

# Волоконные лазеры с перестройкой и нелинейным преобразованием частоты генерации

Каблуков Сергей Иванович

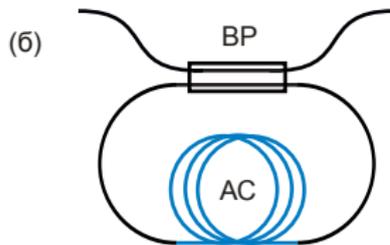
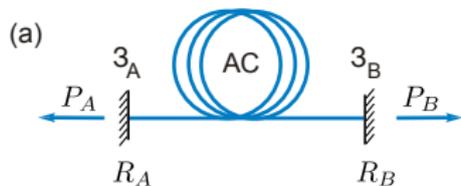
*Институт автоматики и электрометрии СО РАН*

Заседание ОУС СО РАН по физическим наукам  
ИАиЭ СО РАН, г. Новосибирск  
22 марта 2018 г.

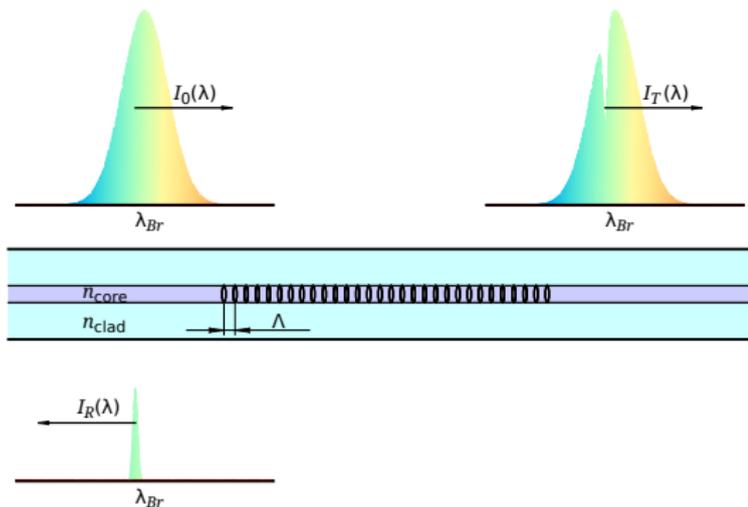


# Схема резонатора и зеркала

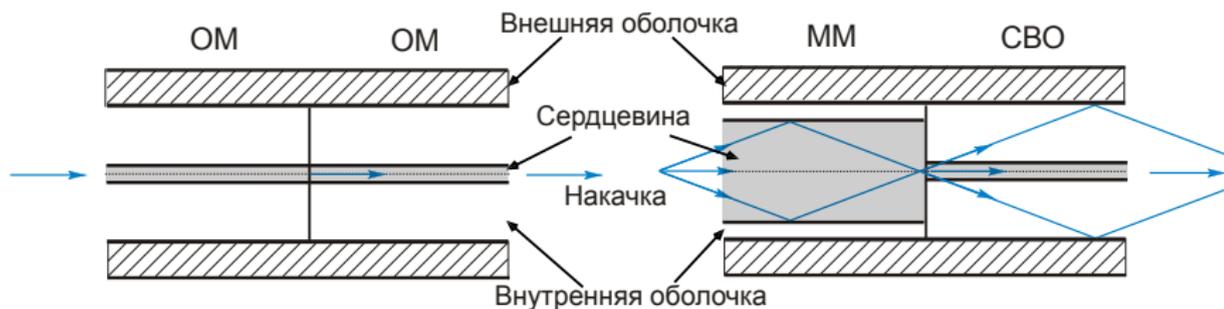
Линейная и кольцевая



Волоконные брэгговские решётки

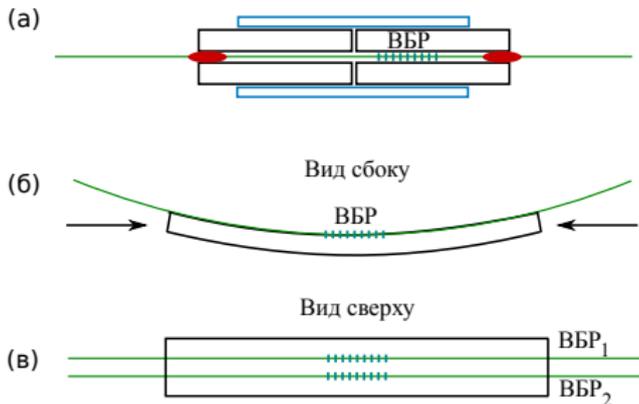


# Заведение излучения накачки в световод



# Способы перестройки ВБР

## Варианты сжатия ВБР



$$\Delta\lambda_{Br} = \lambda_0(1 - p_e)\varepsilon_{Br},$$

где  $p_e = 0,22$  — фотоэластический коэффициент,

$\varepsilon_{Br}$  — относительное удлинение световода,

$\lambda_0$  — длина волны при  $\varepsilon_{Br} = 0$

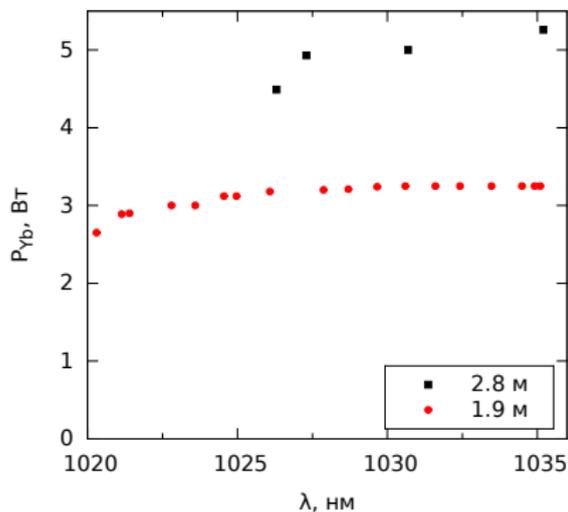
Jeong Y. et. al., IEEE Photon. Technol. Lett. 2004: 35 нм область перестройки эрбиевого лазера

Fu L. et. al., IEEE Photon. Technol. Lett. 2005: 15 нм область перестройки неодимового лазера

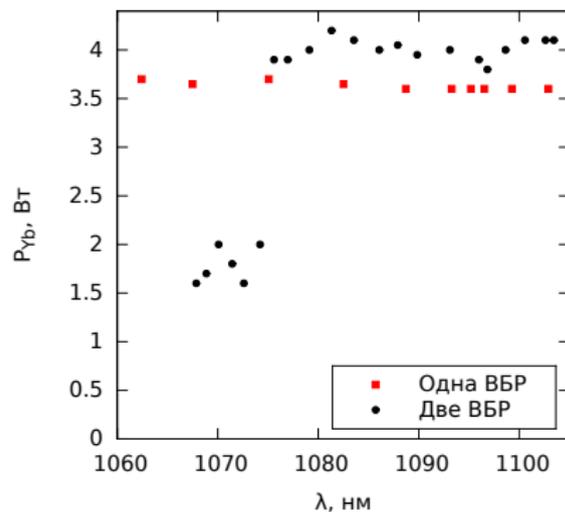
# Перестройка длины волны ИВЛ в области 1030 и 1090 нм



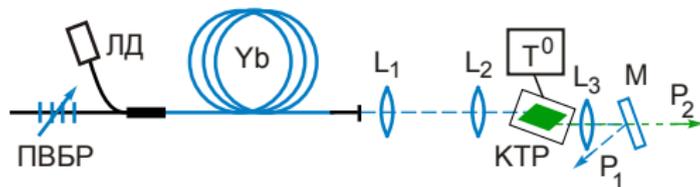
Коротковолновая область



Стандартная область

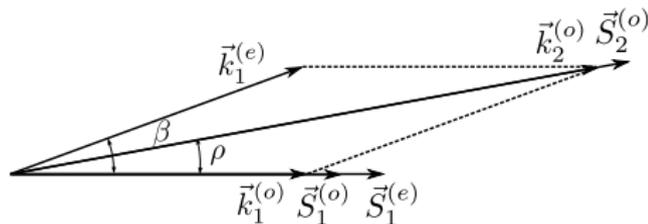


# ГВГ перестраиваемого ИВЛ

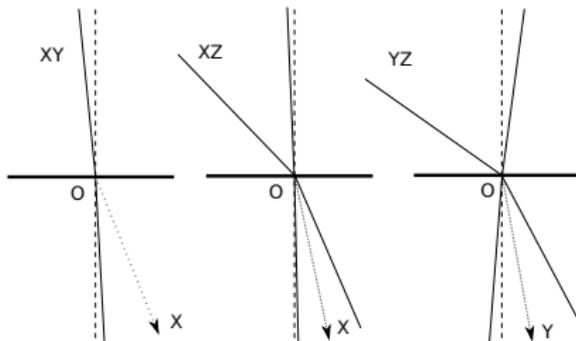


Синхронизм II типа и компенсация сноса при наклонном падении для фиксированной длины волны.

Asami K. Appl. Opt. 1998

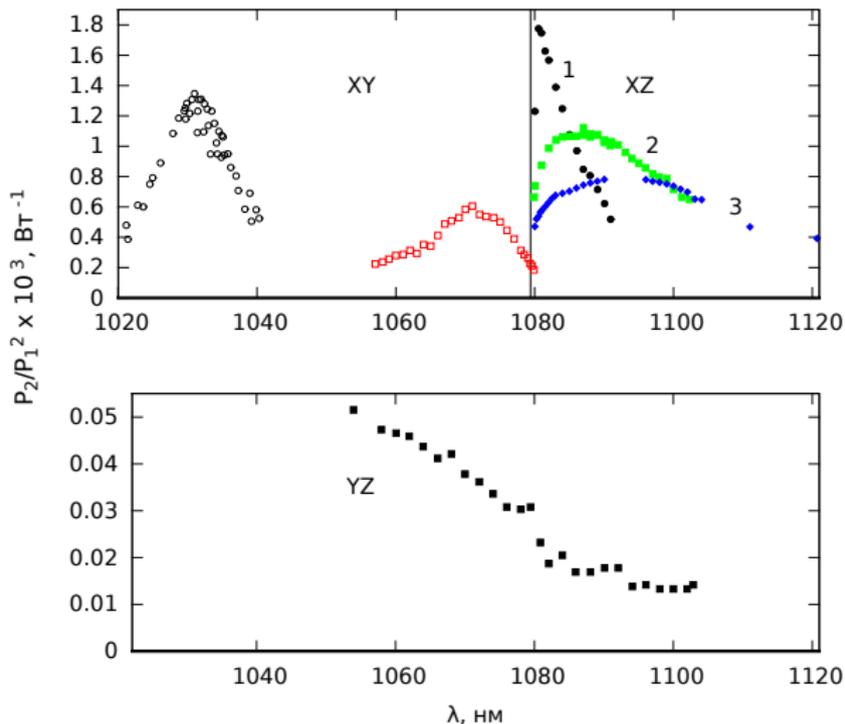


Перестройка длины волны синхронизма может быть обеспечена поворотом кристалла

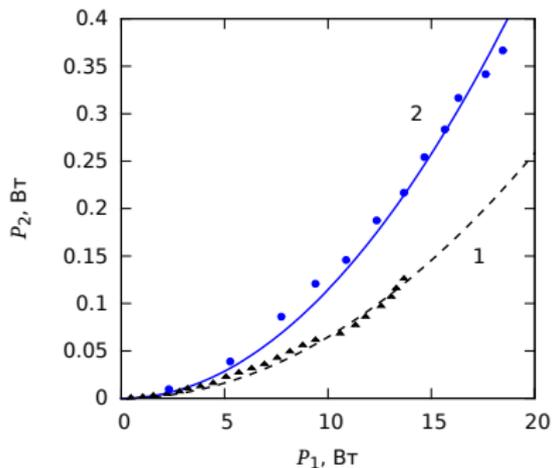
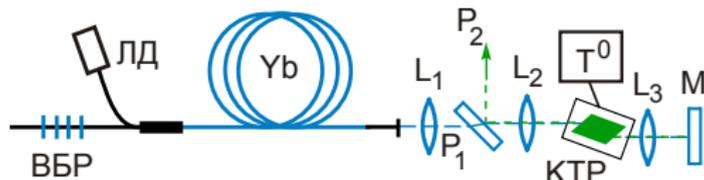


# Сравнение эффективности ГВГ для трёх плоскостей кристалла КТР

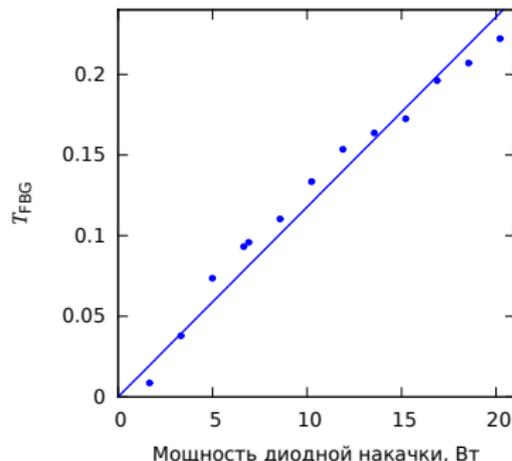
Эффективность ГВГ в КТР



# Увеличение эффективности ГВГ во внутрирезонаторной схеме

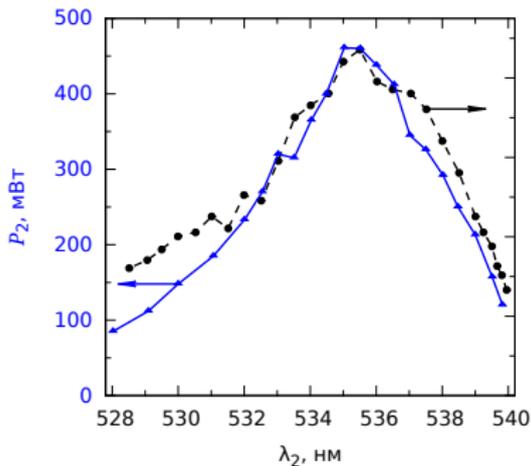


ГВГ вне (1) и внутри (2)  
резонатора ИВЛ

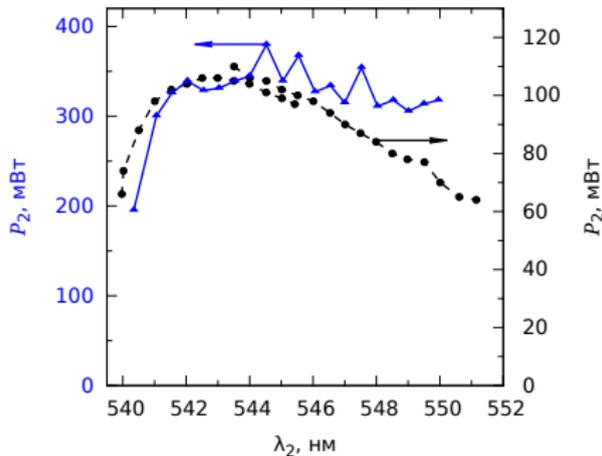


Рост потерь на ВБР из-за  
уширения спектра

# Перестраиваемая внутрирезонаторная ГВГ

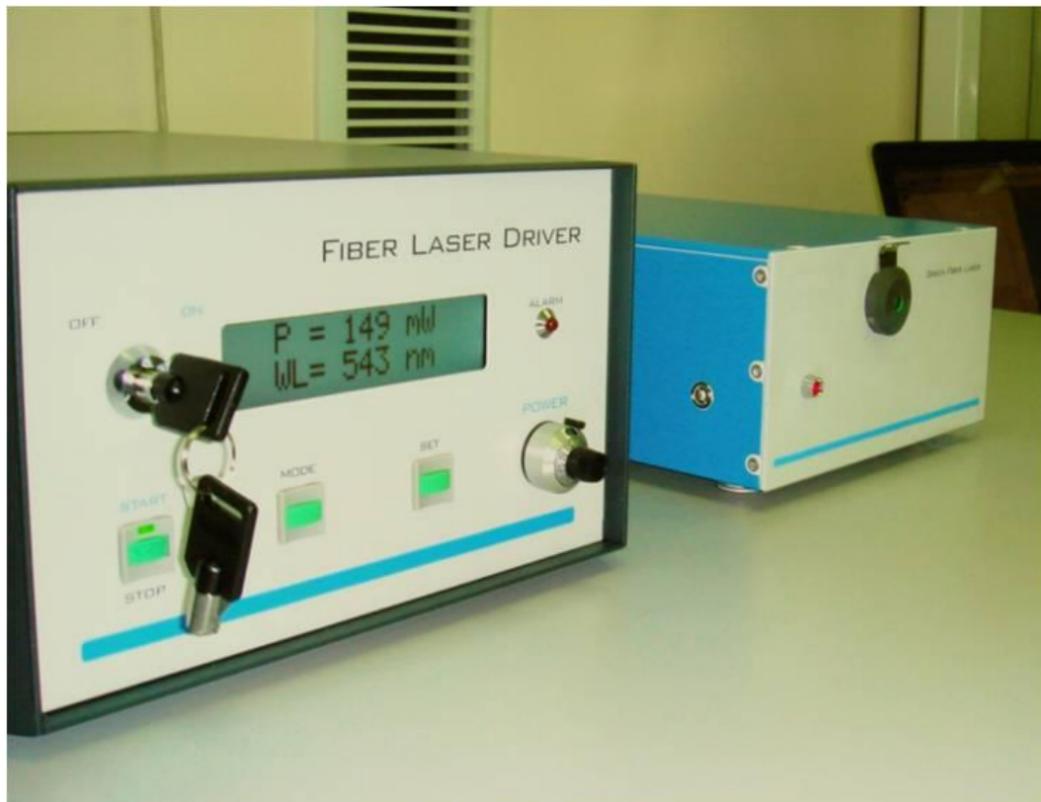


Синхронизм в плоскости XY

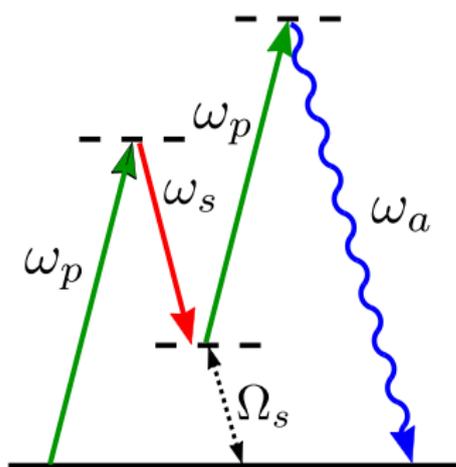


Синхронизм в плоскости XZ

# Прототип лазера с перестраиваемой ГВГ



# Параметрическое преобразование частоты в световоде



$$\Omega_s = \omega_p - \omega_s = \omega_a - \omega_p$$

– частотная параметрическая отстройка

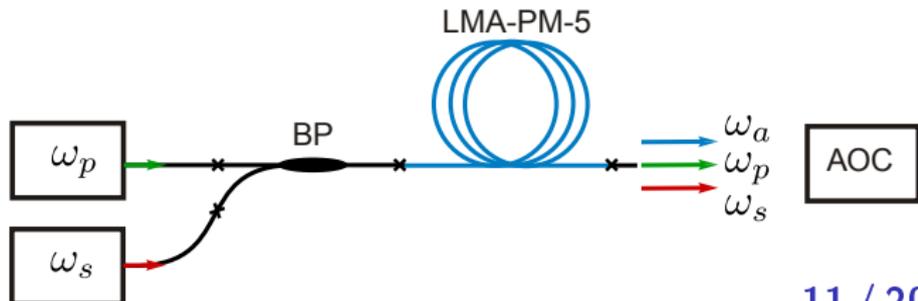
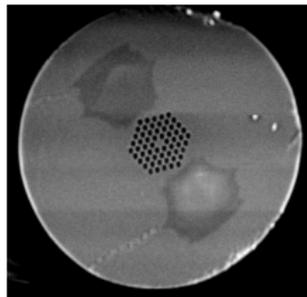
$$\Delta\beta = \beta_a(\omega_a) + \beta_s(\omega_s)$$

$$- \beta_{p1}(\omega_p) - \beta_{p2}(\omega_p) + \gamma P_p = 0$$

– условие фазового синхронизма

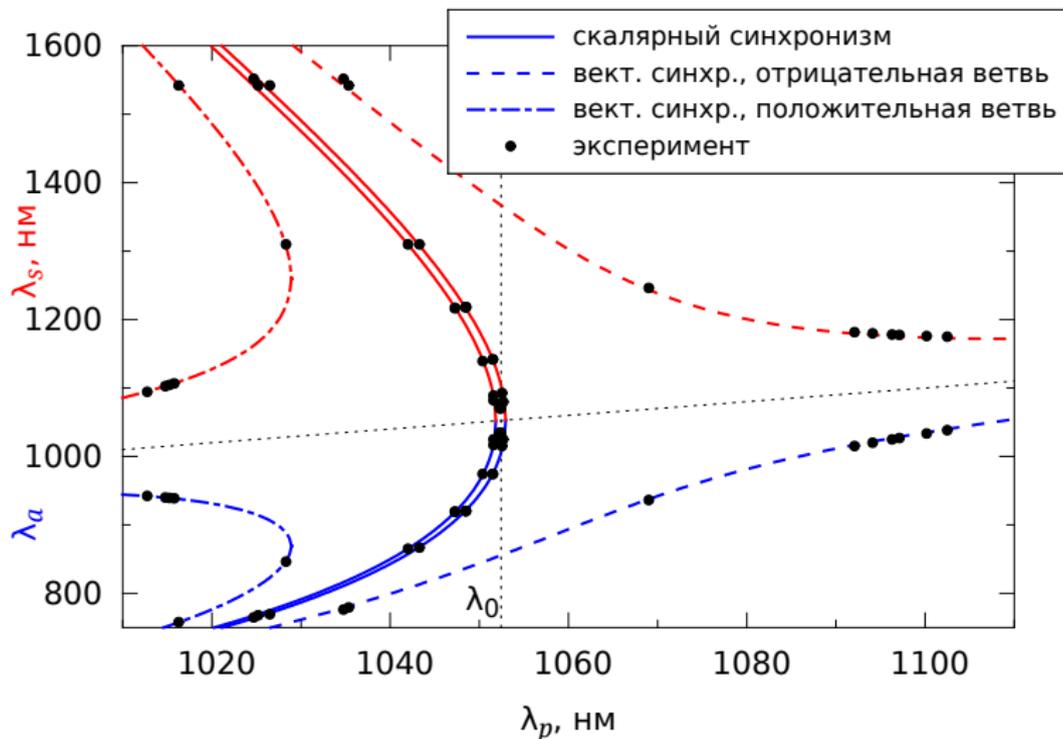
$\omega_p$  – ИВЛ

$\omega_s$  – ИВЛ, ВКР и эрбиевый лазеры



# Кривые синхронизма в световоде LMA-PM-5

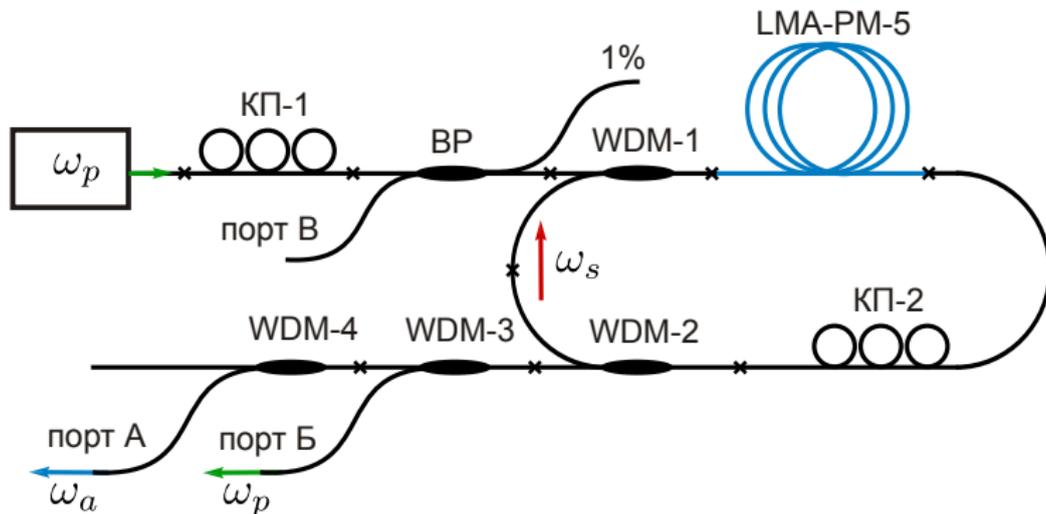
$$\Delta\beta(\Omega_s) = \beta(\omega_a) + \beta(\omega_s) - 2\beta(\omega_p) \pm \frac{\delta n}{c}\Omega_s = 0$$



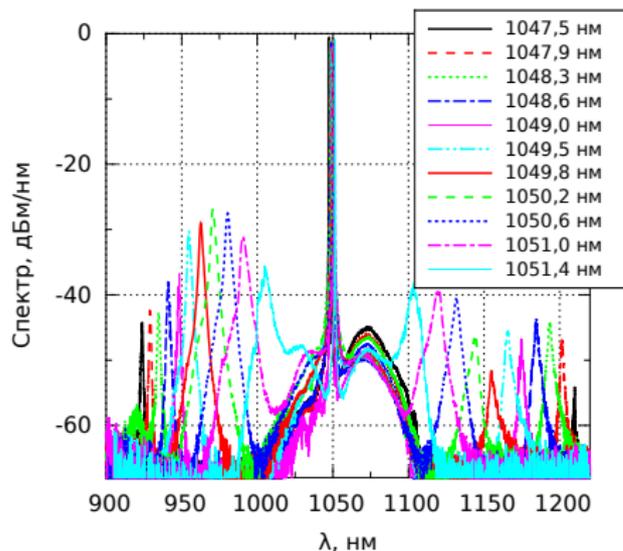
# Волоконный параметрический генератор

Ху Y.Q. et. al. J. Opt. Soc. Am. B. 2009: Параметрический генератор в области 1,55 мкм с максимальным сдвигом частоты  $\leq 15$  ТГц.

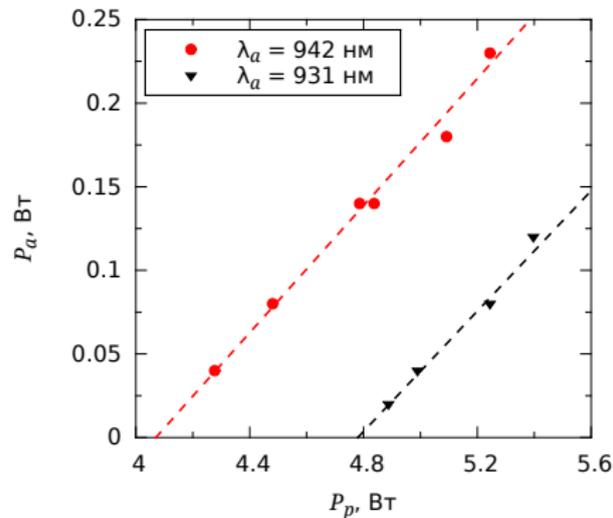
Сигнальная волна  $\omega_s$  генерируется в кольцевом резонаторе



# Спектр и мощность параметрической генерации

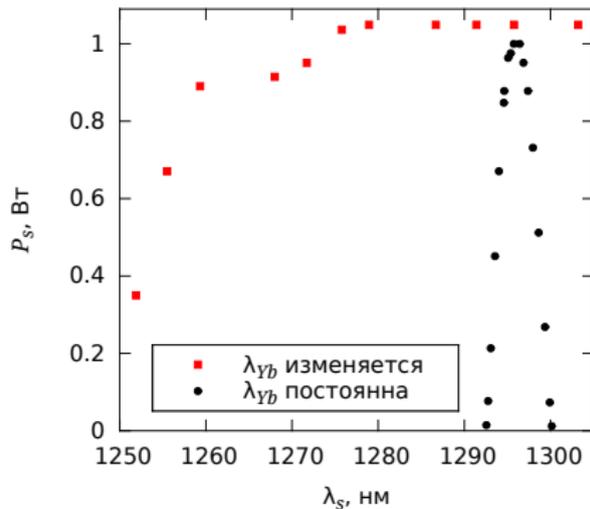
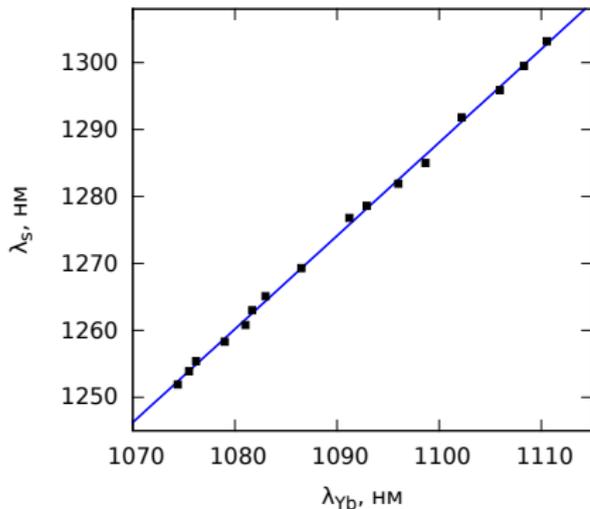
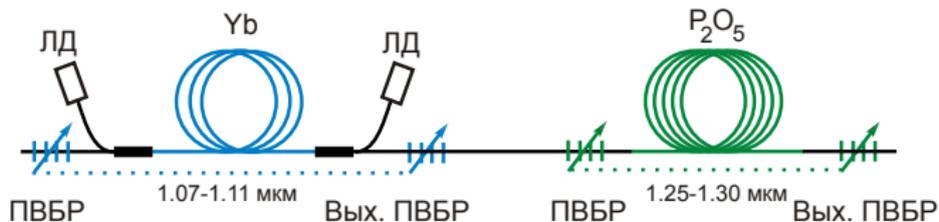


Спектры генерации ВОПГ

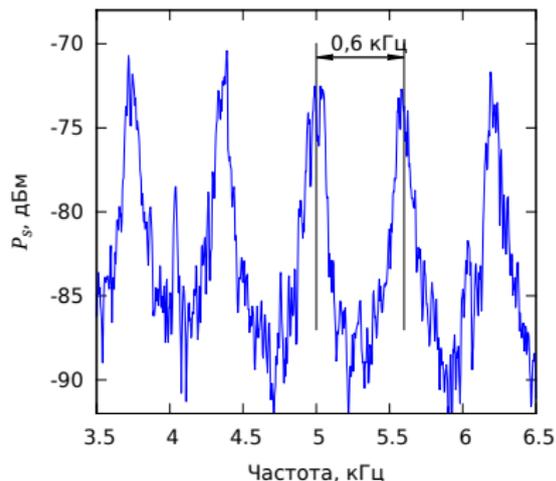
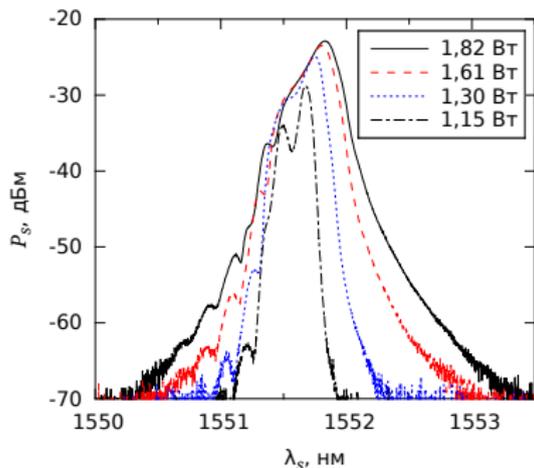
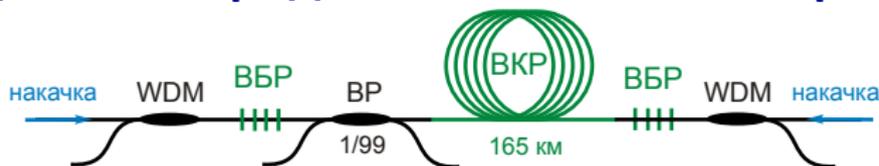


Мощность генерации ВОПГ

# Перестраиваемая ВКР-генерация



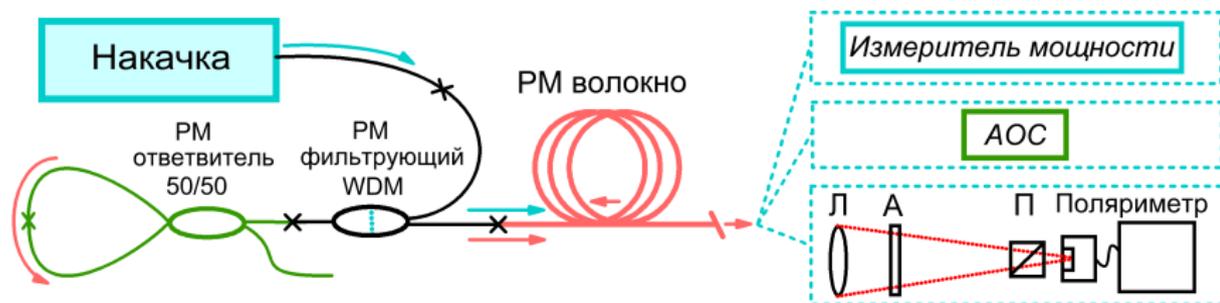
# Генерация в сверхдлинном ВКР-лазере



Максимальная длина ВКР-лазера, в котором удалось зарегистрировать биения в радиочастотном спектре, достигла 270 км ( $\Delta\nu_{rf} \approx 380$  Гц).

Влияние рэлеевского рассеяния продемонстрирована в S. K. Turitsyn et al. *Nat. Phot.* (2010).

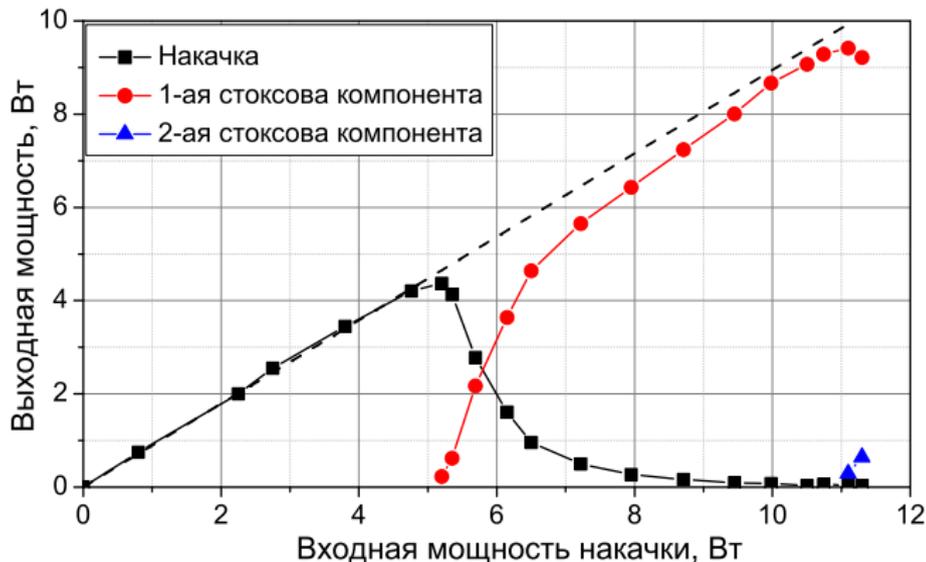
# Схема ВКР-лазера со СРОС



**Накачка** – Непрерывный иттербиевый волоконный лазер с линейной поляризацией излучения  $\lambda_p \approx 1054 \text{ нм}$ ,  $P = 15 \text{ Вт}$

**PM волокно** – Fujikura SM98-PS-U25D длиной 0.5 или 1 км

# Мощность генерации лазера длиной 0.5 км



$$P_1^{out} / P_{in} \approx 87\%$$

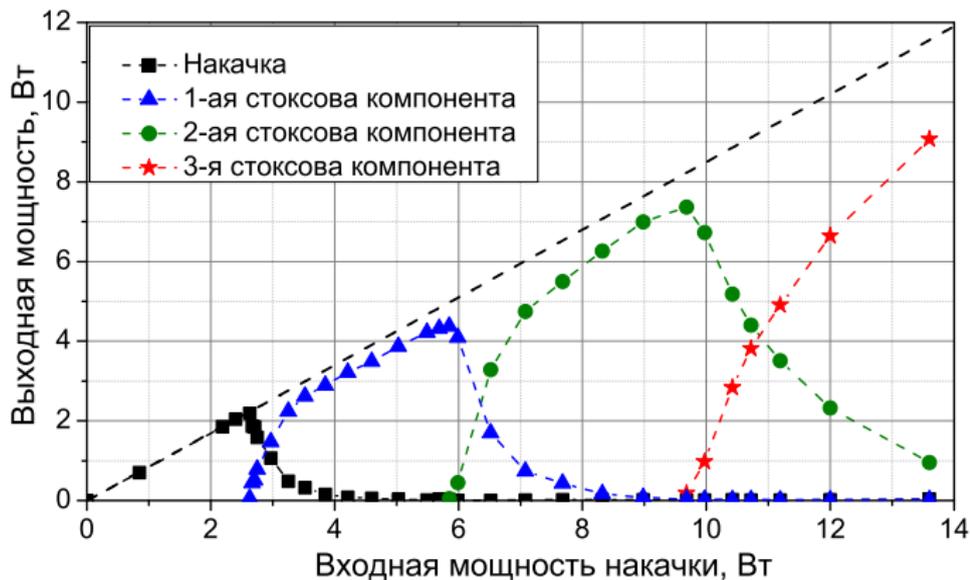
$$\frac{P_1^{out}}{P_{in}} \frac{\lambda_1}{\lambda_p} \approx 92\%$$

$$P_{th} = -\ln(\sqrt{R_{eff}}) / (g_R L) \approx 5.2 \text{ Вт}$$

$$P_p^{out} = P_{in} \exp(-\alpha_P L) \exp[-g_R L (P_{in} - P_{th})]$$

$$P_1^{out} = P_{in} (\lambda_P / \lambda_1) \exp(-\alpha_1 L) (1 - \exp[-g_R L (P_{in} - P_{th})])$$

# Мощность излучения на выходе лазера 1 км



	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$
$\lambda_j$ , [нм]	1111	1169	1232
$P_j^{max}$ , [Вт]	4.4	7.4	9.1
$P_j^{out}/P_{in}$ , [%]	75	75	67
$P_j^{out} \lambda_j / P_{in} \lambda_p$ , [%]	79	83	77

## Заключение

С помощью перестраиваемых ВБР продемонстрирована генерация ИВЛ с перестройкой длины волны более 45 нм с ваттным уровнем мощности.

Экспериментально продемонстрирована возможность эффективной генерации второй гармоники перестраиваемых иттербиевых волоконных лазеров.

Экспериментально реализован полностью волоконный оптический параметрический генератор в области менее 1 мкм с отстройкой частоты до 38 ТГц в коротковолновую область при накачке перестраиваемым ИВЛ.

Создан новый класс ВКР-лазеров – волоконных лазеров со случайной распределённой обратной связью, эффективность которых может превышать эффективность обычных ВКР-лазеров.