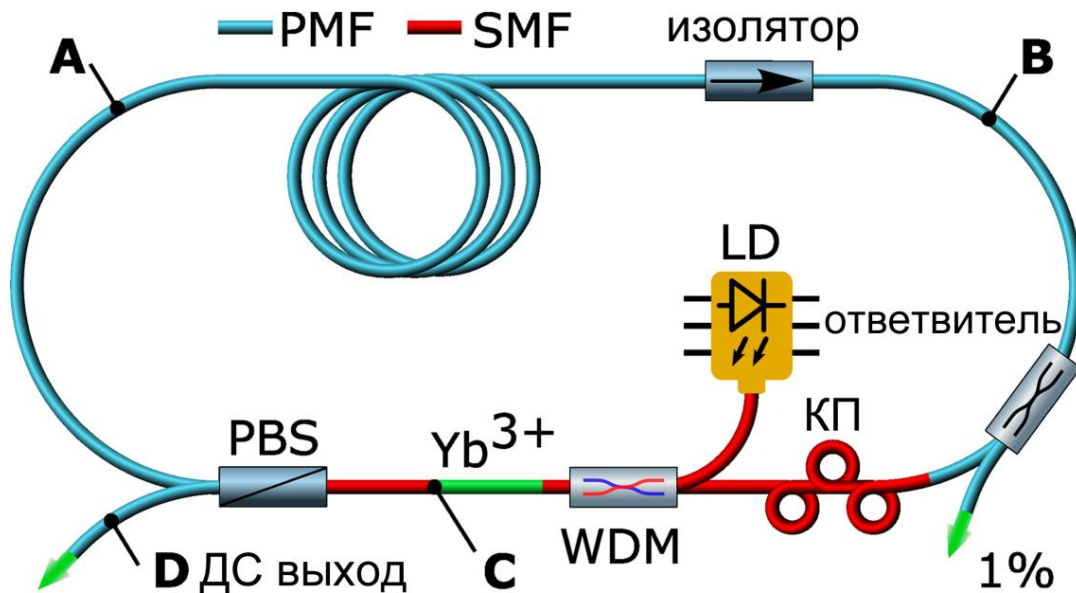


# All-fiber генератор ДС



E. Podivilov, V. Kalashnikov, JETP Let. 2005

$$I(\Omega) \approx \frac{\theta(\Delta^2 - \Omega^2)}{(\Omega_i^2 + \Omega^2)}$$



Порог ВКР для ДС:

$$\frac{\varepsilon_R}{\varepsilon} \propto \frac{P_R}{P_0} \approx \exp\left(\frac{g_R P_0 T}{\delta\nu^{-1}} - 18\right).$$

$$\varepsilon_{cr} \approx 18\delta\nu^{-1}/g_R \sim 15 \text{ нДж}$$

$$T=30 \text{ пс} \rightarrow 200 \text{ фс}$$

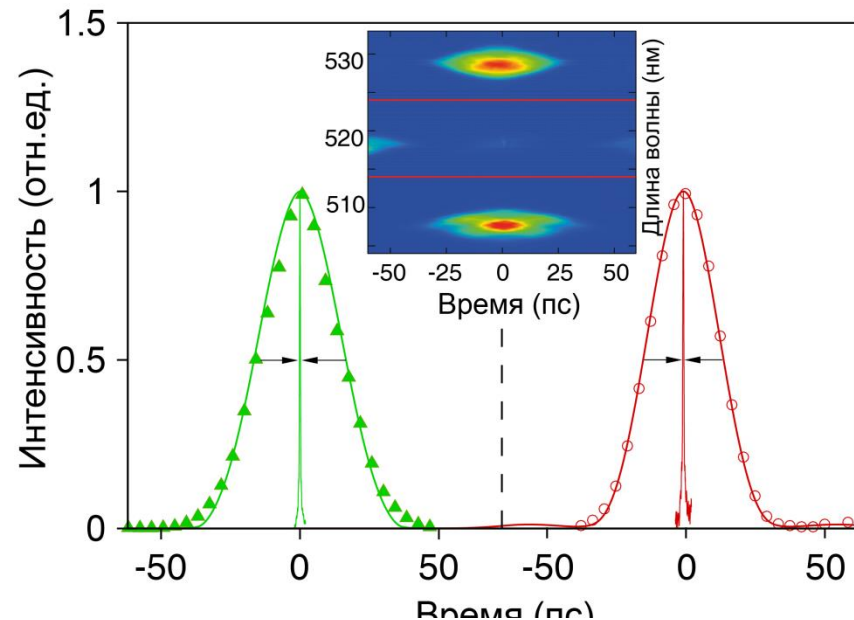
\* D. S. Kharenko, E. V. Podivilov, A. A. Apolonski, and S. A. Babin, Opt. Lett., 37, 4104 (2012)

# Генерация рамановских ДС

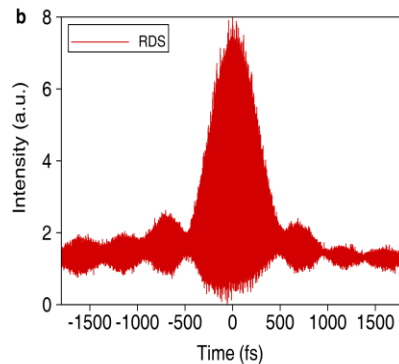
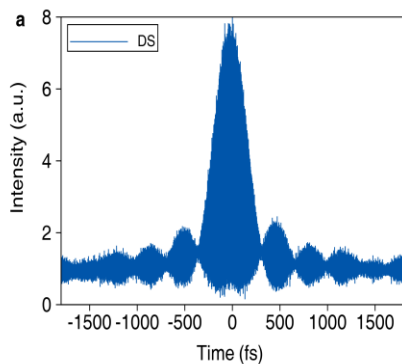
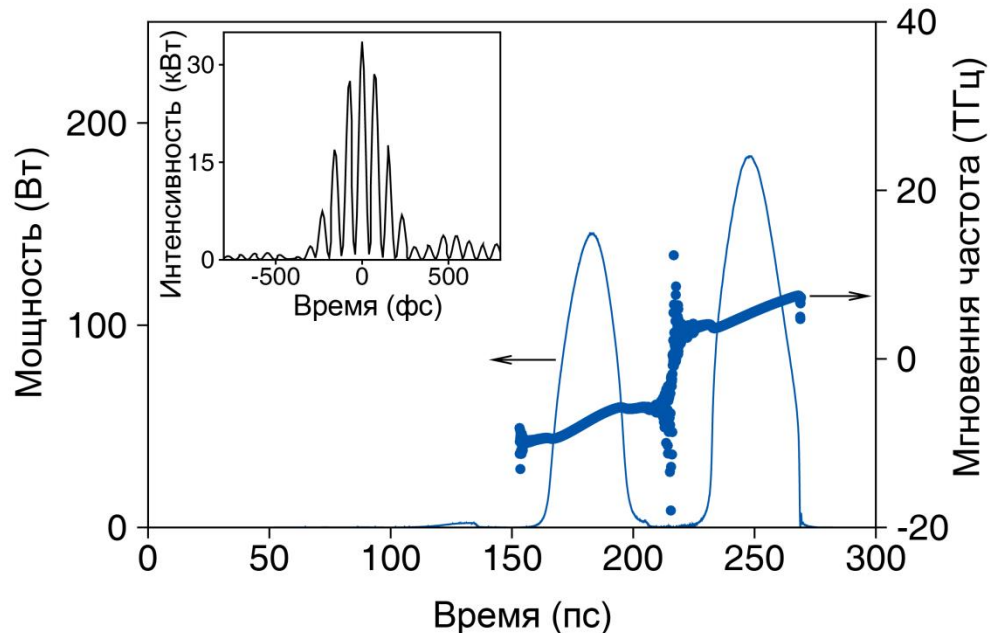


## Сравнение с экспериментом:

Функции автокорреляции ДС и РДС

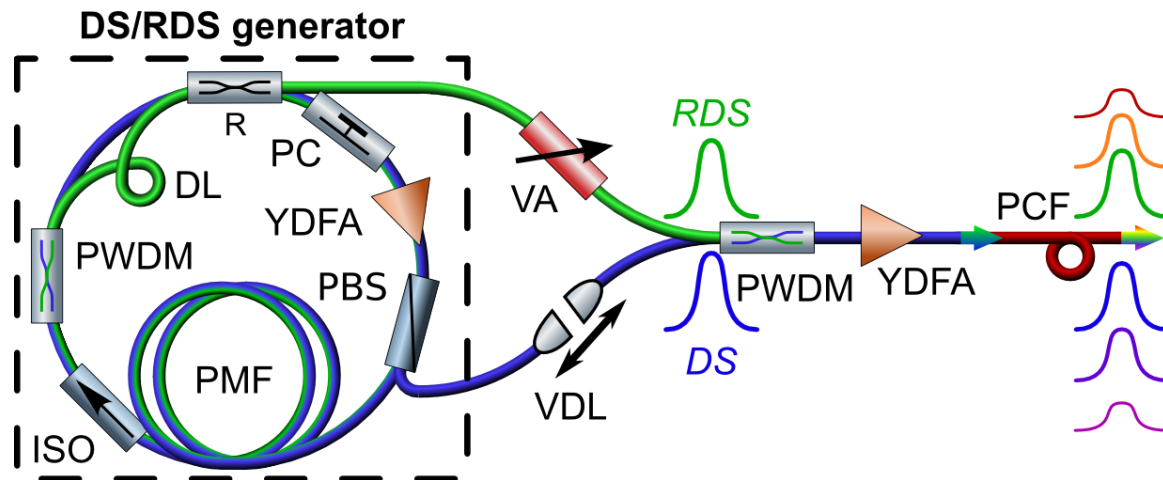


Форма ДС и РДС и их мгновенная частота

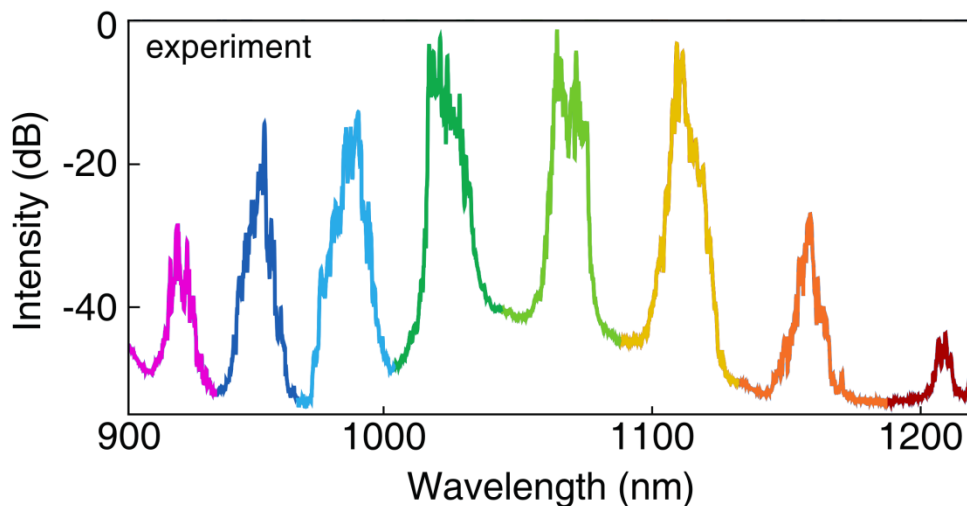


Сжатие внешним компрессором:  
~200 фс (ДС) и ~300 фс (РДС)  
Суммарная энергия ~30 нДж

# Генерация рамановских ДС



1 m, ZDW~1040 nm  
(SC-5.5-1040)  
Дисперсия ->0



$$-\omega_{AS} + \omega_{DS} + \omega_{RDS} - \omega_S = 0$$

Умножение ДС и РДС с генерацией стоксовых и антистоксовых солитонов  
E. Podivilov, et al. Sci. Rep. 7, 2905 (2017)

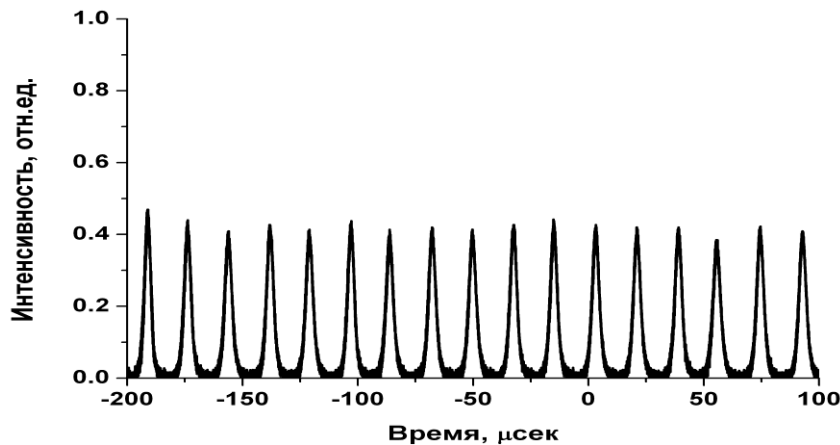
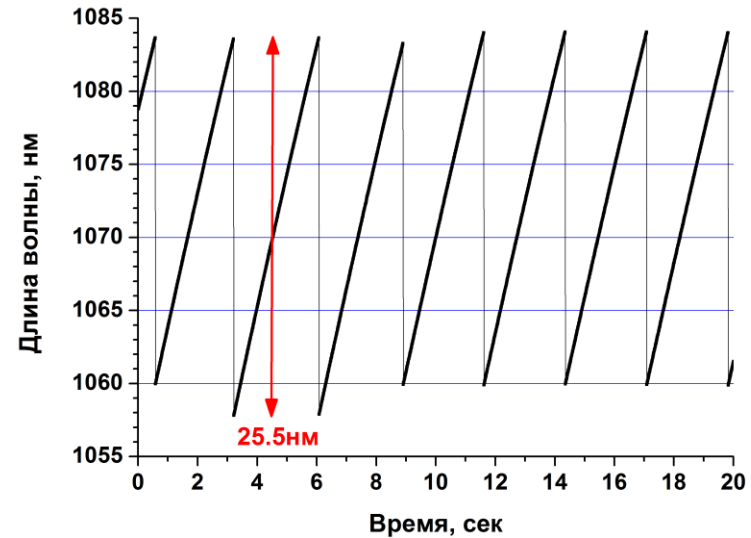
# Одночастотный волоконный лазер с самосканированием частоты.

## Основные свойства.

Продемонстрирован волоконный лазер с перестройкой частоты без внешних спектральных элементов - лазер с самосканированием частоты

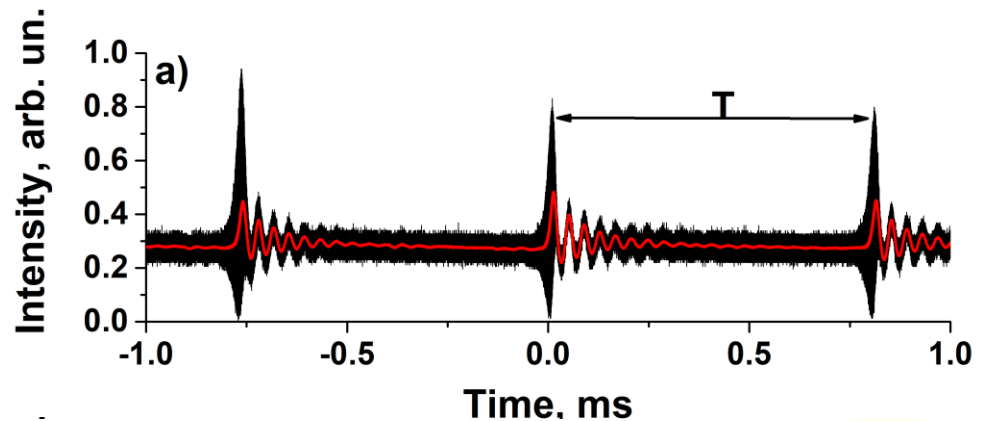
### Достоинства:

- ✓ Отсутствие перестроечных элементов;
- ✓ Большой диапазон сканирования  $> 25$  нм;
- ✓ Различные спектральные диапазоны от 1 до 2.1 мкм: Nd, Yb, Er, Bi, Tm, Ho;
- ✓ Спектральная ширина излучения  $< 1$  МГц;
- ✓ Линейная поляризация излучения;
- ✓ Связь фаз последовательно генерируемых мод.



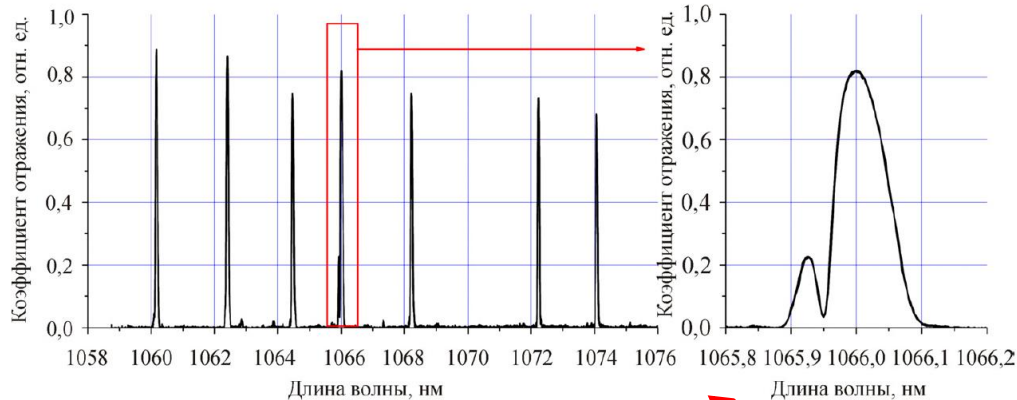
Динамика интенсивности с решетками усиления (импульсный режим)

Динамика длины волны лазера с самосканированием частоты

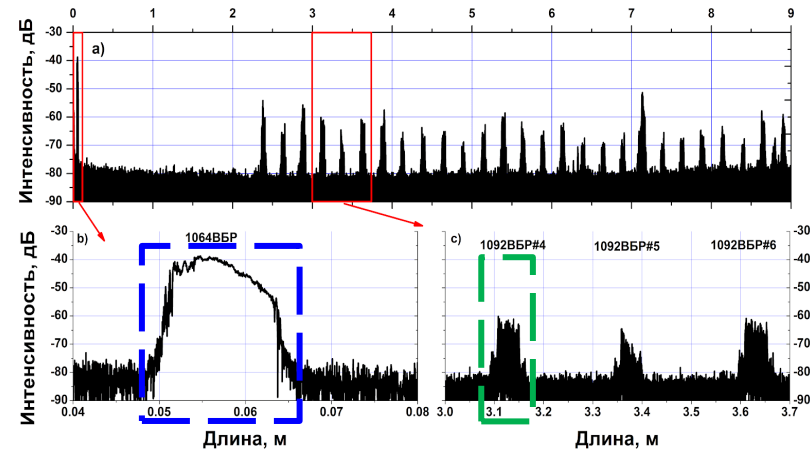


Динамика интенсивности с решетками поглощения (непрерывный режим)

# Одночастотный волоконный лазер с самосканированием частоты. Практические приложения.

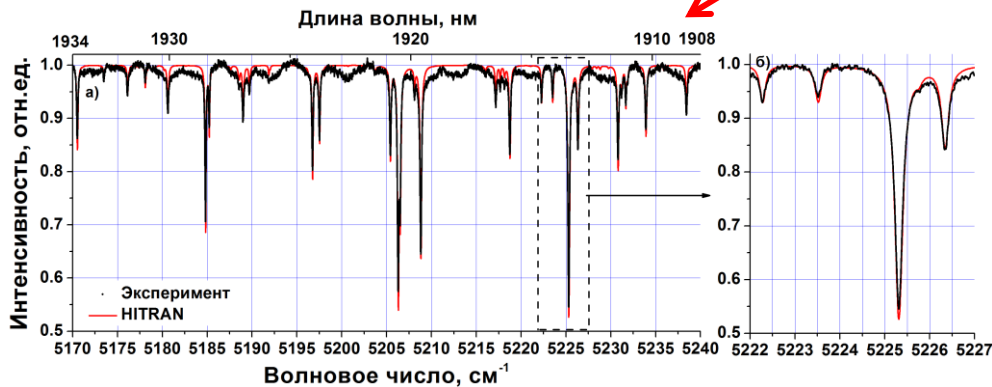


Опрос волоконных датчиков

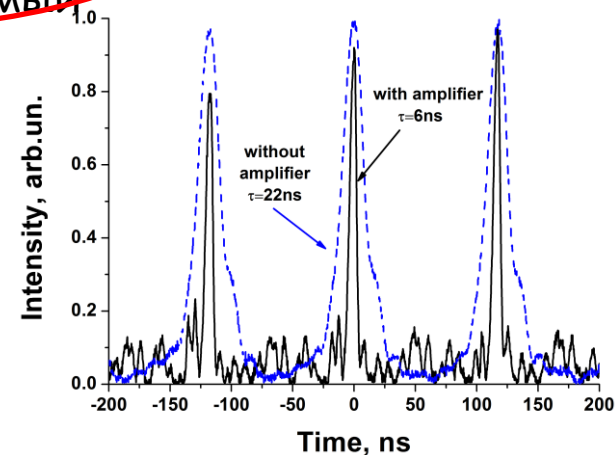


Распределенные измерения (OFDR)

Самосканирующий лазер = простой  
одночастотный перестраиваемый  
лазер

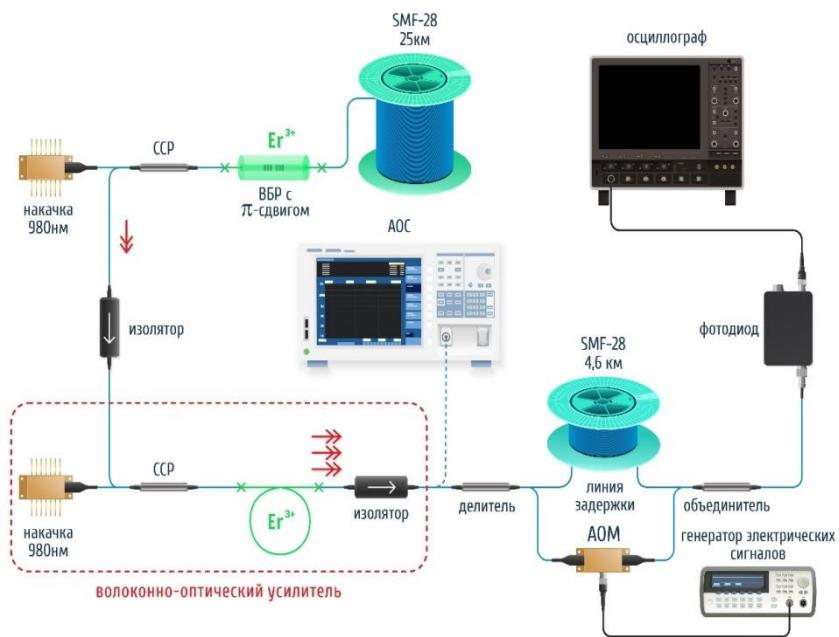


Высокоразрешающая спектроскопия (пары воды)



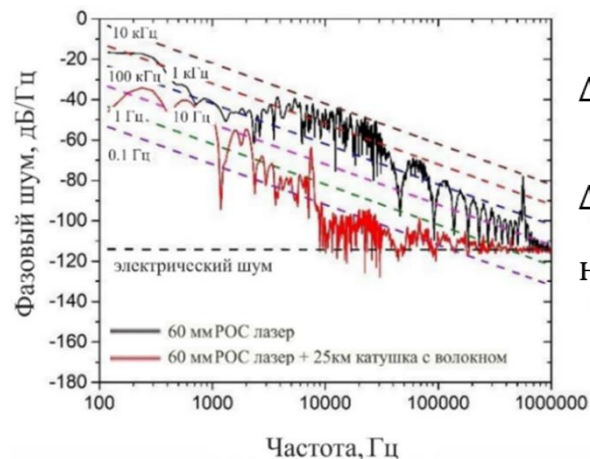
Синтезирование коротких импульсов

# Сужение ширины линии генерации эрбиевого РОС-лазера за счет применения дополнительной случайной распределенной обратной связи



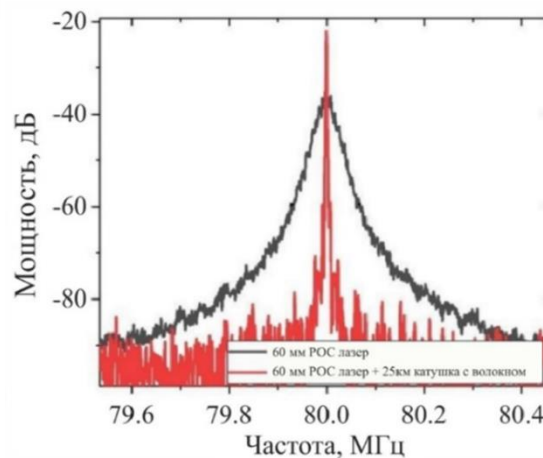
$$\Delta = \left( \frac{L_{РОС}}{2T_2 \sqrt{\epsilon L_{eff} L_{eff} n}} \right)^2 \Delta_{РОС} \approx 10^{-6} \text{ Гц}$$

Время задержки ~ 100 мксек:



$\Delta_{РОС} \approx 15 \text{ Гц на } 10^6 \text{ Гц}$

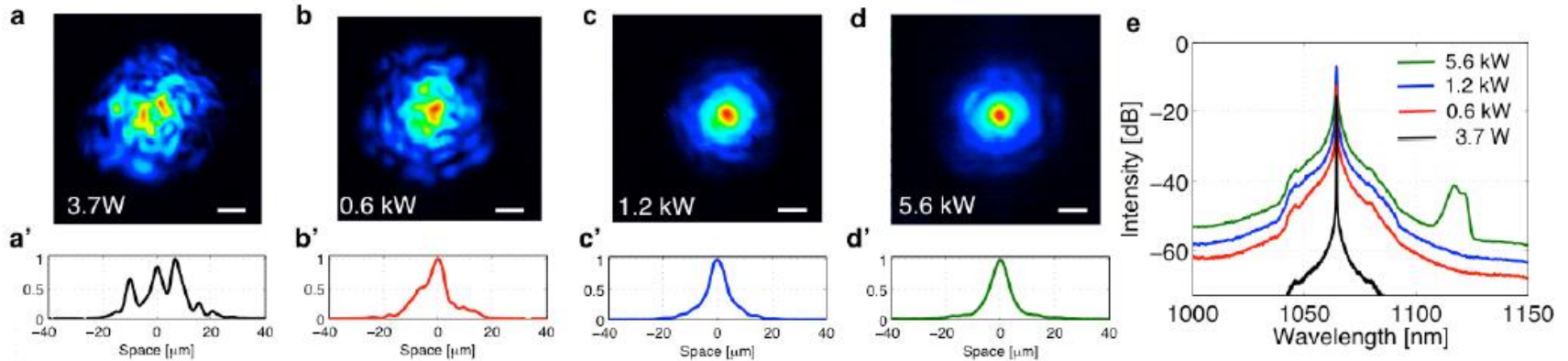
$\Delta_{РОС+катушка} \approx 0,1 \text{ Гц на } \sim 10^4 \text{ Гц}$



$\Delta_{РОС} \approx 6 \text{ кГц}$

$\Delta_{РОС+катушка} \approx 160 \text{ Гц}$

# Самоочистка светового пучка в **МНОГОМОДОВОМ** оптоволокне вследствие термализации фотонов



Собственные моды линейной задачи выражаются через полиномы Лагерра (аналогия с двумерным параболическим потенциалом в квантовой механике)

$$\Psi(\zeta, \vec{\rho}) = \sum_{m,p=0}^{\infty} B_{p,m}(\zeta) U_{p,m}(\vec{\rho}) e^{i(n+1)\zeta}$$

$$U_{p,m}(\vec{\rho}) = N_{p,m} \rho^{|m|} L_p^{|m|}(\rho^2) e^{-\rho^2/2} e^{im\phi}$$

Константы распространения (продольный импульс мод) эквидистантны:  
 $K_n = K_0 - \Delta n$ ,  
 где  $n = 2p + |m|$  - главное квантовое число

Общий вид термодинамически равновесного распределения

$$|B_{p,m}(\Omega)|^2 \sim \frac{1}{\mu + \omega - \nu n - \Omega m}$$



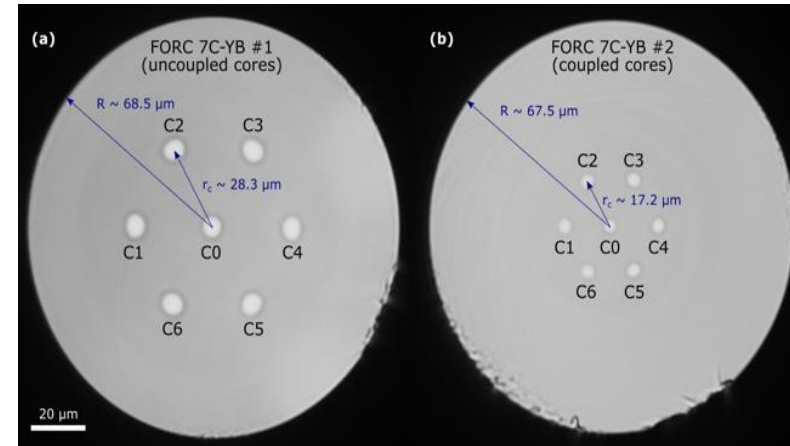
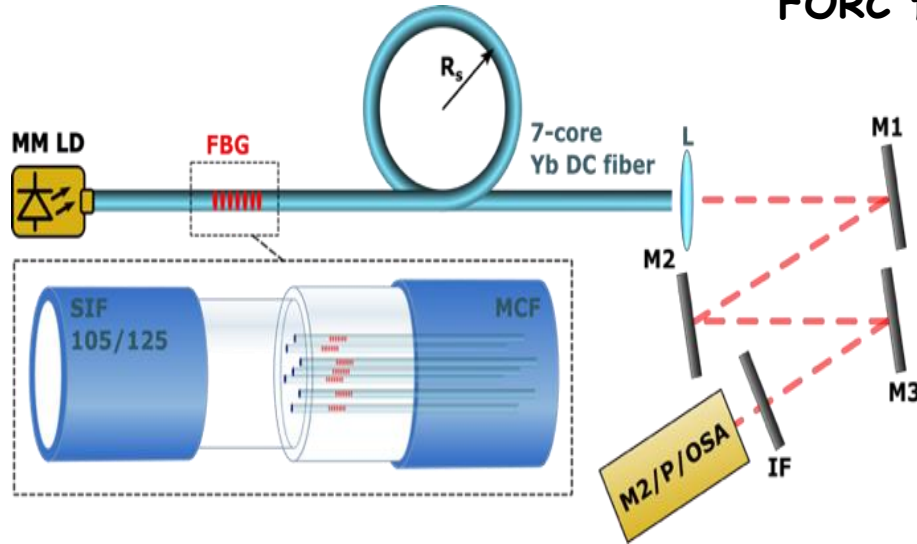
# 1064-nm 7-core Yb-doped fiber laser



FORC fibers:

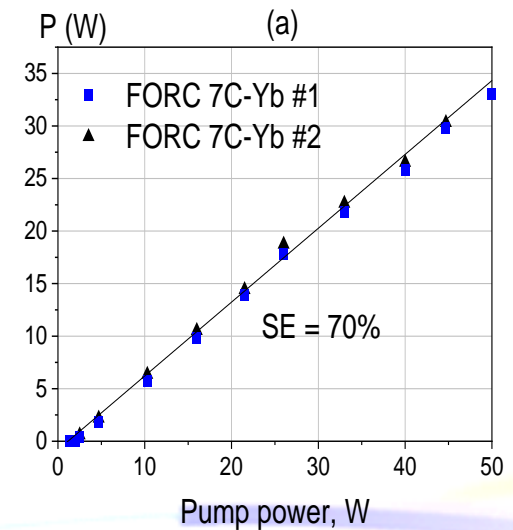
no coupling

strong coupling

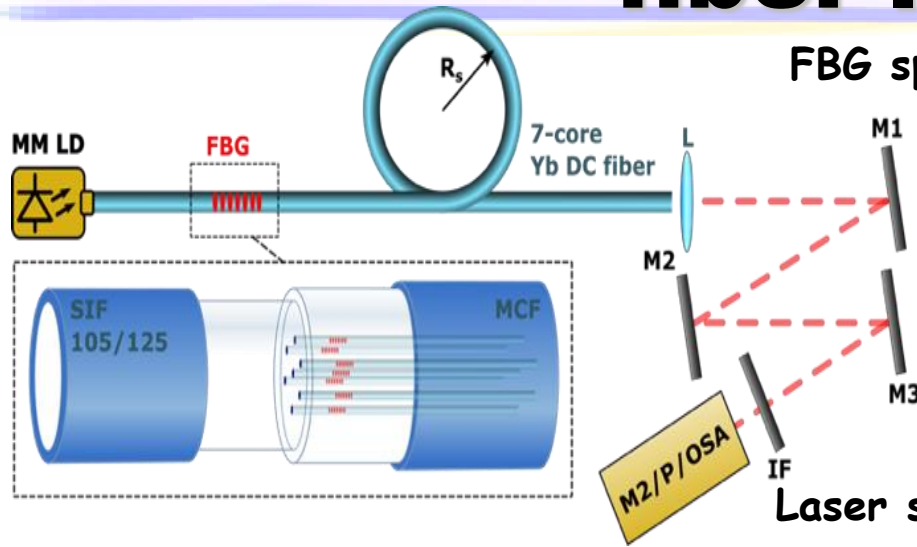


Output power is the same for both:  $\sim 33 \text{ W}$  at  $50 \text{ W}$  pumping (976-nm LD)

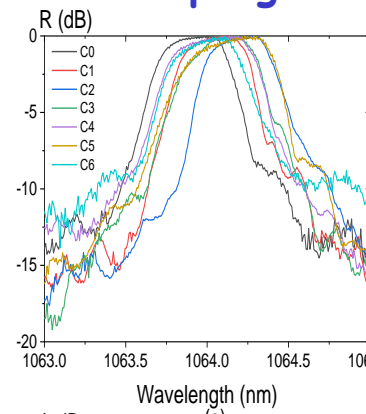
But output spectra are quite different!



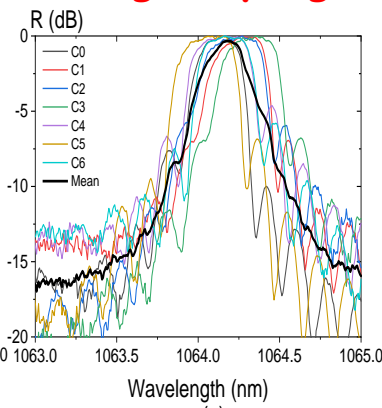
# 1064-nm 7-core Yb-doped fiber laser



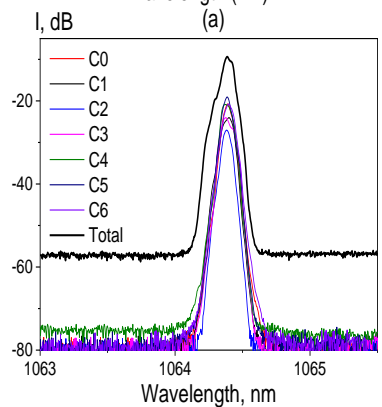
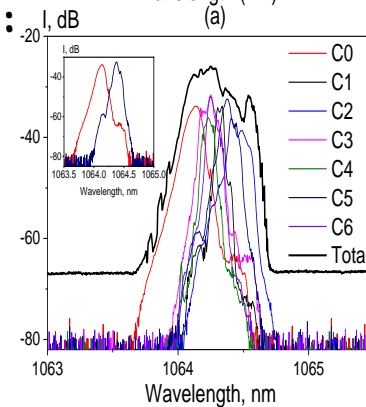
FBG spectra: **no coupling**



FBG spectra: **strong coupling**



Laser spectra:



Without coupling each core has its own spectrum (~ind. FBG)

With coupling - collapse of the spectra into one narrow spectrum (supermodes hybridization!):

$$B_{\pm} = (A_1 \pm A_2) / \sqrt{2}$$

$$G^2 |r_f^2 r_1(\omega^*) r_2(\omega^*)| = 1$$

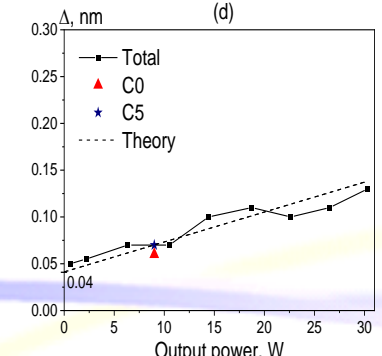
$$\Delta = 4 / \pi [\Delta_{FBG} \gamma L \ln(1/R_0)] P_{out}$$

$$(B_+ + B_-)^{out} = r_1(\omega)(B_+ + B_-)^{in}$$

$$(B_+ - B_-)^{out} = r_2(\omega)(B_+ - B_-)^{in}$$

$$|r_1(\omega^*) r_2(\omega^*)| = \max(r_1(\omega) r_2(\omega))$$

A.G.Kuznetsov, et al. *Opt. Lett.* (2023)



# Спасибо за внимание



## Рэлеевское рассеяние

Для рассеяния на осцилляторе массы  $m$ , с зарядом  $q$  и собственной частотой  $\nu_0$  сечение рассеяния  $\sigma_R$  пропорционально четвёртой степени частоты света  $\nu$ :

Дж.Рэлей, 1871 г.

$$\sigma_R = \frac{8\pi}{3} \left( \frac{q^2}{mc^2} \right)^2 \left( \frac{\nu}{\nu_0} \right)^4 .$$

неоднородности  $R < \lambda$ :

$$\sigma \sim (R/\lambda)^4 \pi R^2$$

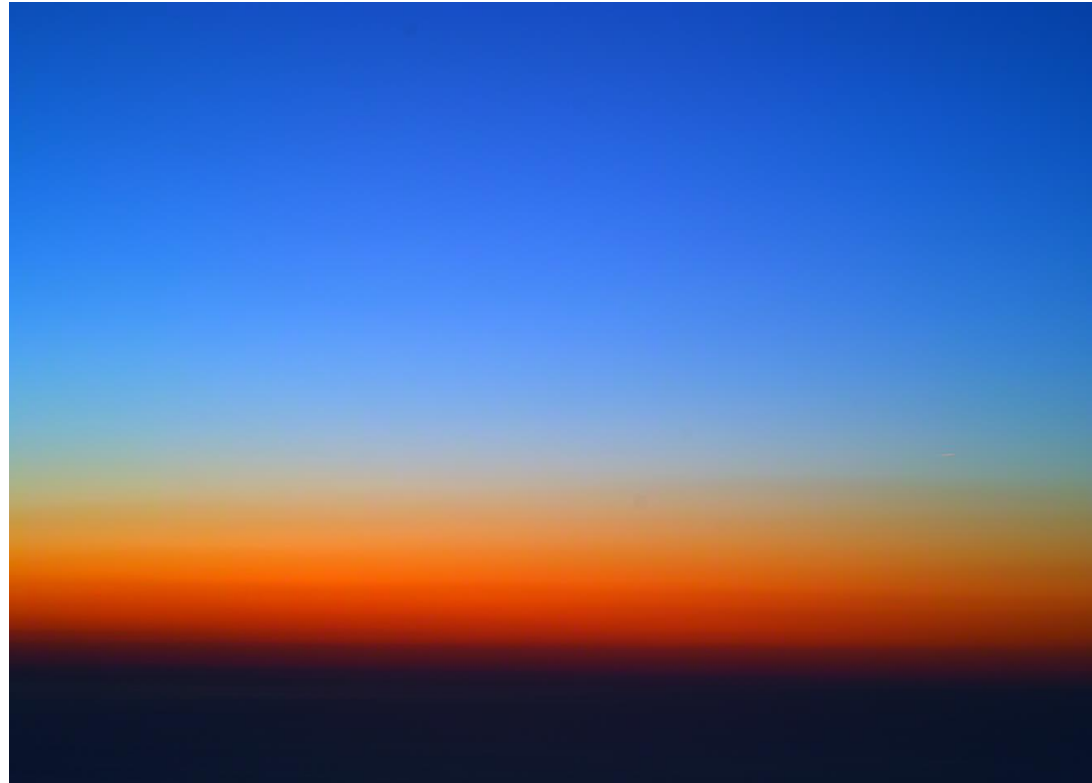
$$I = I_0 \exp(-\alpha_R x)$$

**волокно 20 км -**

**проходит 1/3**

**поглощение 1/3**

**рассеяние 1/3, назад – 0,001**



# Спасибо за внимание!



Публикационная активность  
И уровень результатов:  
3 монографии,  
>200 статьи с суммарным  
индексом цитирования 6800 и  
индексом Хирша 45  
по Web of Science

# История

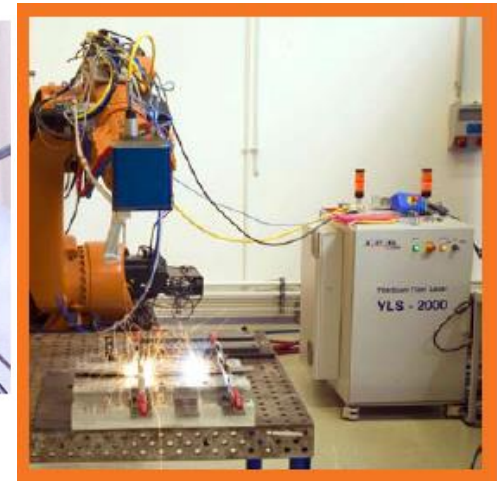


- + 1961 – волоконный активный элемент (Э.Снитцер):
  - низкое качество световодов
  - объемная оптика
  - лазерная накачка
- + 1966 – кварцевые световоды / примеси (Ч.Као, Дж.Хокхэм)
- + 1980-199х – волоконно-оптическая связь, Интернет
  - полупроводниковые лазеры с выходом в волокно
  - волоконные брэгговские решетки
  - волоконные разветвители и объединители
  - и др. волоконные элементы
- + 200х – волоконные  
лазеры и датчики

- + 200х Лаборатория Бабина  
Волоконной оптики в ИАиЭ



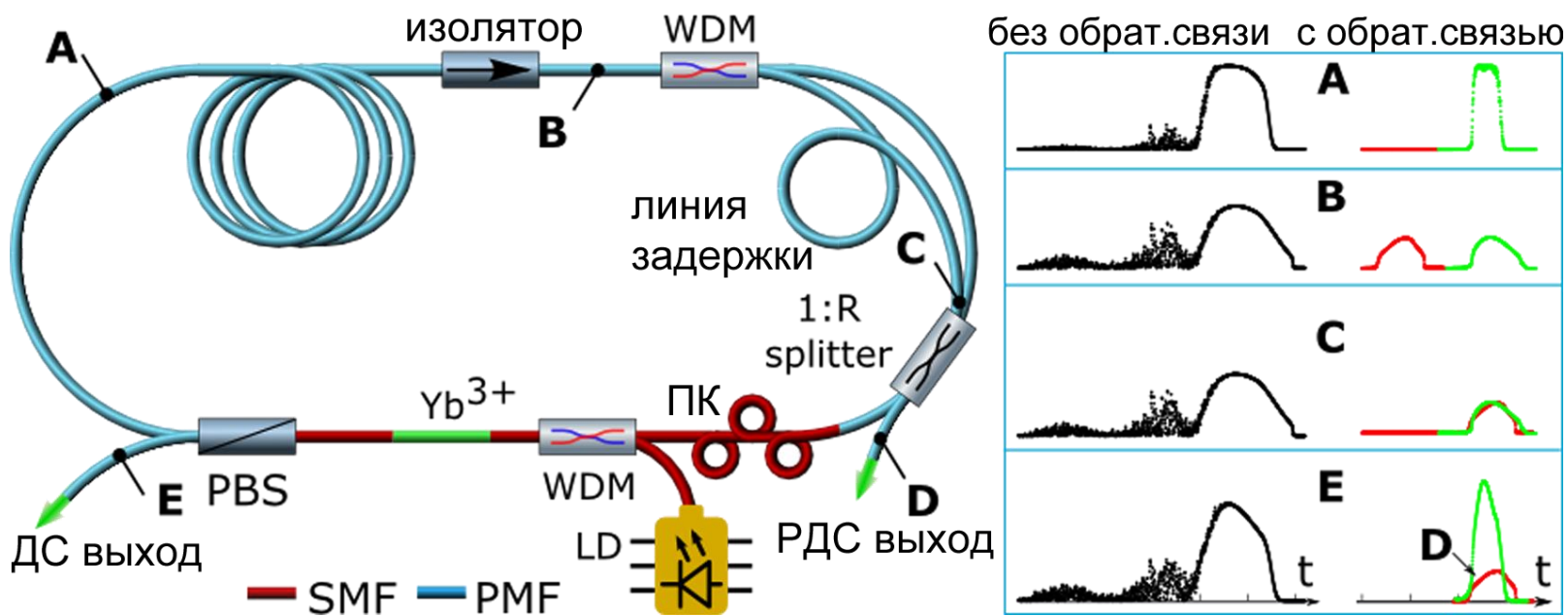
*Real-time feedback on well conditions to maximize output.*



# Генерация рамановских ДС



Модифицированная схема волоконного фс лазера:

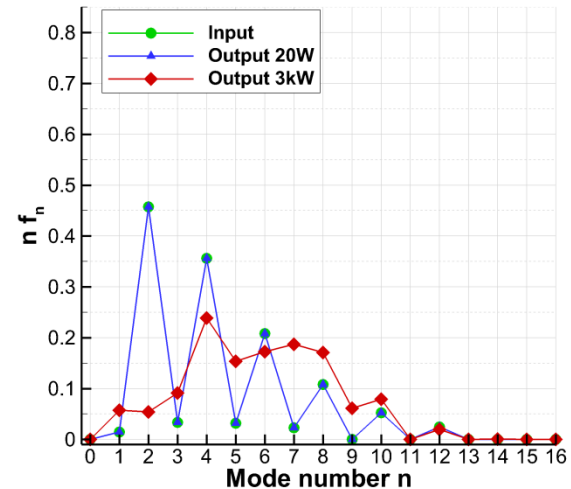
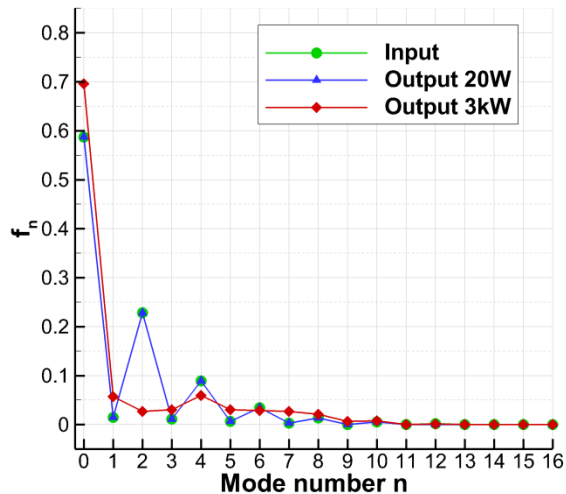


# Самоочистка светового пучка



$$f_n = \sum_{p,m} |B_{p,m}|^2 \delta(n - 2p - |m|), \quad \sum_{n=0}^{\infty} f_n = 1, \quad \rightarrow \text{Сохранение энергии}$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} n f_n = \bar{n} = \text{const}, \quad \rightarrow \text{Сохранение волнового вектора}$$



E. Podivilov et al.  
PRL 122, 10902,  
2019