

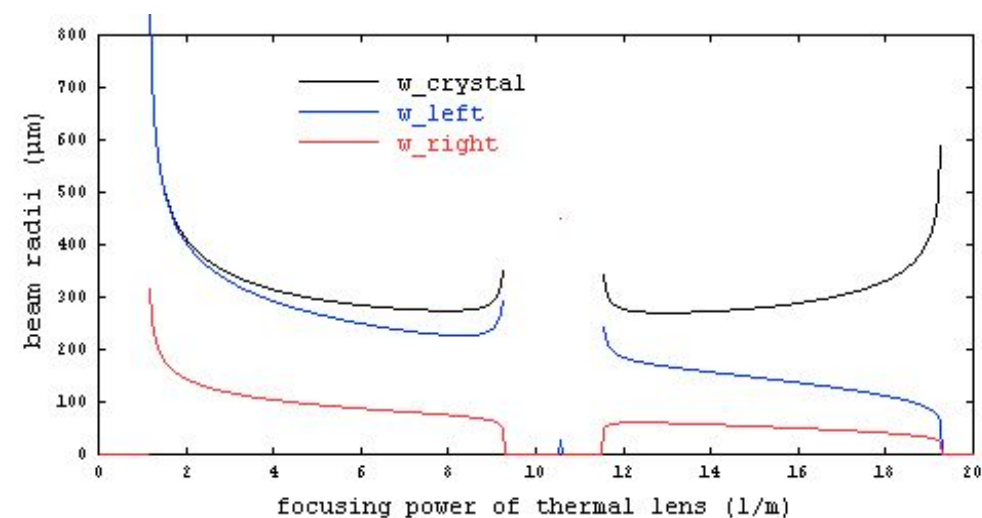
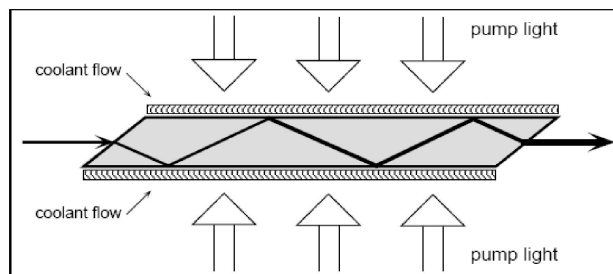
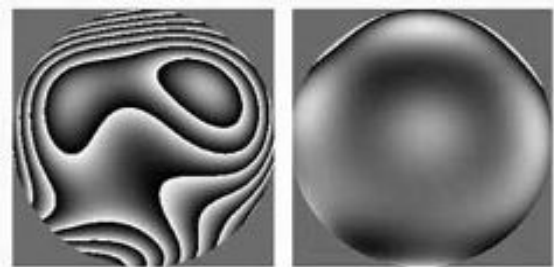
# Ключевые проблемы

**Огромные тепловыделения в активной среде требуют:**

- высокого КПД**
- организации эффективного теплоотвода**
- подавления и/или компенсации термооптических эффектов в активной среде**
- учета тепловых эффектов в других оптических элементах**

# Уменьшение тепловых эффектов

- Intelligent design of the geometry; pump, laser medium, resonator  
⇒ rod, slab, thin-disc, fibre geometry.
- Reduce the quantum defect.
- Use a brighter (longitudinal) pump and longer absorption length.
- Increase the thermal conductivity: cryogenic cooling (for crystals).
- Coherently add beams from several thermally isolated systems.
- “Point design” optimized for a given thermal lens (Inflexible, unable to correct higher order aberrations)
- Adaptive optics (complex, expensive).



# Полезные технологии. Адаптивная оптика

## **ДВА ВИДА АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ:**

**Нелинейная - ОВФ**

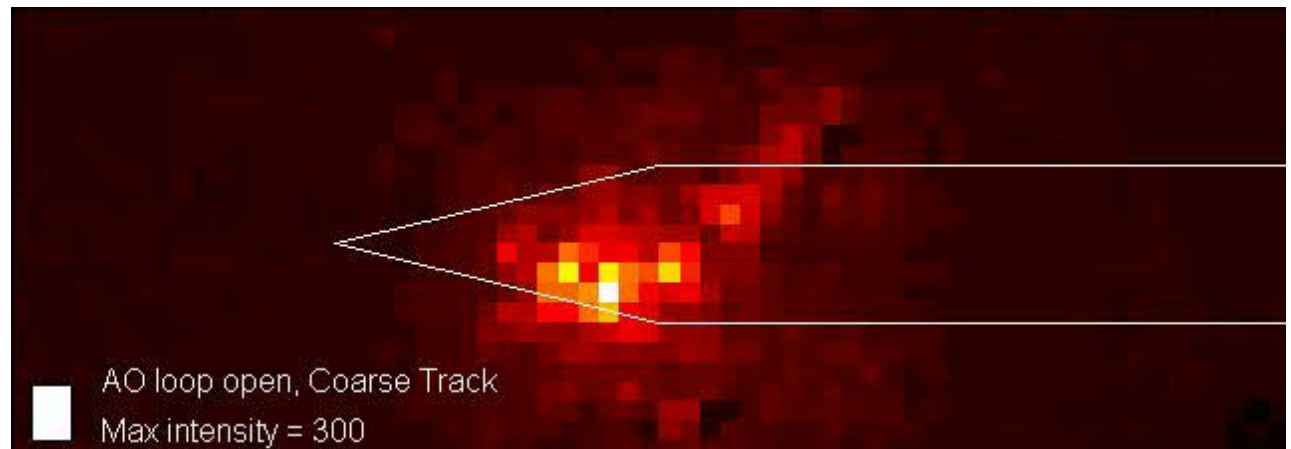
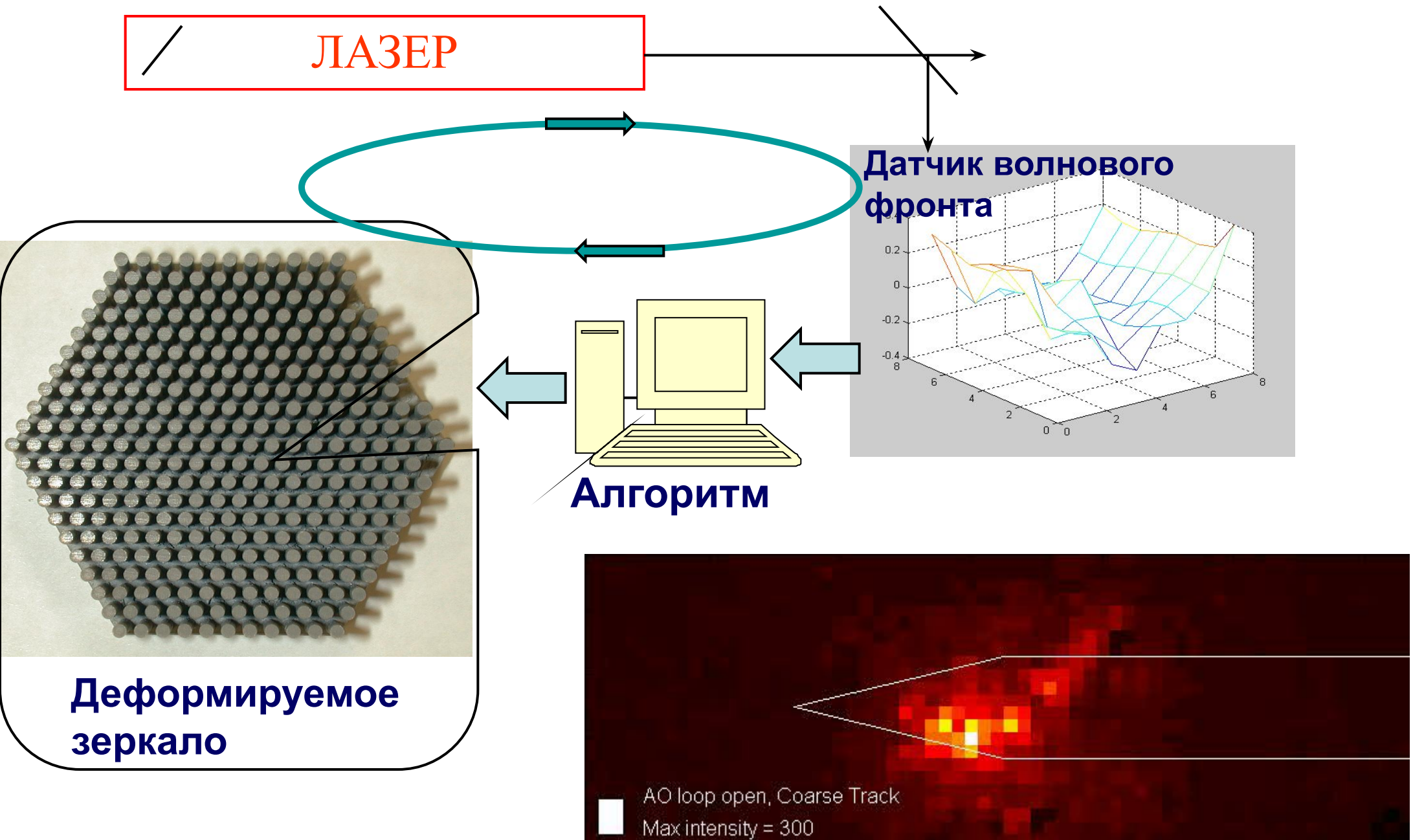
**Линейная - деформируемые зеркала**

## **ДВЕ ФУНКЦИИ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ:**

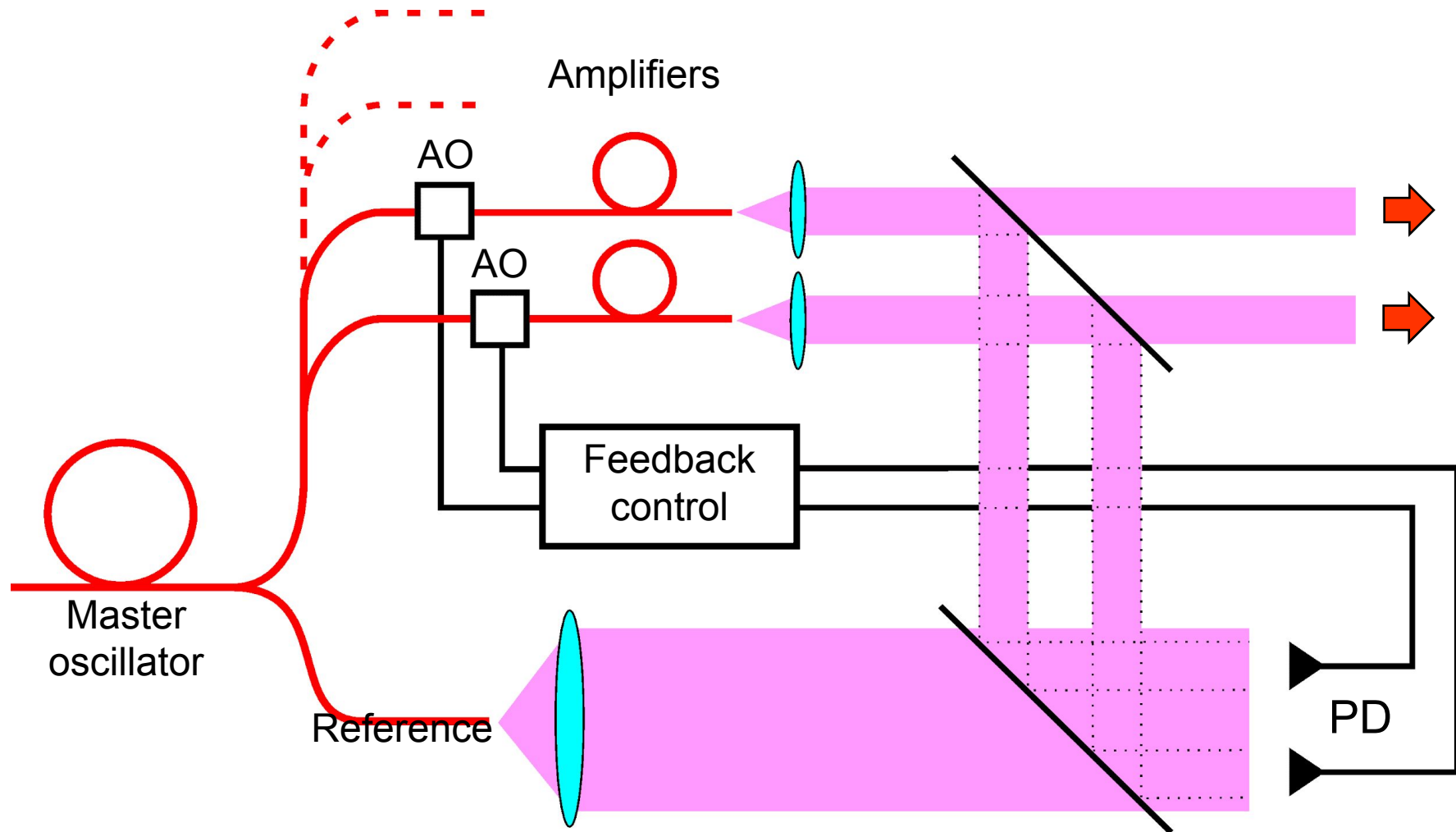
**Компенсация (тепловых) искажений внутри самого лазера**

**Компенсация искажений, вносимых атмосферой на трассе**

# Полезные технологии. Адаптивная оптика



# Полезные технологии. Суммирование каналов



Successfully tested with 10W Yb fibre amplifiers

S.J.Augst, T.Y.Fan, A.Sanchez Opt Letts 29, 474, 2004

# Полезные технологии. Суммирование каналов

## Методы:

- Нелинейная оптика
- Прямое измерение фазы и адаптивное управление
- Суммирование спектров на дифракционной решетке

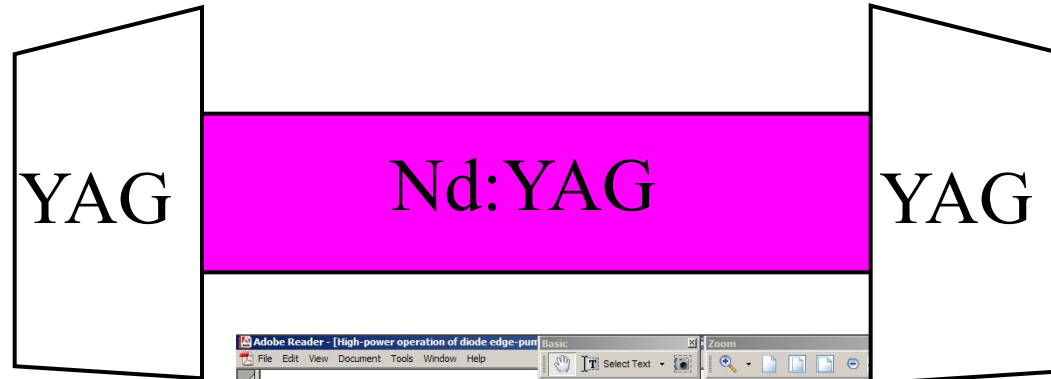
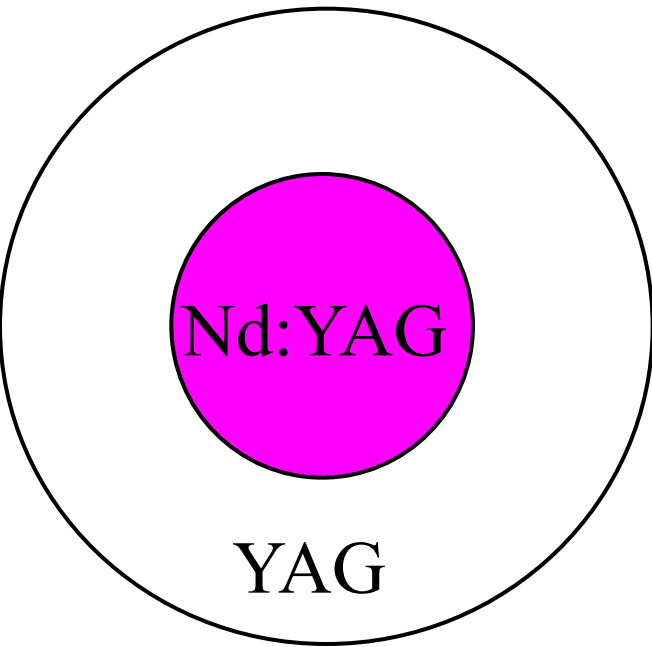
## Геометрия:

- Суммирование резонаторов
- Суммирование усилителей

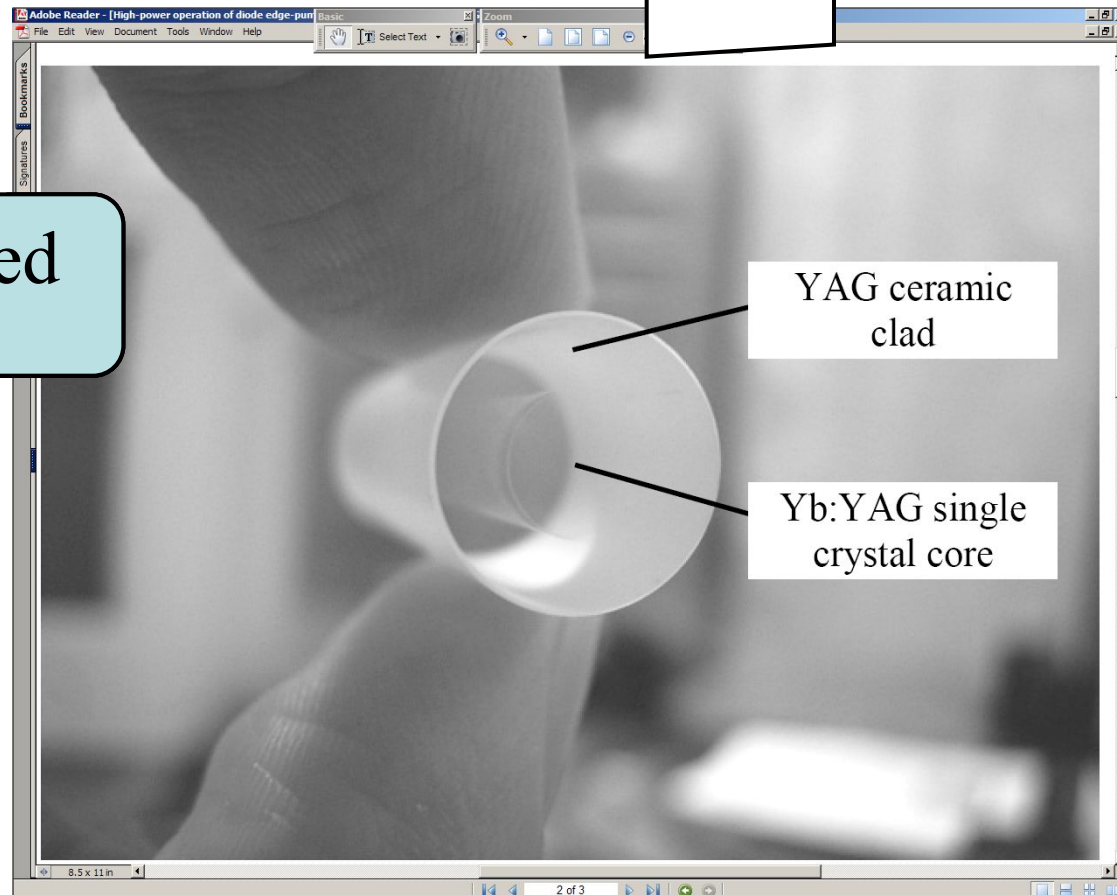
Пример суммирования двух  
волоконных лазеров прямым  
измерением фазы



# Полезные технологии. Композитные материалы



Diffusion bonded



# Полезные технологии. Охлаждение до 77К

Большая теплопроводность: YAG (10раз), GGG (6раз), сапфир (25раз)

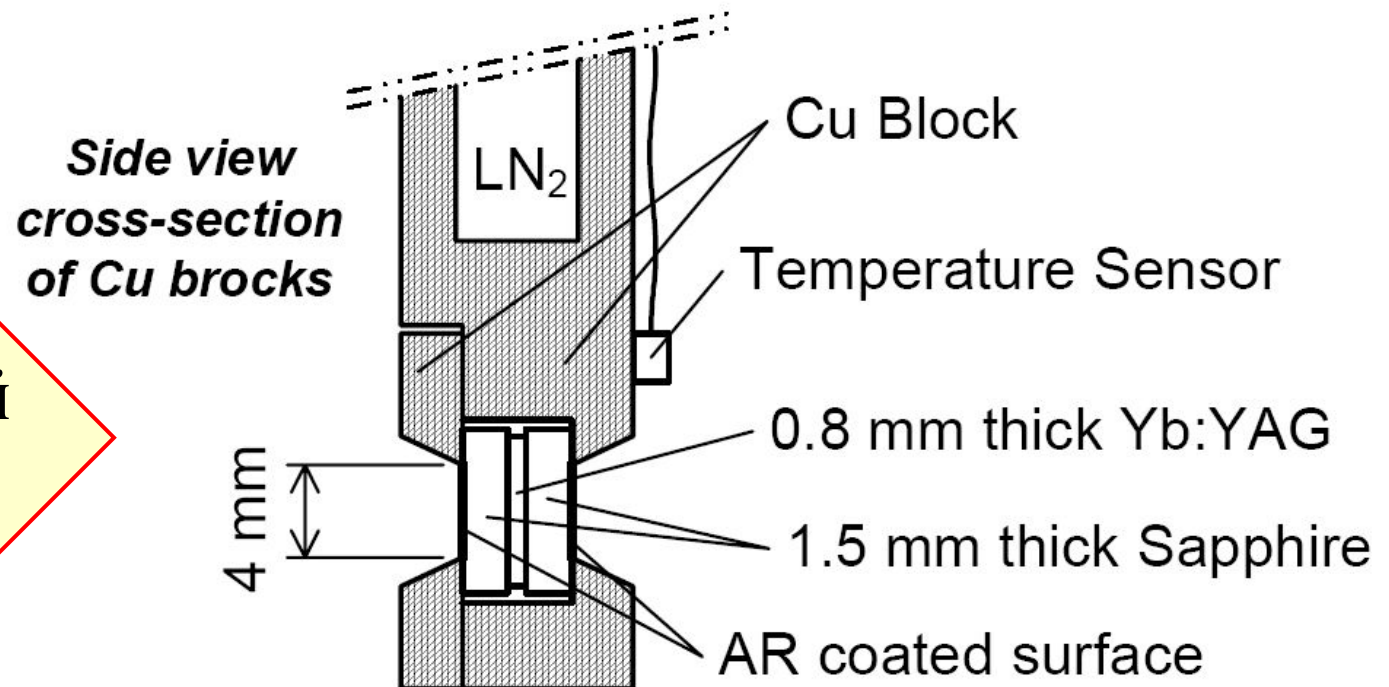
Меньше коэффициент линейного расширения

Меньше  $dn/dT$

Больше сечение перехода

Опустошение нижнего лазерного уровня в Yb

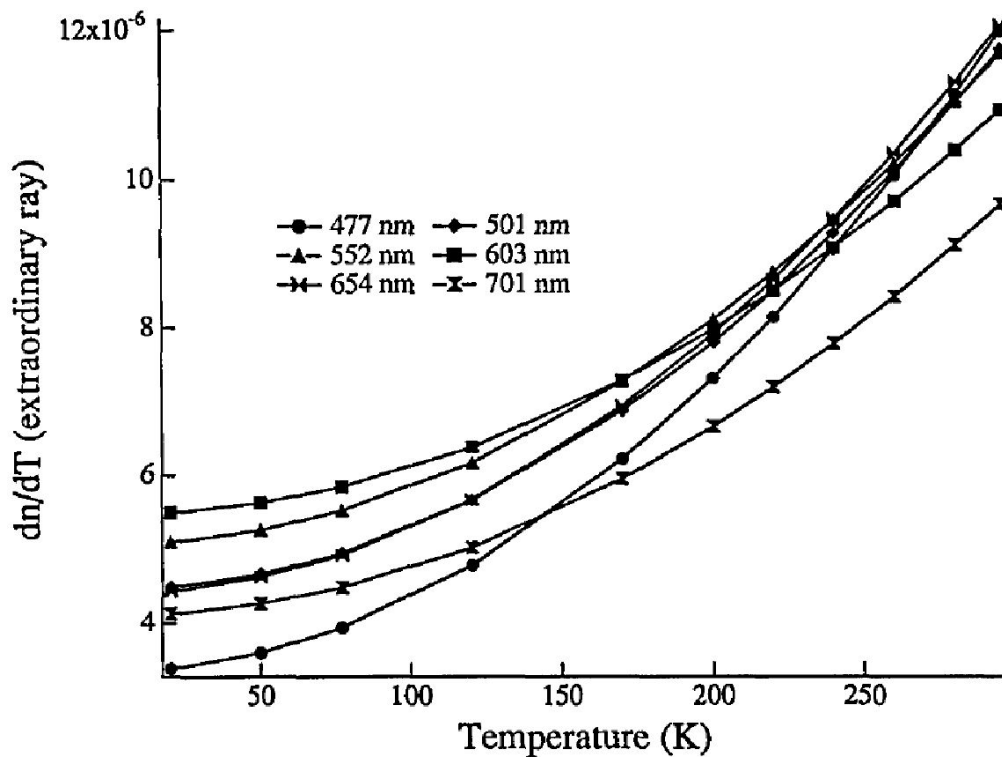
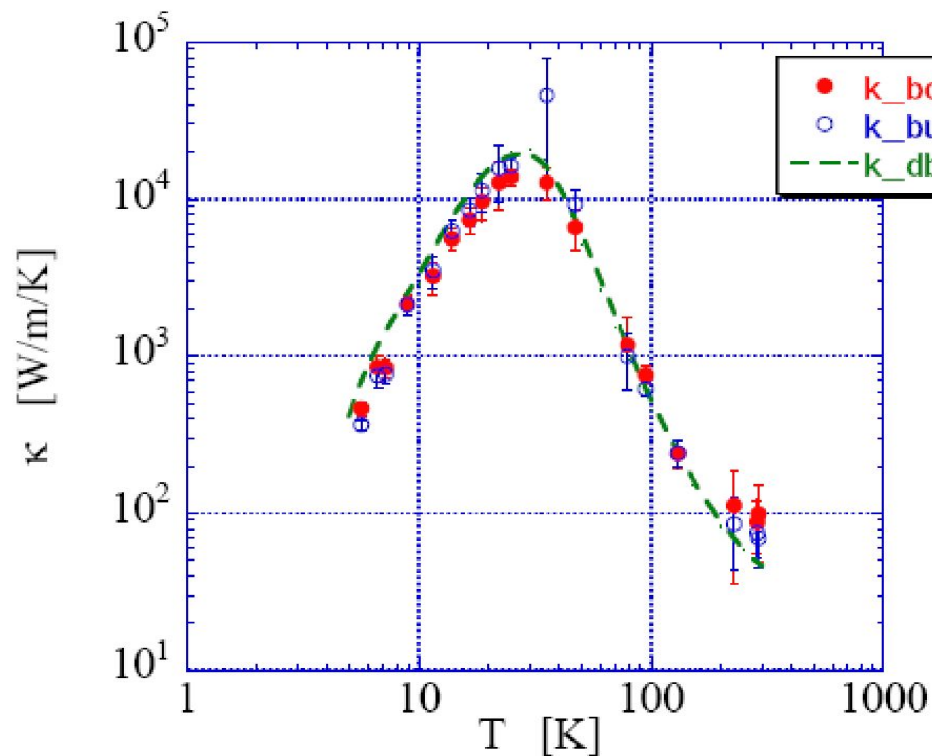
Пример с дисковой геометрией





# Полезные технологии. Охлаждение до 77K

## Свойства сапфира (с титаном):



T. Suzuki et. al., Frontiers Science Series No. 41 (FSS-41), ISSN 0915-8502

A. C. DeFranzo, B. G. Pazol, Applied Optics, **32**, pp. 2224-2234, 1993

# Тепловая линза в $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ при 77K

$$\frac{1}{f} = \frac{P_a}{\kappa A} \left[ \frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + \alpha C_{r,\phi} n^3 + \frac{\alpha r_o (n-1)}{L} \right]$$

$\kappa$ ,  $dn/dT$ , and  $\alpha$  depend on material temperature

Temperature	300 K	77 K
Thermal conductivity, $\kappa$ [W cm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	0.33	10
Thermal dependence on refractive index, $dn/dT$ [K <sup>-1</sup> ]	$1.28 \times 10^{-5}$	$0.19 \times 10^{-5}$
Thermal expansion coefficient, $\alpha$ [cm <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> ]	$5.0 \times 10^{-6}$	$0.34 \times 10^{-6}$

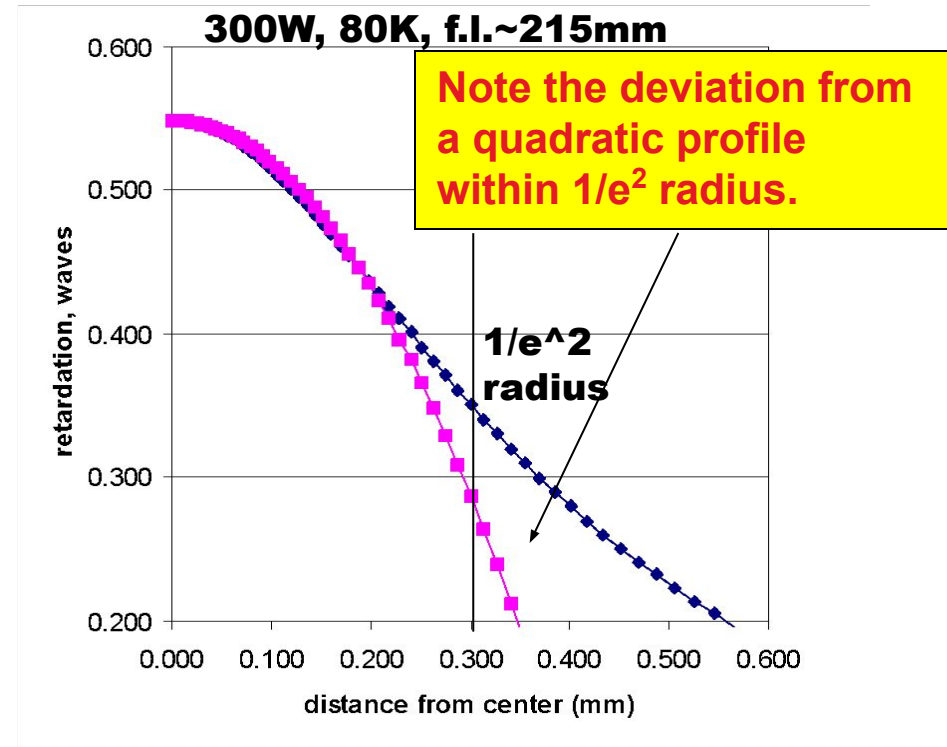
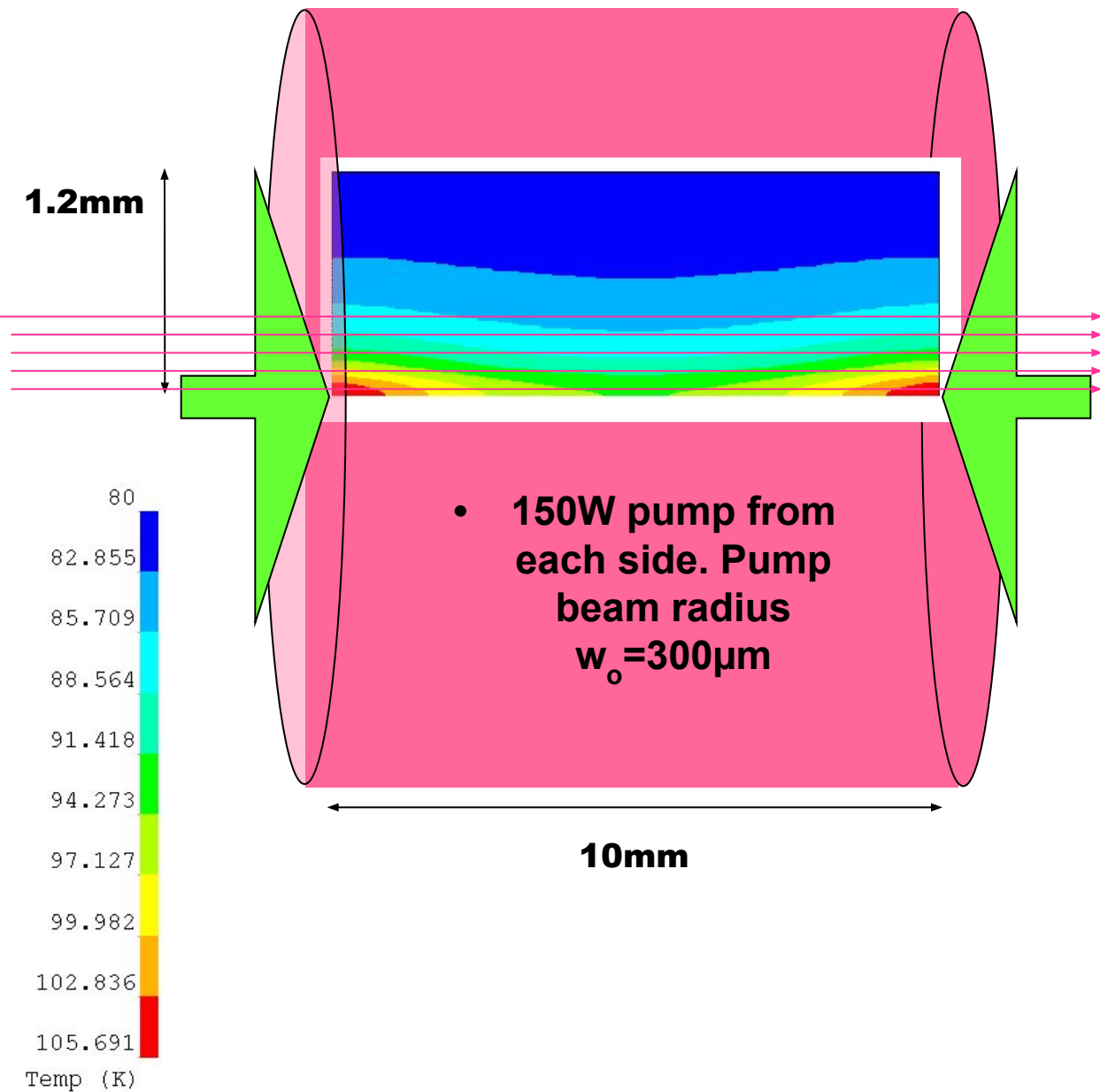
**30x higher**

**7x lower**

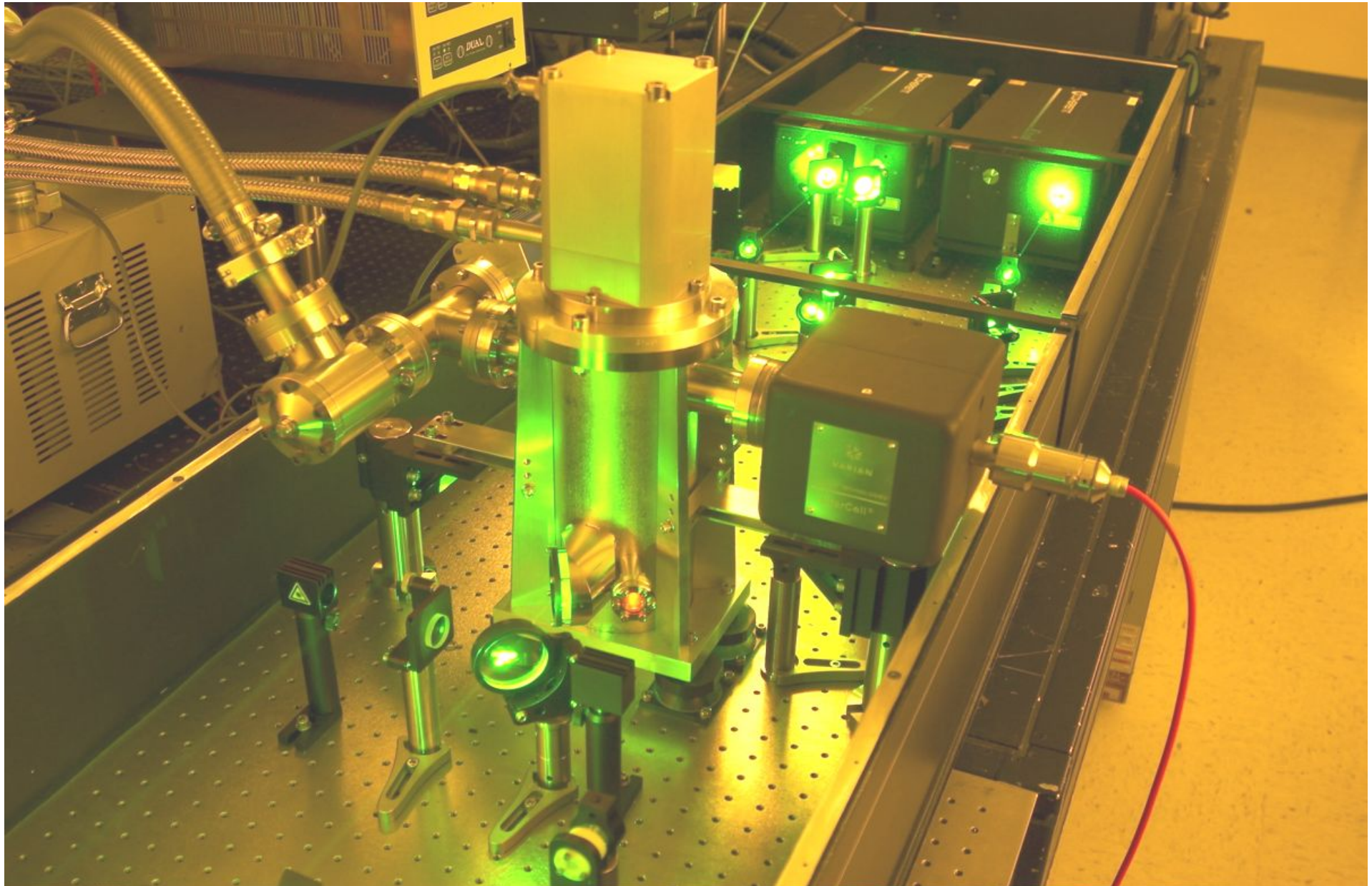
**14x lower**

For a given thermal lens value, the pump power can increase by a factor of **>200** at cryogenic temperatures!

# Thermal modeling of amplifier crystal at 80K



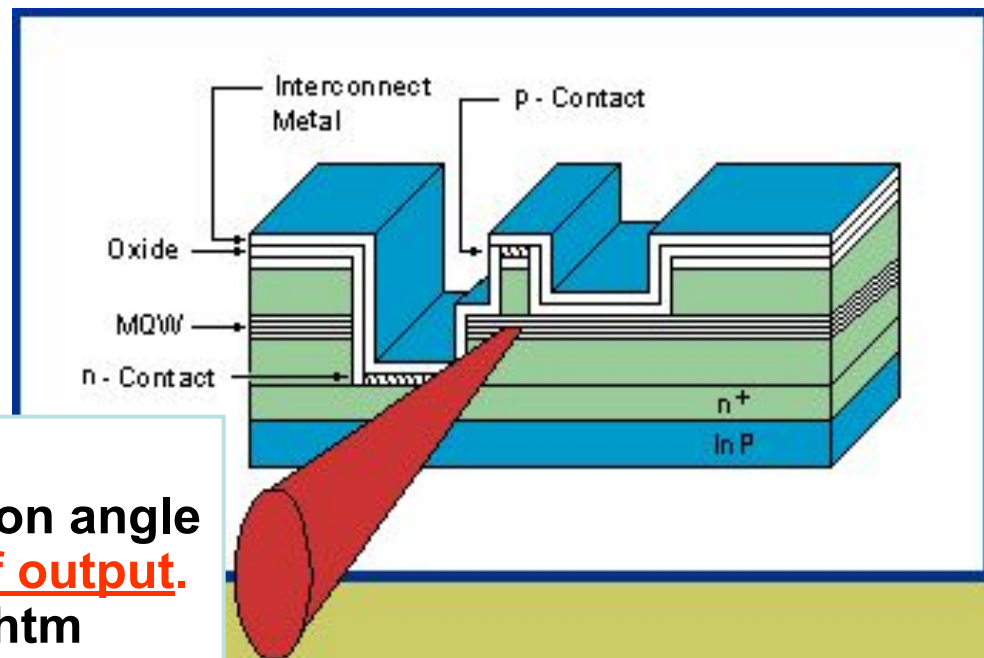
# Sample Commercial System: Legend-HE-Cryo



- Oscillator, stretcher, regen, cryo-cooled multipass amplifier, high power compressor.
- $>7\text{mJ}$  @  $1\text{kHz}$ ,  $<40\text{fs}$ ,  $<1\%$  RMS stability

# Накачка.

Сегодня диодная накачка – широко рекламируемый и продаваемый продукт



- **DOS** Decade Optical Systems, Inc.
- 720-bar QCW array: 1.7 mm pitch at 55° emission angle including fast axis collimation optics; 72 kW of output. [http://www.sslasers.com/Laser\\_Diode\\_Arrays.htm](http://www.sslasers.com/Laser_Diode_Arrays.htm)

Характерная цена 10-20\$/Вт, включая охлаждение

**НИКАКОЙ АЛЬТЕРНАТИВЫ ДИОДНОЙ НАКАЧКЕ НЕТ**

# Ион. (Yb или Nd)

	Nd:YAG	Yb:YAG
Длина волны накачки, нм	808	941
Сечение поглощения, $10^{-20} \text{ см}^2$	6.7	0.7
Ширина полосы накачки, нм	<4	18
Интенсивность насыщения накачки, $\text{кВт/см}^2$	12	28
Минимальная интенсивность накачки, $\text{кВт/см}^2$	0	2.8
Длина волны усиления, нм	1064	1030
Сечение усиления, $10^{-20} \text{ см}^2$	2.8	2.1
Ширина полосы усиления, нм	0.6	6
Интенсивность насыщения усиления, $\text{кВт/см}^2$	2.6	9.5
Энергия насыщения усиления, Дж/см <sup>2</sup>	0.6	9.0
Время жизни верхнего уровня, мкс	250	970
Дефект кванта	0.24	0.11
Энергия тепловыделения, $\text{Дж/фотон/hv}$	0.37	0.11
Плотность тепловыделения при усилении $0.05 \text{ см}^{-1}$ , $\text{Вт/см}^3$	51	55

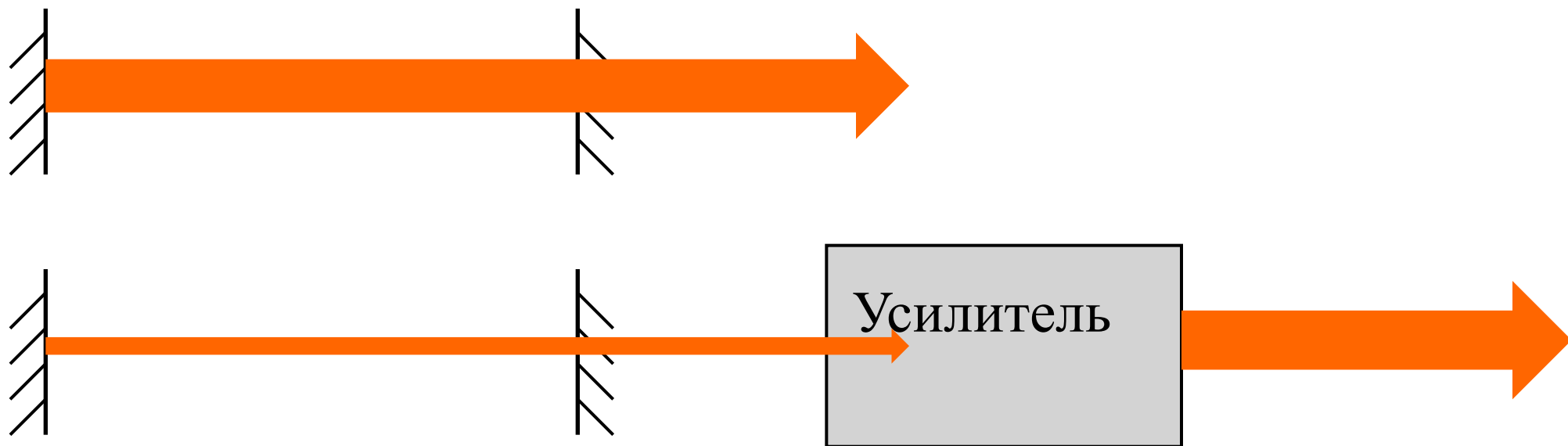
Преимущества Yb явно превосходят его недостатки, хотя на сегодняшний день лазеры на Nd более бесспорно технологически

Nd<sup>3+</sup>

Yb<sup>3+</sup>

} 3кТ при 300К

## Оптическая схема. С усилителем или без?



**Для лазерного драйвера для УТС выбор однозначен**

**Для лазерного оружия – конкуренция между двумя архитектурами в полном разгаре**

# Выбор матрицы.

**S-FAB** или **стекло**

В настоящее время на УТС, но в будущем их могут вытеснить и оттуда

**Для волоконных лазеров :**

**Кварц**

*кристаллические* **волокна ?!**

**Для НЕволоконных лазеров 3 кандидата:**

**YAG** - теплопроводность

**GGG** – апертура, качество

**Керамика** – теплопроводность, апертура, качество .....



# Геометрия активной среды. 5 вариантов.

Ключевой вопрос – одновременно организовать потоки  
накачки, генерации и охлаждения

стержень

слэб

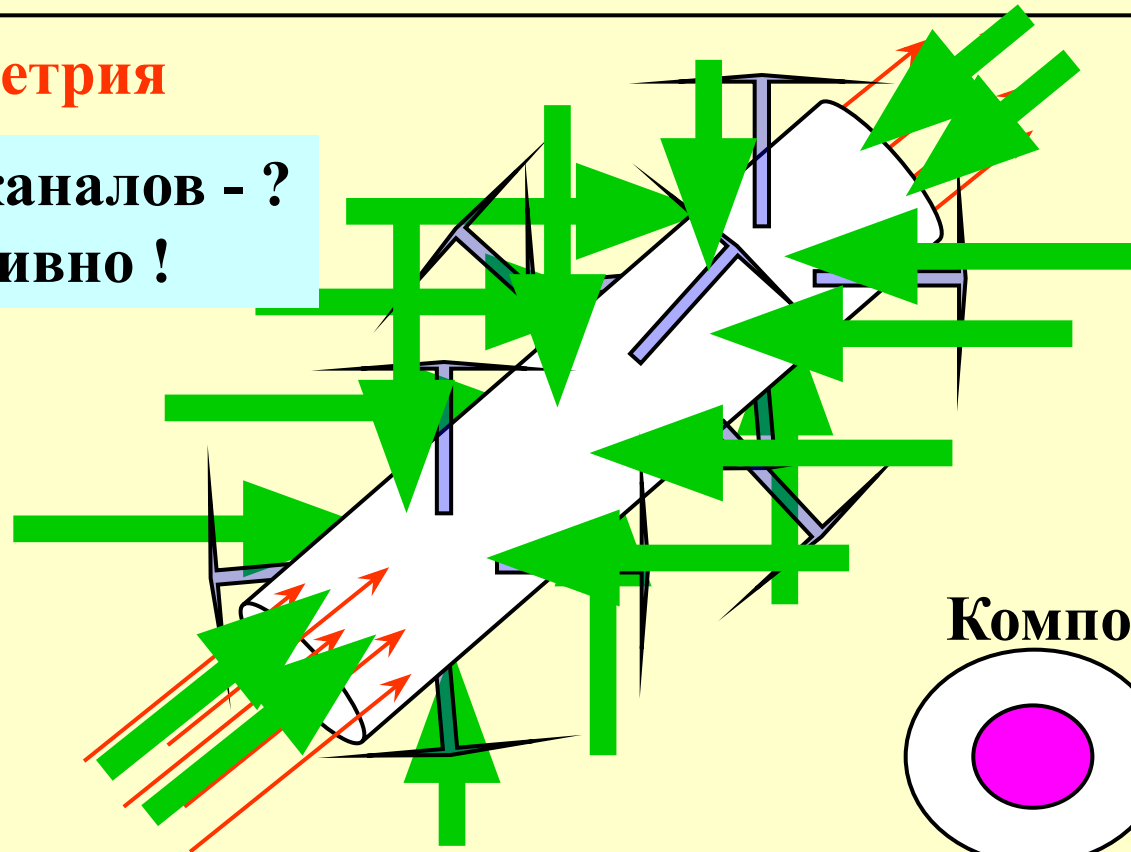
диск

активное зеркало

волокно

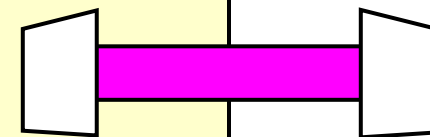
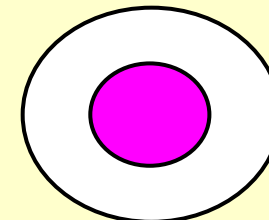
2D геометрия

Суммирование каналов - ?  
77К – перспективно !



YAG  
GGG  
керамика

Композитные среды



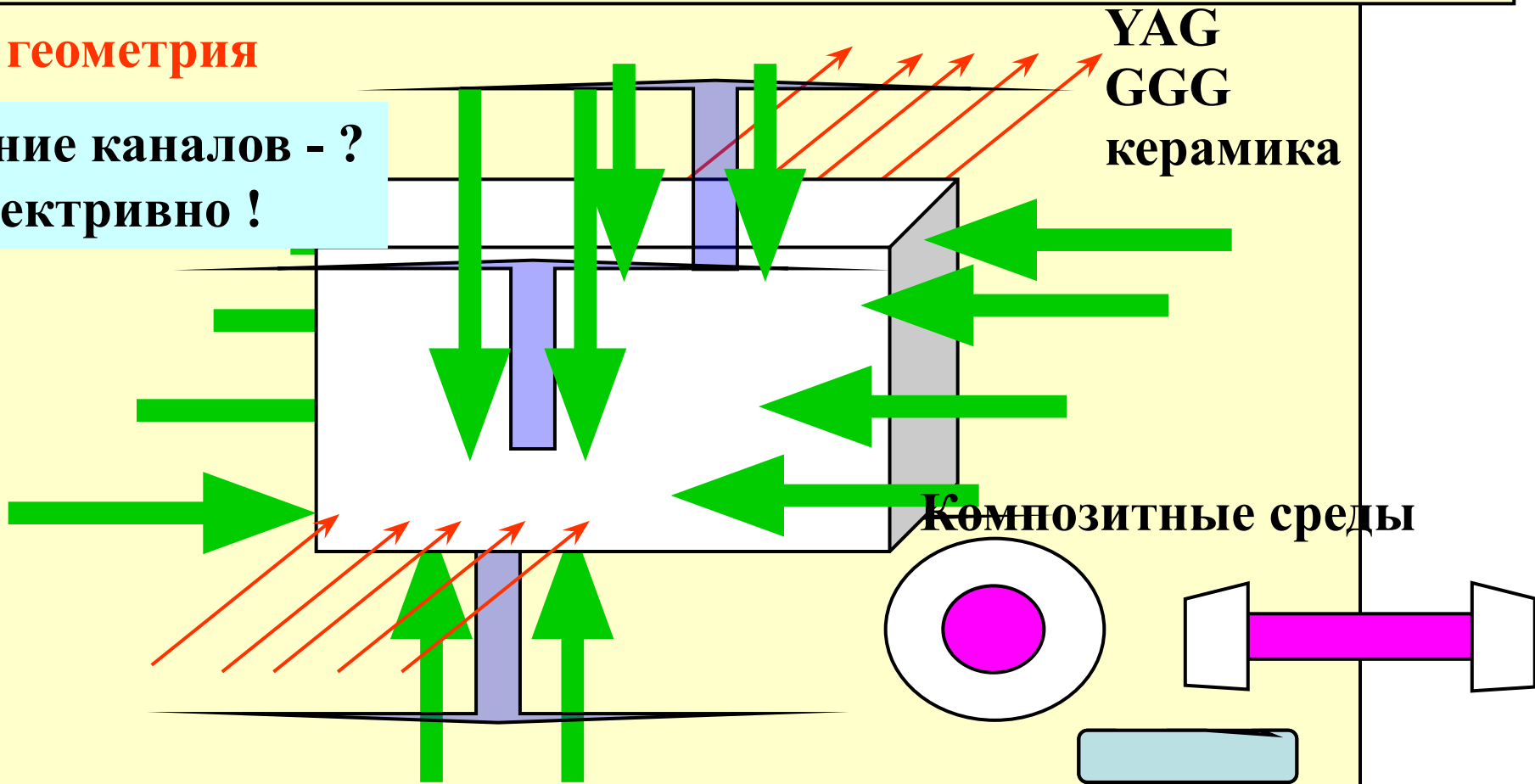
# Геометрия активной среды. 5 вариантов.

Ключевой вопрос – одновременно организовать потоки  
накачки, генерации и охлаждения

стержень      слэб      диск      активное зеркало      волокно

2D геометрия

Суммирование каналов - ?  
77К – перспективно !



# Геометрия активной среды. 5 вариантов.

Ключевой вопрос – одновременно организовать потоки  
накачки, генерации и охлаждения

стержень

слэб

ДИСК

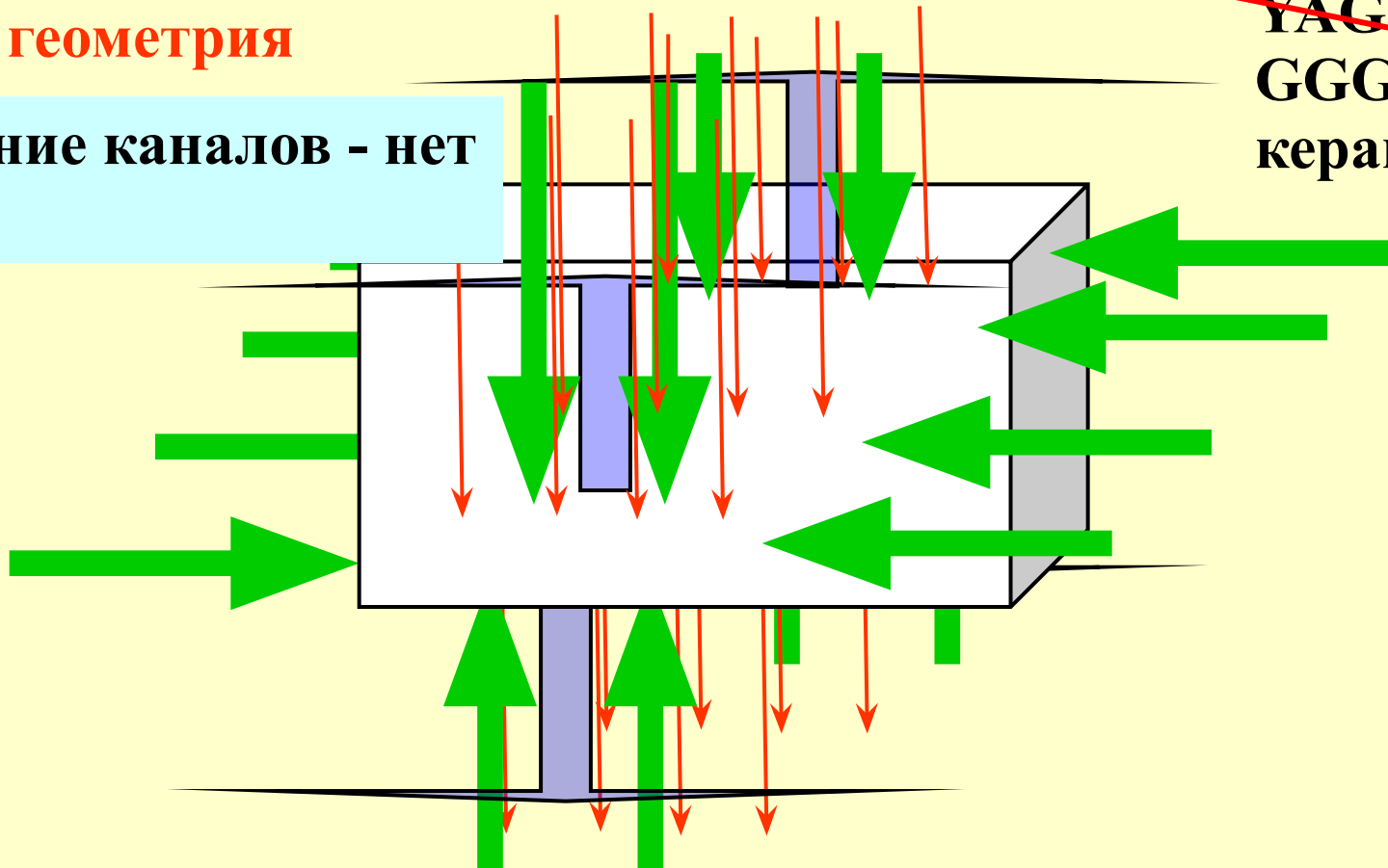
активное зеркало

ВОЛОКНО

2D геометрия

Суммирование каналов - нет  
77К – ?

~~YAG~~  
GGG  
керамика



# Геометрия активной среды. 5 вариантов.

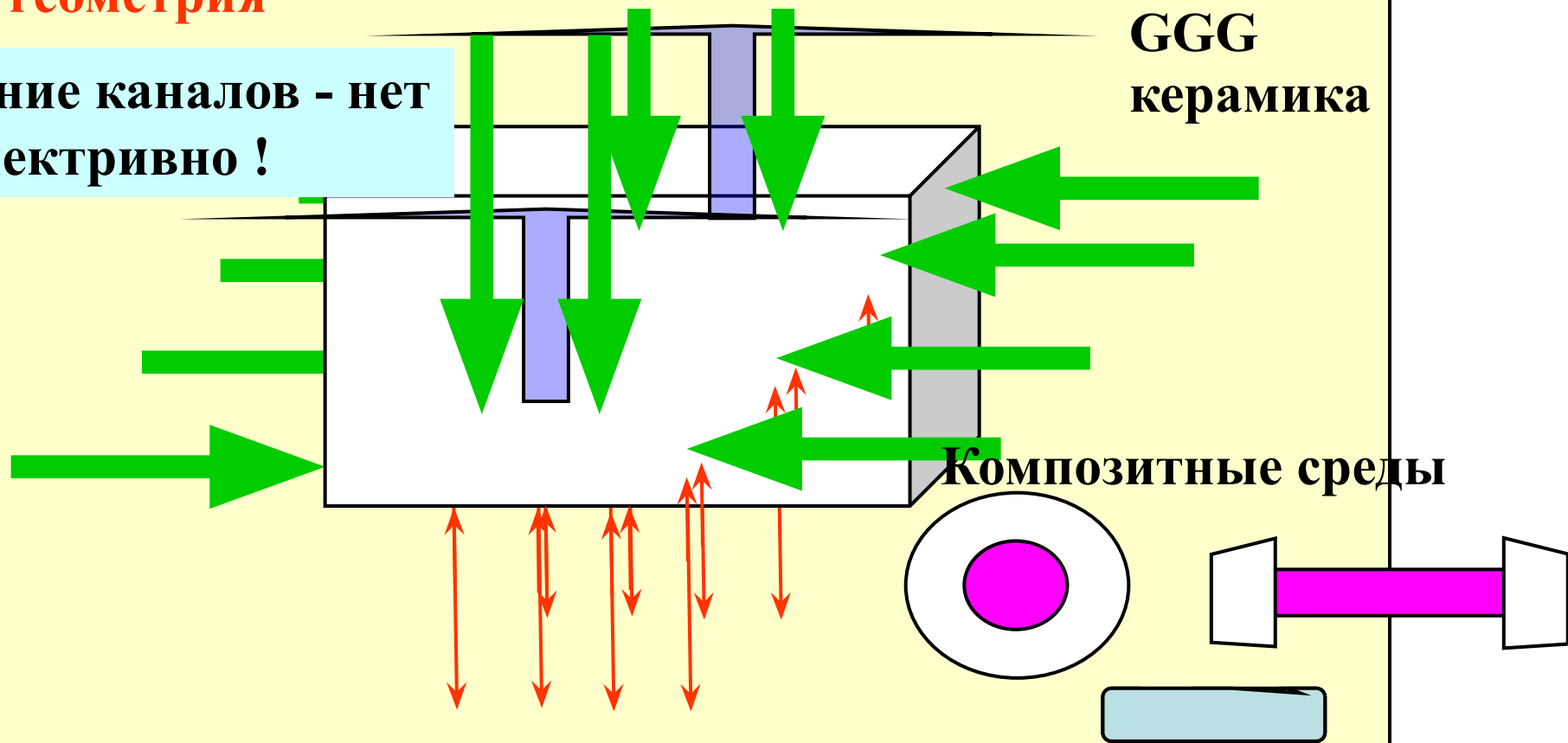
Ключевой вопрос – одновременно организовать потоки  
накачки, генерации и охлаждения

стержень      слэб      диск      активное зеркало      волокно

3D геометрия

Суммирование каналов - нет  
77К – перспективно !

YAG  
GGG  
керамика



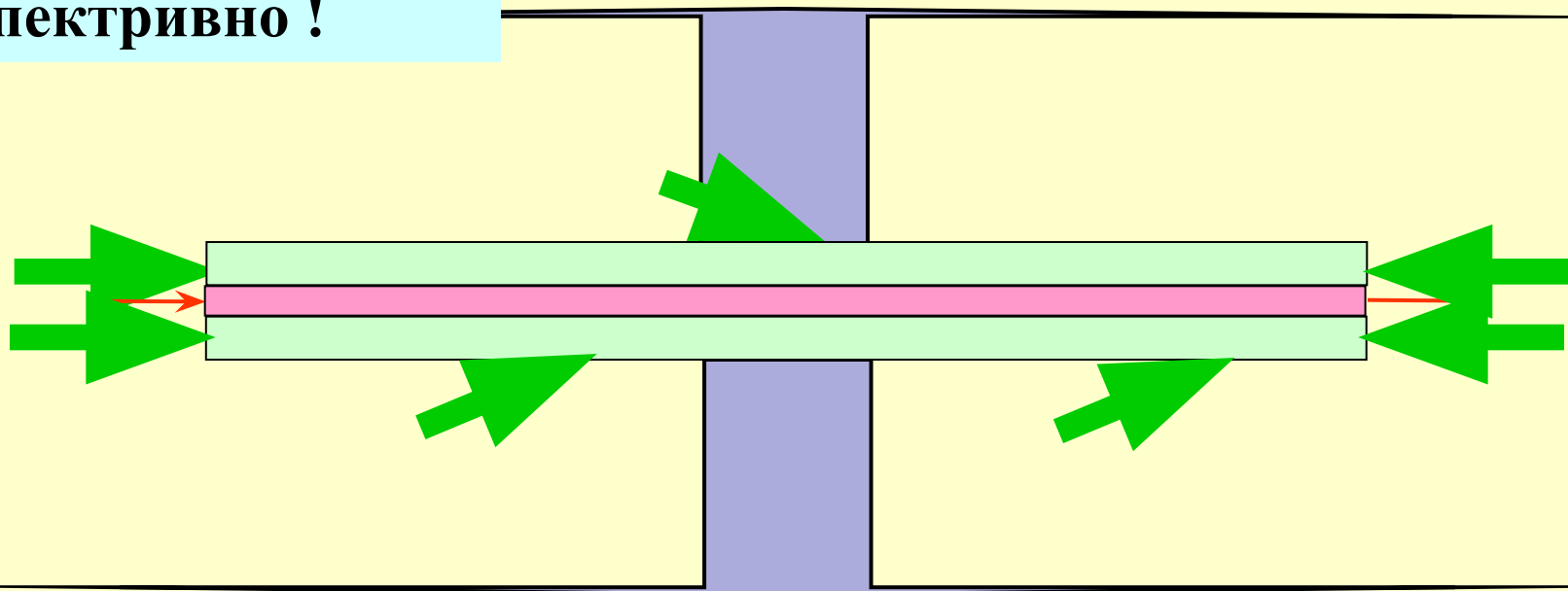
# Геометрия активной среды. 5 вариантов.

Ключевой вопрос – одновременно организовать потоки  
накачки, генерации и охлаждения

стержень      слэб      диск      активное зеркало      ВОЛОКНО

2D геометрия

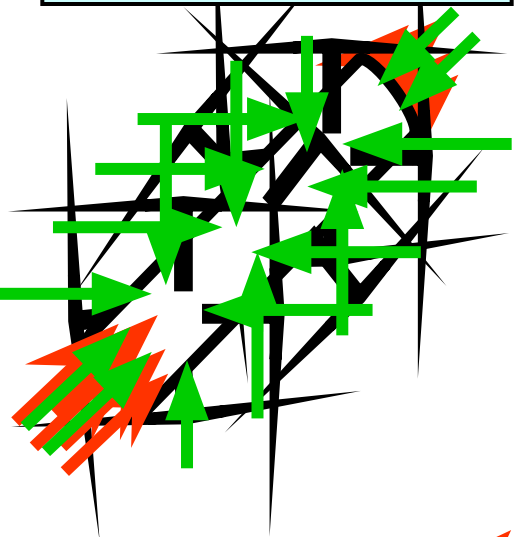
Суммирование каналов - да  
77К – перспективно !



# Геометрия активной среды.

300 Вт поляр. (2005)  
1.4 кВт неполяр. (2004)

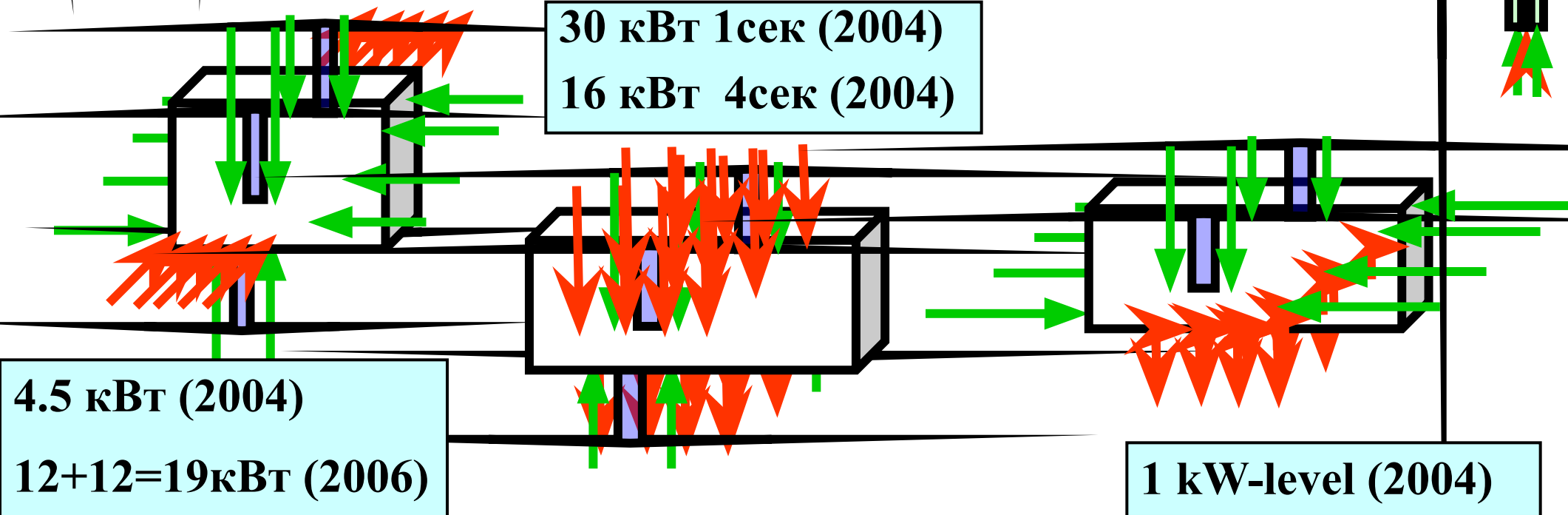
2.65 кВт (2002)



Во всех геометриях  
продемонстрирована мощность  
киловаттного уровня.  
Перспективы достичь 100кВт  
примерно одинаковы.

30 кВт 1сек (2004)

16 кВт 4сек (2004)

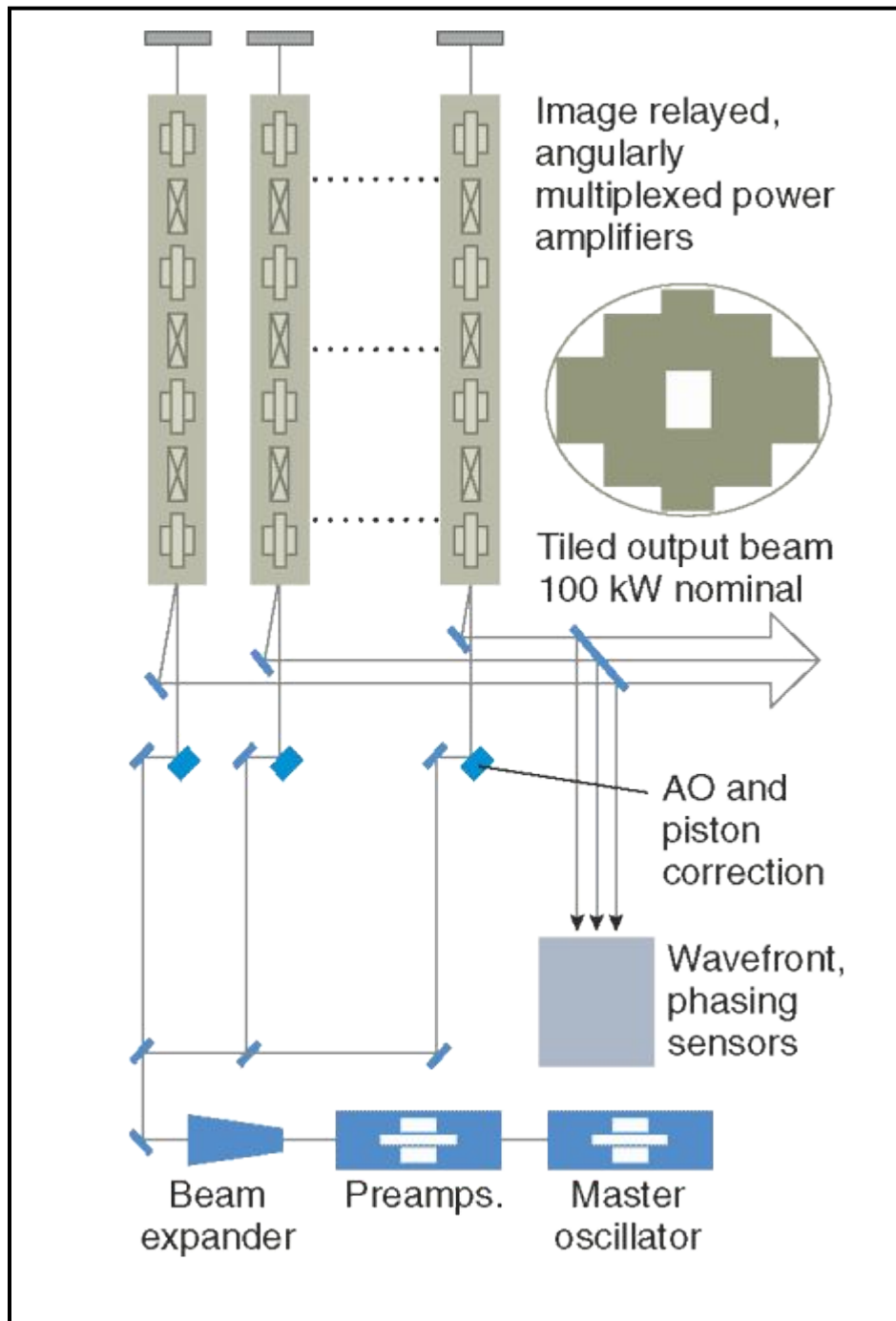


4.5 кВт (2004)

12+12=19кВт (2006)

1 kW-level (2004)

# Обзор действующих проектов. Northrop Grumman



**Nd**

**Слэбы**

**Генератор - усилитель**

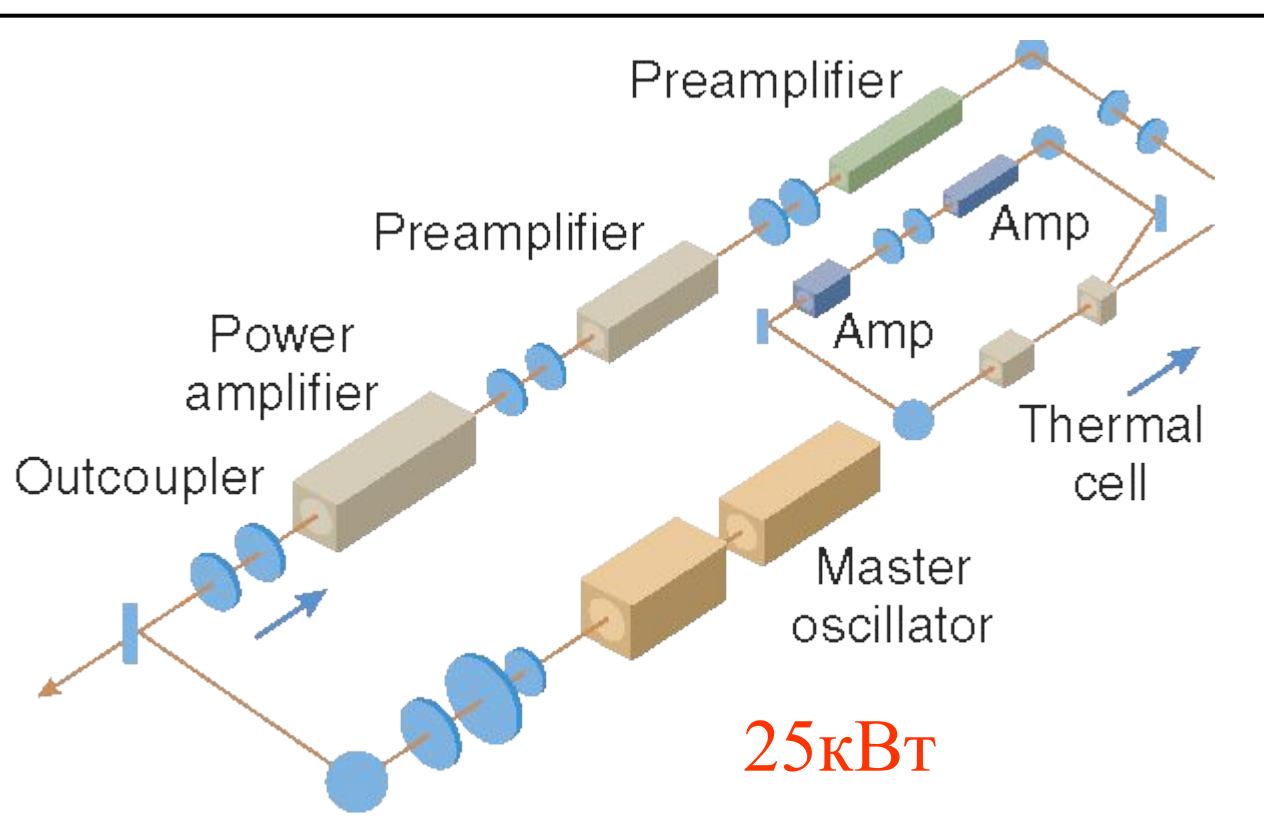
**8 каналов по 12.5kW**

**4 слэба в канале**

**Суммирование – прямое измерение**

**Май 2004 – 4.5кВт с одного слэба**

# Обзор действующих проектов. Raytheon



**Yb**

**YAG**

**Слэбы**

**Генератор - усилитель**

**ОВФ – тепловая  
нелинейность**

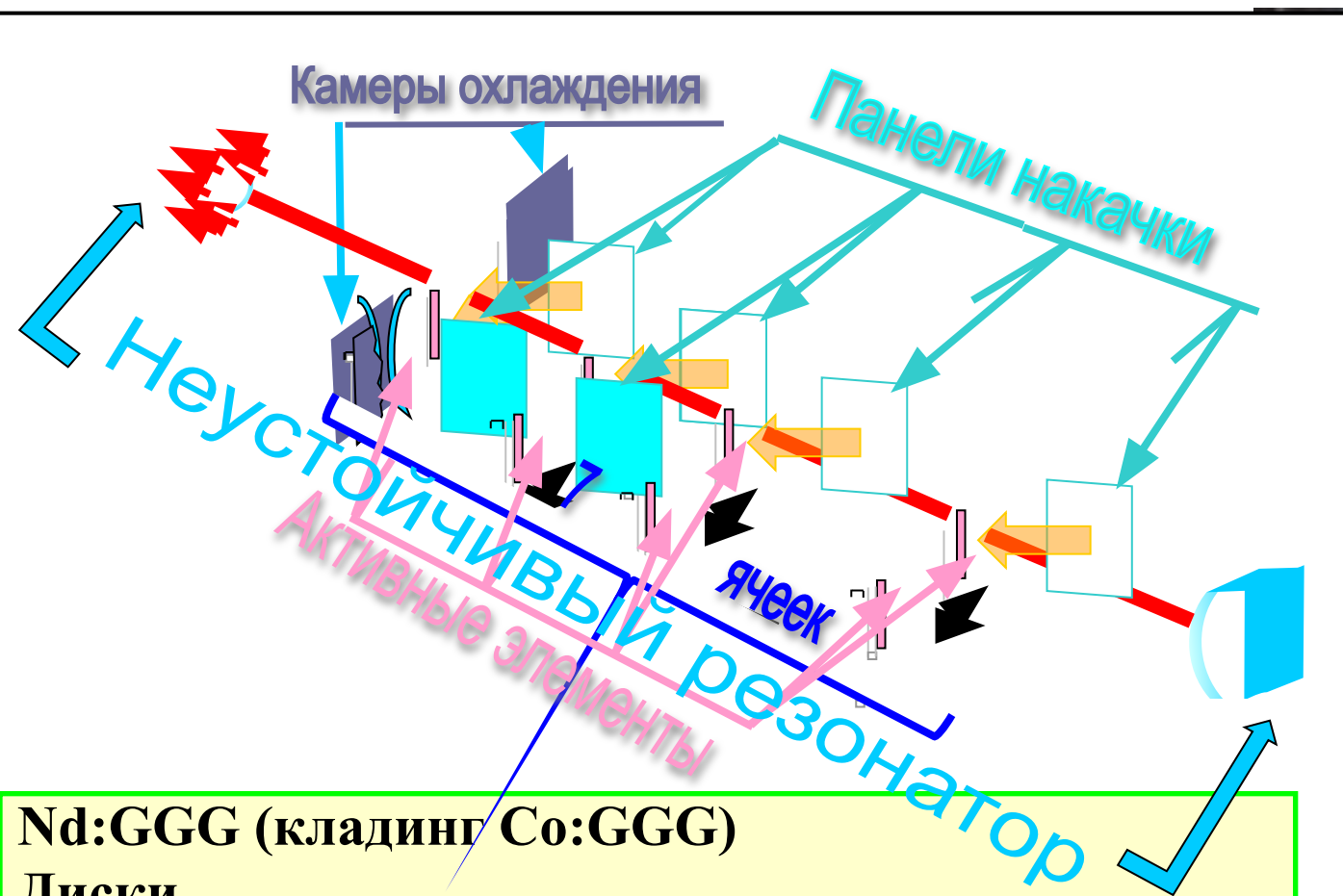
**1 канал 25кВт**

**+ 1-2 усилителя -100кВт**

**2002 – 2.65 кВт (стержни)**



# Обзор действующих проектов. Ливермор (NCL)



**Nd:GGG (клатинг Co:GGG)**

Диски

Генератор

Деформируемое зеркало

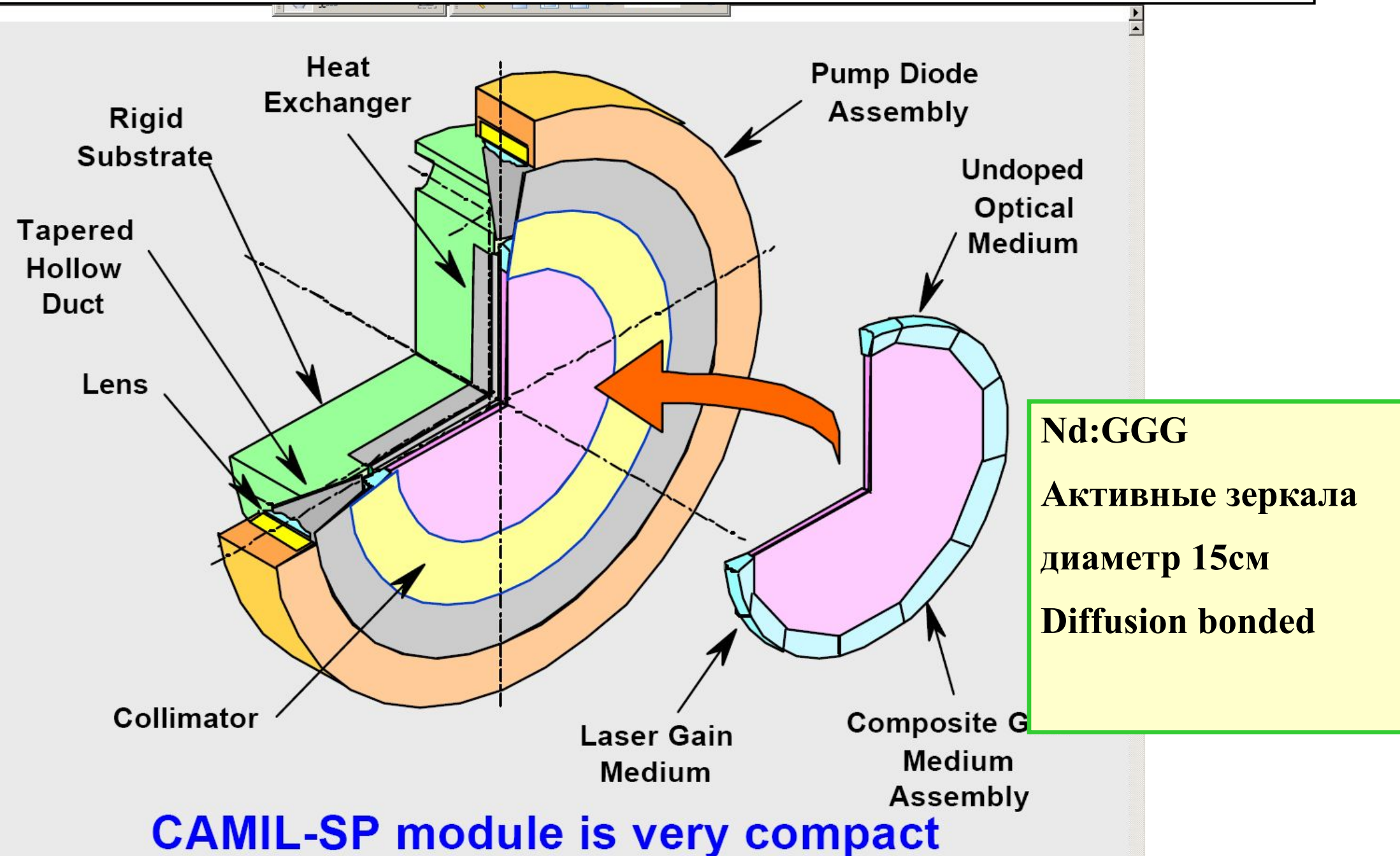
9 дисков (с накоплением тепла) 14x14см -100кВт

Май 2004, 3 диска: 30кВт (1сеунда)

10кВт (4 секунды)

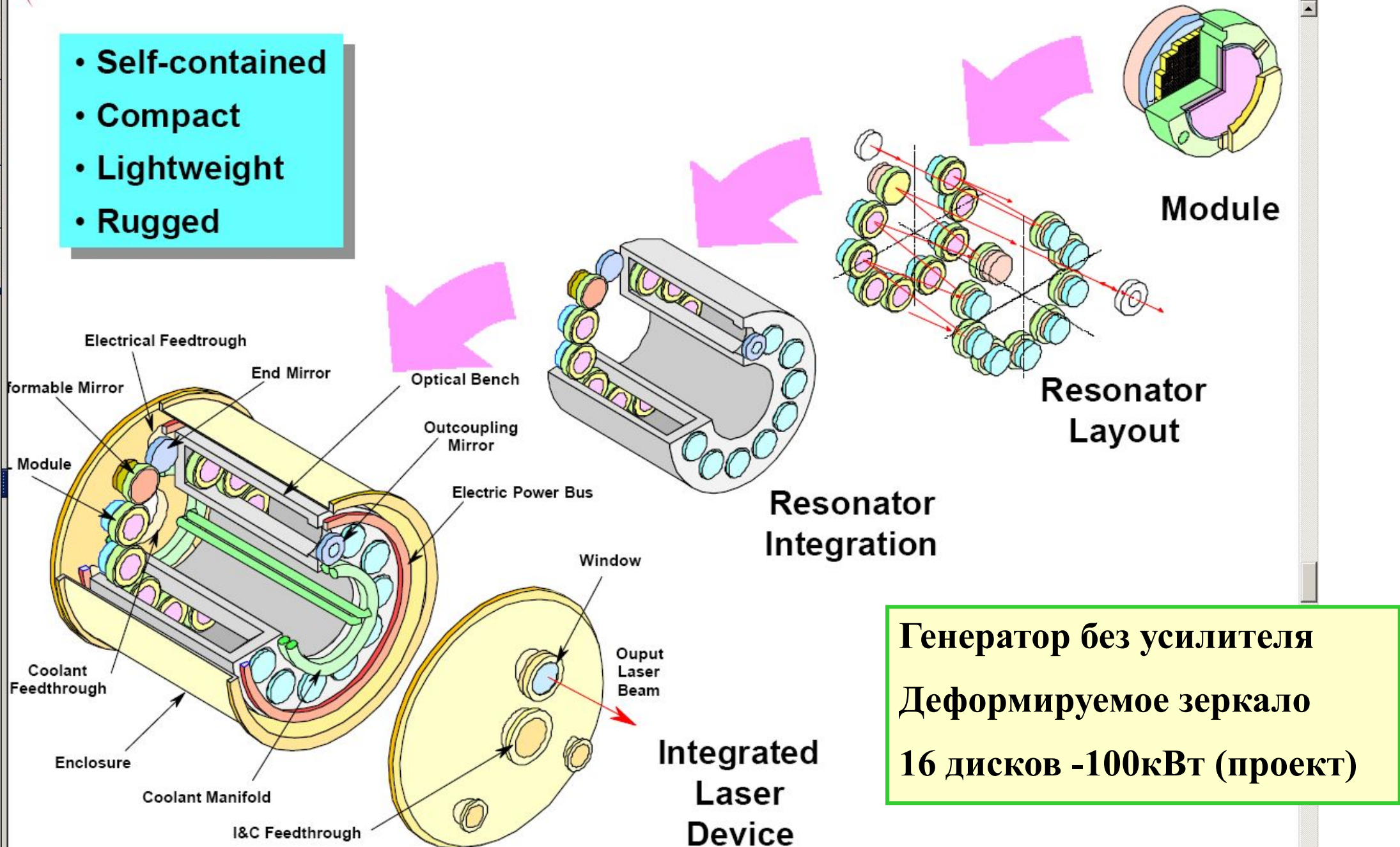


# Обзор действующих проектов. **Boeing.**



# Обзор действующих проектов. **Boeing.**

- Self-contained
- Compact
- Lightweight
- Rugged



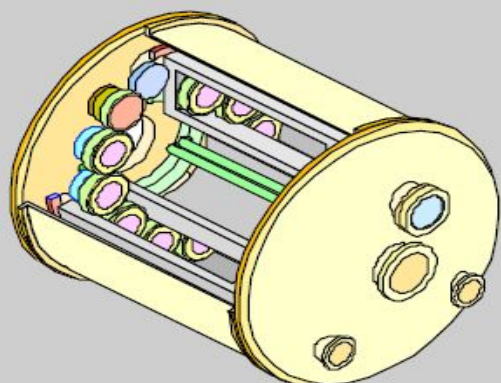
# Обзор действующих проектов. Boeing.

## Size & Weight Scaling Model

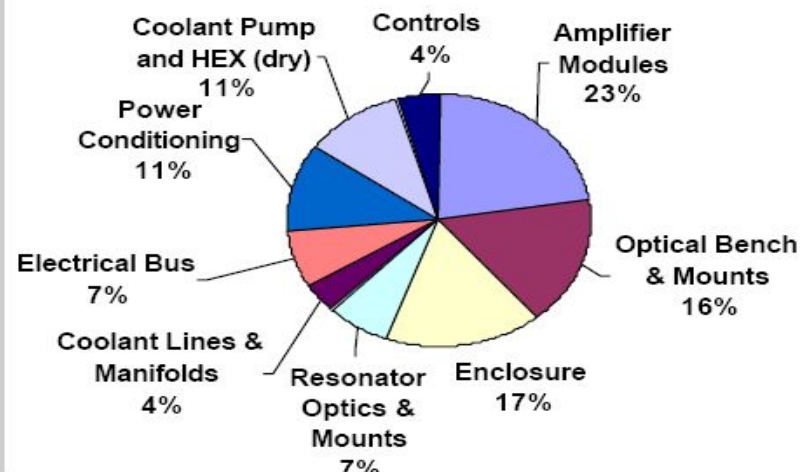
Point design for a 100 kW CAMIL System

CAMIL

L&EOS

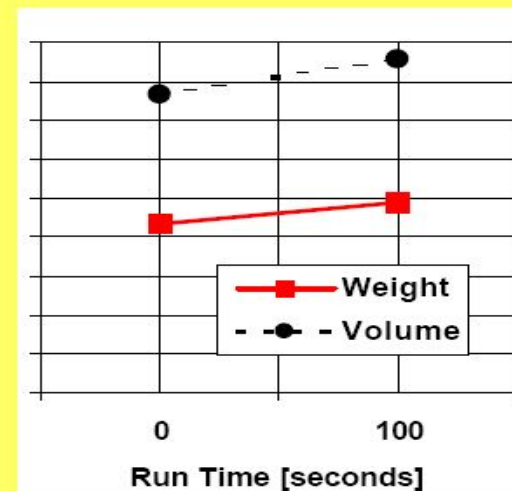
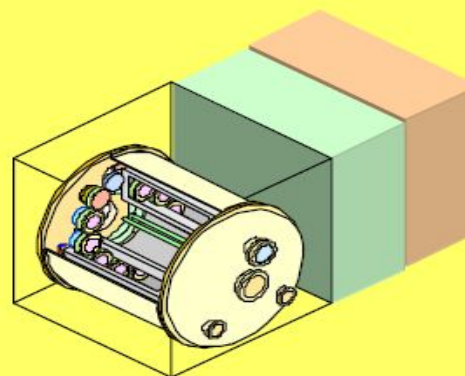
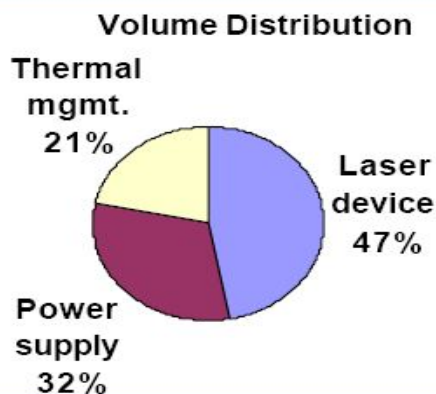


**Laser Device**  
 15 cm Ø Nd:GGG disks,  
 $\eta_{e-o} = 20\%$ ,  
 $\sigma_{P,w} = 172 \text{ W/kg}$ ,  
 $\sigma_{P,v} = 68 \text{ W/liter}$



## Laser System (w/o BCS)

100 sec (up to continuous) firing with a 30 minute recharge



# Обзор действующих проектов. **Boeing.**

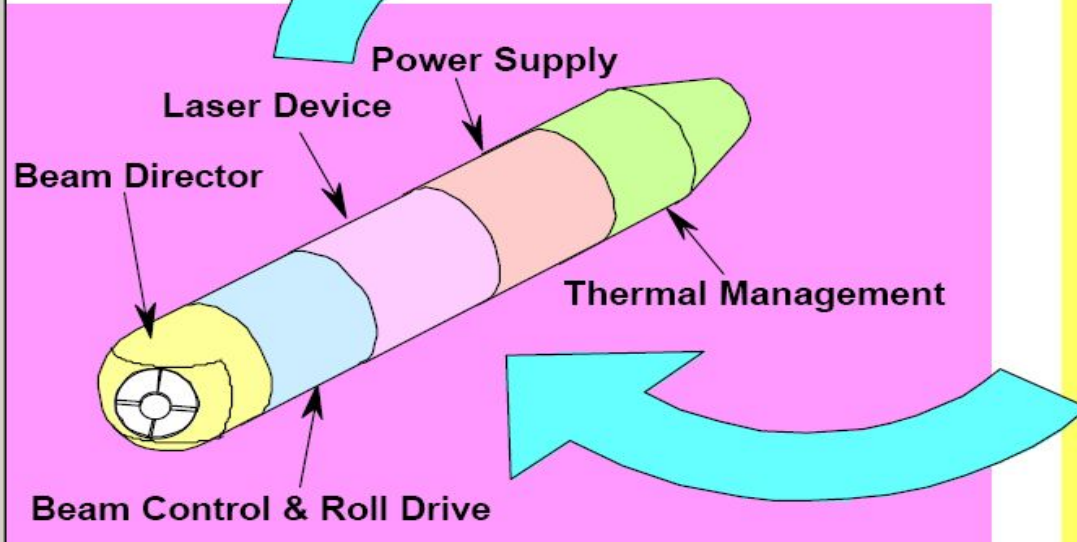
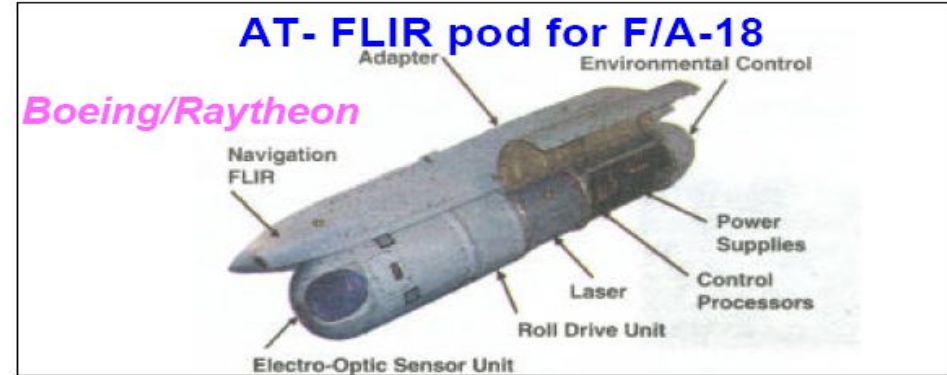
SL

CAMIL

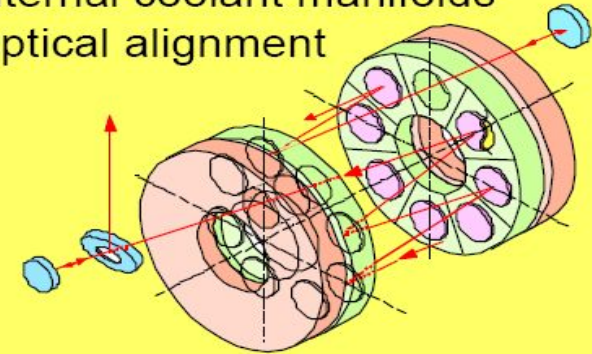
## SSHEL Pod for Tactical Aircraft

L&EOS

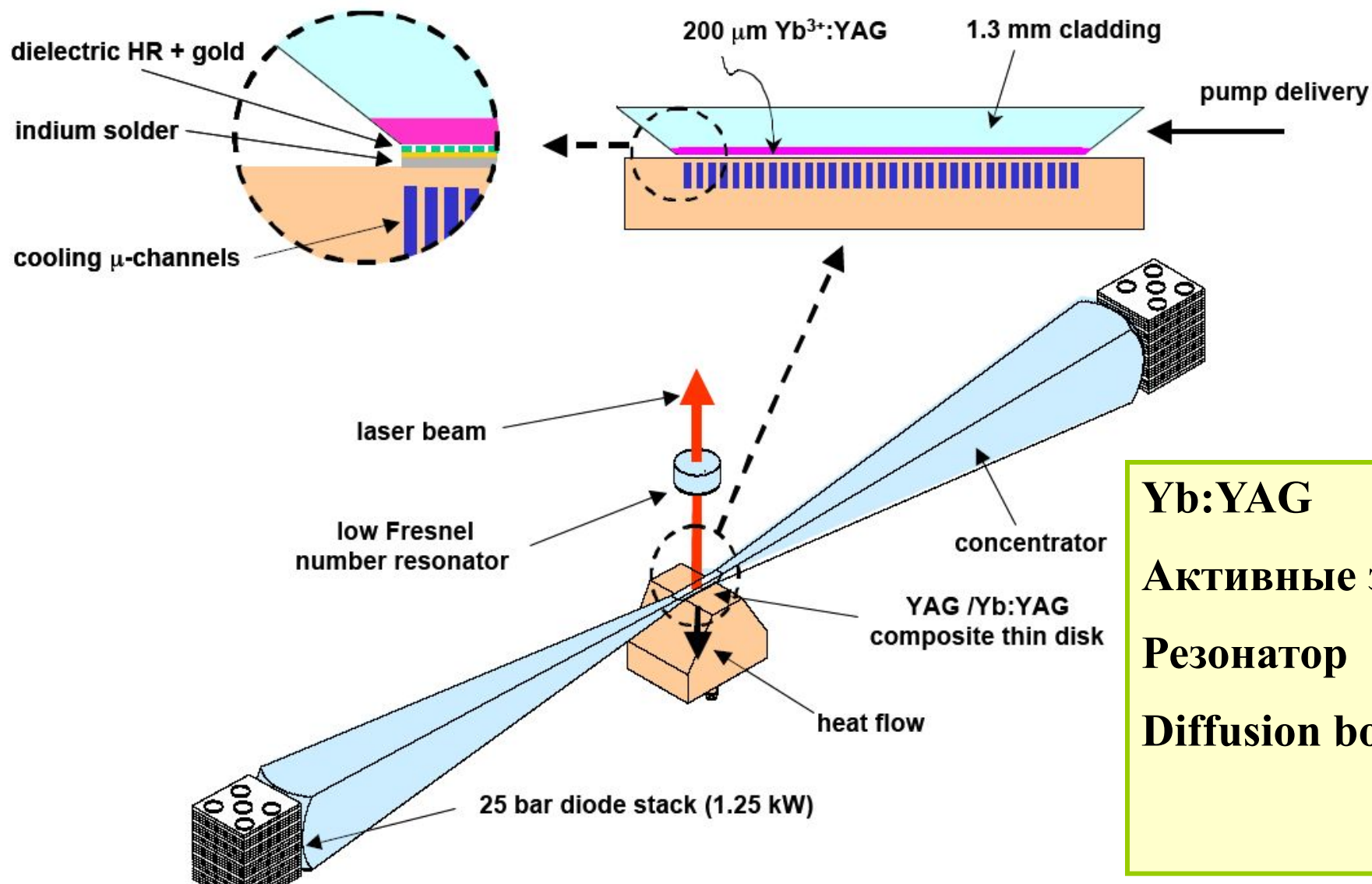
HEL integration into TAC could be in a form of a pod that could be shared by many different AC  
Weapon commonality would increase applications and reduce cost of deployment



- CAMIL with multiple laser disks placed on a common substrate
  - Internal coolant manifolds
  - Optical alignment

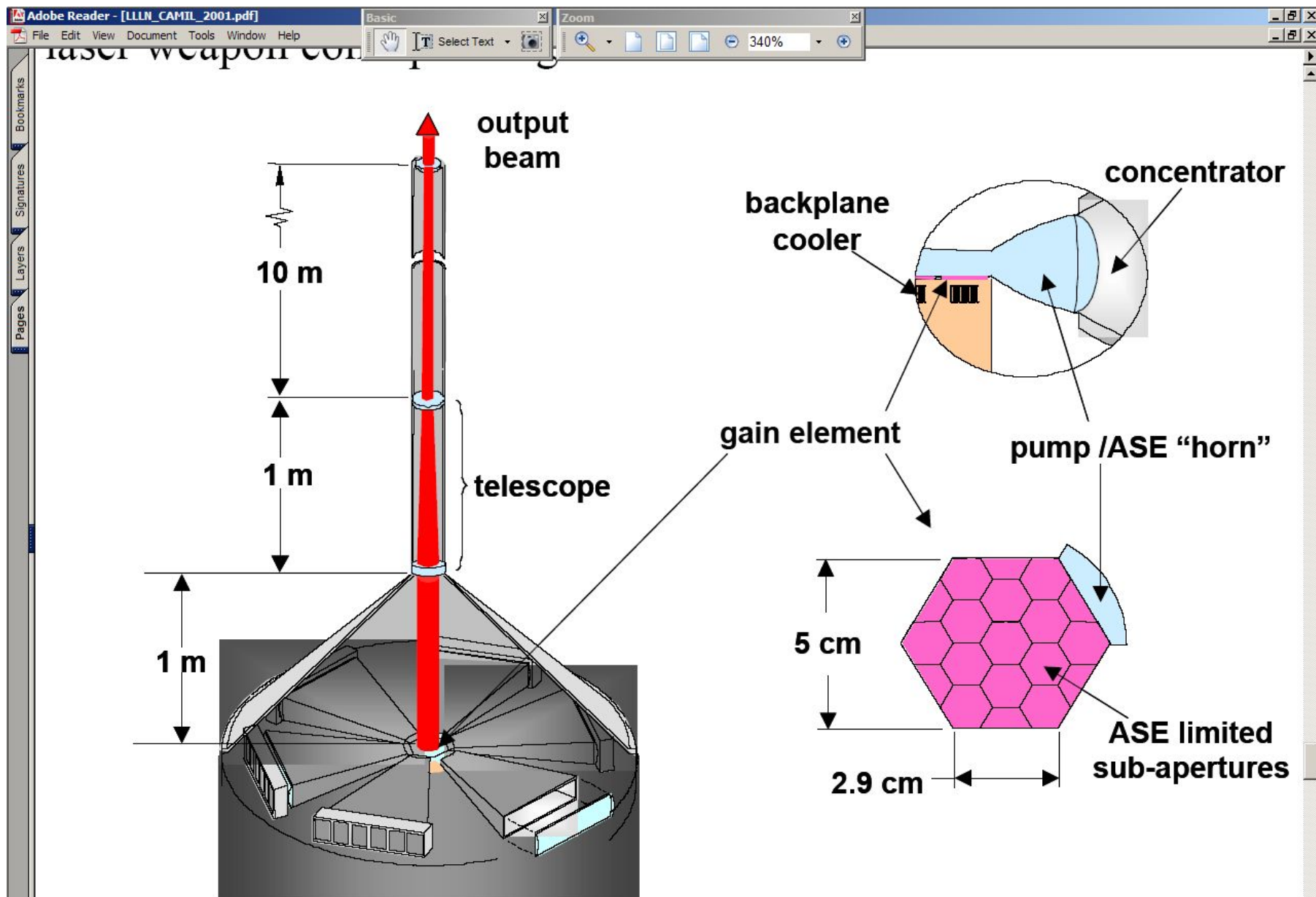


# Обзор действующих проектов. Ливермор



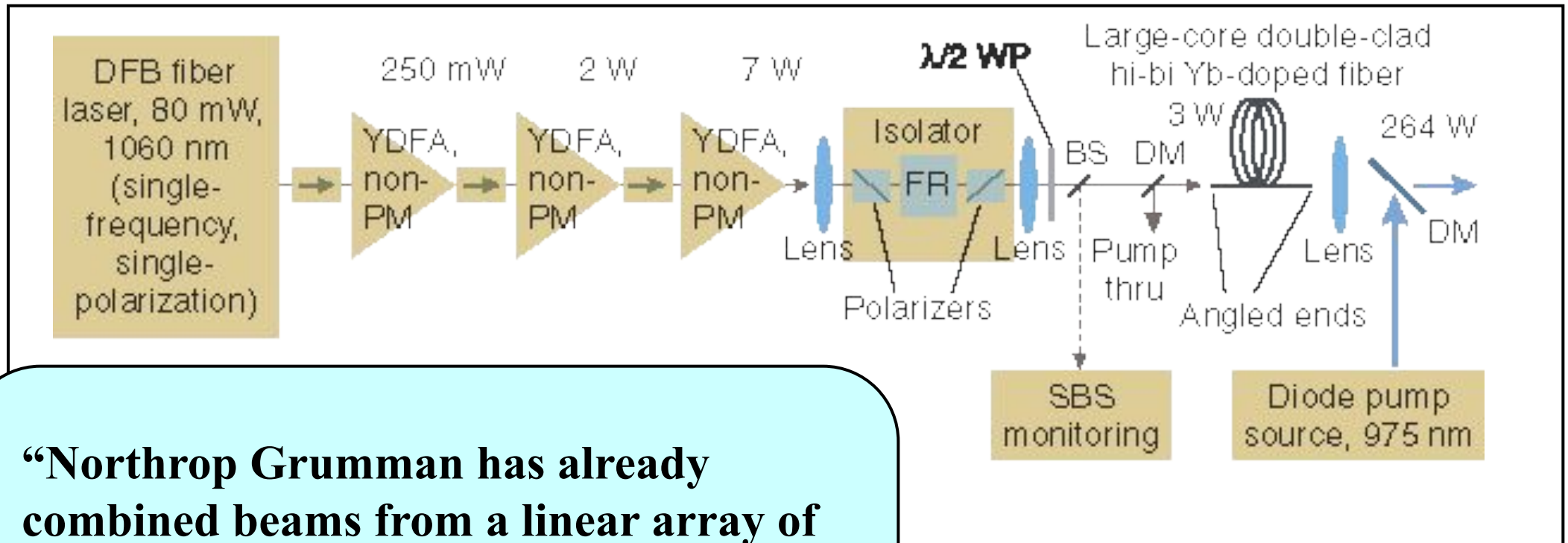
**Yb:YAG**  
**Активные зеркала**  
**Резонатор**  
**Diffusion bonded**

# Обзор действующих проектов. Ливермор



*Conceptual design for a 100 kW class laser weapon. The Yb:YAG*

# Обзор действующих проектов. Northrop Grumman



“Northrop Grumman has already combined beams from a linear array of four fiber lasers in a project for the HEL-JTO; the company is now trying to combine outputs of a circular array of seven fibers”.

Yb

Волокно **PM**

Резонатор – усилитель **265Вт**

суммирование



## Обзор действующих проектов (не волоконных).

геометрия	фирма	ион	Усили- тель	матриц а	Сумми- рование	Адаптивная оптика
Диски	LLNL	Nd	нет	GGG	нет	зеркала
Активные зеркала	Boeing	Nd	нет	GGG	нет	
Активные зеркала	LLNL	Yb	нет	YAG	нет	
слэб	NG	Nd	да		8 каналов	Зеркала
слэб	Raytheon	Yb	да	YAG	нет	ВТР
слэб	LLNL	Yb	да	S-FAP		
слэб	Osaka U.	Nd	да	стекло	нет	ВРМБ

