Институт автоматики и электрометрии СО РАН



# Теория новых режимов генерации в в**олоконны**х **лазер**ах

Е.В.Подивилов лаборатория фотоники

ОУС ФН, 10.09.2019

# История



#### 4 1961 — волоконный активный элемент (Э.Снитцер):

- низкое качество световодов
- объемная оптика
- лазерная накачка
- 4 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
- **4** 200х волоконные

лазеры и датчики

#### **4** 200х Лаборатория Бабина Волоконной оптики в ИАиЭ ОУС ФН, 10.09.2019

Real-time feedback on well conditions to maximize output.



### 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, ...

YФ

• Фоточувствительность: *ВБР*- периодическая структура *п(z)* 

период Л=300-500нм

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

## Волоконные лазеры



#### Волоконные лазеры

- не требуется юстировка зеркал
- высокая эффективность (~70%)
   и стабильность генерации
- высокое качество пучка (M<sup>2</sup>~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

1



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

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

$$P_2^{\text{out}} = t_2 P_2^+(L) = t_2 \frac{\delta_2(\alpha_1 L + \delta_1) \exp(\delta_2^{\text{out}}/2)}{2\frac{\lambda_2}{\lambda_1} g_1 L[\sinh(\delta_2^{\text{out}}/2) + \sinh(\delta_2^{\text{in}}/2)]} \left(\frac{P_0^{\text{in}}}{P_{\text{th}2}} - \frac{\delta_2(\alpha_1 L + \delta_1) \exp(\delta_2^{\text{out}}/2)}{2\beta_1 (1-\beta_1) (1-\beta_1) (1-\beta_1) (1-\beta_1) (1-\beta_1)}\right)$$

#### 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



## Форма спектра ВКР-лазера



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



Баланс

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

Оценка L<sub>RS</sub>

Порог

$$L_{RS} = \frac{1}{\alpha_p} \ln\left(\frac{g_R P_{th}}{\alpha}\right) \approx 35 \text{KM} \qquad L \sim 2 L_{RS}$$
$$P_{th} = 2 \frac{\alpha}{g_R} \left(1 + \ln\left(\frac{g_R P_{th}}{\alpha}\right)\right) + \frac{\alpha_p}{g_R} \ln\left(\frac{1}{Q}\sqrt{\frac{\alpha_p}{\pi\alpha}}\right) \approx 1.8Bm$$

Turitsyn S. et al, Nature Photonics 2010 >450

## 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

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

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 многокакадного Релеевского ВКР лазера



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



Зависимость выходной мощности

Сравнение кинетической теории с экспериментом





# All-fiber генератор ДС





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



#### Модифицированная схема волоконного фс лазера:



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



#### Сравнение с экспериментом:







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 )

$$\Psi(\zeta, \vec{
ho}) = \sum_{m,p=0}^{\infty} B_{p,m}(\zeta) U_{p,m}(\vec{
ho}) e^{i(n+1)\zeta}$$
 Константы распространения (продольный импульс мод) эквидистантны:  
 $U_{p,m}(\vec{
ho}) = N_{p,m} \rho^{|m|} L_p^{|m|}(\rho^2) e^{-\rho^2/2} e^{im\phi}$  Константы распространения (продольный импульс мод) эквидистантны:  
Kn=k0 -  $\Delta n$ ,  
где n=2p + |m| - главное квантовое число

# Самоочистка светового пучка



$$f_n = \sum_{p,m} |B_{p,m}|^2 \delta(n-2p-|m|), \quad \sum_{n=0}^{\infty} f_n = 1, \quad 
ightarrow Coxpaнeние энергии$$
 $\sum_{n=0}^{\infty} nf_n = \overline{n} = const, \quad 
ightarrow Coxpaнeние волнового вектора$ 

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





## 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:

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

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

Дж.Рэлей, 1871 г.

