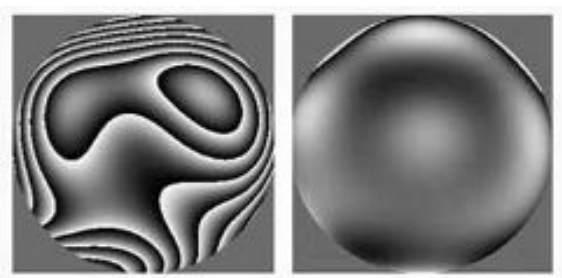
Ключевые проблемы

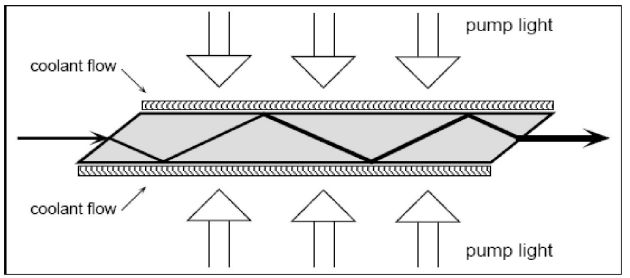
Огромные тепловыделения в активной среде требуют:

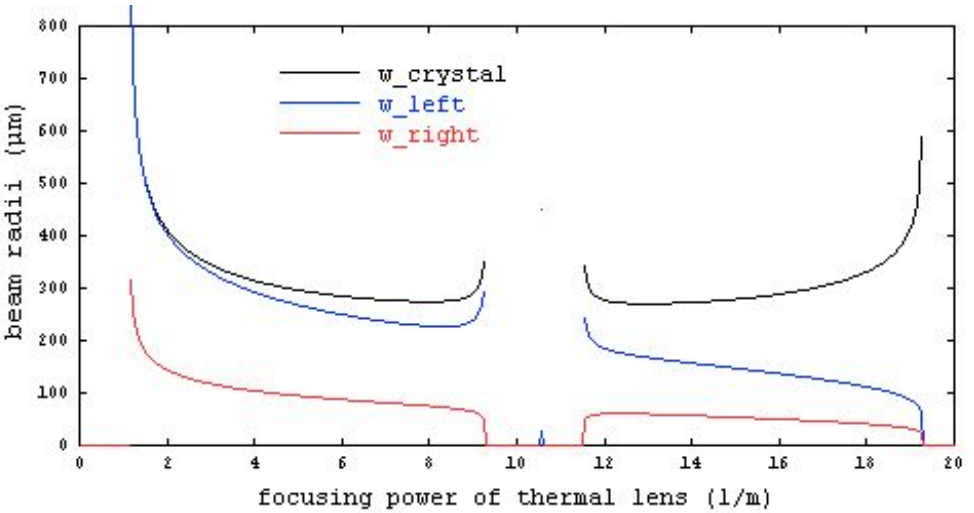
- **высокого КПД**
- **организации эффективного теплоотвода**
- **подавления и/или компенсации термооптических эффектов в активной среде**
- **учета тепловых эффектов в других оптических элементах**

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

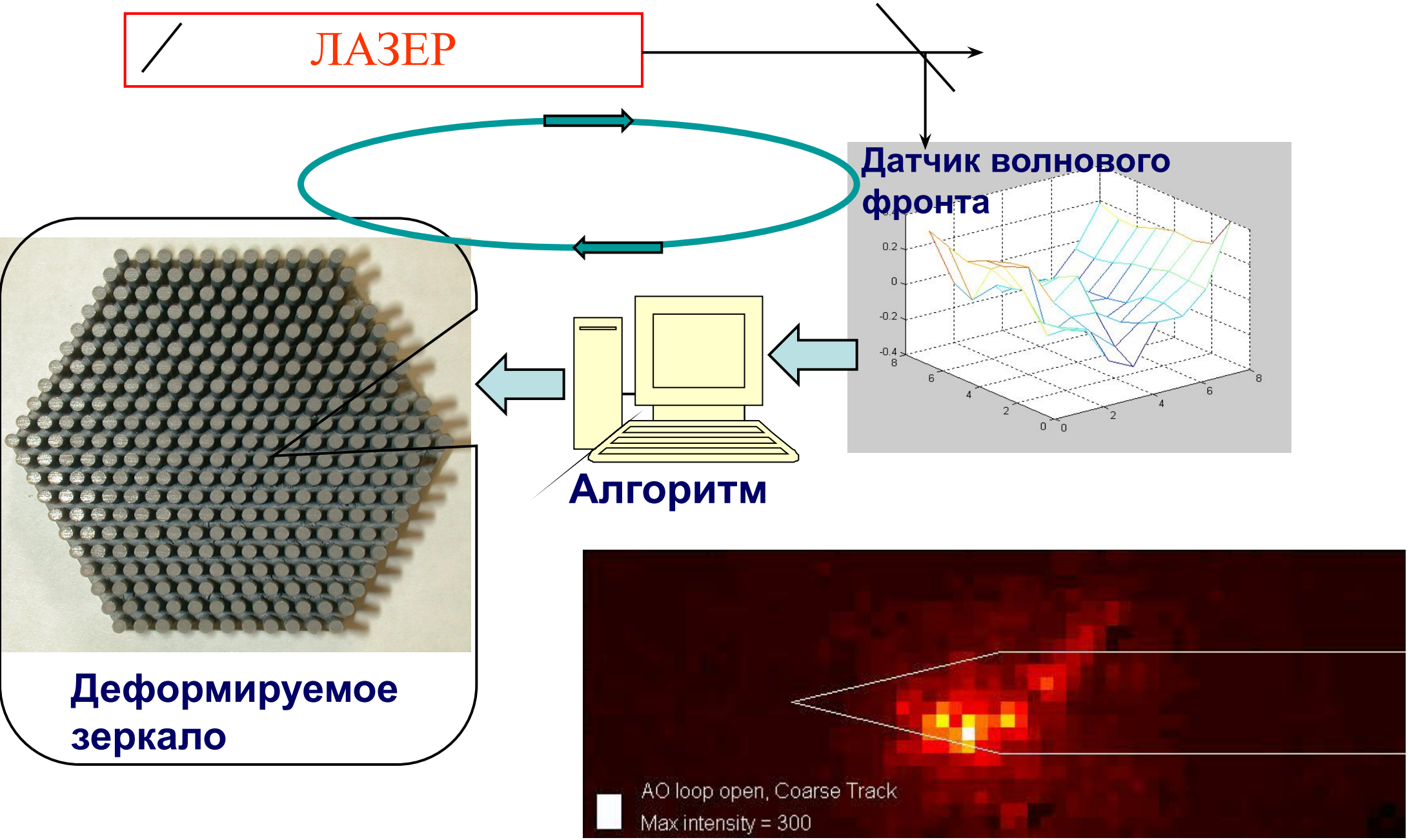
Линейная - деформируемые зеркала

ДВЕ ФУНКЦИИ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ:

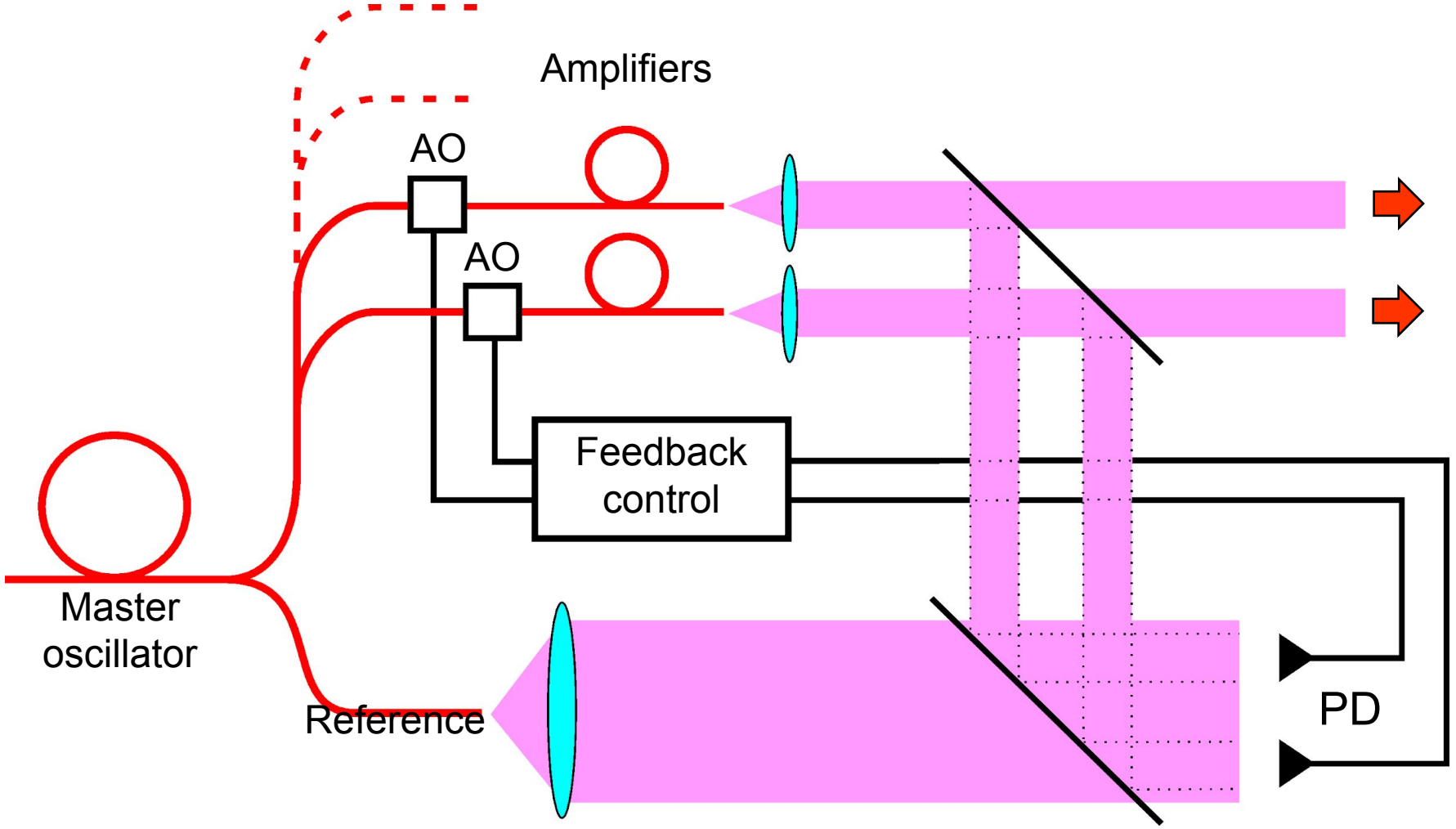
Компенсация (тепловых) искажений внутри самого лазера

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:

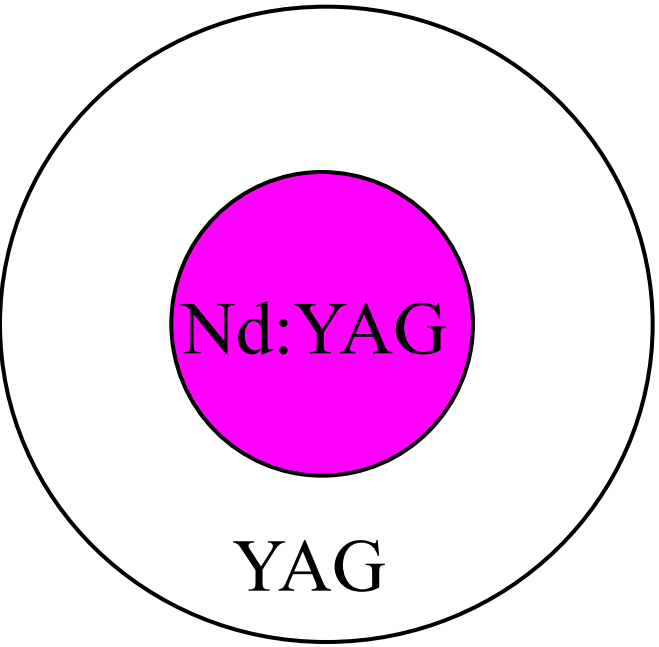
- Нелинейная оптика
- Прямое измерение фазы и адаптивное управление
- Суммирование спектров на дифракционной решетке

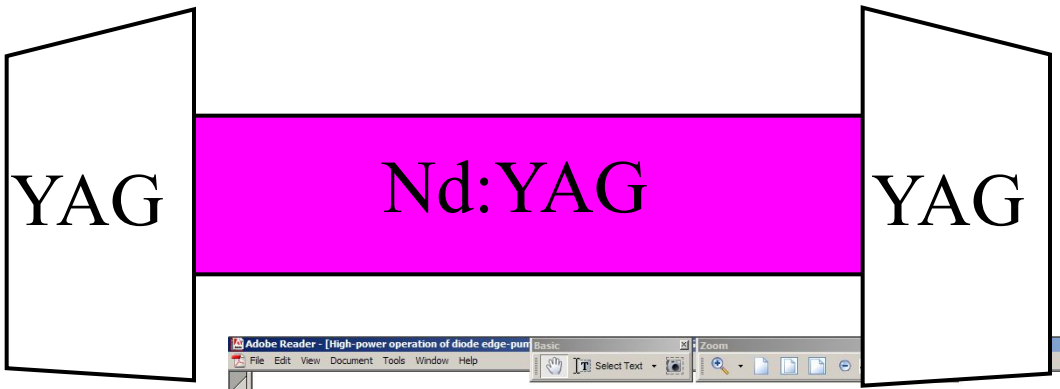
Геометрия:

- Суммирование резонаторов
- Суммирование усилителей

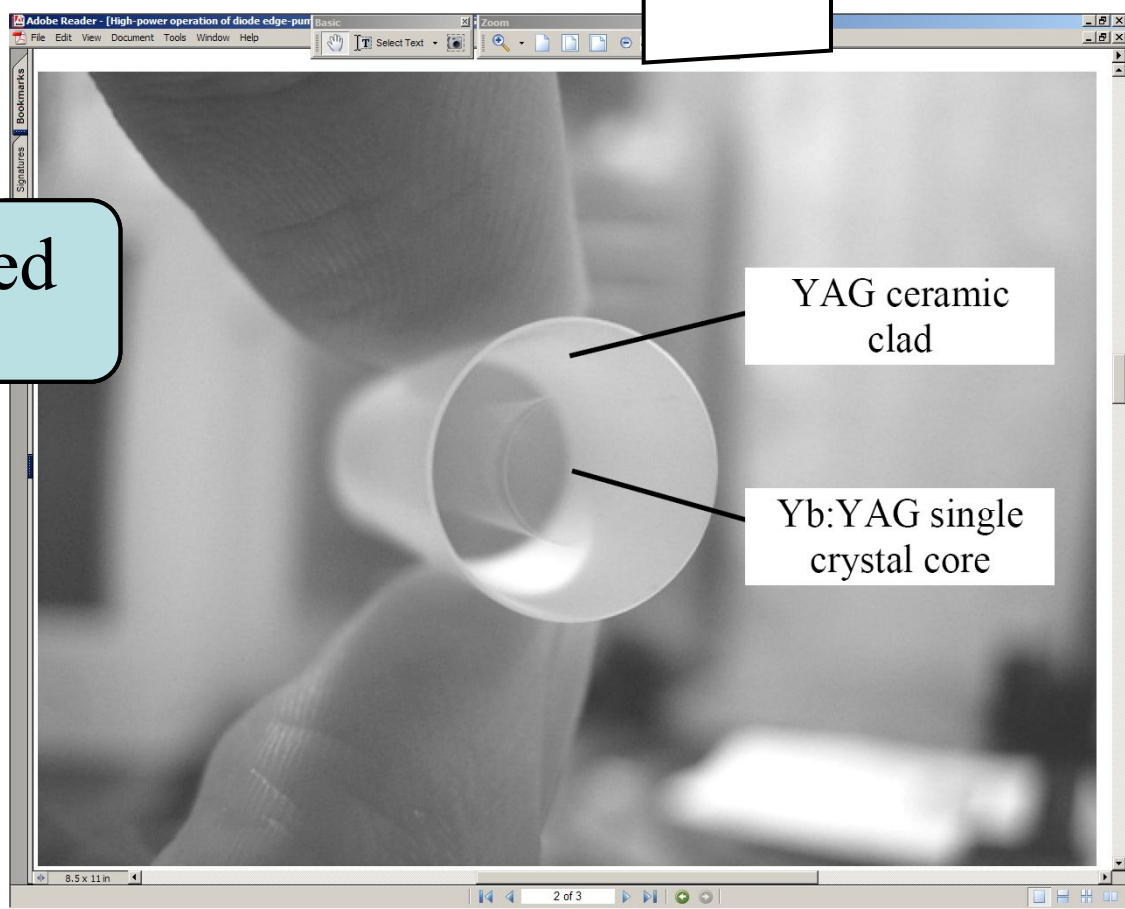
Пример суммирования двух волоконных лазеров прямым измерением фазы

Полезные технологии. Композитные материалы





Diffusion bonded



Полезные технологии. Охлаждение до 77К

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

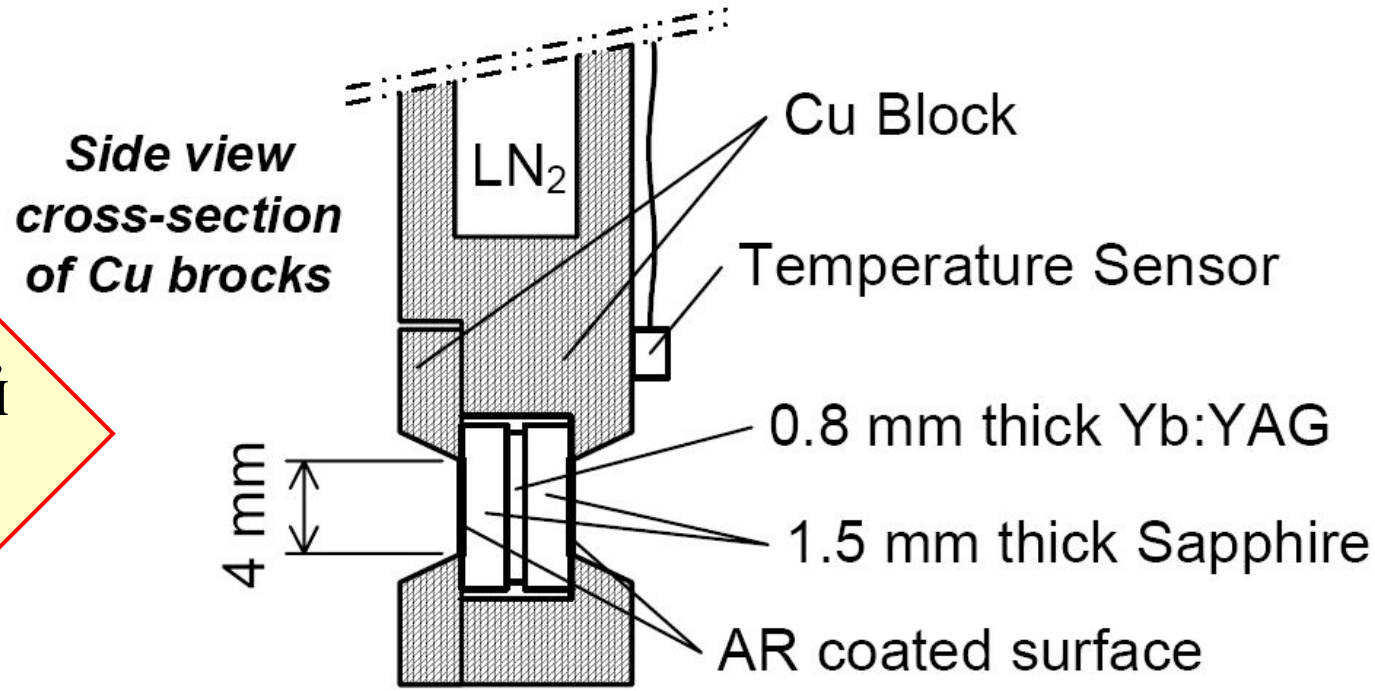
Меньше коэффициент линейного расширения

Меньше dn/dT

Больше сечение перехода

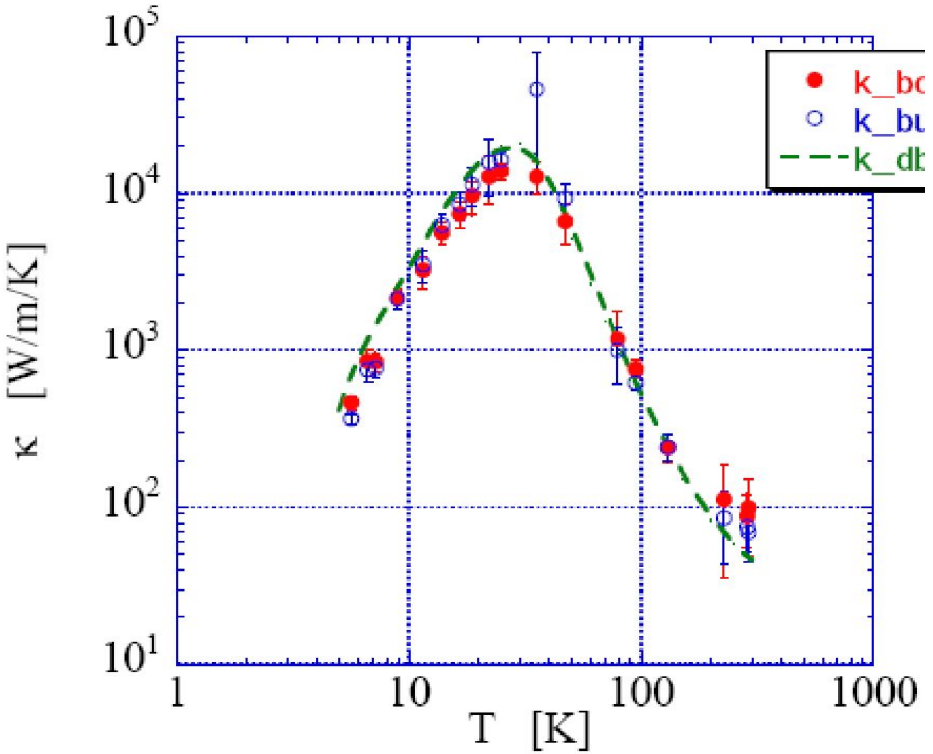
Опустошение нижнего лазерного уровня в Yb

Пример с дисковой геометрией

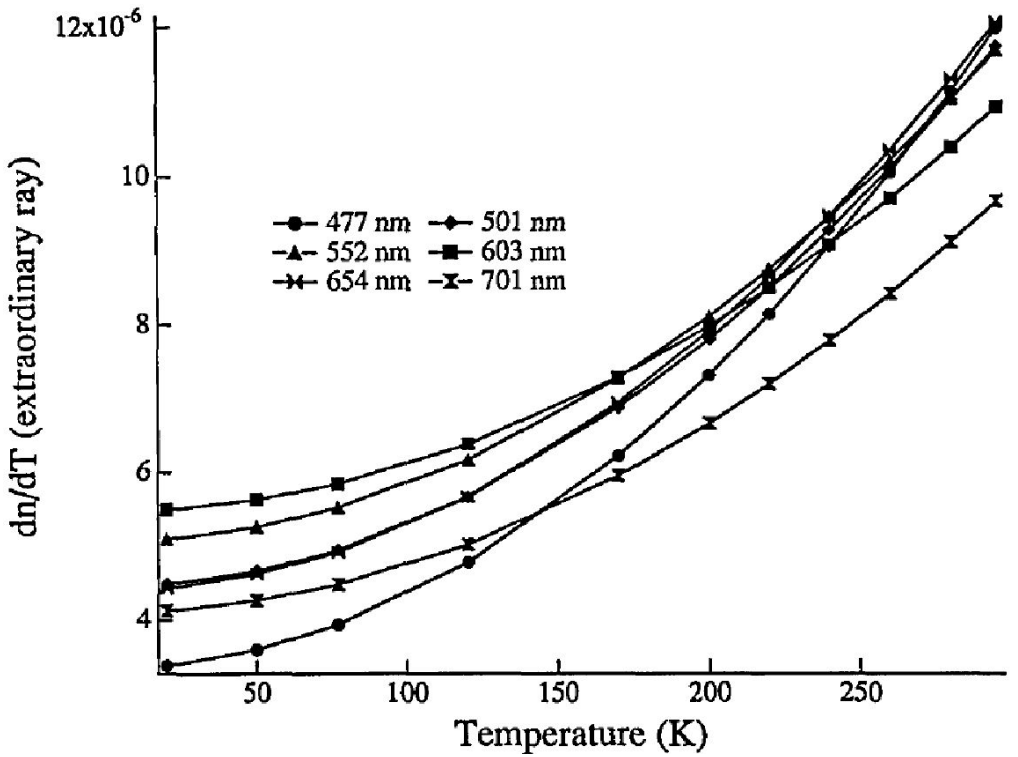


Полезные технологии. Охлаждение до 77К

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 Ti:Al_2O_3 при 77К

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

•κ, dn/dT, and α depend on material temperature

Temperature	*300 K*	77 K
Thermal conductivity, κ [W cm^{-1} K^{-1}]	0.33	10
Thermal dependence on refractive index, dn/dT [K^{-1}]	1.28×10^{-5}	0.19×10^{-5}
Thermal expansion coefficient, α [cm^{-3} K^{-1}]	5.0×10^{-6}	0.34×10^{-6}

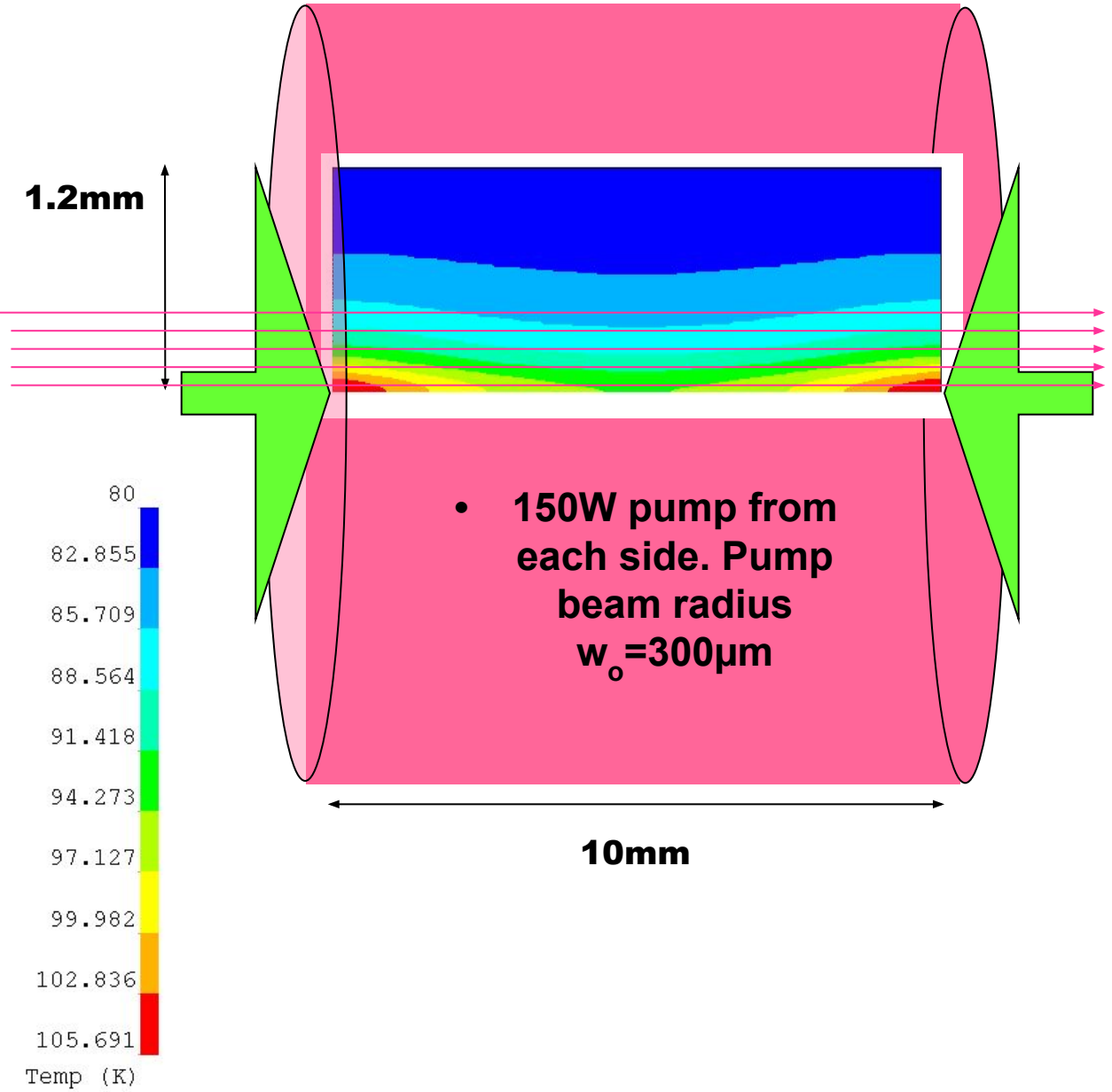
30x higher

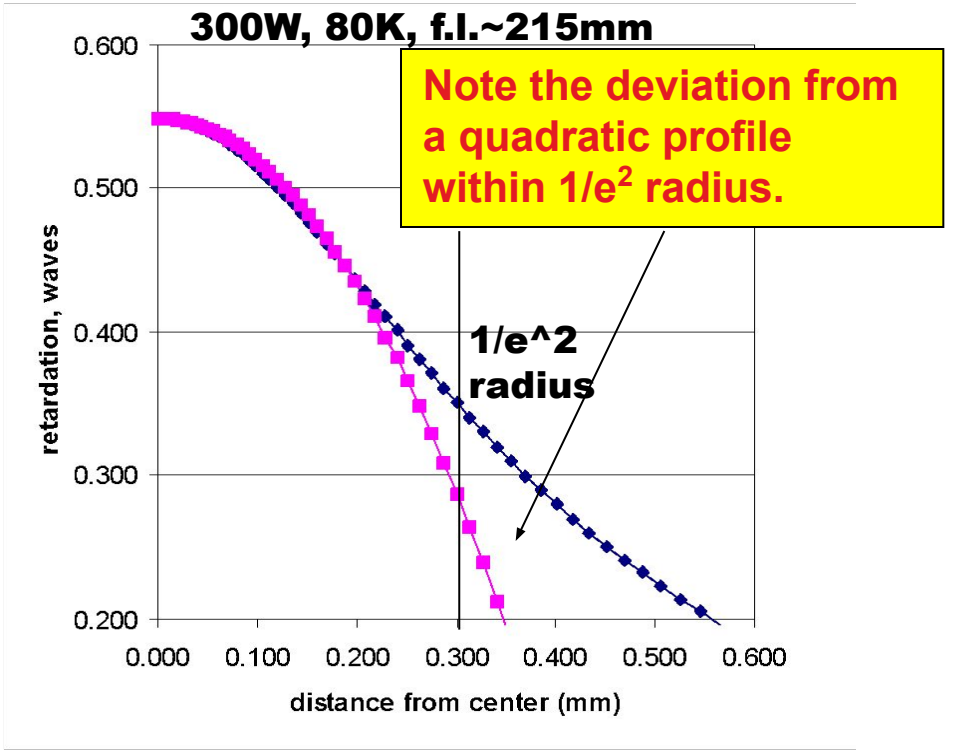
7x lower

14x lower

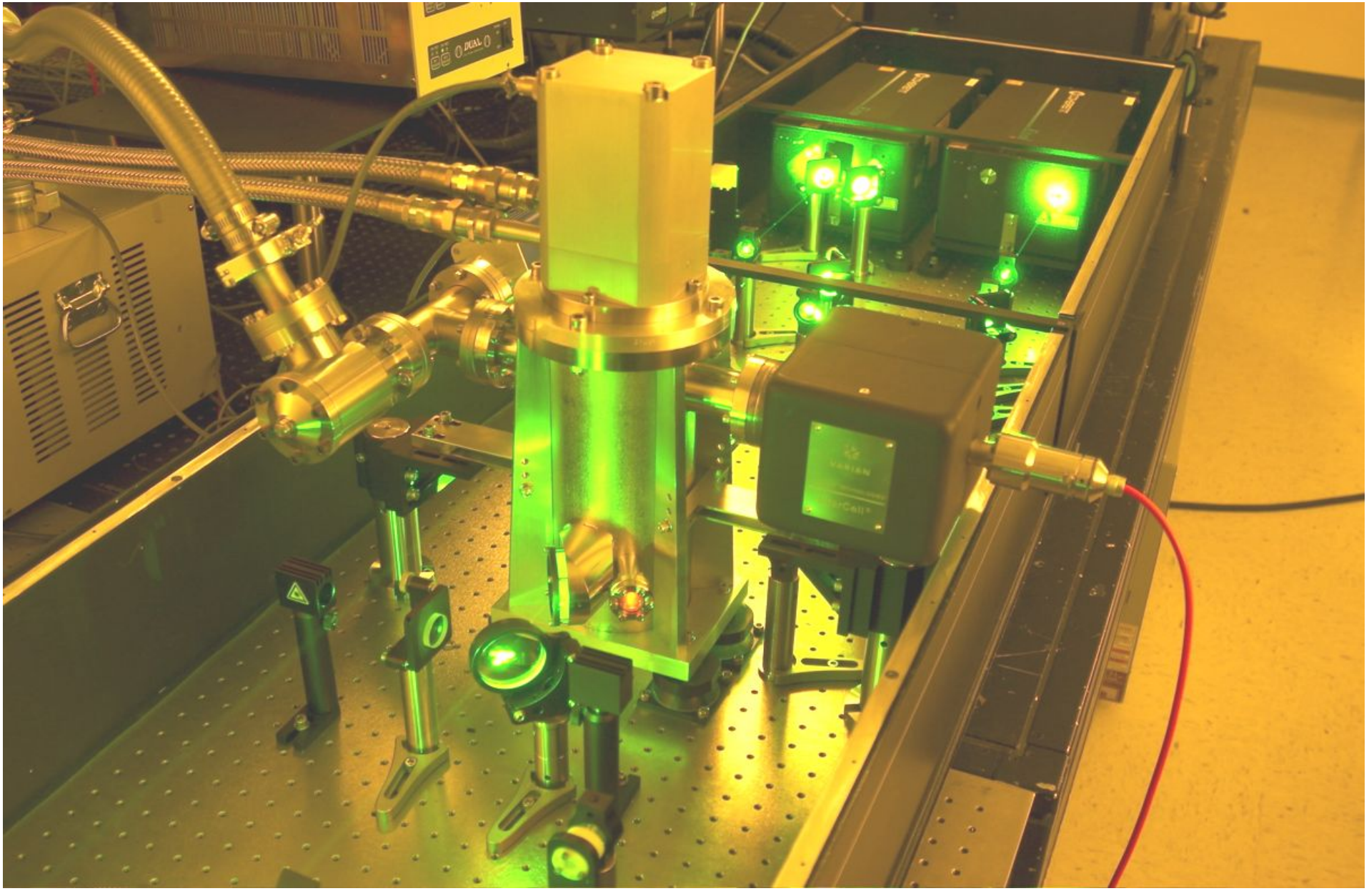
For a given thermal lens value, the pump power can increase by a factor of >200 at cryogenic temperatures!

Thermal modeling of amplifier crystal at 80K





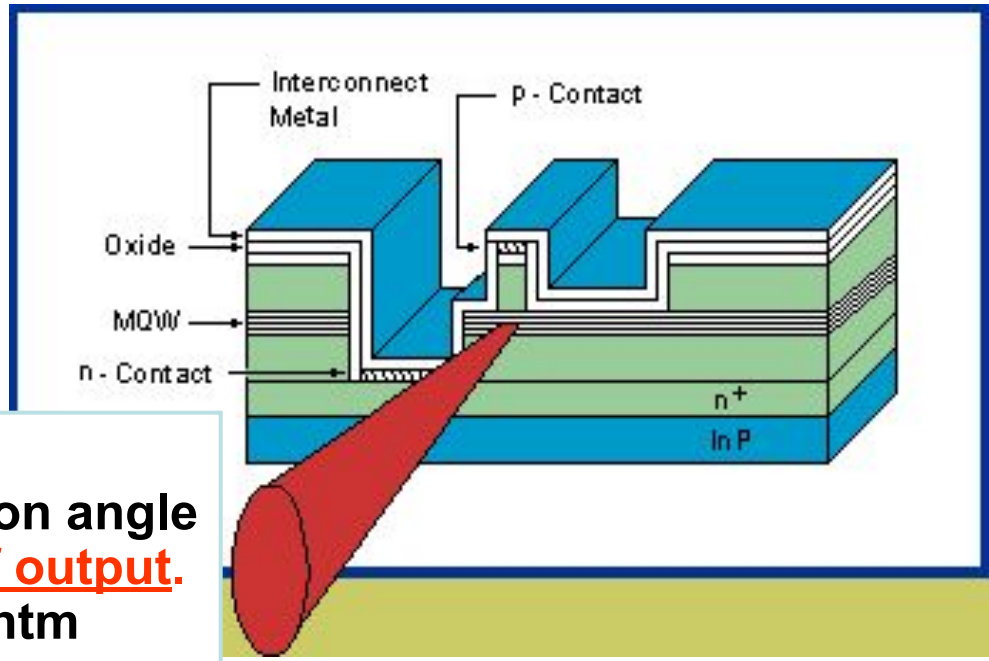
Sample Commercial System: Legend-HE-Cryo



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

Накачка.

Сегодня диодная накачка – широко рекламируемый и продаваемый продукт

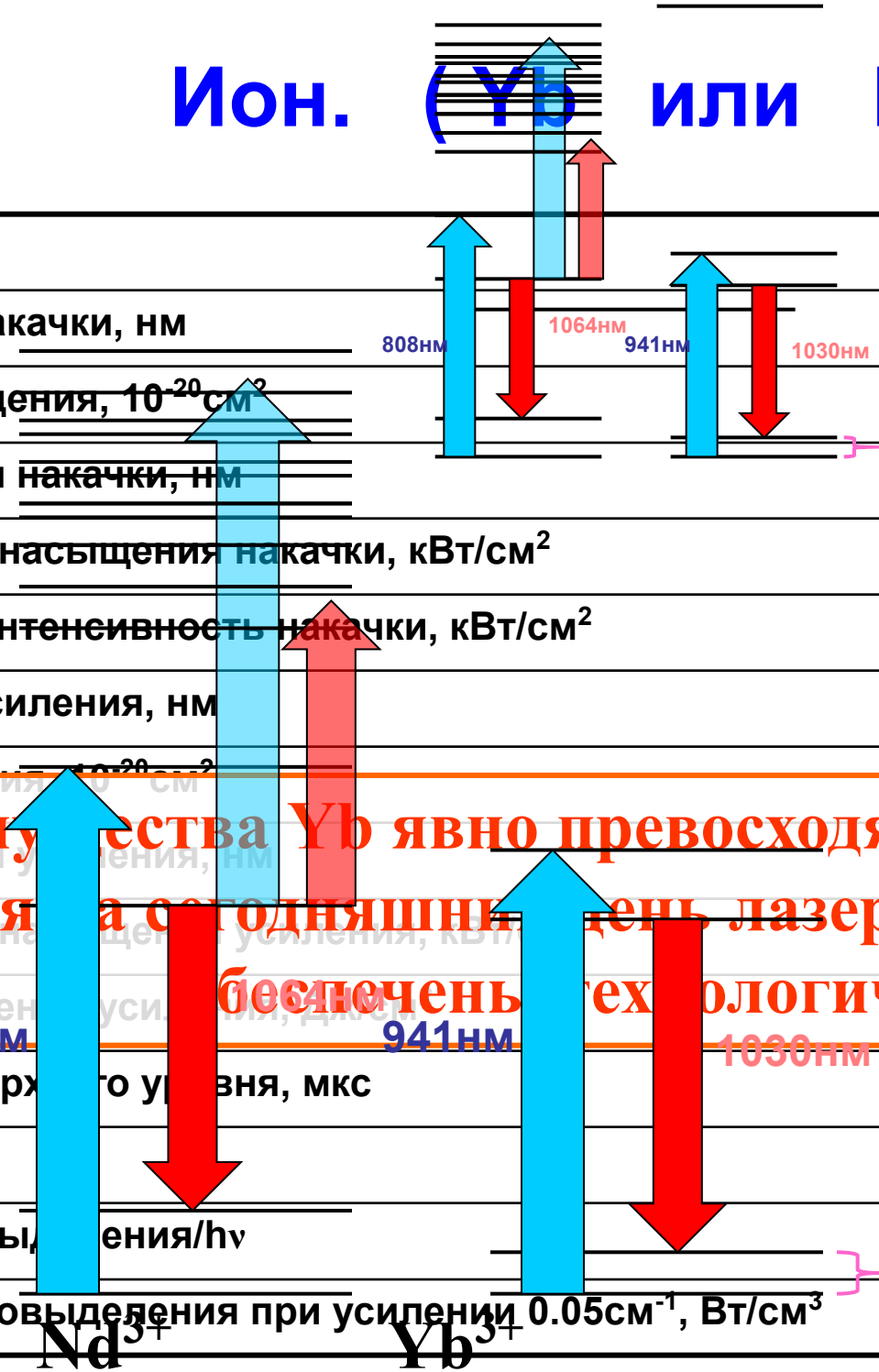


- **Decade Optical Systems, Inc.**
- **720-bar QCW array: 1.7 mm pitch at 55º emission angle including fast axis collimation optics; 72 kW of output. http://www.sslasers.com/Laser_Diode_Arrays.htm**

Характерная цена 10-20$/Вт, включая охлаждение

НИКАКОЙ АЛЬТЕРНАТИВЫ ДИОДНОЙ НАКАЧКЕ НЕТ

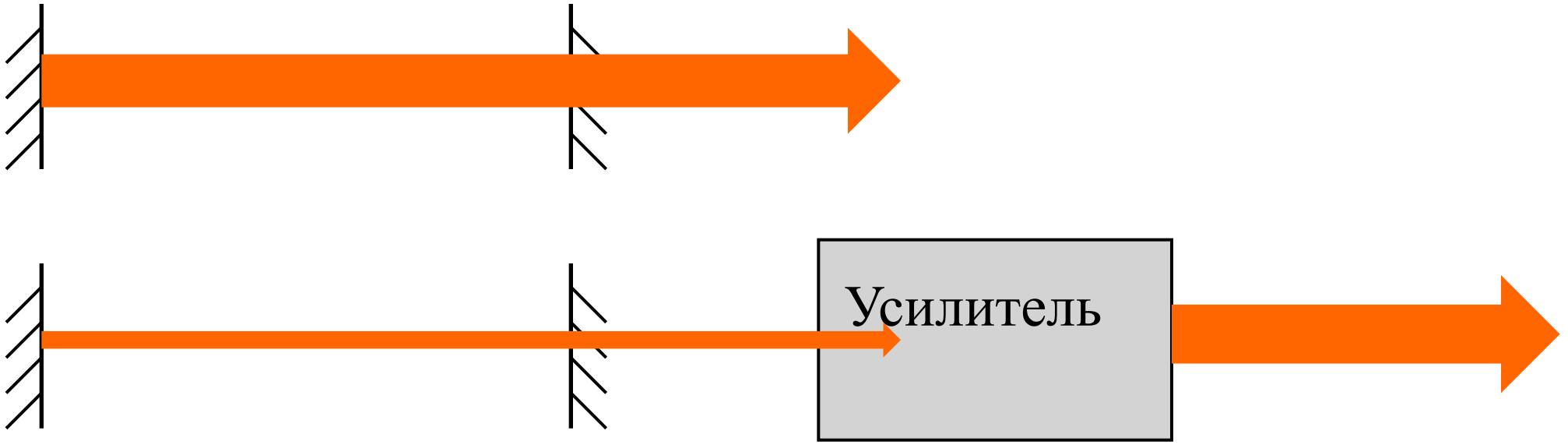
Ион. (Yb или Nd)



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

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

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 .....

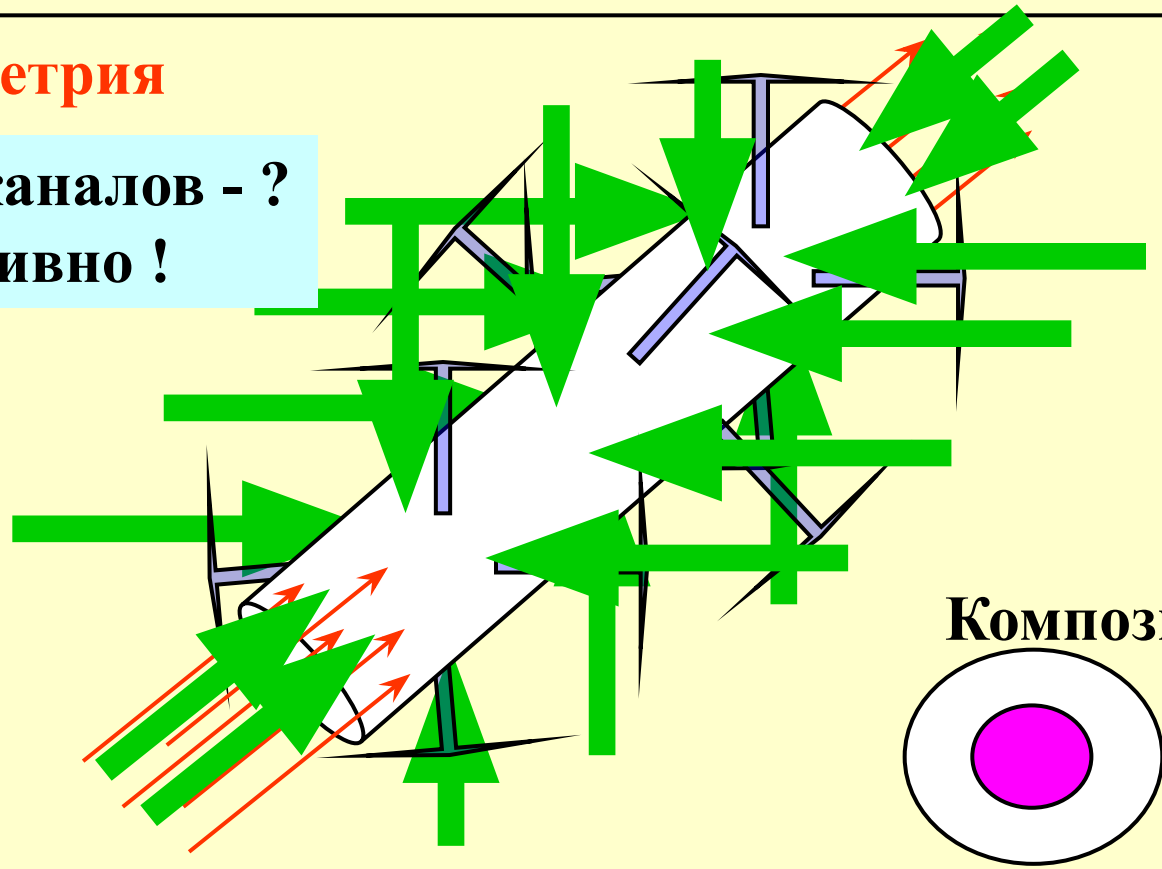
Геометрия активной среды. 5 вариантов.

Ключевой вопрос – одновременно организовать потоки накачки, генерации и охлаждения

стержень слэб диск активное зеркало волокно

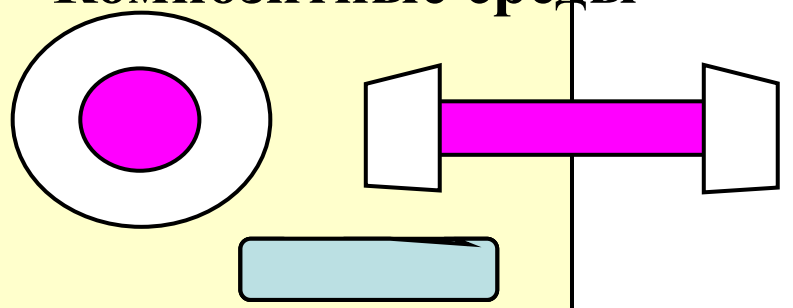
2D геометрия

Суммирование каналов - ?
77K – перспектривно !



YAG
GGG
керамика

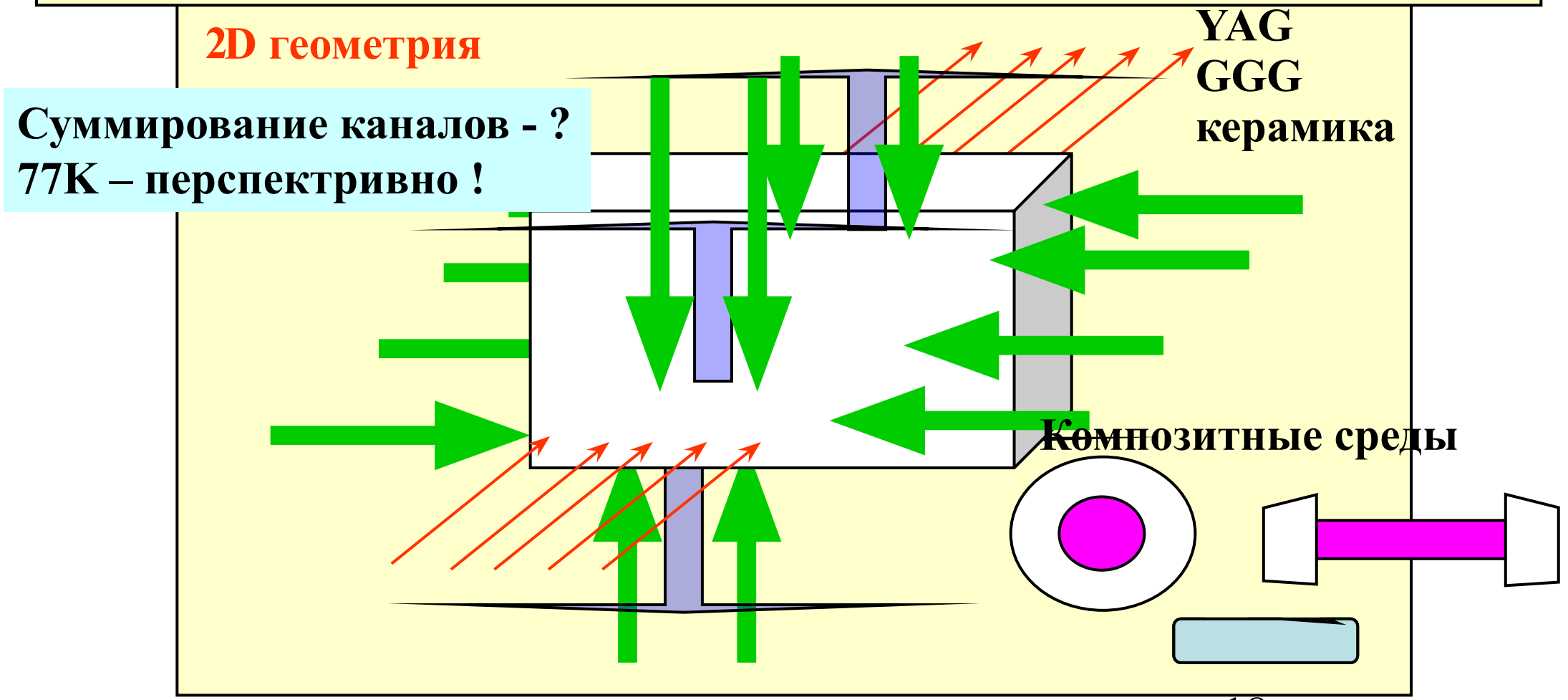
Композитные среды



Геометрия активной среды. 5 вариантов.

Ключевой вопрос – одновременно организовать потоки накачки, генерации и охлаждения

стержень слэб диск активное зеркало волокно



Суммирование каналов - ?
77K – перспектривно !

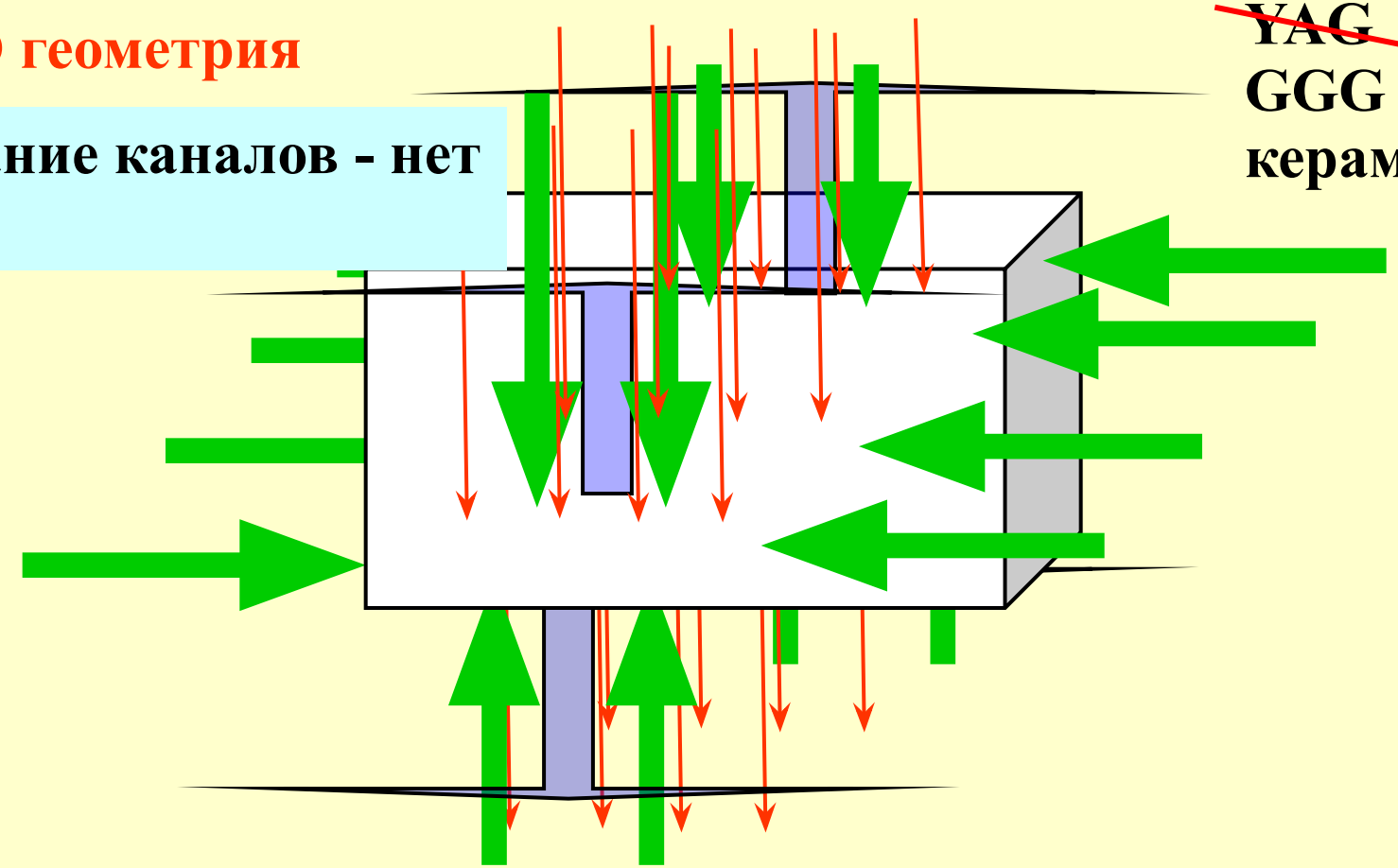
Геометрия активной среды. 5 вариантов.

Ключевой вопрос – одновременно организовать потоки накачки, генерации и охлаждения

стержень слэб **диск** активное зеркало волокно

2D геометрия

Суммирование каналов - нет
77K – ?

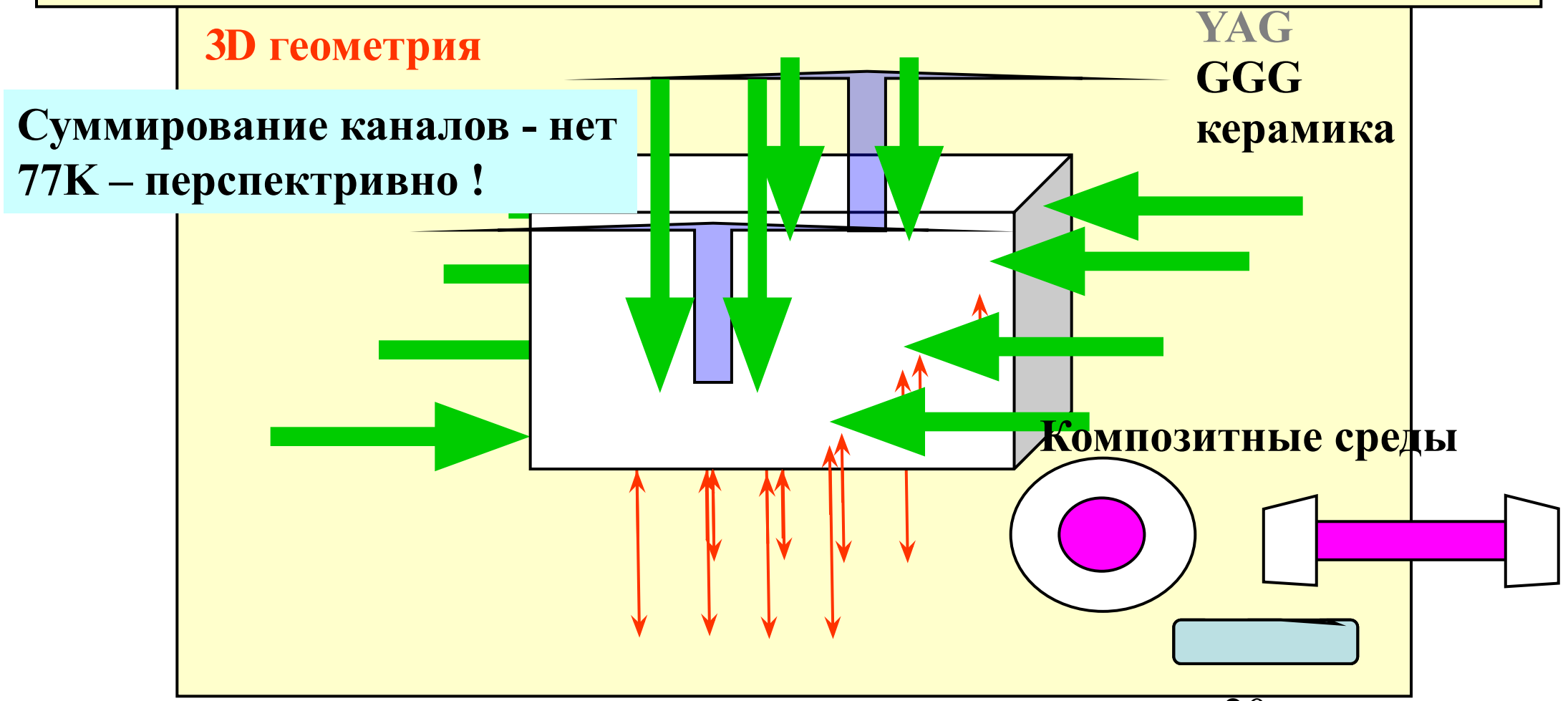


~~YAG~~
GGG
керамика

Геометрия активной среды. 5 вариантов.

Ключевой вопрос – одновременно организовать потоки накачки, генерации и охлаждения

стержень слэб диск активное зеркало волокно



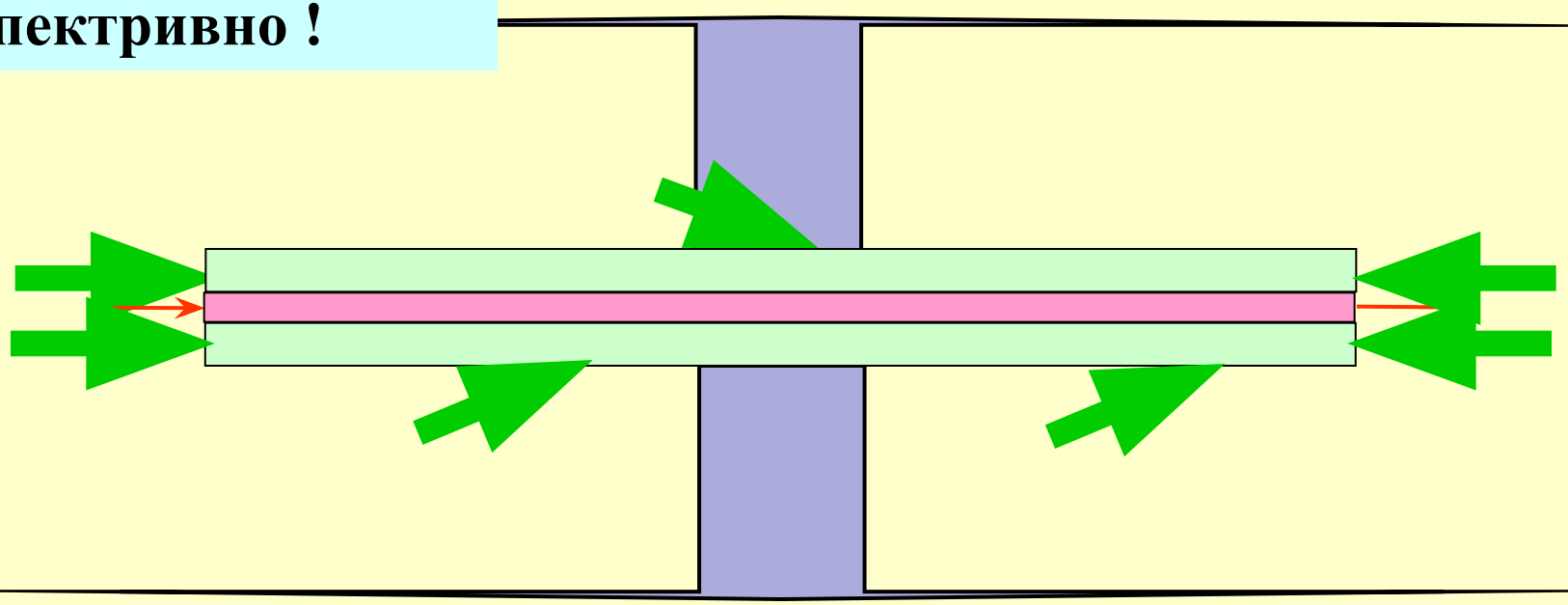
Геометрия активной среды. 5 вариантов.

Ключевой вопрос – одновременно организовать потоки накачки, генерации и охлаждения

стержень слэб диск активное зеркало волокно

2D геометрия

Суммирование каналов - да
77K – перспектривно !



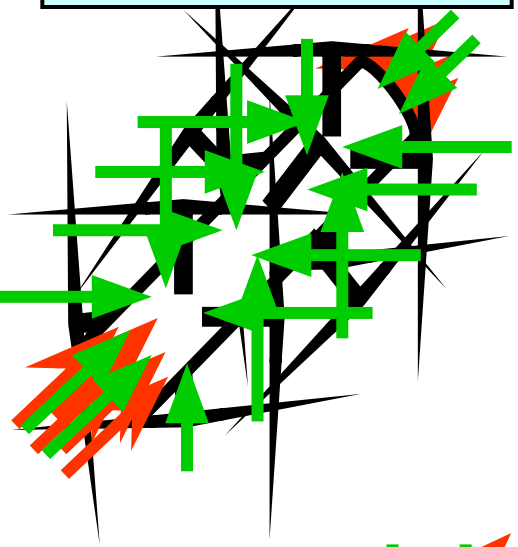
Геометрия активной среды.

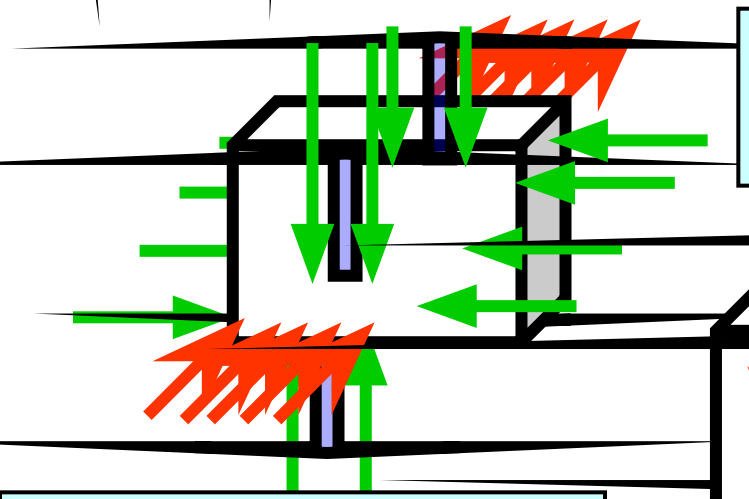
300 Вт поляр. (2005)
1.4 кВт неполяр. (2004)

2.65 кВт (2002)

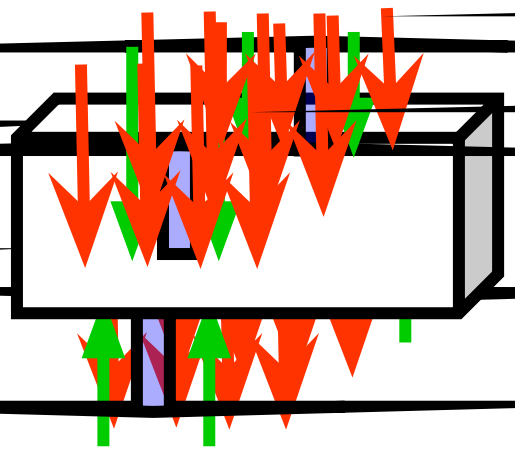
Во всех геометриях продемонстрирована мощность киловаттного уровня.

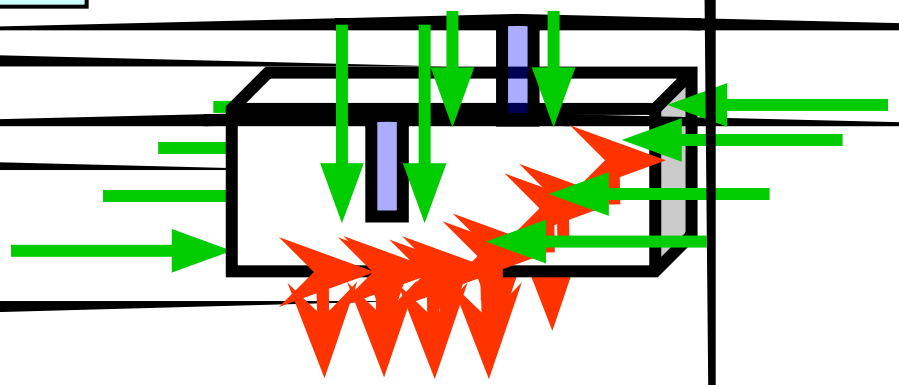
Перспективы достичь 100кВт примерно одинаковы.

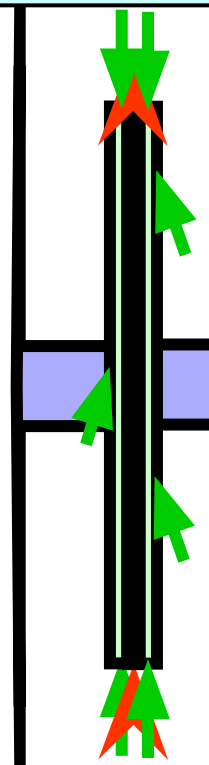




30 кВт 1сек (2004)
16 кВт 4сек (2004)



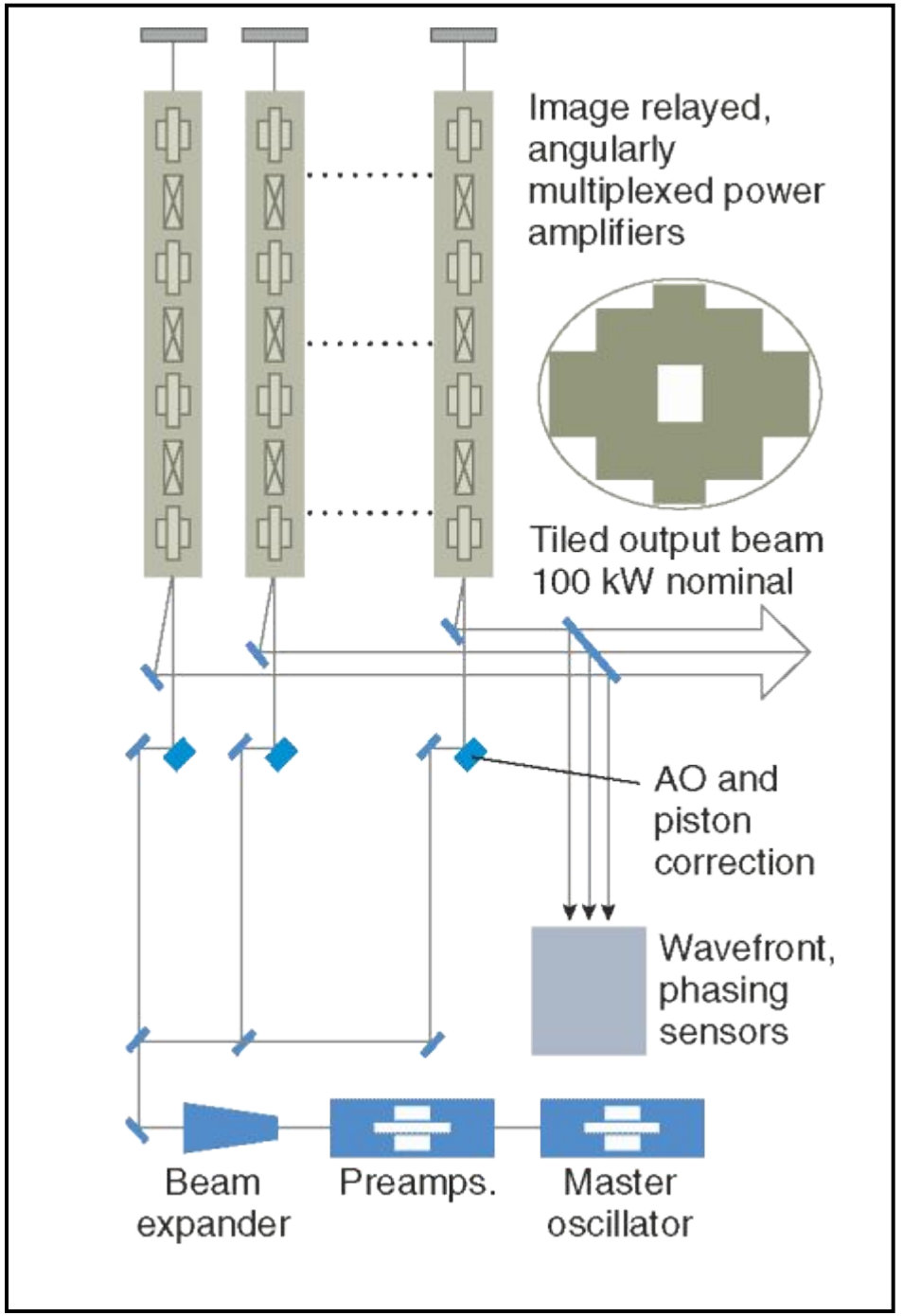




4.5 кВт (2004)
12+12=19кВт (2006)

1 kW-level (2004)

Обзор действующих проектов. Northrop Grumman



Nd

Слэбы

Генератор - усилитель

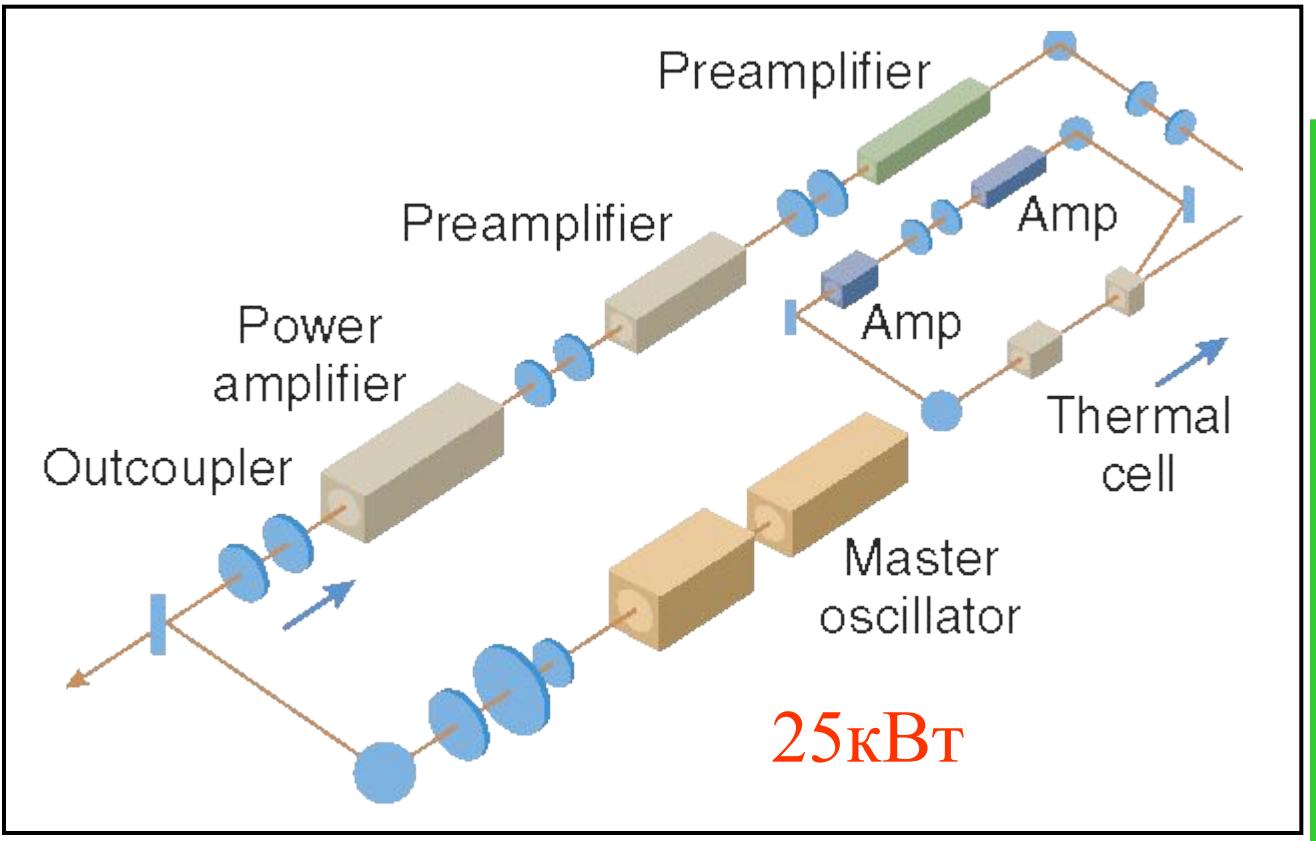
8 каналов по 12.5kW

4 слэба в канале

Суммирование – прямое измерение

Май 2004 – 4.5кВт с одного слэба

Обзор действующих проектов. Raytheon



Yb

YAG

Слэбы

Генератор - усилитель

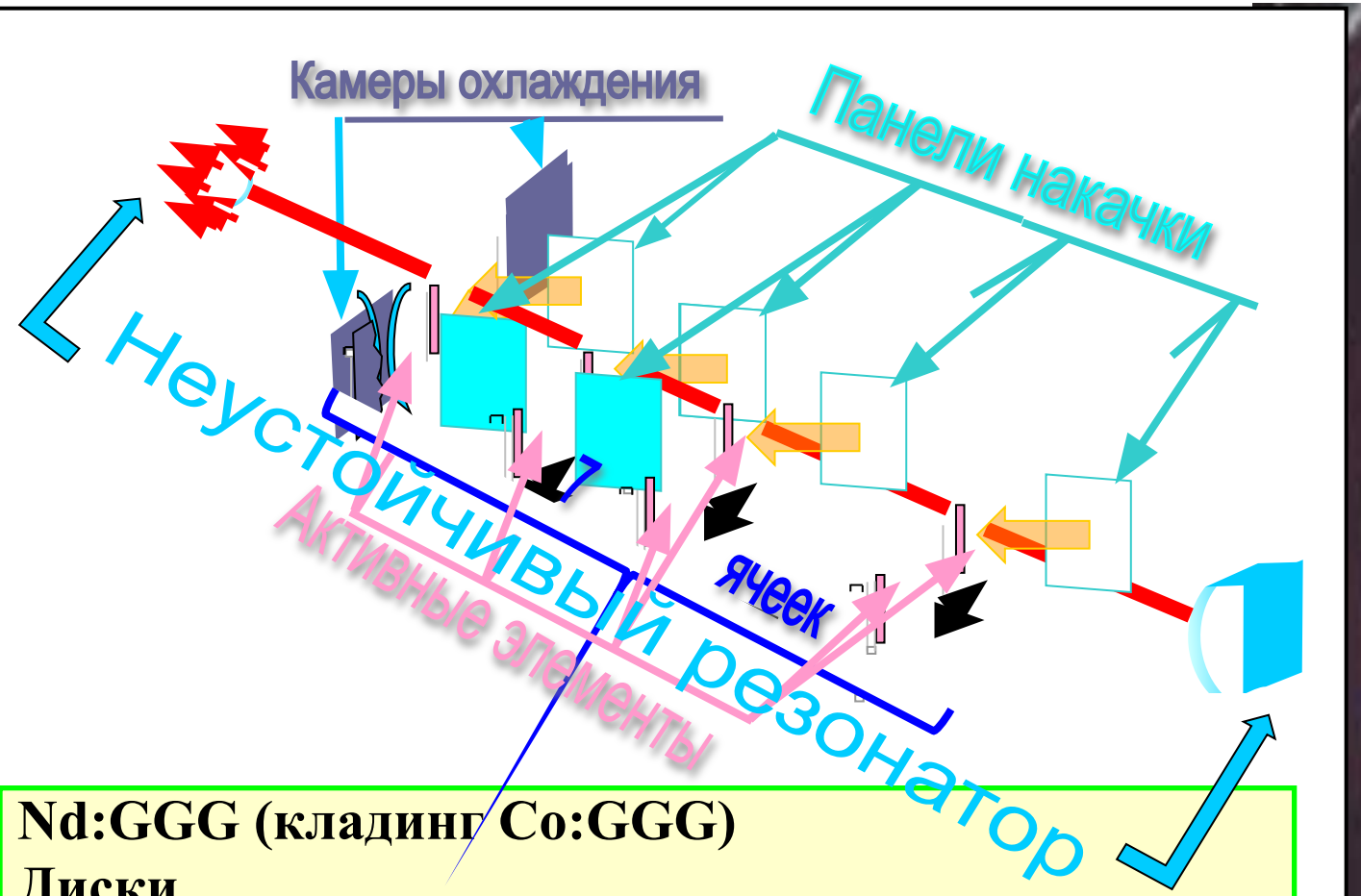
ОВФ – тепловая нелинейность

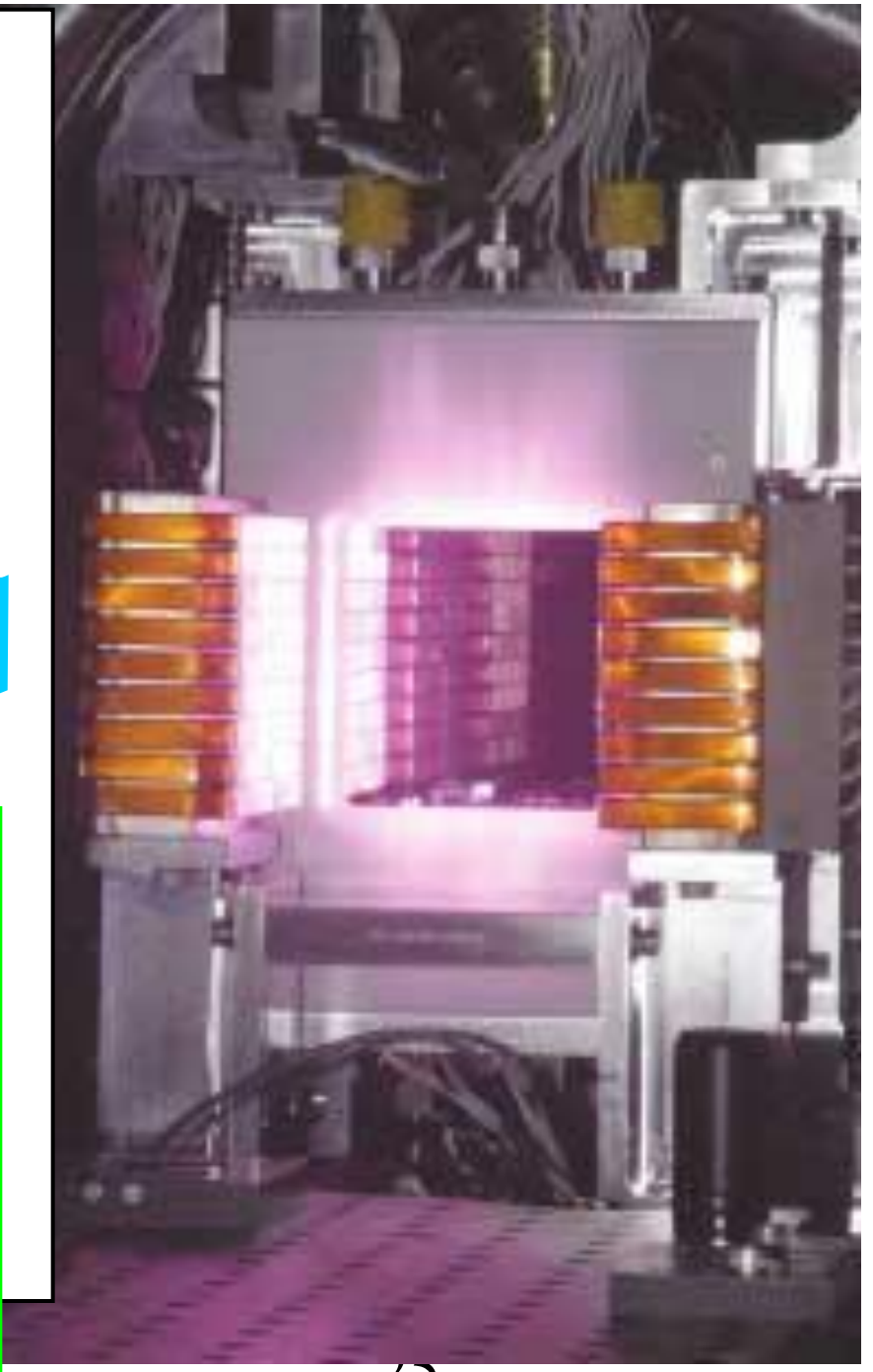
1 канал 25кВт

+ 1-2 усилителя -100кВт

2002 – 2.65 кВт (стержни)

Обзор действующих проектов. Ливермор (HCL)

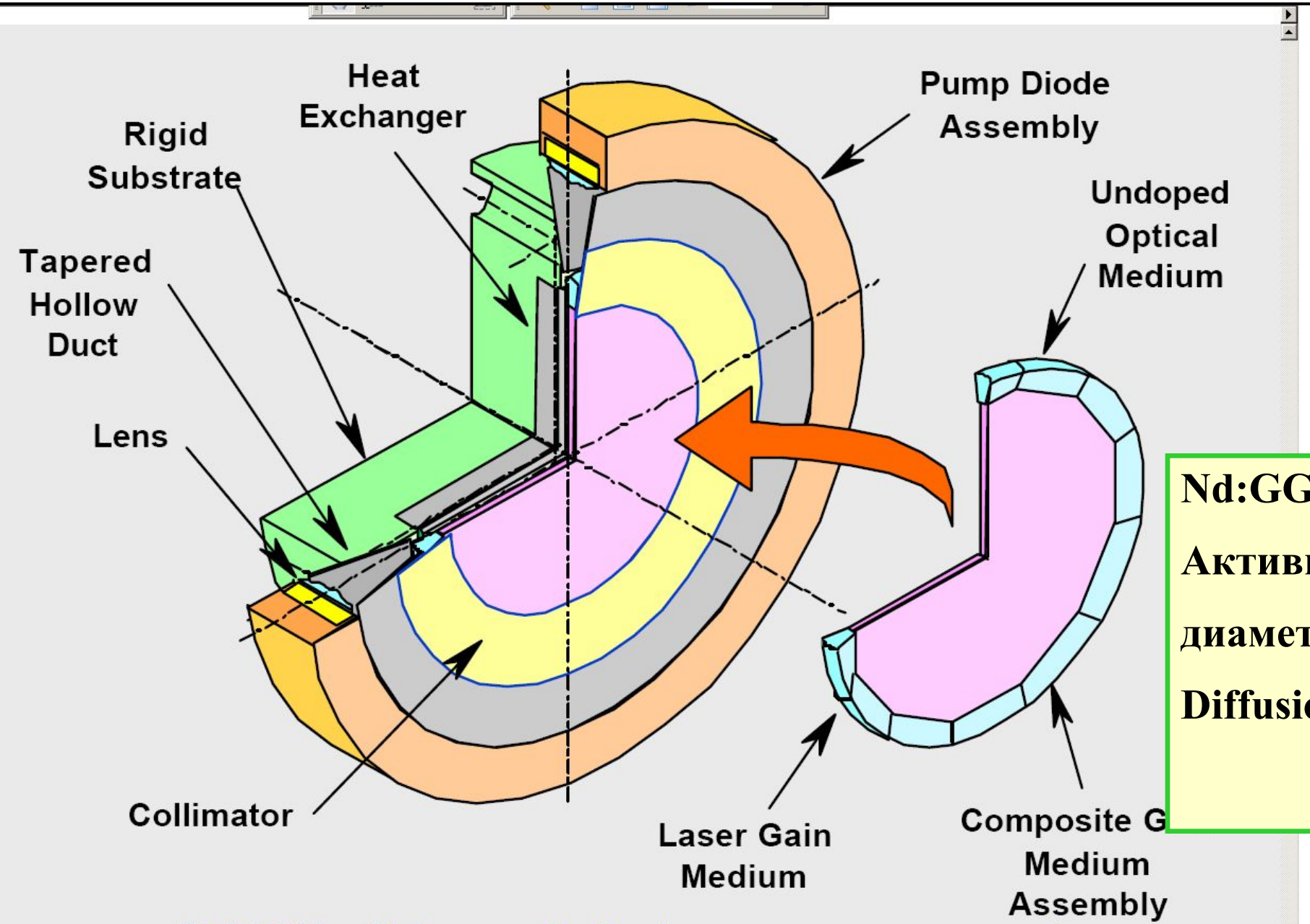




Nd:GGG (кладинг Co:GGG)
Диски
Генератор
Деформируемое зеркало
9дисков (с накоплением тепла) 14x14см -100кВт

Май 2004, 3 диска: 30кВт (1сеунда)
10кВт (4 секунды)

Обзор действующих проектов. Boeing.



Nd:GGG

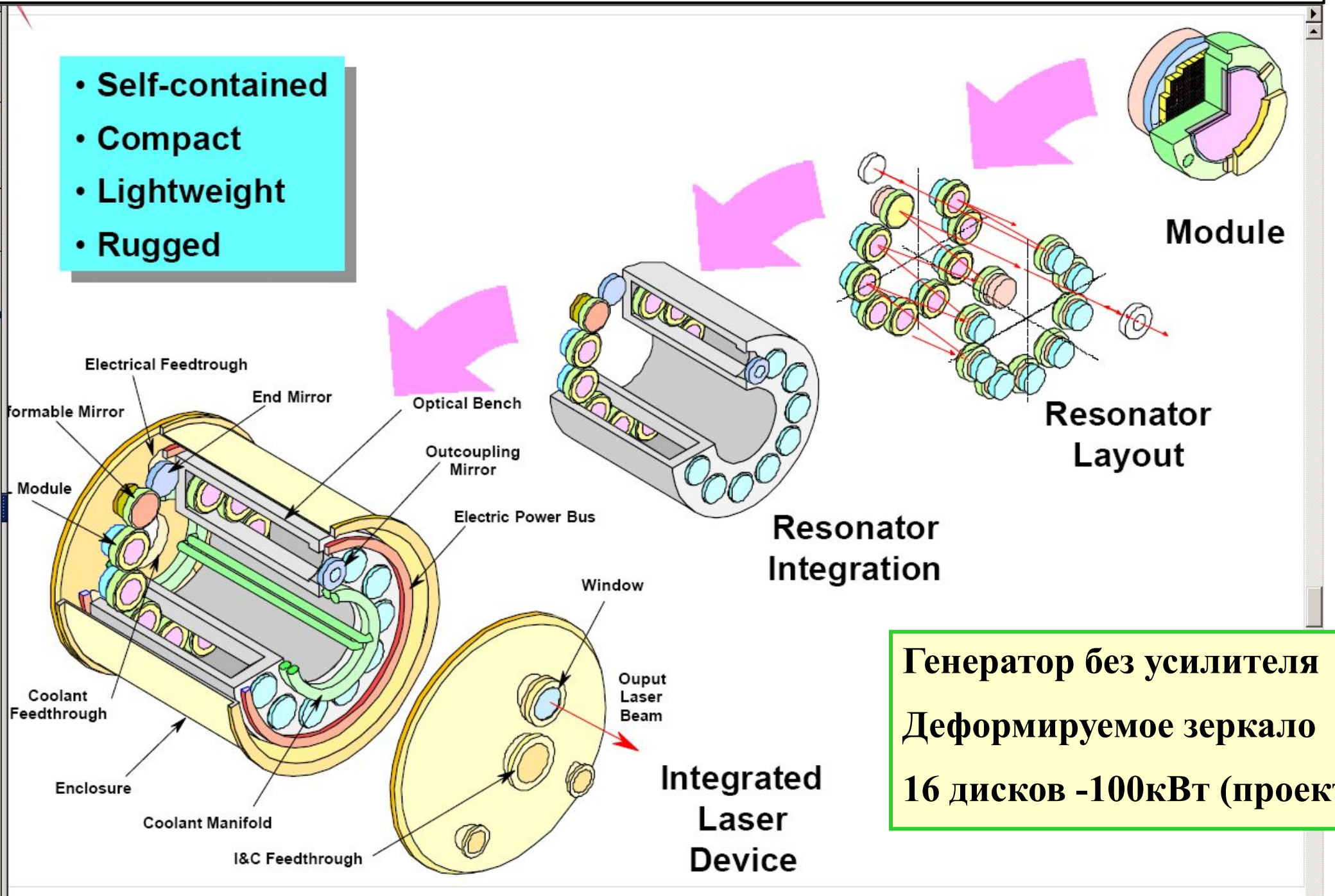
Активные зеркала

диаметр 15см

Diffusion bonded

CAMIL-SP module is very compact

Обзор действующих проектов. Boeing.



Генератор без усилителя

Деформируемое зеркало

16 дисков -100кВт (проект)

Обзор действующих проектов. Boeing.

Adobe Reader - [Large-aperture Disk Lasers For DEW Applications 4th ADES 1.11.2001.pdf]

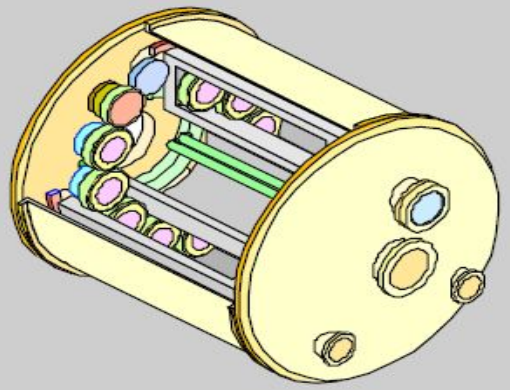
File Edit View Document Tools Window Help

Size & Weight Scaling Model

Point design for a 100 kW CAMIL System

CAMIL

L&EOS



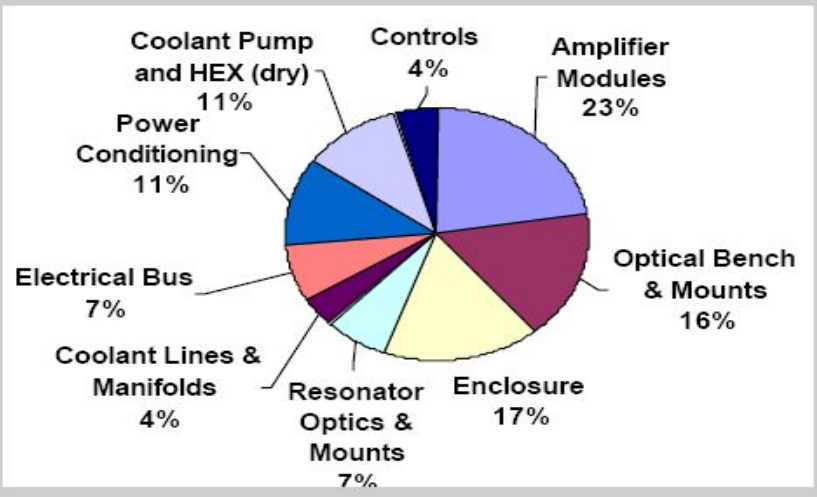
Laser Device

15 cm Ø Nd:GGG disks,

$\eta_{e\text{-}o}$ = 20%,

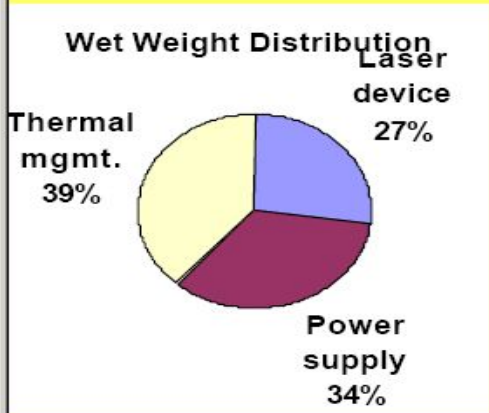
$\sigma_{P,w}$ = 172 W/kg,

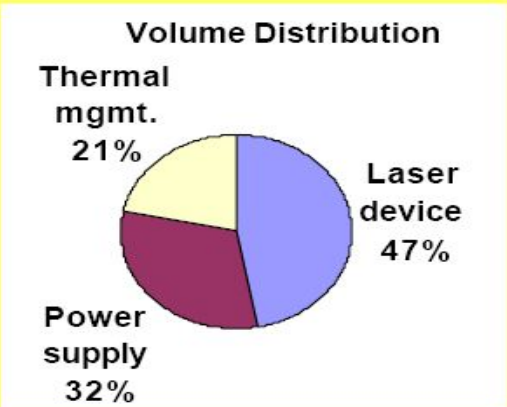
$\sigma_{P,v}$ = 68 W/liter

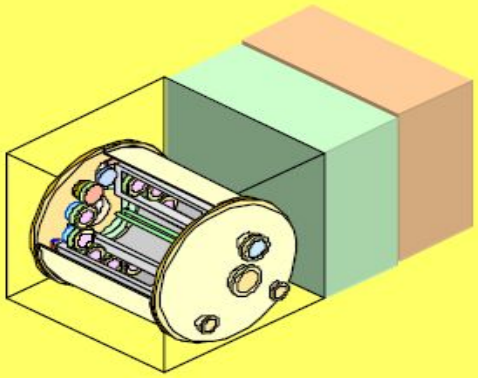


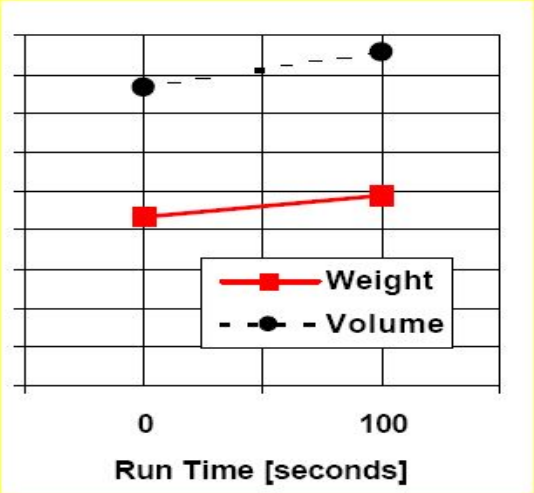
Laser System (w/o BCS)

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









11 x 8.5 in

13 of 18

Обзор действующих проектов. Boeing.

Adobe Reader - [Large-aperture Disk Lasers For DEW Applications 4th ADES 1.11.2001.pdf]

File Edit View Document Tools Window Help

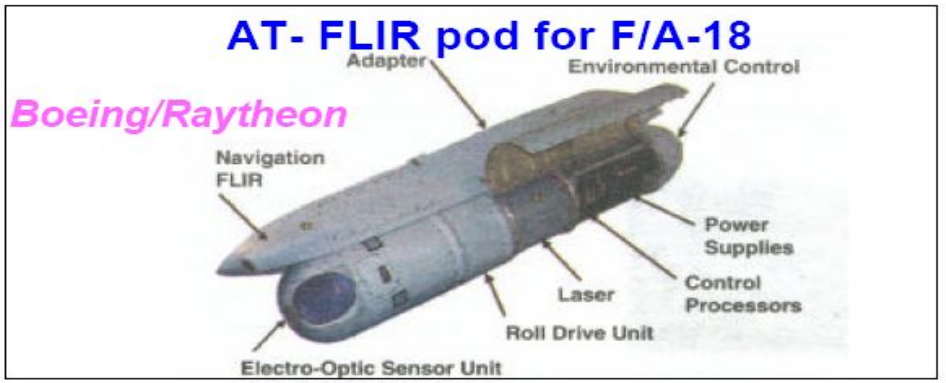
SL

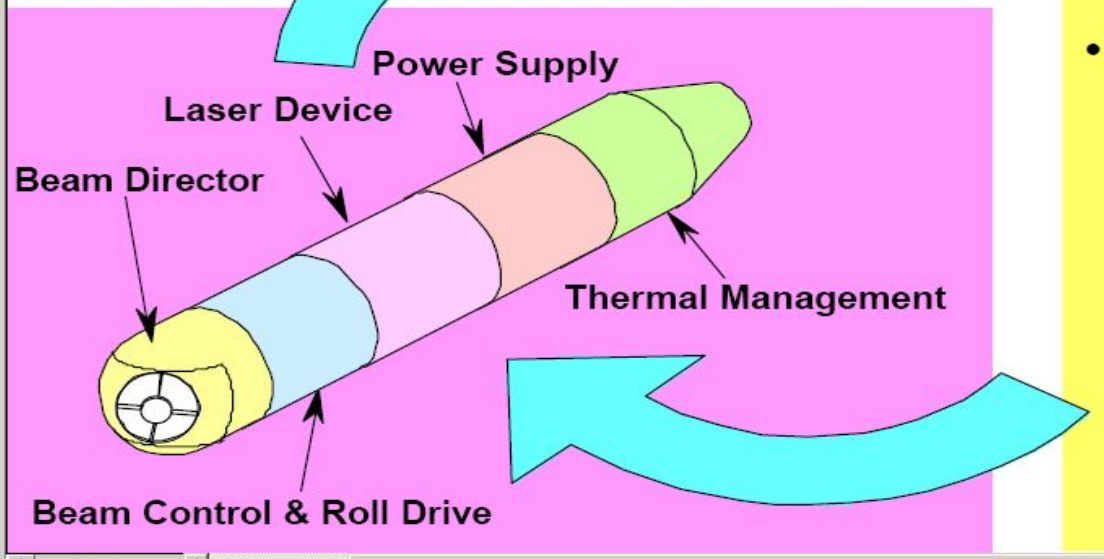
CAMIL

L&EOS

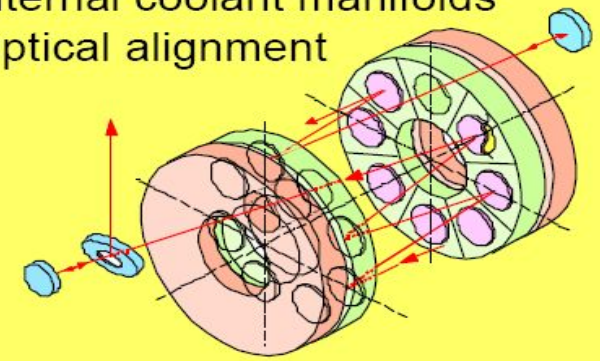
SSHEL Pod for Tactical Aircraft

- 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





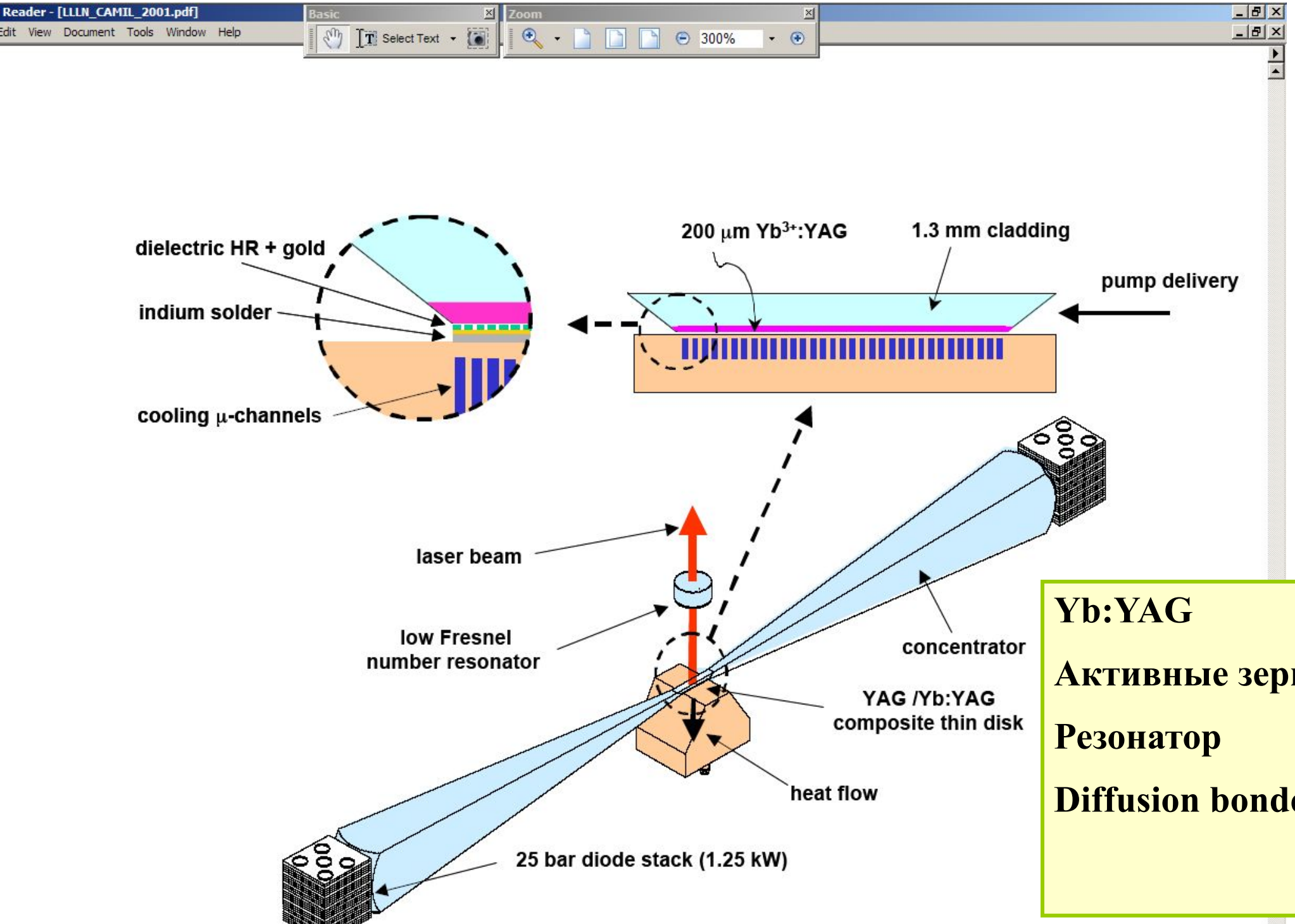
- CAMIL with multiple laser disks placed on a common substrate
  - Internal coolant manifolds
  - Optical alignment



11 x 8.5 in

14 of 18

Обзор действующих проектов. Ливермор



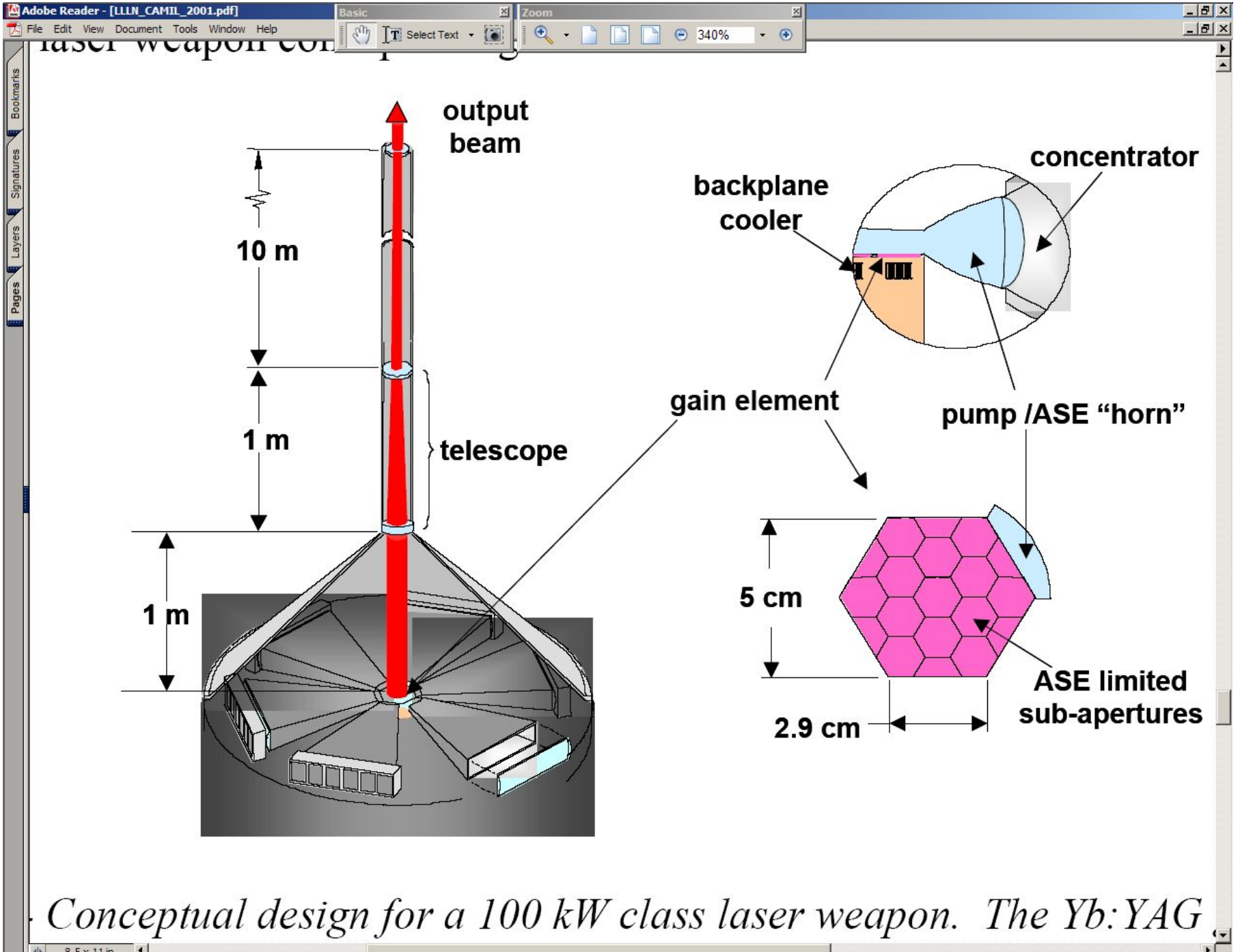
Yb:YAG

Активные зеркала

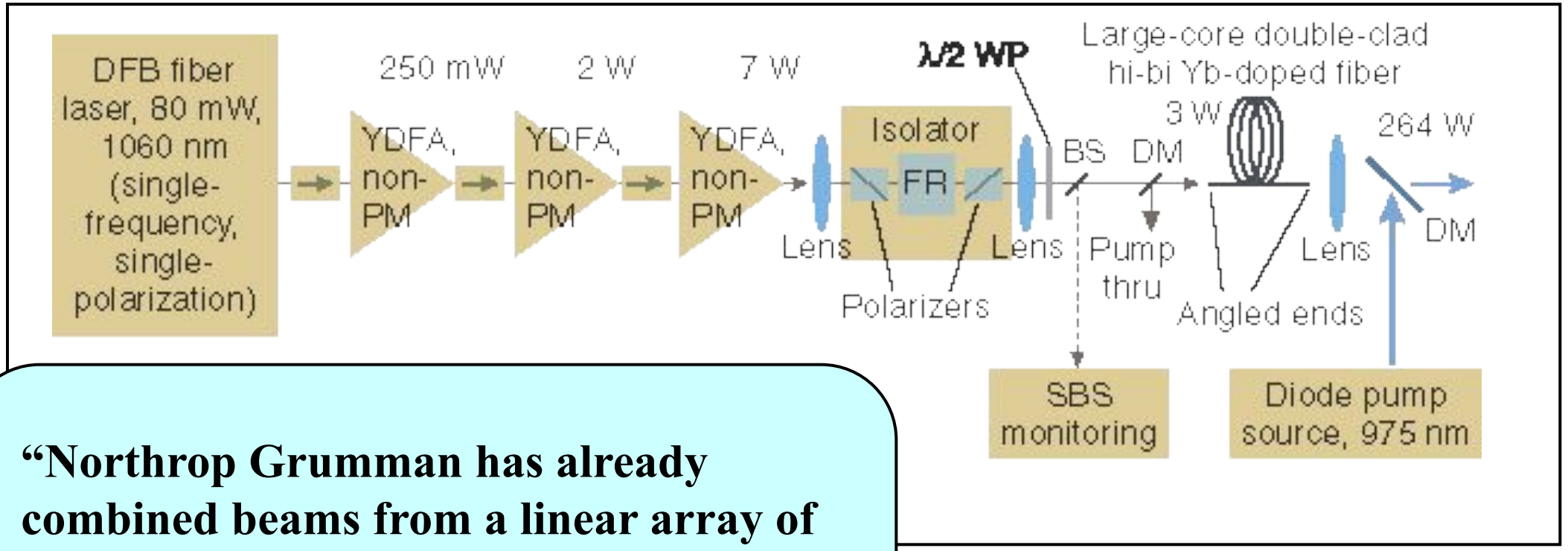
Резонатор

Diffusion bonded

Обзор действующих проектов. Ливермор



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	матрица	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