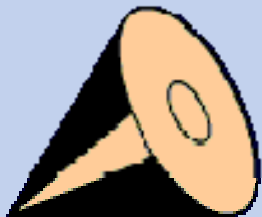


# **ВОЛОКОННЫЙ ЭРБИЕВЫЙ ЛАЗЕР И УСИЛИТЕЛЬ С НАКАЧКОЙ В ОБОЛОЧКУ И ВЫСОКОЙ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ**

Л.В. Котов\*<sup>1</sup>, М.Е. Лихачев<sup>1</sup>, М.М. Бубнов<sup>1</sup>, О.И. Медведков<sup>1</sup>,  
Д.С. Липатов<sup>2</sup>, А.Н. Гурьянов<sup>2</sup>, Н. Н. Вечканов<sup>2</sup>

(1)-Научный Центр Волоконной Оптики РАН

(2)- Институт химии высокочистых веществ РАН



## Волоконные лазеры и усилители с высокой выходной мощностью, работающие в диапазоне ~1550nm

### 1. Волоконные лазеры и усилители на основе световодов легированных Er-Yb

Достигнутая дифференциальная эффективность: 40%

Недостатки:

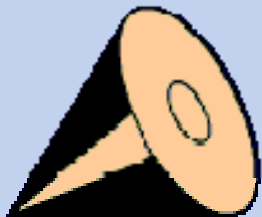
- а. Появление паразитной генерации Yb в области 1мкм при больших мощностях.  
=> Снижение эффективности генерации, излучение перестает быть безопасным для глаз.
- б. Необходимость солегирования большим количеством фосфора => сложности при создании одномодовых световодов с большим полем моды.

### 2. Эрбиевые лазеры и усилители с накачкой по сердцевине рамановским двухкаскадным конвертором, преобразующего излучение иттербиевого лазера в излучение накачки на длине волны 1.48 мкм

Достигнутая дифференциальная эффективность: <27%

Недостатки:

- а. Низкая эффективность (Достигнутая на сегодняшний день эффективность преобразования привысокой мощности 975→1480-32%, 1480→1550-85% )
- б. Сложность конструкции.



# Мощные эрбиевые лазеры и усилители с накачкой по оболочке

## **Многомодовые эрбиевые лазеры**

A.S. Kurkov, V.M. Paramonov, M.V. Yashkov, S.E. Goncharov, I.D. Zalevskii, "Multimode cladding-pumped erbium-doped fibre laser", Quantum electronics, Vol 37 No 4 (2007), 343–344

**P=4Вт**

**Дифф.эффективность= 30%**

Kuhn, V. Kracht, D. Neumann, J. Wessels, P., "67 W of Output Power From an Yb-Free Er-Doped Fiber Amplifier Cladding Pumped at 976 nm", Photonics Technology Letters, IEEE, Vol.23(7), pp. 432 – 434,(2011)

**P=67Вт**

**Дифф.эффективность= 30%**

## **Лазеры и усилители с накачкой на длине волны 1532 нм**

Jun Zhang, Viktor Fromzel, and Mark Dubinskii, "Resonantly cladding-pumped Yb-free Er-doped LMA fiber laser with record high power and efficiency," Opt. Express 19, 5574-5578 (2011)

**P<sub>max</sub>=88Вт**

**Дифф. эффективность=69%**

## **Одномодовые эрбиевые лазеры и усилители с накачкой лазерными диодами на 980нм**

P. Bousselet, et all, " + 30dBm output power from a cladding pumped Yb free EDFA for L band applications," in Optical Amplifiers and Their Applications, OSA Technical Digest Series (2001), paper OWC3

**P= 1Вт**

**Дифф.эффективность= 22%**

Vincent Kuhn, Dietmar Kracht, Jörg Neumann, and Peter Weßels, "Er-doped photonic crystal fiber amplifier with 70 W of output power," Opt. Lett. 36, 3030-3032 (2011)

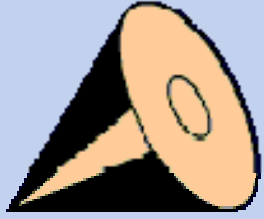
**P= 70Вт**

**Дифф.эффективность= 18,5%**

M.E. Likhachev, L.V. Kotov, M.M. Bubnov, O.I. Medvedkov, A.A. Sysolyatin, D.S. Lipatov and A.N. Guryanov, "High-power double-clad Er-doped fiber laser", Proc. SPIE 7914, 791424 (2011)

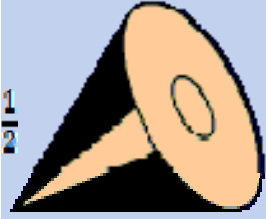
**P= 6,4Вт**

**Дифф.эффективность= 28,2%**



## Цель данной работы:

Создание схемы эффективных волоконных эрбиевых лазера и усилителя с накачкой в оболочку, позволяющих использовать в качестве накачки стандартные коммерчески доступные лазерные диоды на 980нм.



$$\alpha_{об} \sim \alpha_c * (d/D)^2$$

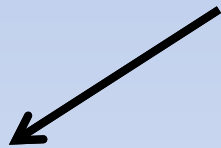
$\alpha_{об}$  – поглощение из оболочки

$\alpha_c$  – поглощение из сердцевины

d – Диаметр сердцевины

D – диаметр оболочки

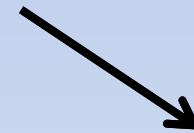
## Увеличение поглощения из оболочки



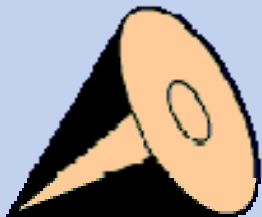
**1. Уменьшение диаметра внешней оболочки.**



**2. Увеличение диаметра сердцевины.**



**3. Увеличение концентрации ионов эрбия в сердцевине.**



## 1. Уменьшение диаметра внешней оболочки.

Минимальный внешний диаметр световода при котором возможны скалывание и сварка световодов стандартными средствами-80 мкм.

Апертура стандартного источника накачки (105мкм) **NA~0.2**

Использование волоконного тэйпера 105–80мкм **NA~0.3**

Использование объединителя накачки и сигнала (Pump combiner) (125мкм) **NA~0.4**

Использование Pump combiner и тэйпера 125-80мкм **NA~0.6**

В данной работе использовалось тефлоновое покрытие, обеспечивающее апертуру 0.6

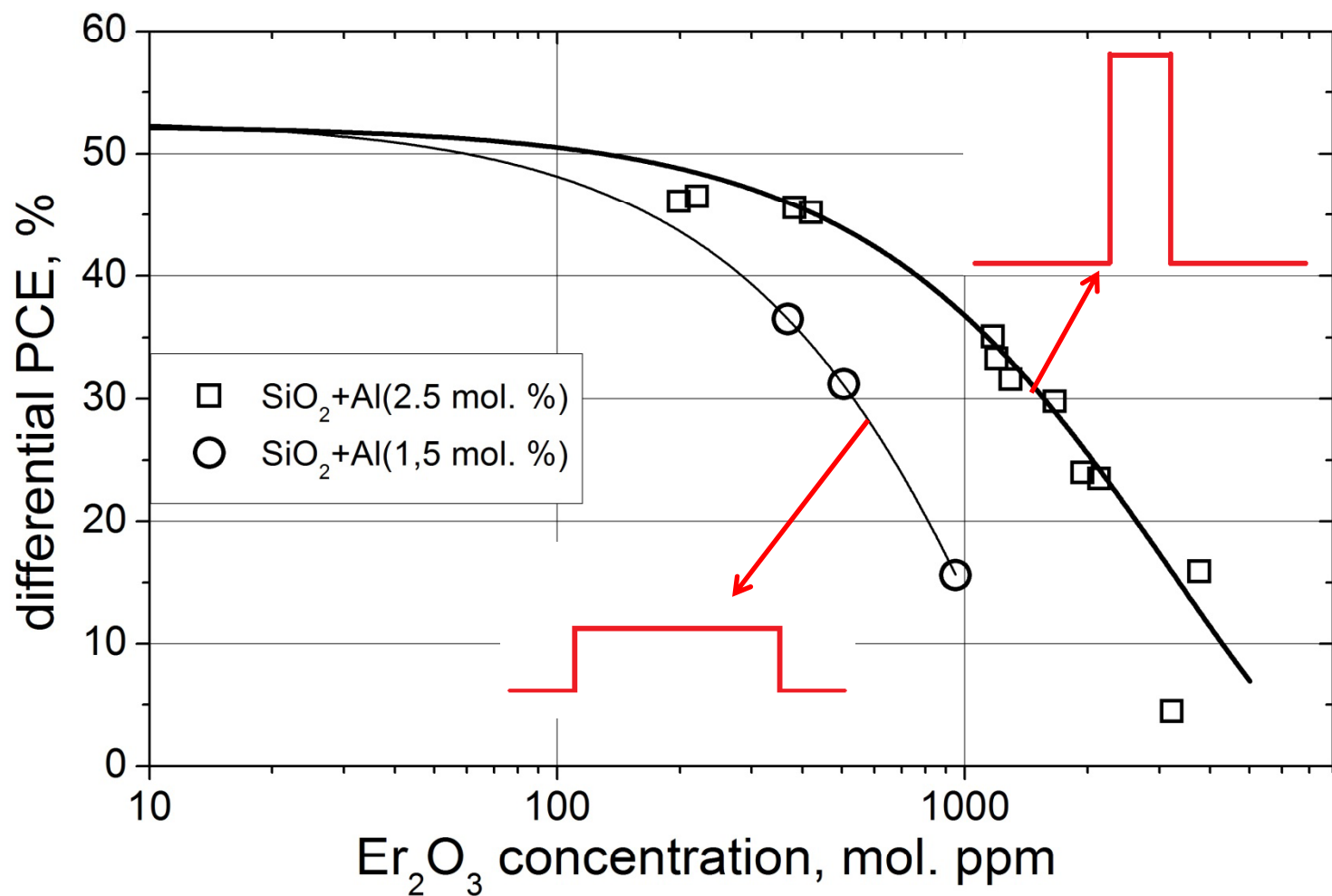


## 2. Увеличение диаметра сердцевины.

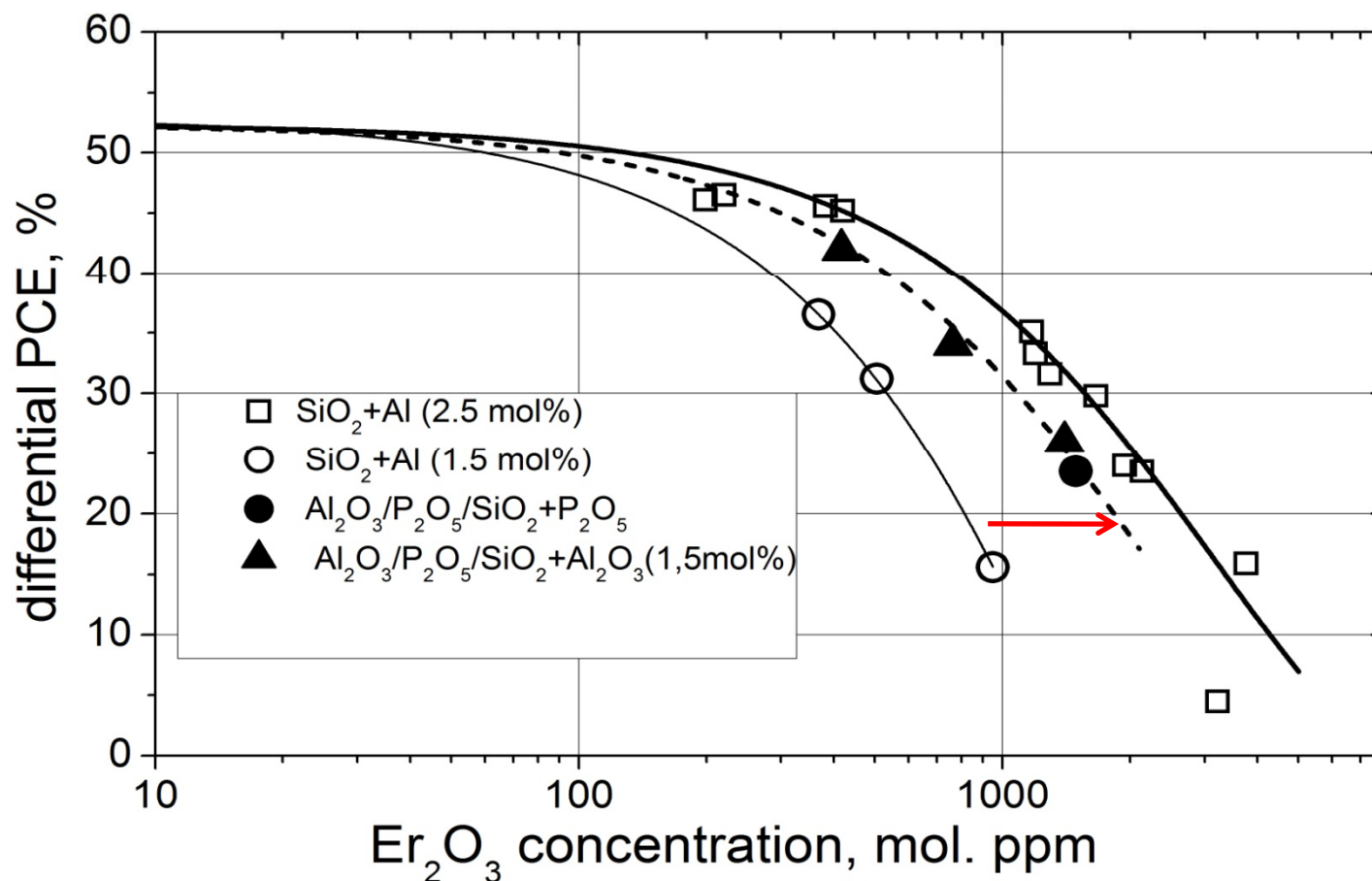
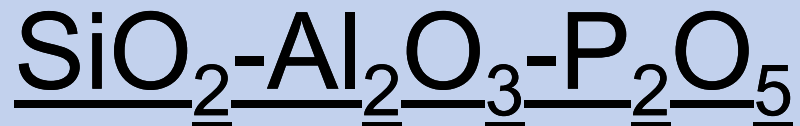
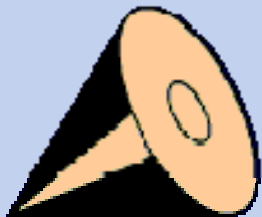
Возможно получение одномодовой генерации в световодах с диаметром сердцевины вплоть до ~40 мкм на  $1.55 \mu\text{m}^1$ . Однако необходимо **уменьшение  $\Delta n$**

## 3. Увеличение концентрации ионов эрбия в сердцевине.

Необходимо солегирование  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , подавляющим кластеризацию, но **повышающим  $\Delta n$**



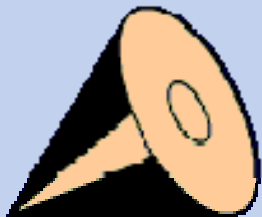
<sup>1</sup>D. Machewirthe et al, "Large-mode-area double-clad fibers for pulsed and CW lasers and amplifiers", Proc. SPIE, Vol. 5335(2004), pp140-150



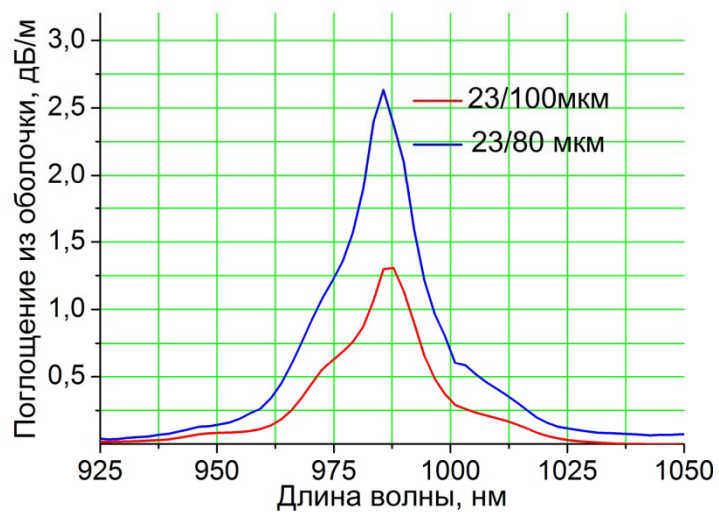
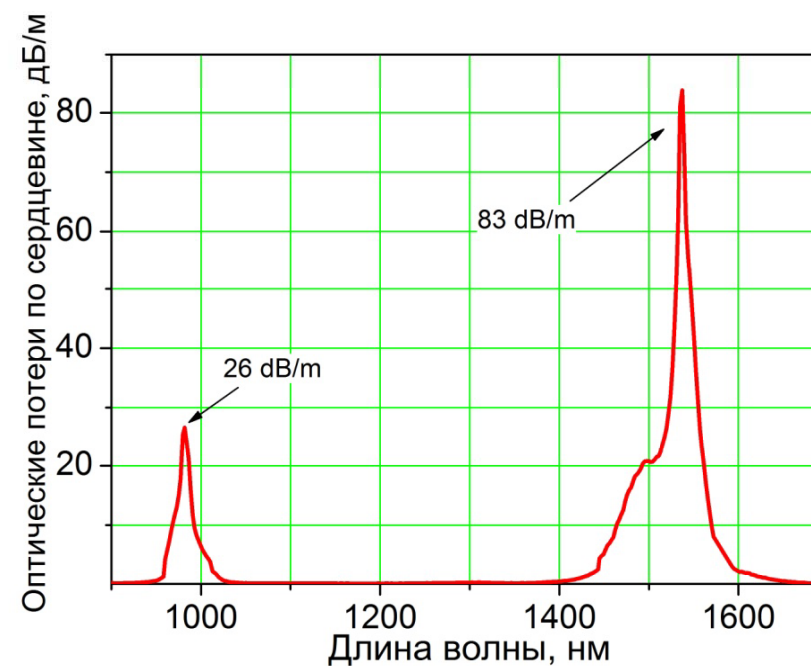
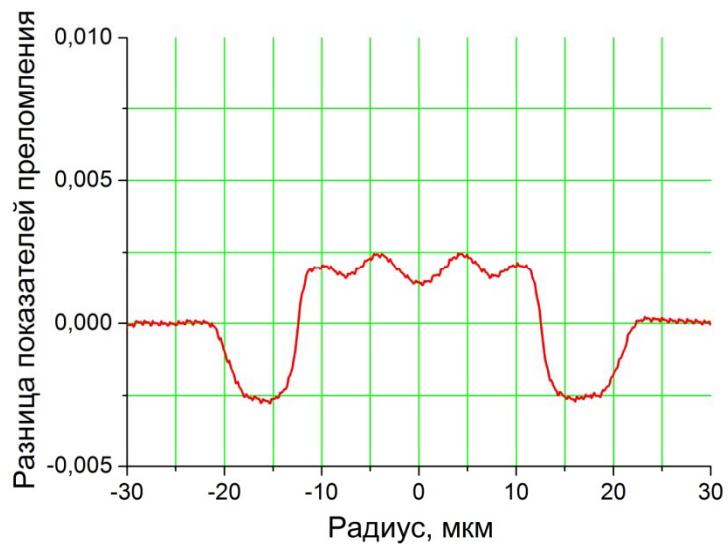
Использование стекол на основе  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5$  позволяет вводить большие концентрации эрбия без ограничения на показатель преломления<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>M.E. Likhachev, M.M. Bubnov, K.V. Zotov, D.S. Lipatov, M.V. Yashkov, and A.N. Guryanov, "Effect of the  $\text{AlPO}_4$  join on the pump-to-signal conversion efficiency in heavily Er-doped fibers" Optics Letters, Vol. 34, Issue 21 (2009), pp. 3355-3357





# Характеристики световода



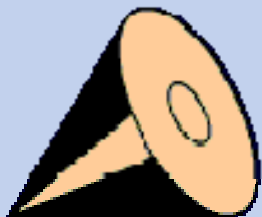
Содержание легирующих добавок:

$\text{Al}_2\text{O}_3$  ~9 мол. %;

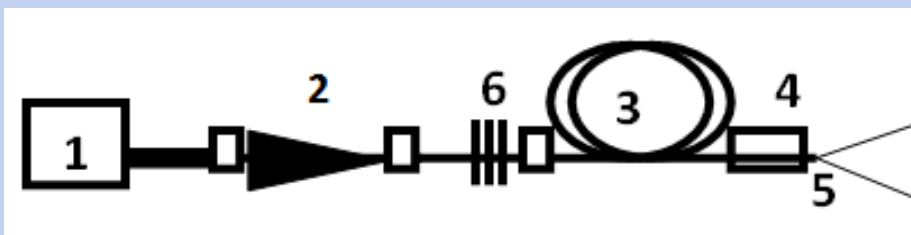
$\text{P}_2\text{O}_5$  ~9мол. %;

$\text{Er}_2\text{O}_3$  ~0.1 mol%,

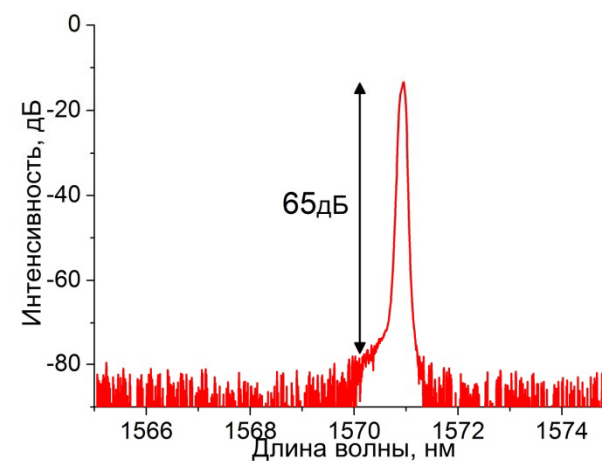
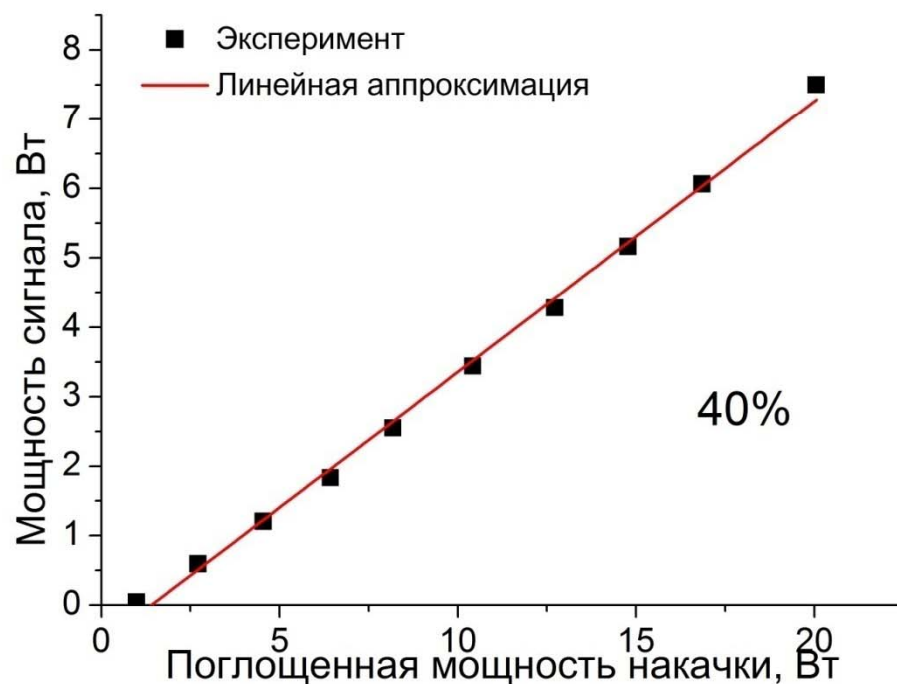
$\text{GeO}_2$  ~1.5мол. %



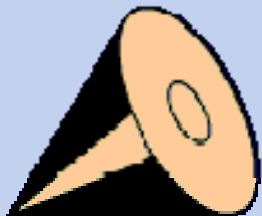
# Лазер



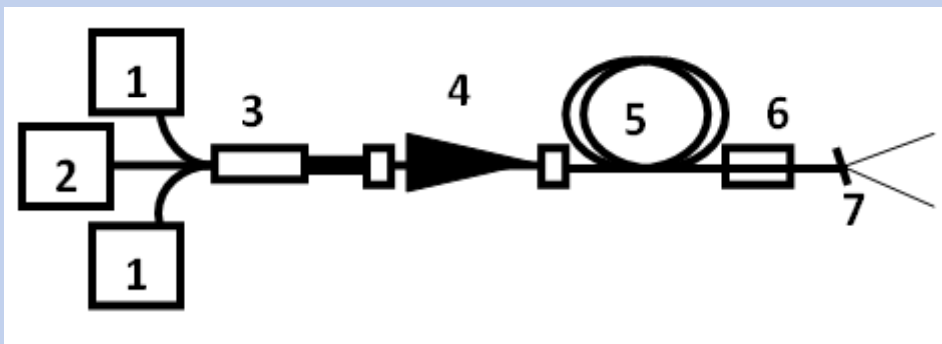
1-источник накачки, 2-волоконный конус (105-80мкм), 3-эрбиевый световод, 4-вывод непоглощенной накачки, 5-прямой скос



Дифференциальная эффективность относительно введенной в световод мощности-35%.  
Длина активного световода(23/80мкм)-5м



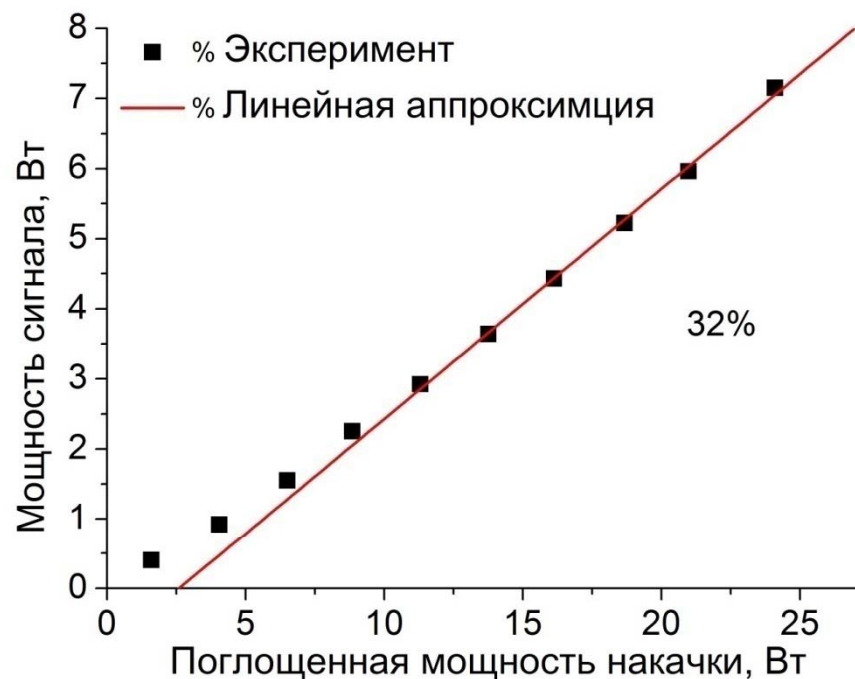
# Усилитель

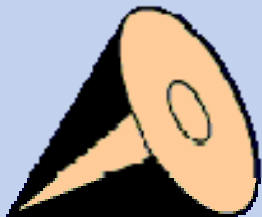


*1-источник накачки, 2-источник усиливаемого излучения, 3-рипр combiner, 4-волоконный конус(125-95мкм), 5-эрбиевый световод, 6-вывод накачки, 7-косой скл*

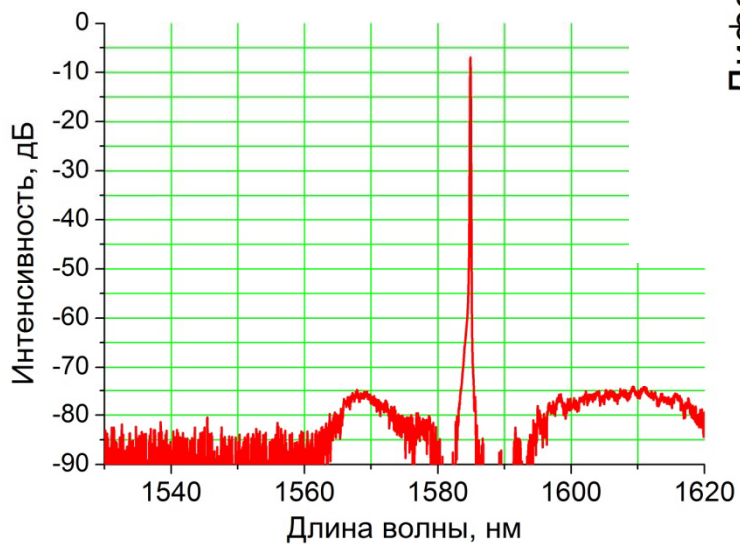
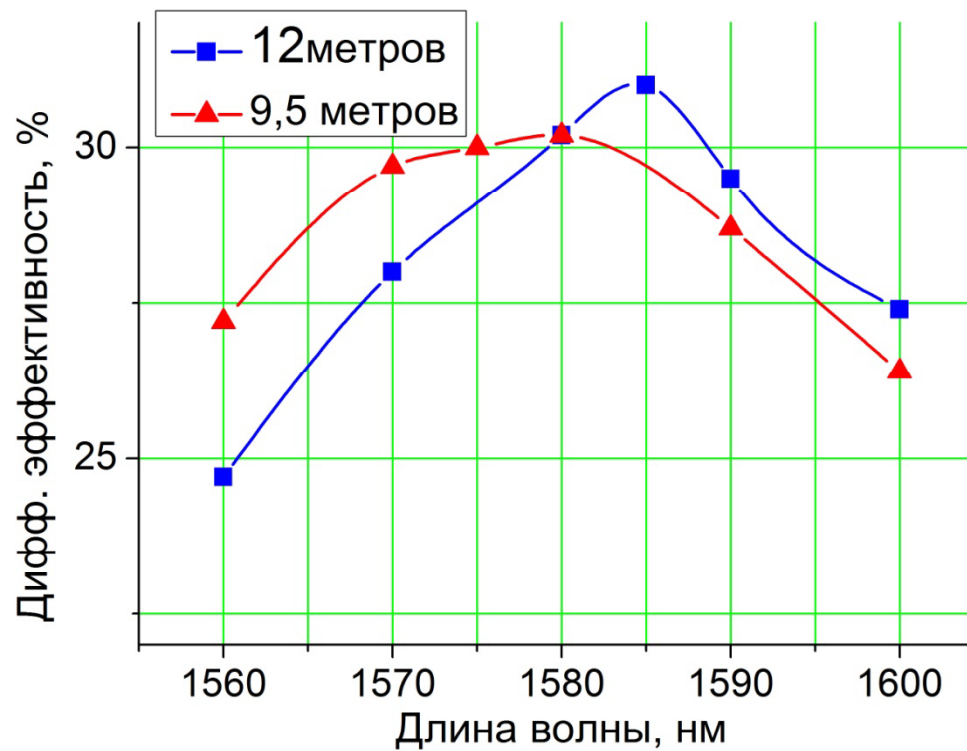
Дифференциальная эффективность относительно введенной в световод мощности-31%. Длина активного световода(23/100мкм) 12м

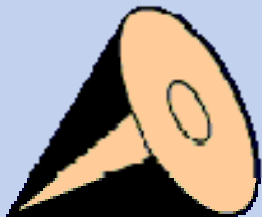
Мощность накачки ~33Вт  
Потери в рипр combiner ~4Вт  
Потери в конусе ~2 Вт  
Непоглощенная мощность ~2.5Вт





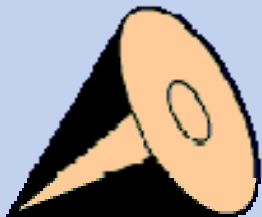
# Исследование зависимости эффективности усиления от длины волны





# Заключение

1. Проведена оптимизация конструкции эрбиевого световода, позволяющая при использовании широко распространенных многомодовых источников накачки в области 980нм получить рекордную для такого типа лазеров дифференциальную эффективность преобразования накачки в сигнал 40%.
2. Использование нового типа покрытия с рекордно высокой апертурой позволило использовать pump combiner и тем самым создать целиком волоконную схему усилителя.
3. Создан мощный эрбиевый волоконный усилитель эффективно работающий в спектральном диапазоне 1560-1600нм с максимальной эффективностью 32%
4. Полученные результаты, а также низкие серые потери в световоде позволяют ожидать еще большего увеличения эффективности при снижении концентрации эрбия.



# Спасибо за внимание!

Коллектив авторов выражает благодарность Мелькумову М. А за помощь в проведении данной работы.