

# Теория новых режимов генерации в волоконных лазерах

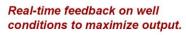
**Е.В.Подивилов** лаборатория фотоники

### История



- 1961 волоконный активный элемент (Э.Снитцер):
  - низкое качество световодов
  - объемная оптика
  - лазерная накачка
- **4** 1966 кварцевые световоды / примеси (Ч.Као, Дж.Хокхэм)
- **4** 1980-199х волоконно-оптическая связь, Интернет
  - полупроводниковые лазеры с выходом в волокно
  - волоконные брэгговские решетки
  - волоконные разветвители и объединители
  - и др. волоконные элементы
- 4 200х волоконные лазеры и датчики



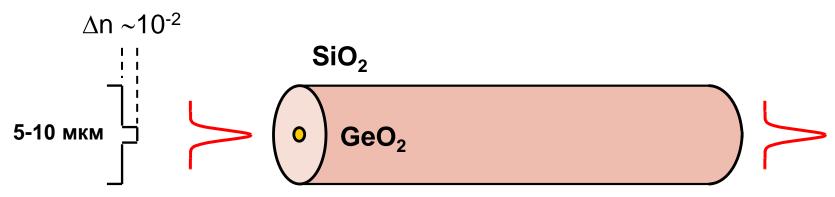




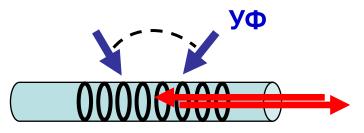


### Оптическое волокно





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



период  $\Lambda$ =300-500нм

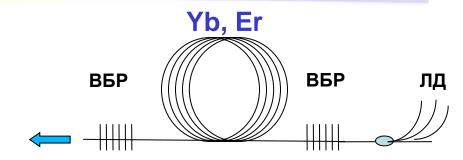
$$\lambda_{\mathit{Bragg}} = 2 \cdot n_{\mathit{eff}}(T) \cdot \Lambda(T, \mathcal{E})$$
 датчики и лазерные зеркала

### Волоконные лазеры



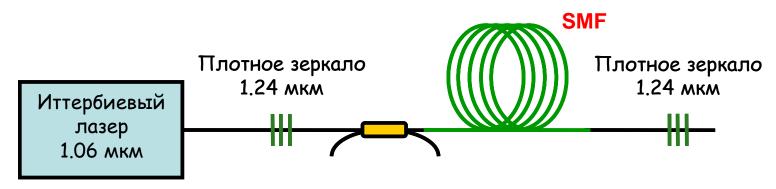
#### Волоконные лазеры

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



#### **↓** волоконные ВКР – лазеры

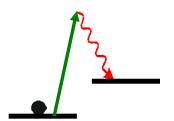
генерация в широком диапазоне спектра 1,1 - 1,7 мкм



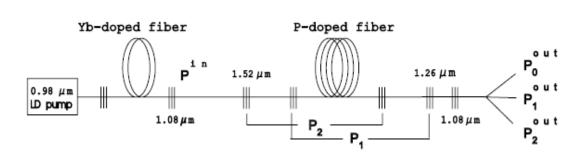
Dianov E.M. et al. **Electr. Lett.** 33, 236 (1997).

**Квант.** электр. 35, 1083 (**2005**)

ВКР- усиление: g~1 дБ/(км Вт)



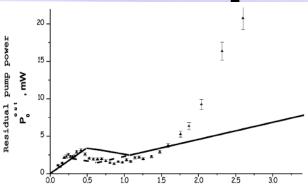
### Многокаскадные Волоконные лазеры

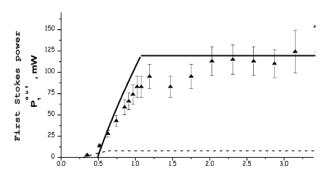


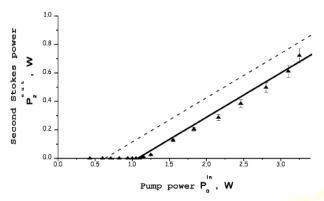
$$\begin{split} P_0^{\text{out}} &= t_0 P_0^+(L) = t_0 P_0^{\text{in}} \exp\left(-\alpha_0 L - \frac{g_0 \lambda_1}{g_1 \lambda_0} (\alpha_2 L + \delta_2)\right) \\ P_1^{\text{out}}(P_0^{\text{in}}) &= P_1^{\text{out}}(P_{\text{th2}}) = t_1 \frac{\alpha_2 L + \delta_2}{2g_1 L} = \text{const} \\ P_2^{\text{out}} &= t_2 P_2^+(L) = t_2 \frac{\delta_2(\alpha_1 L + \delta_1) \exp(\delta_2^{\text{out}}/2)}{2\frac{\lambda_2}{\lambda_1} g_1 L [\sinh(\delta_2^{\text{out}}/2) + \sinh(\delta_2^{\text{in}}/2)]} \left(\frac{P_0^{\text{in}}}{P_{\text{th2}}} - 1\right) \end{split}$$

### 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



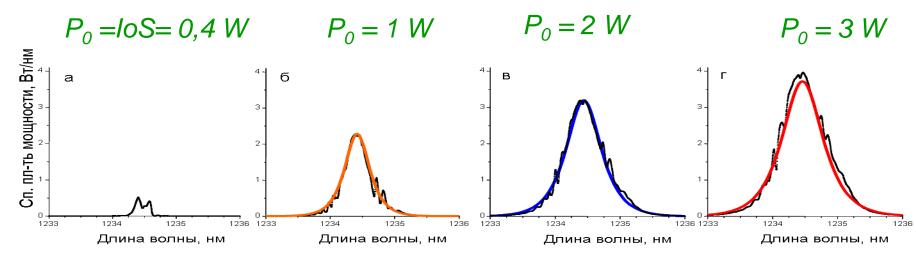




### Форма спектра ВКР-лазера



$$i\left(\partial_z-\hat{g}\right)\psi_+=eta\partial_t^2\psi_++rac{\gamma}{2}\psi_+|\psi_+|^2,$$
 обобщ. НУШ 12 С/2nL<1МГц N~106 мод 4ВС+дисперсия = с.ф. 4 Слабая волновая Турбулентность Турбулентность



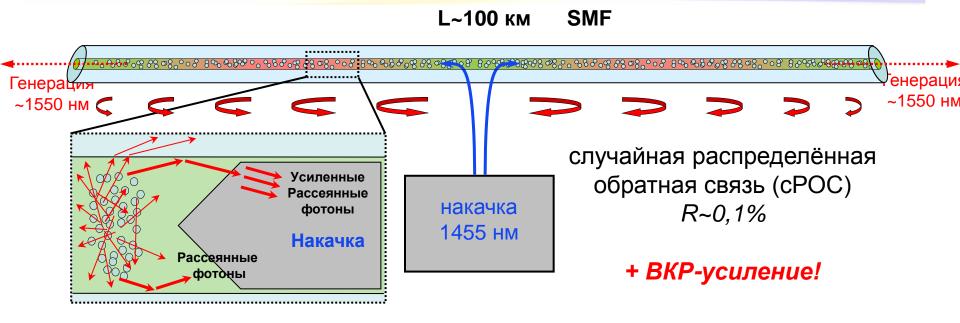
Babin S.A., Churkin D.V., Ismagulov A.E., Kablukov S.I., Podivilov E.V. **Opt. Lett. 2006; JOSA B 2007.** > 150

Без подгоночных параметров!

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

### Генерация без зеркал





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

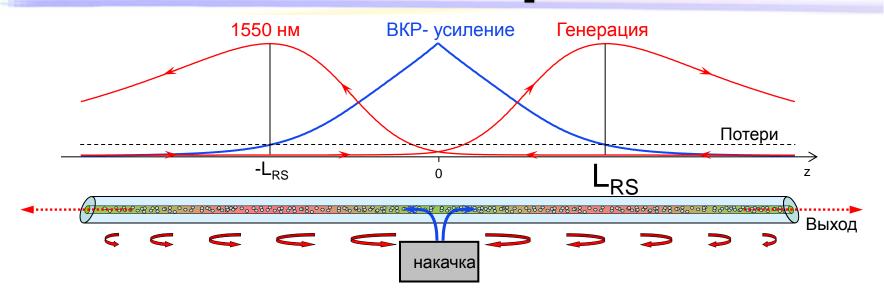
Волоконный лазер без резонатора II

1-мерный «случайный» (random) лазер:

Усиление – ВК Рассеяние. Обратная связь – Рэлеевское Рассеяние.

лазерная генерация?

### Механизм генерации Релеевского ВКР лазера



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

$$O$$
ценка  $L_{RS}$ 

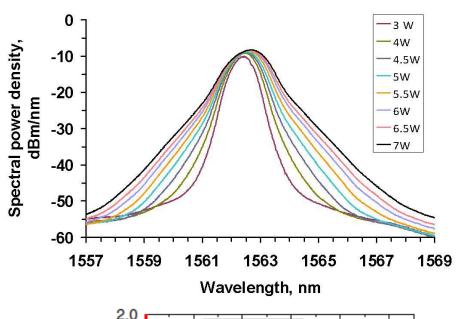
$$L_{RS} = \frac{1}{\alpha_n} \ln \left( \frac{g_R P_{th}}{\alpha} \right) \approx 35 \text{KM}$$
  $L \sim 2 L_{RS}$ 

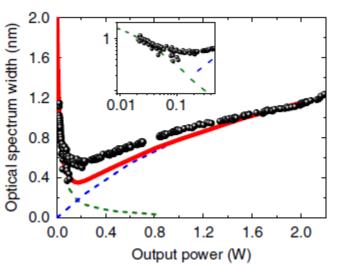
$$L_{RS} = \frac{1}{\alpha_p} \ln \left( \frac{g_R P_{th}}{\alpha} \right) \approx 35 \text{KM} \qquad L \sim 2 L_{RS}$$

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

### 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

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

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. **ЖЭΤΦ, 2014,** 

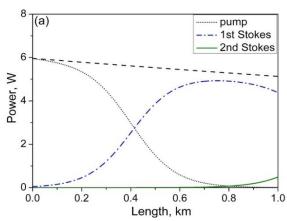
# **Теория многокакадного Релеевского ВКР лазера**

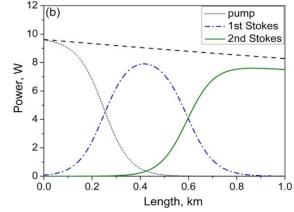


$$P_0(x) = (P_{in}/2) \exp(-\alpha x)(1 - \tanh[g_{R1}P_{in}(\tilde{x}(x) - x_1)/2])$$

$$P_{j}(x) = (P_{in}/2)(\lambda_{0}/\lambda_{j})\exp(-\alpha x)(\tanh\left[g_{R1}P_{in}(\tilde{x}(x)-x_{j})/2\right] - \tanh\left[g_{R1}P_{in}(\tilde{x}(x)-x_{j+1})/2\right])$$

$$P_{k}(x) = (P_{in}/2)(\lambda_{0}/\lambda_{k}) \exp(-\alpha x)(1 + \tanh[g_{R1}P_{in}(\tilde{x}(x) - x_{k})/2])$$



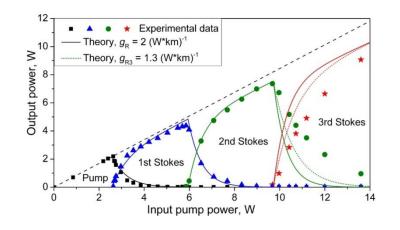


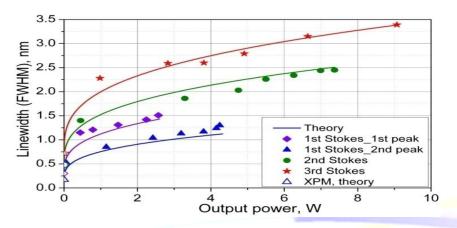
Распределение мощности Вдоль оптоволокна

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

#### Зависимость выходной мощности

#### Сравнение кинетической теории с экспериментом



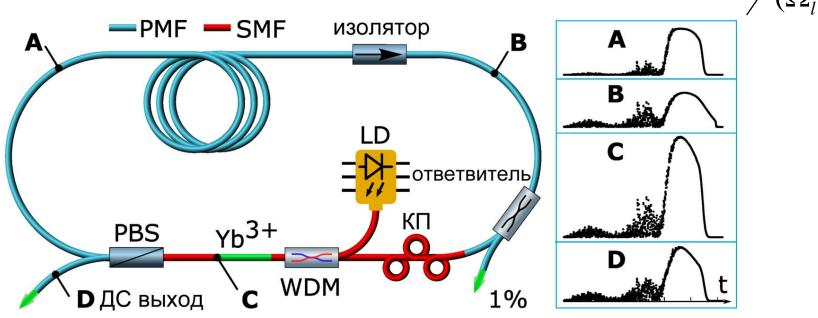


### All-fiber генератор ДС



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

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



#### Порог ВКР для ДС:

$$\frac{\mathcal{E}_R}{\mathcal{E}} \propto \frac{P_R}{P_0} \approx \exp\left(\frac{g_R P_0 T}{\delta v^{-1}} - 18\right).$$

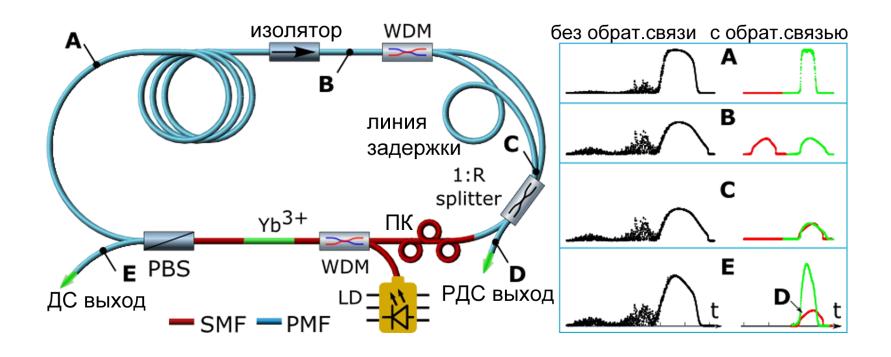
$$\varepsilon_{cr}$$
 ≈ 18 $\delta V^{-1}/g_R$  ~ 15 нДж

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

### Генерация рамановских ДС



#### Модифицированная схема волоконного фс лазера:

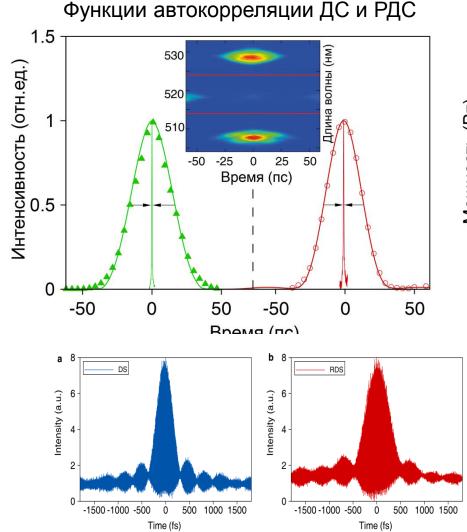


<sup>\*</sup>S. Babin, A. Bednyakova, D. Kharenko, E. Podivilov, M. Fedoruk, V. Kalashnikov, and A. Apolonski, Nat. Comm., 2014

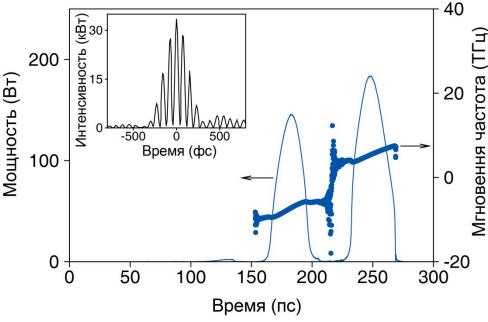
### Генерация рамановских ДС



#### Сравнение с экспериментом:



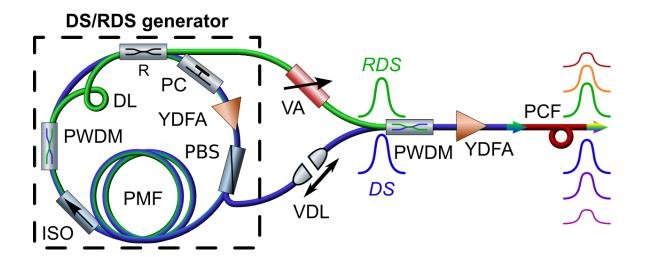
Форма ДС и РДС и их мгновенная частота



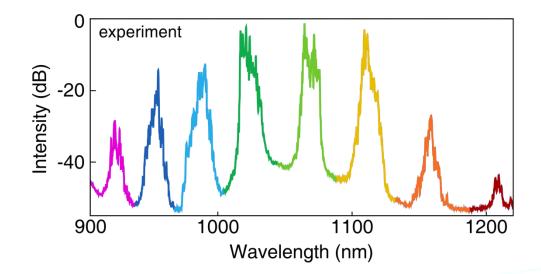
Сжатие внешним компрессором: ~200 фс (ДС) и ~300 фс (РДС) Суммарная энергия ~30 нДж

### Генерация рамановских ДС





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

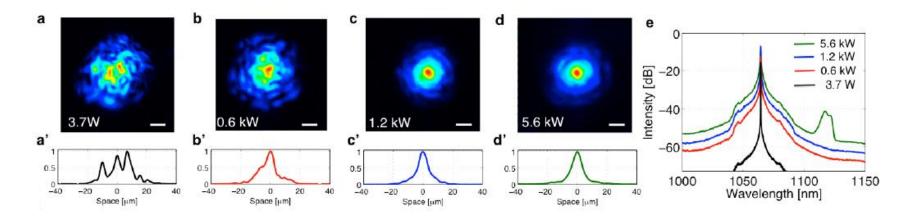


 $-\omega_{AS} + \omega_{DS} + \omega_{RDS} - \omega_{S} = 0$ 

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

# Самоочистка светового пучка





Уравнение на огибающую многомодового световода с параболическим профилем показателя преломления сердцевины

$$2i\frac{d\Psi}{d\zeta} = \frac{d^2\Psi}{d\vec{\rho}^2} - \rho^2\Psi + D\frac{d^2\Psi}{d\zeta^2} + p|\Psi|^2\Psi + \delta(z,\vec{r})\Psi$$

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

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

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

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

Константы распространения (продольный импульс мод) эквидистантны:  $Kn=kO - \Delta n$ 

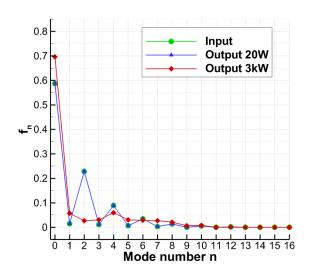
# Самоочистка светового пучка



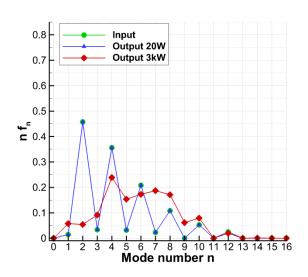
$$f_n = \sum_{p,m} |B_{p,m}|^2 \delta(n-2p-|m|), \qquad \sum_{n=0}^\infty f_n = 1, \qquad 
ot \Rightarrow \mathcal{C}$$
охранение энергии

$$\sum_{n=0}^{\infty} n f_n = \overline{n} = const,$$
  $o$  Сохранение волнового вектора

Аналогия с двумерной гидродинамической турбулентностью, где сохраняются Энергия  $\sum V_k^2$  и завихренность  $\sum k^2 V_k^2$ .



E. Podivilov at al. PRL **122**, 10902, 2019





### Спасибо за внимание!

### Спасибо за внимание!



Публикационная активность И уровень результатов: 3 монографии, 193 статьи с суммарным индексом цитирования 3625 и индексом Хирша 34 по Web of Science

### Рэлеевское рассеяние



Для рассеяния на осцилляторе массы m, с зарядом q и собственной частотой  $v_0$  сечение рассеяния  $\sigma_R$  пропорционально четвёртой степени частоты света v:

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

Дж.Рэлей, 1871 г.

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