

Волноводные лазеры, записанные фемтосекундными импульсами в кристаллах YAG

Андрей Охримчук
ИЦВО РАН

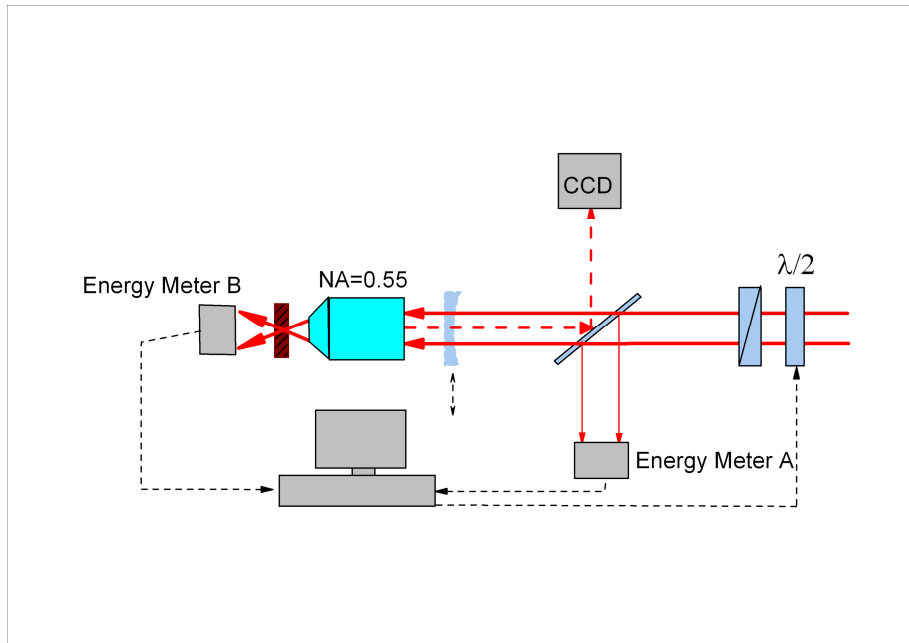
Ian Bennion
Photonics Research Group, Aston university (Birmingham, UK)

Александр Шестаков
НИИ Полюс, Москва

План доклада

- Классификация волноводов, создаваемых фемтосекундным пучком в кристаллах
- Режимы модификации показателя преломления в кристаллах ИАГ пучком фемтосекундных импульсов.
- Запись волноводов с малыми потерями с оболочкой пониженного показателя преломления в кристаллах ИАГ
- Волноводные импульсные и непрерывные лазеры в кристаллах ИАГ.

Установка для записи волноводов пучком фемтосекундного лазера



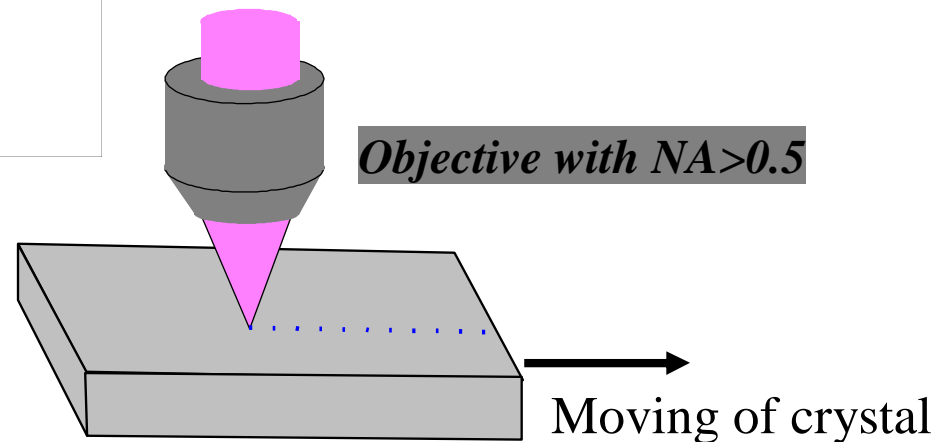
Standard technique
+ beam of elliptical cross section

Inscription beam parameters:

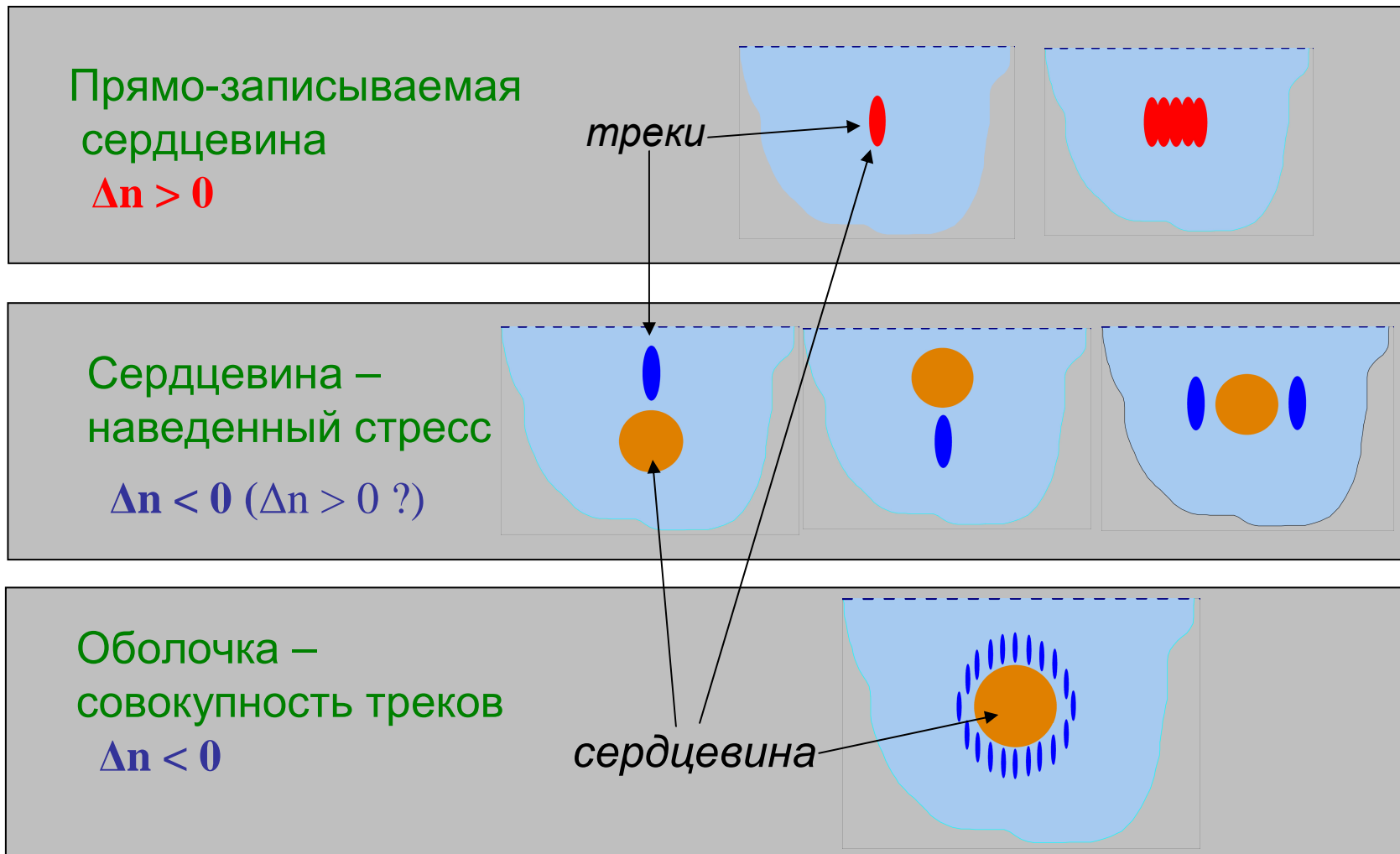
$\lambda = 800 \text{ nm}$

$\tau_{\text{pulse}} = 120 \text{ fs}$

$f_{\text{rep}} = 1 \text{ kHz}$



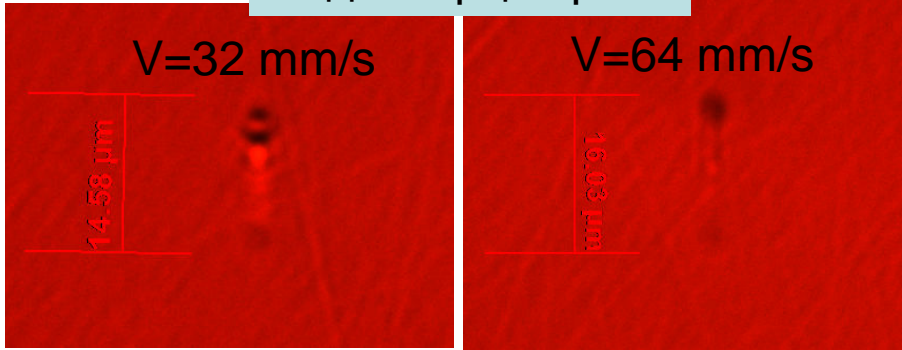
3 типа волноводов в кристаллах



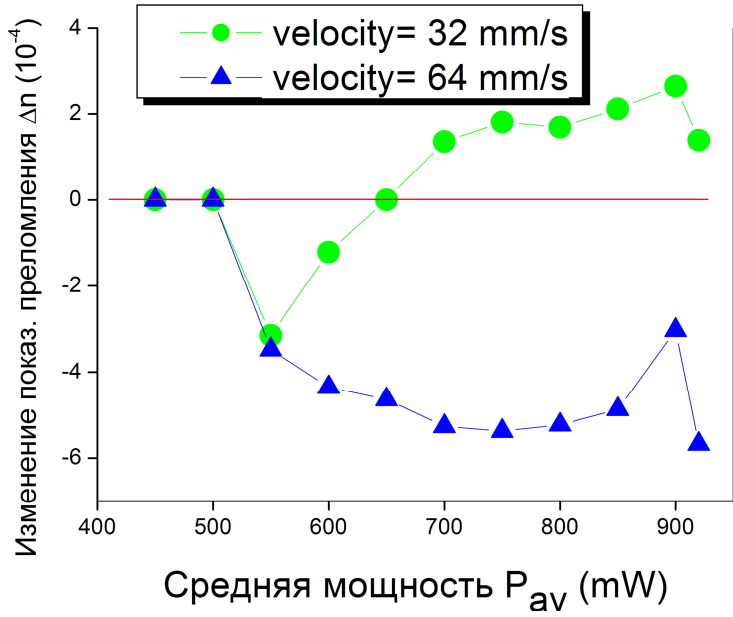
Необратимое изменение показателя преломления YAG:Cr⁴⁺ в области воздействия фемтосекундного пучка - Частота повторения 11МГц

$\lambda = 800 \text{ nm}$, Объектив NA=0.85, $\tau_{\text{pulse}} = 52 \text{ fs}$

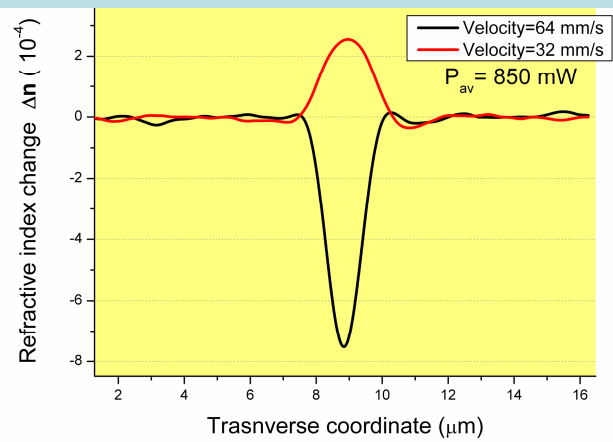
Вид с торца трека



Изменение показателя преломления При разных скоростях сканирования



Профили показателя преломления



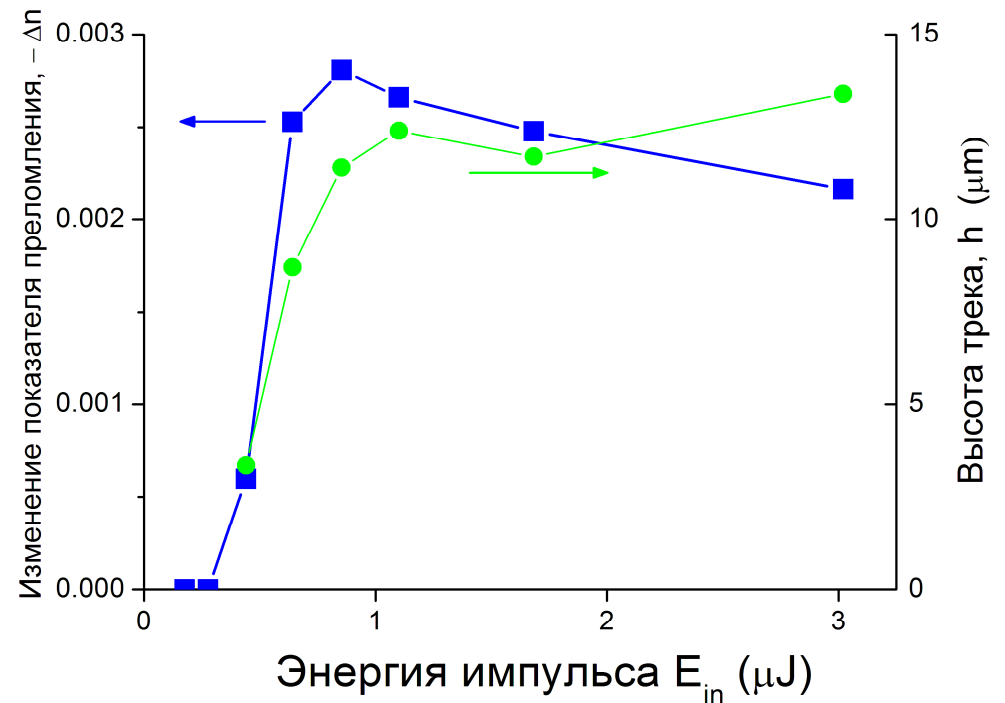
Необратимое изменение показателя преломления YAG:Nd в области воздействия фемтосекундного пучка - Частота повторения 1кГц

$\lambda = 800 \text{ nm}$
 $\tau_{\text{pulse}} = 52 \text{ fs}$
 Объектив
 $NA=0.55$
 + Цилиндрическая
 линза $f=-34 \text{ cm}$
 → поперечные
 размеры перетяжки
 пучка
 ~ **$1 \times 10 \text{ }\mu\text{m}$**

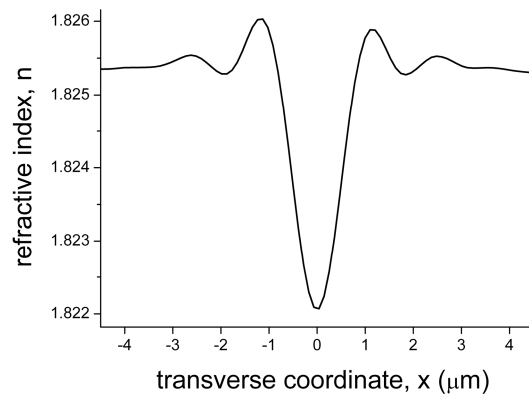
Торец трека



Изменение показателя преломления
И высота трека

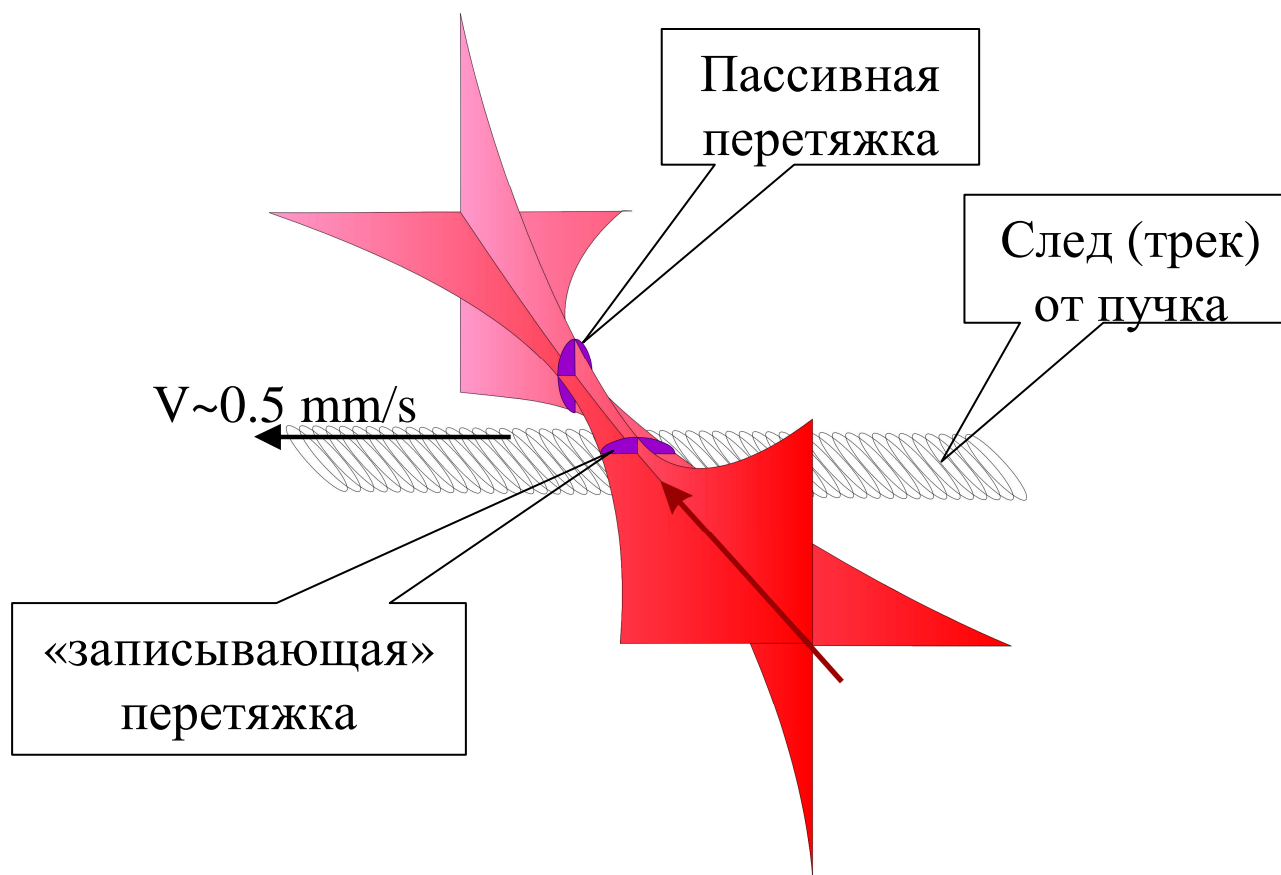


Профиль показателя преломления



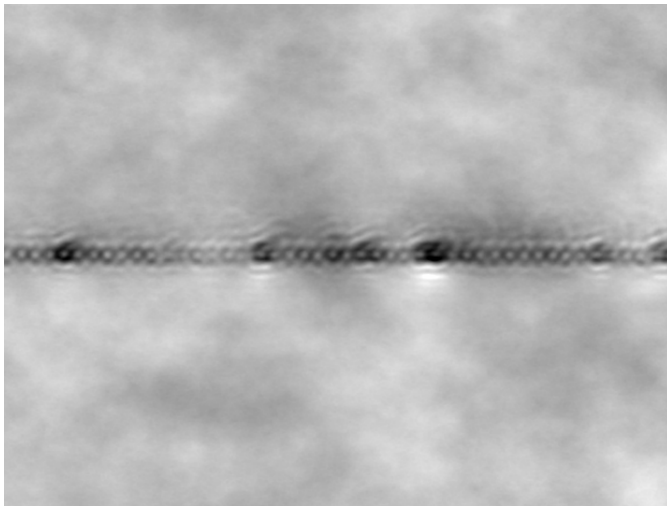
Порог записи при $E_{\text{pulse}} = 0.4 \mu\text{J}$

Запись пучком с эллиптической перетяжкой



Запись пучком с эллиптической перетяжкой

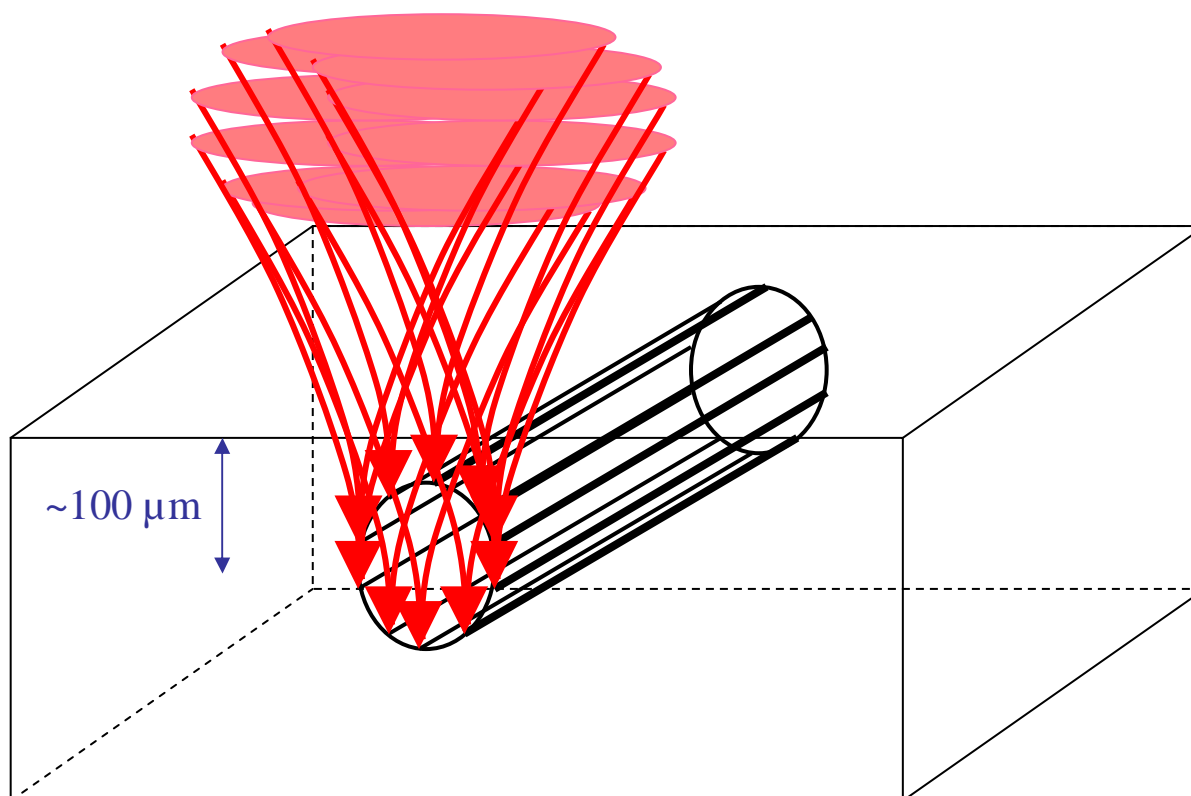
Без цилиндрической линзы
(обычный пучок)



С цилиндрической линзой
(пережка эллиптического
поперечного сечения)



Схема записи оболочки с пониженным показателем преломления



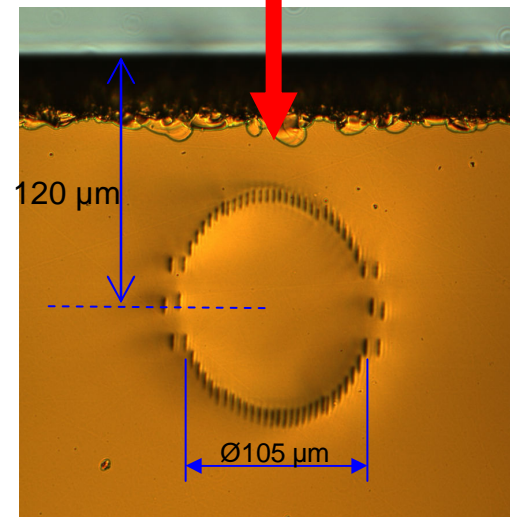
Волновод с пониженным показателем преломления в оболочке

Оболочка состоит из 66 параллельных треков

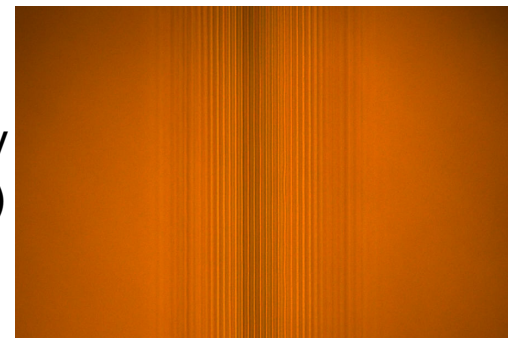
$$E_{\text{pulse}} = 1-2 \mu\text{J}$$
$$V = 0.3 - 0.7 \text{ mm/s}$$

Фемто-пучек

Вид с торца

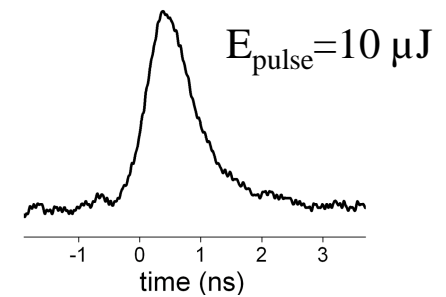
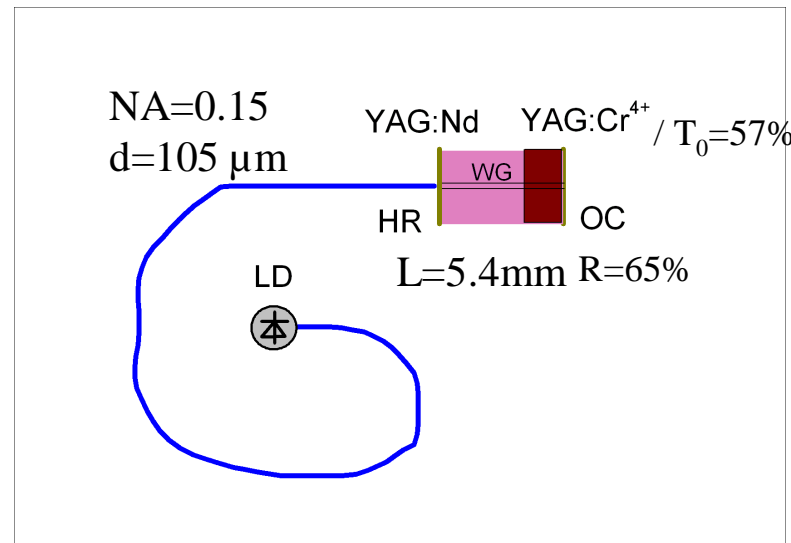
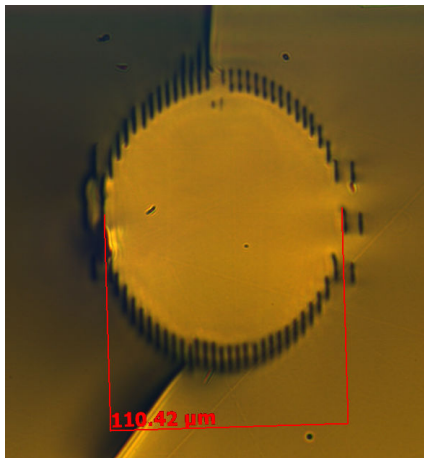


Вид сбоку
(со стороны падения фемтосекундного пучка)



Монолитный волноводный микрочип-лазер (наносекундные и суб-наносекундные импульсы)

Вид с торца



$\tau_{\text{pump}} = 100 - 250 \mu\text{s}$
 $f_{\text{rep}} = 1 \text{ Hz} - 10 \text{ kHz}$

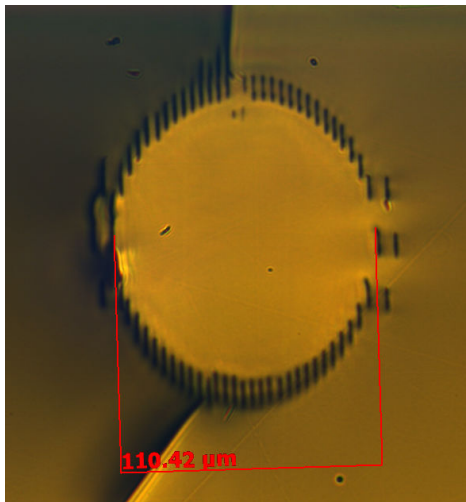
Наблюдается стабильный режим модуляции добротности в широком диапазоне частоты повторения – нет влияния термолинзы.

Импульсный волноводный лазер: эффективность

$$\Delta n = 3 \cdot 10^{-3}$$

$$NA = \sqrt{2n \cdot \Delta n} = 0.1$$

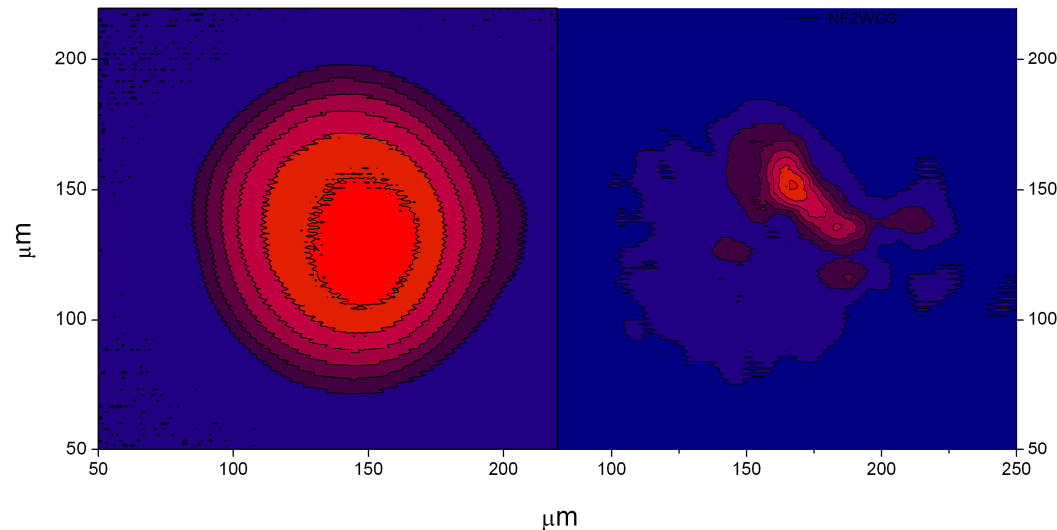
$$V = \frac{2\pi r}{\lambda} NA = 34$$



Распределение интенсивности на выходном торце

Pump (0.8μm)

Lasing (1.064μm)



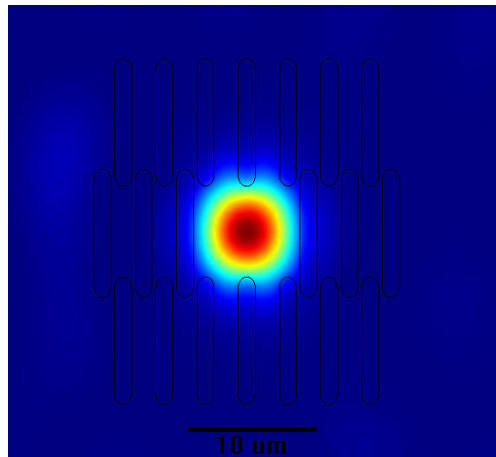
$$E_{\text{pump}} = 200 \mu\text{J} / E_{\text{out}} = 10 \mu\text{J} \quad (2.5 \text{ GW/cm}^2)$$

В традиционном микрочип (без волновода) лазере с такими же параметрами импульса требуется в 3 раза большая мощность накачки

Волновод с размером поля, соответствующим волоконному лазеру на основе кварцевого волокна с Yb^{3+}

Электромагнитная задача
на собственные значения.

Распределение поля моды
(CONSOL multiphysics code, FEM)

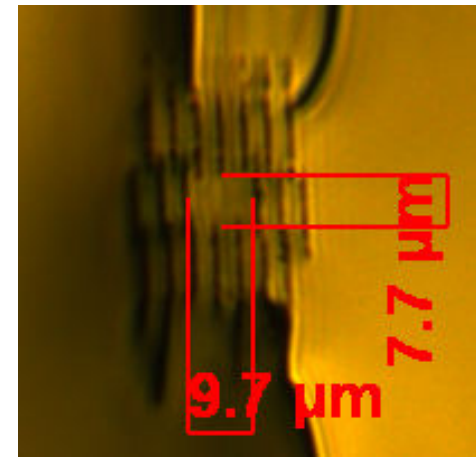


2 modes with orthogonal
polarizations

$$\begin{aligned} \text{Ø}_{\text{mode field}} &= 10 \text{ }\mu\text{m} \\ \alpha_{\text{prop}} &\approx 0.15 \text{ cm}^{-1} \\ \alpha(\text{Cr}^{4+}) &= 3.0 \text{ cm}^{-1} \end{aligned}$$

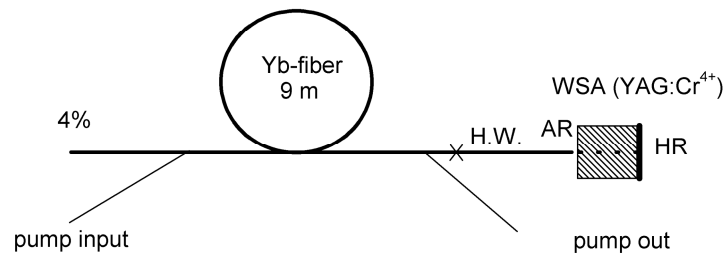
FOM ~ 20

YAG:Cr⁴⁺

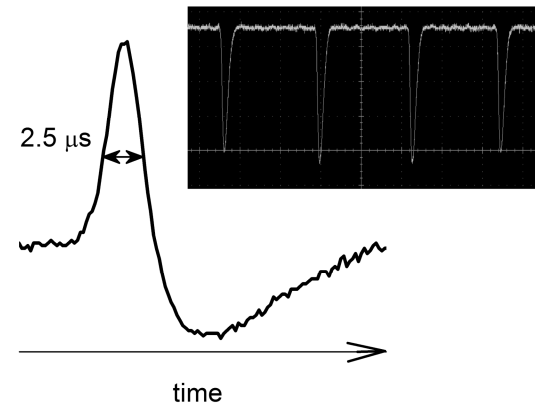


$$\Delta n = -3 \cdot 10^{-3}$$

Режим модуляции добротности Yb-волоконного лазера с волоконным насыщающимся поглотителем на основе кристалла YAG:Cr⁴⁺



$f_{\text{rep}} = 20 \text{ kHz}$



WSA & Yb-fiber: $T_0 (1056\text{nm}) = 60 \%$

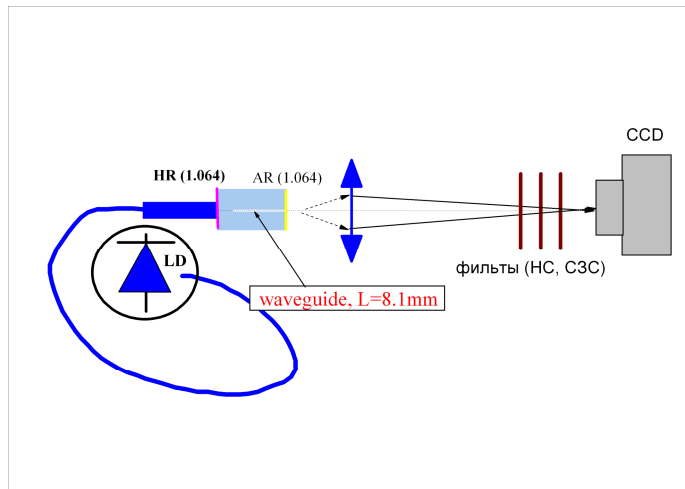
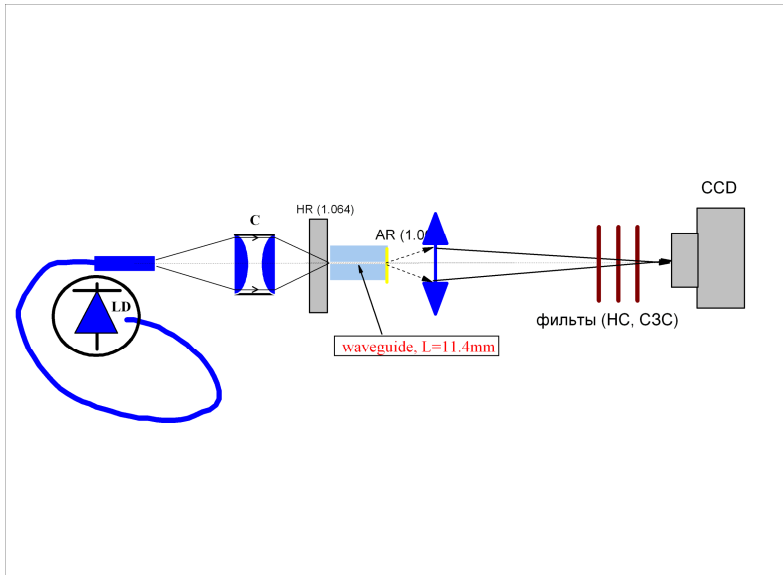
$\lambda_p = 910 \text{ nm}$
 $\lambda_{\text{las}} = 1056 \text{ nm}$
 $P_{\text{pump}} = 3 \text{ W}$
 $P_{\text{out}} = 23 \text{ mW}$

Проблема: self-Q-switch при больших мощностях накачки
 Необходимо оптимизировать длину волокна,
 Диапазон отражения глухого зеркала.

Волноводный непрерывный лазер на YAG:Nd(0.3%)

Эффективность заведения и распространения излучения

накачки

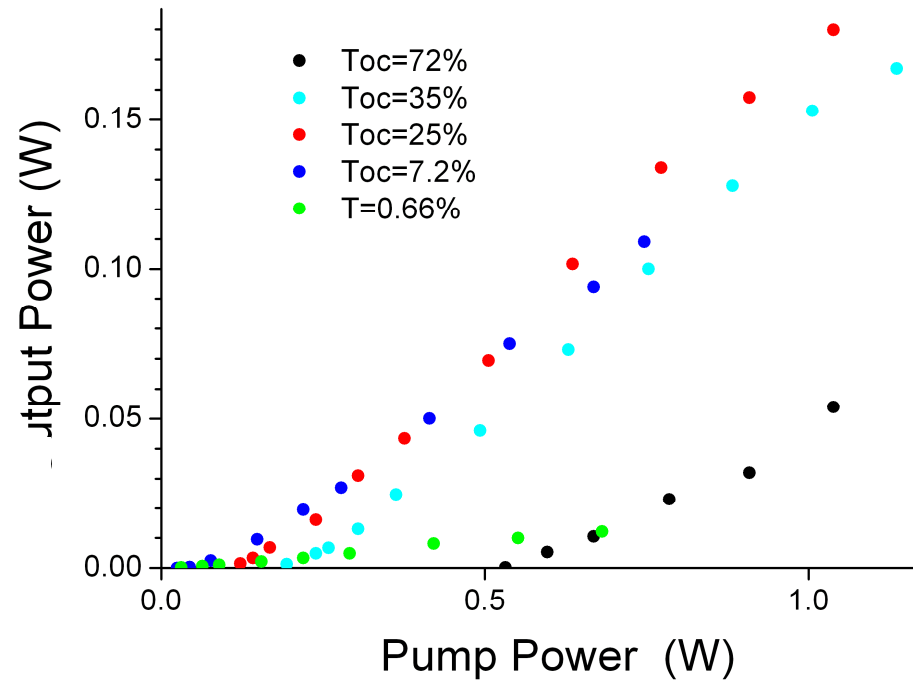
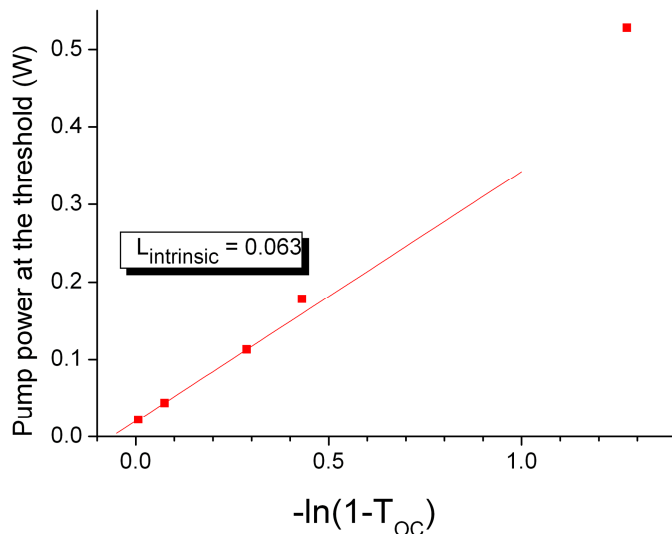
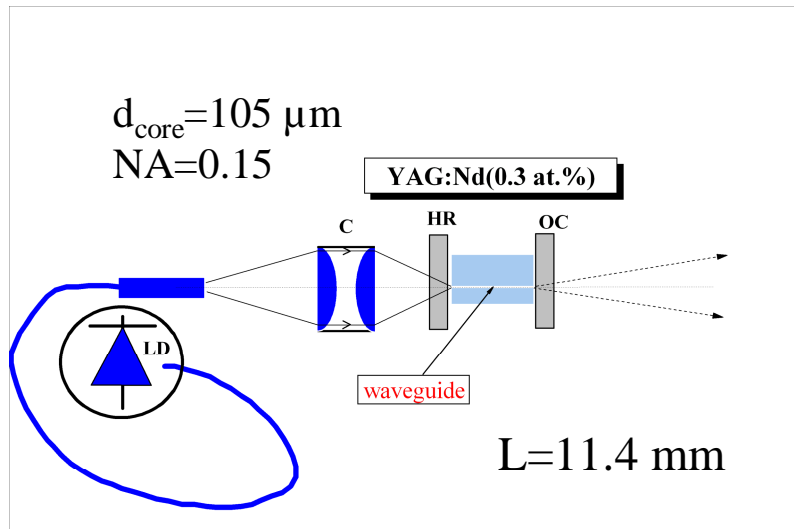


$$\alpha(\text{Nd}) = 1.2 \text{ cm}^{-1}$$

В О Л Н О В О Д	Количество треков	Энергия в импульс е	Скоро сть сканир ования	Коэффициент ослабления K (cm ⁻¹)	
				Заведение через линзу	Прямое заведение
N		E _p (μJ)	V (mm/s)		
1	60	1.5	0.5	1.54	1.12
2	60	1.2	0.5	1.42	1.10
3	48	1.4	0.5	1.80	1.28
4	48	1.5	0.7	2.38	1.84

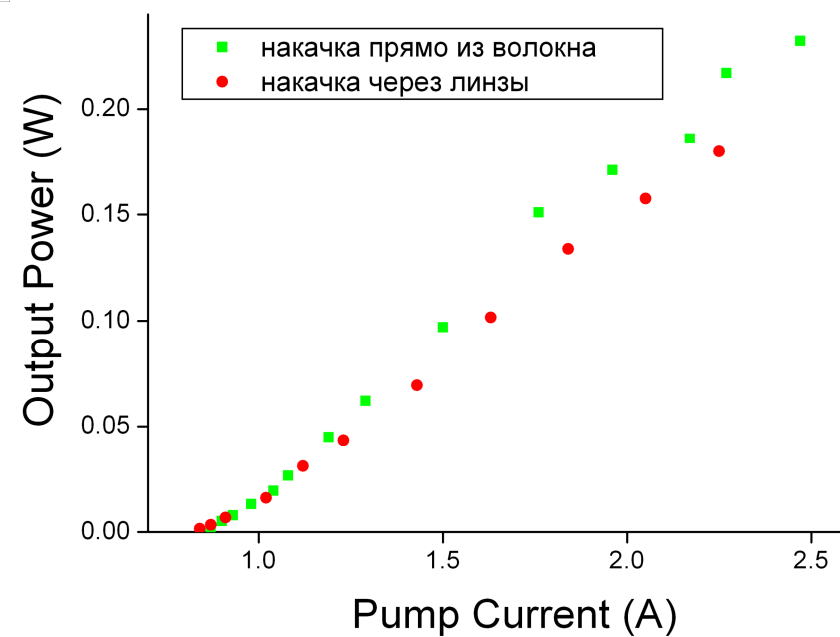
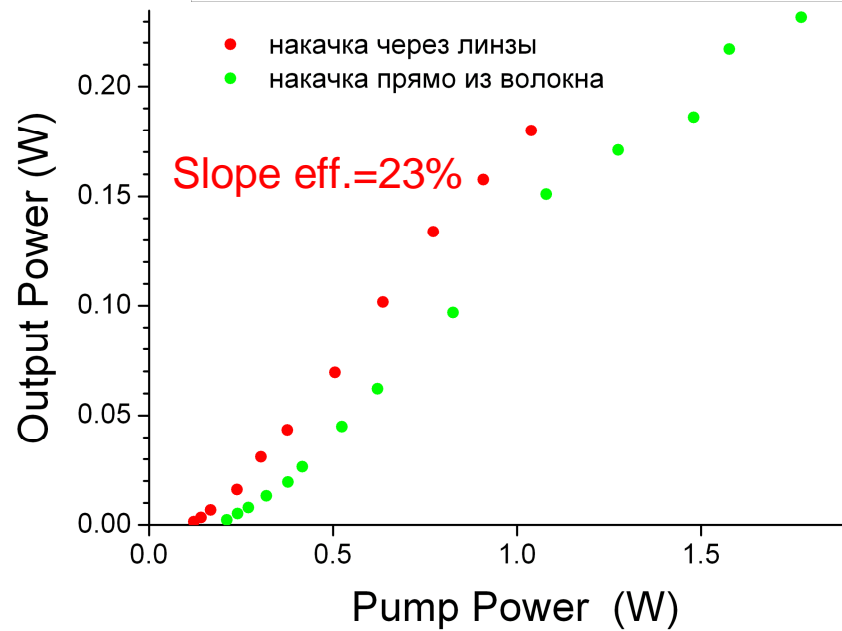
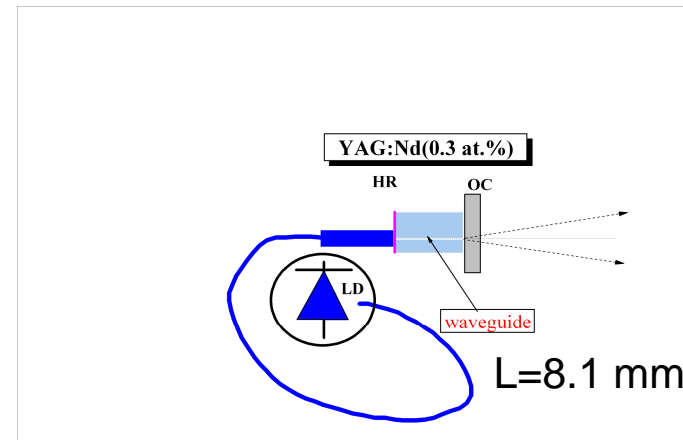
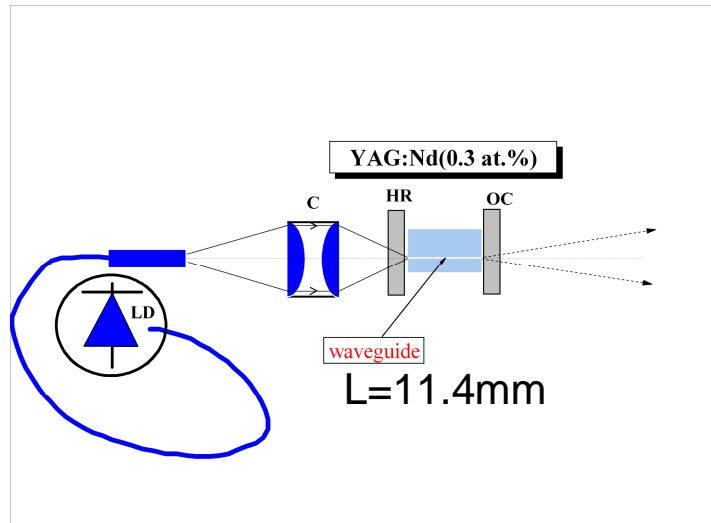
Генерационные эксперименты (1)

Анализ Финдли-Клея



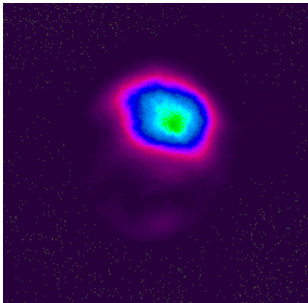
$$\alpha(1.064) = \frac{L_{\text{intrinsic}}}{L} = 0.028 \text{ cm}^{-1} = 0.12 \text{ dB/cm}$$

Генерационные эксперименты (2)

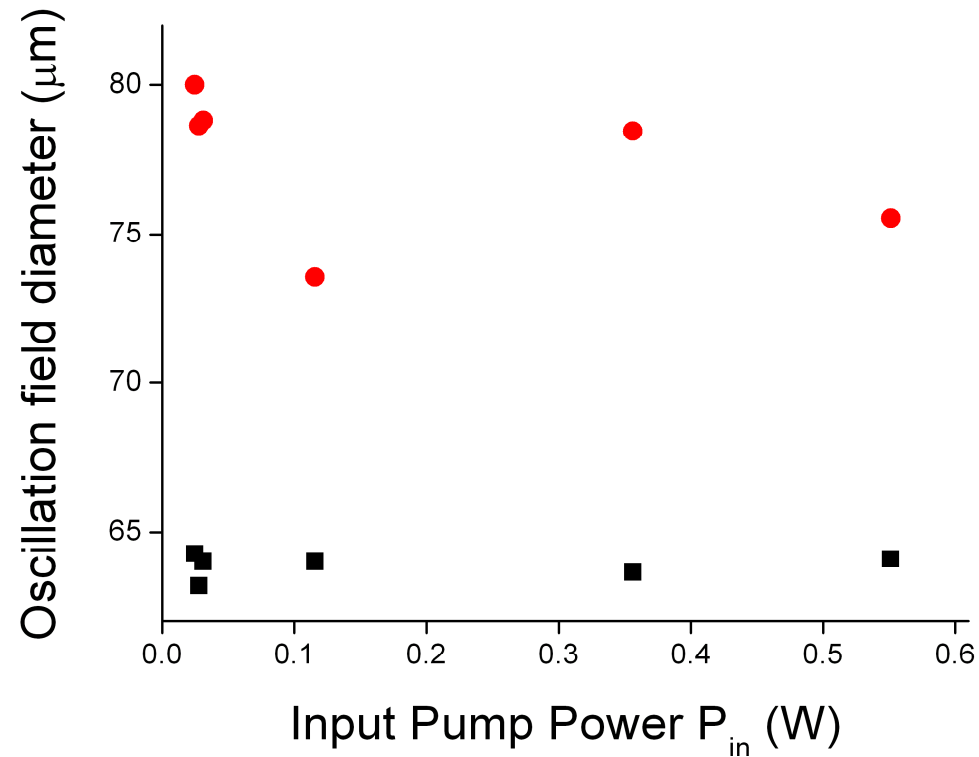
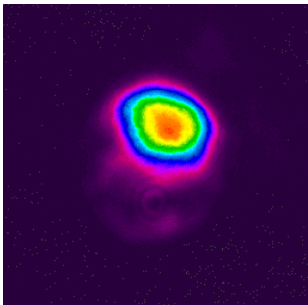


Одномодовый режим генерации в глухом резонаторе $T_{oc}=0.66\%$

$P_{pump}=28 \text{ mW}$



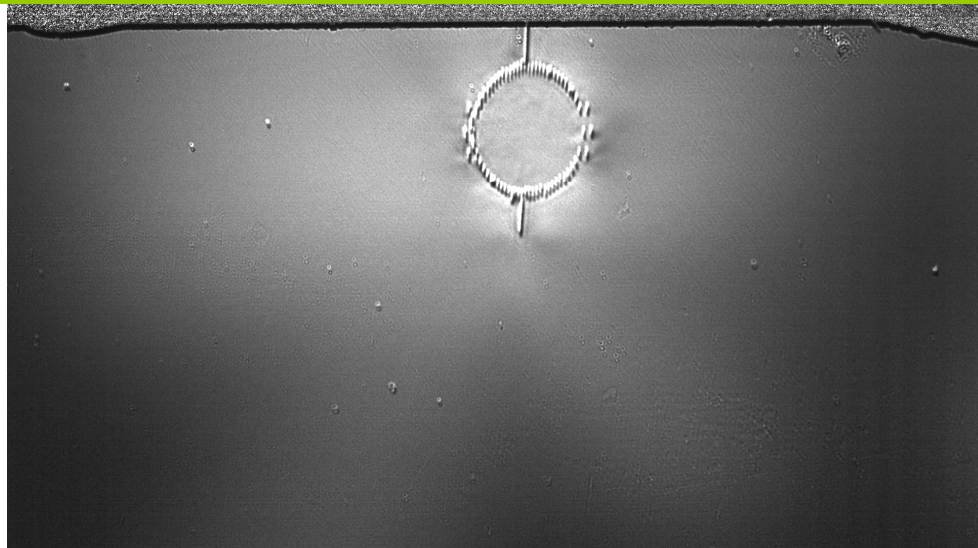
$P_{pump}= 551 \text{ mW}$



Возмущения показателя преломления в следствии механического стресса

1)

Микроскопическое изображение торца волновода, состоящего из 66 треков, в скрещенных поляризаторах



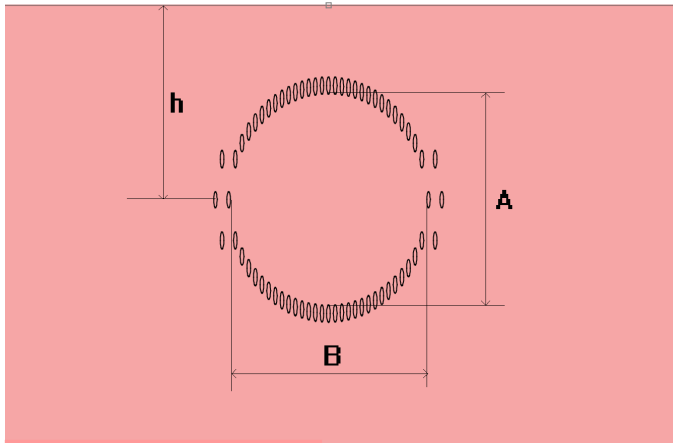
2)

A. Benayas, et al., "Thermally resistant **waveguides fabricated in Nd:YAG ceramics** by crossing femtosecond damage filaments", Optics Letters, **35**, 330 (2010).

Стресс сжания в 0.4 GPa (4 kbar)

Расчет мод с учетом механического стресса (1) (COMSOL multiphysics)

8



66 треков
h = 120 μm
B = 110 μm
A = 116 μm

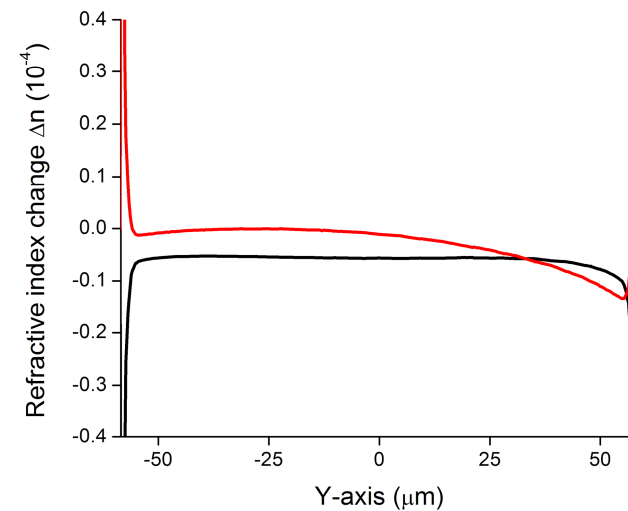
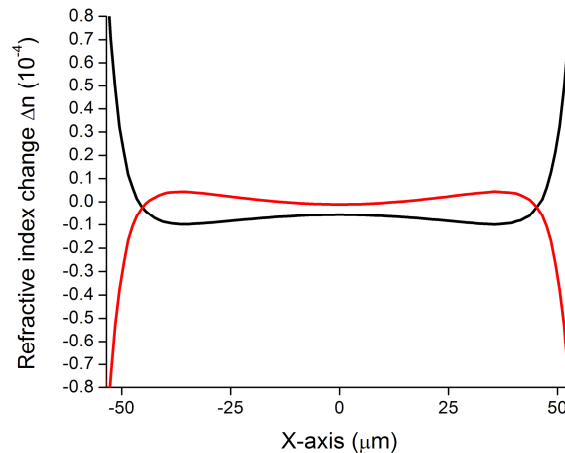
$$n_x = n_{YAG} \left(1 - 0.5 n_{YAG}^2 (p_{11} u_{xx} + p_{12} u_{yy}) \right)$$

$$n_y = n_{YAG} \left(1 - 0.5 n_{YAG}^2 (p_{11} u_{yy} + p_{12} u_{xx}) \right)$$

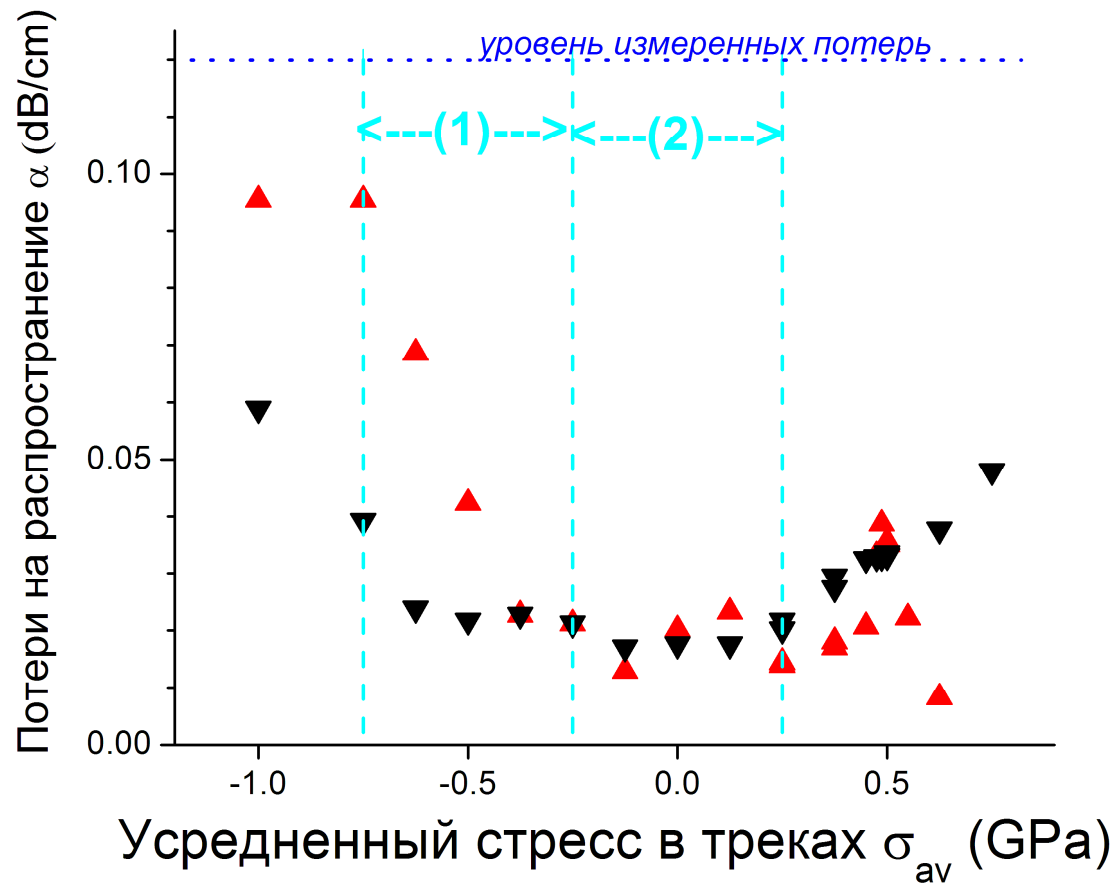
$$n_{xy} = n_{yx} = -0.5 n_{YAG}^3 p_{44} u_{xy}$$

$p_{11} = -0.02$
 $p_{12} = 0.0091$
 $p_{44} = -0.0615$
 (λ = 633 nm)

$\sigma_{av} = -0.5 \text{ GPa}$



Расчет потерь на распространение в зависимости от стресса (COMSOL multiphysics)



Выводы

Фемтосекундный пучок с эллиптическим поперечным сечением перетяжки позволяет записывать волноводы в кристаллах YAG с низкими потерями

Измеренные потери в волноводе с пониженным показателем преломления в оболочке составили 0.12 dB/cm (0.028 cm^{-1}) на $\lambda=1.064 \text{ }\mu\text{m}$ – абсолютно рекордно-низкие потери для волноводов, записанных фемтосекундными импульсами (включая стекла)