

## 室温動作 2J×100Hz DFCチップレーザーの開発

A) 理研レーザー (レーザー駆動電子加速技術開発グループ, 2018年発足)

PI: 平等拓範, 佐藤庸一, 石月秀貴, 辻明宏

B) 分子研レーザー (社会連携研究部門, 2019年発足)

PI: 平等拓範, 竹家啓, A. Kausas, V. Yahia, H.H. Lim

高エネ研

吉田光宏, 本田洋介, 周翔宇, 張叡

核融合研

安原亮

量研機構

桐山博光, 宮坂泰弘

## 室温動作 2J×100Hz DFCチップレーザーの開発

- はじめに
- コンセプト
- 実現手法（表面活性接合）
- DFCチップによるレーザー増幅特性
- 将来展望

## “Passion extreme light”



**Nobel Laureate Gérard Mourou**  
École Polytechnique (France)

Light materialisation

- Laser Astrophysics and Cosmology
- Polarization of Vacuum, Materialization of Light
- Transmutation of Nuclear Waste

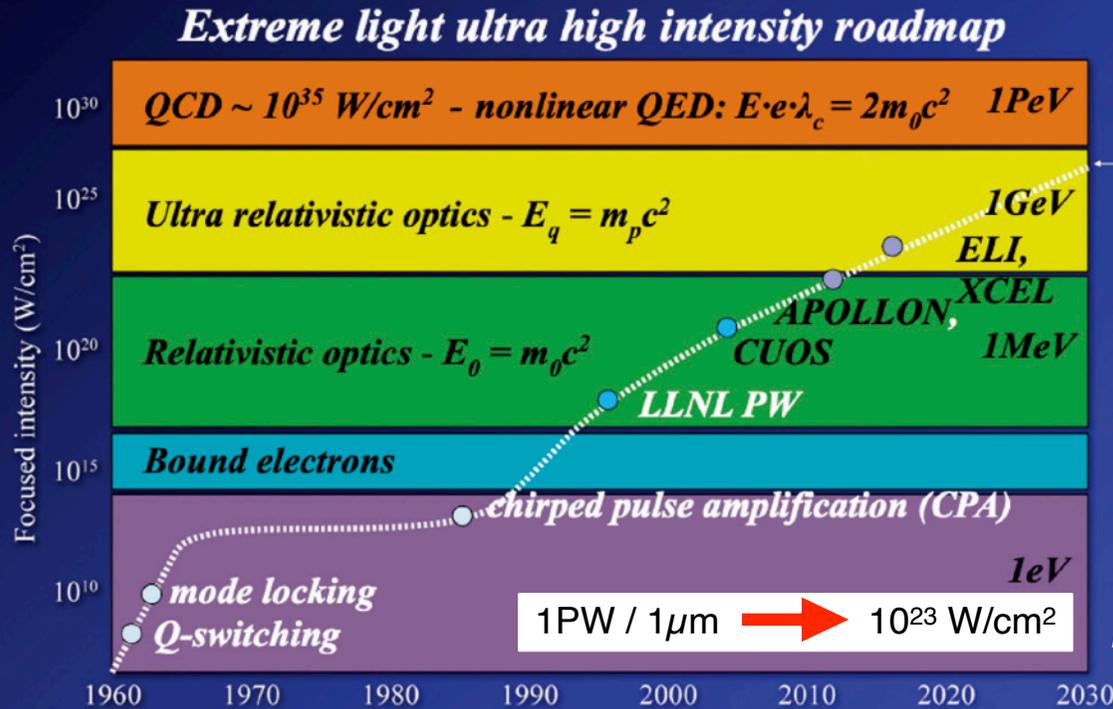


Figure 13. The Laser Wake Field Acceleration.

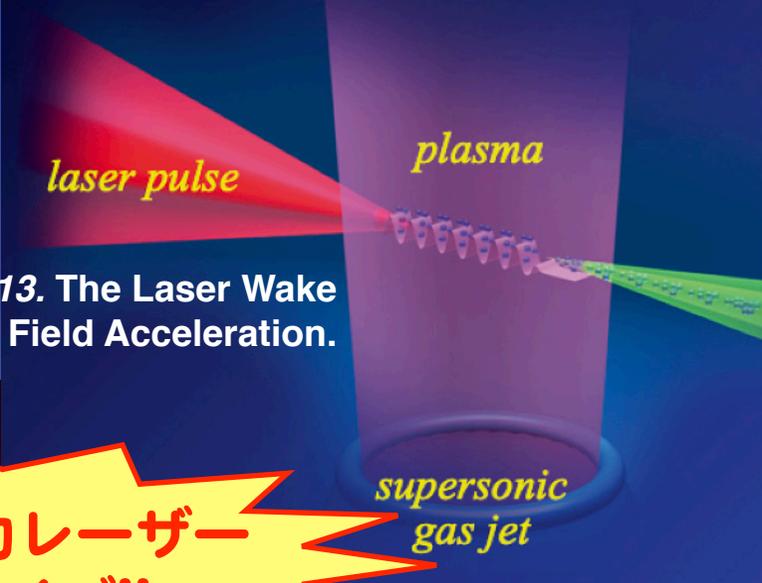


Figure 1. <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/10/mourou-lecture.pdf>

### LASE 2021 Symposium Chairs



**Craig B. Arnold**  
Princeton Univ.  
(United States)

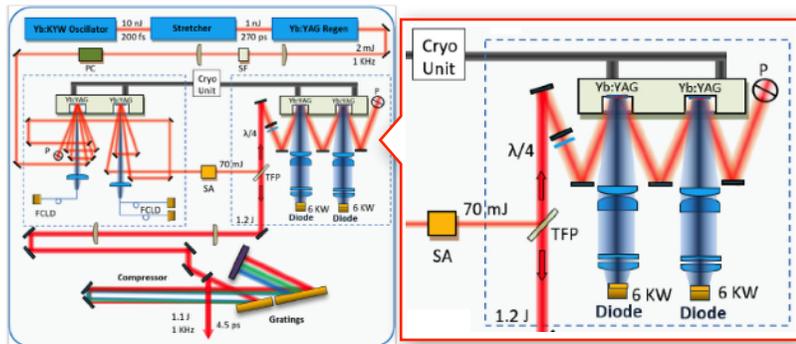


**Takunori Taira**  
RIKEN / IMS  
(Japan)

**ペタワット出力レーザー  
は体育館サイズ!!**

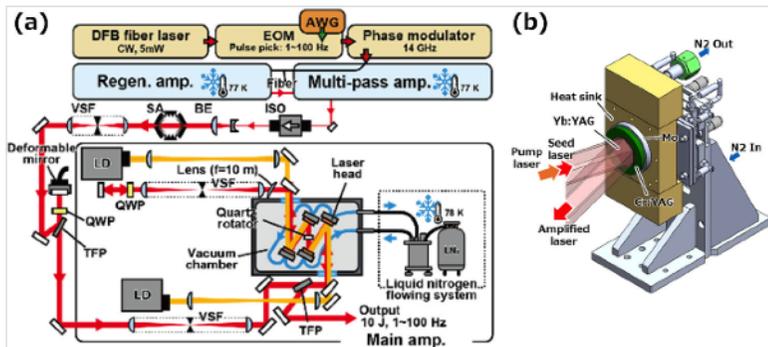
# 多段ディスクによる高出力レーザー

## Cryo-cooled Multi Active Mirror



Ref : Y. Wang, et. al., *Opt. Lett.*, 45 (24) 6615 (2020)

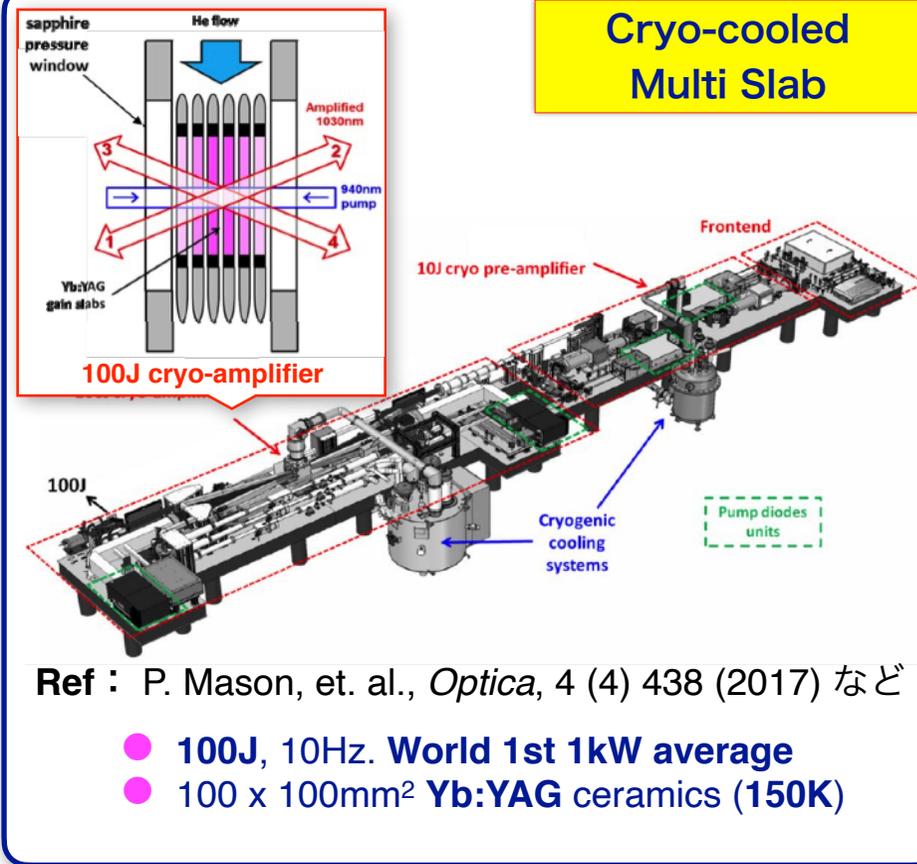
- 1.1J, 1000Hz, 1kW average
- 30 x 30mm<sup>2</sup> Yb:YAG crystal (130K)



Ref : J. Ogino, et. al., *Opt. Lett.*, 46 (3) 621 (2021)

- 9.3J, 33.3Hz
- φ60 mm Yb:YAG ceramics (130K)

## Cryo-cooled Multi Slab



Ref : P. Mason, et. al., *Optica*, 4 (4) 438 (2017) など

- 100J, 10Hz. World 1st 1kW average
- 100 x 100mm<sup>2</sup> Yb:YAG ceramics (150K)

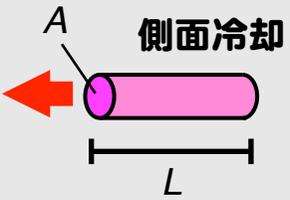
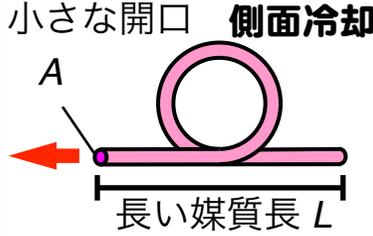
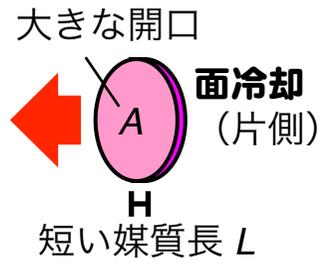
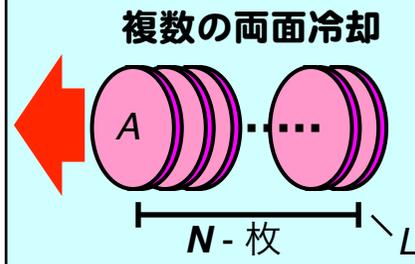
室温動作・モノリシック

2J x 100Hz (SG1)

▶ Distributed Face Cooling (DFC) chip

# 高出力固体レーザー (デバイス) 構成

\*マルチディスク：多重スラブ、多段アクティブミラーやモノリシックのDFC (Distributed Face Cooling, 分布面冷却) など

形状 パラメータ	ロッド	ファイバー	ディスク	マルチディスク*
				
最大抽出パワー <small>※ R<sub>T</sub>: 熱衝撃パラメーター</small>	$P_{ex} = \frac{8\pi R_T L}{\chi}$	$P_{ex} = \frac{8\pi R_T L}{\chi}$	$P_{ex} = \frac{12R_T}{\chi} \left( \frac{A}{L} \right)$	$P_{ex} = 2N \cdot \frac{12R_T}{\chi} \left( \frac{A}{L} \right)$
スケールリング	×	○	○	◎
利得 $g = \Delta n \sigma L$	○	○ 長い L	×	◎ N倍の L, 高い Δn
最大エネルギー $E_{max} = A \times LIDT$	○	×	○ 寄生発振との戦い	◎ 寄生発振の抑制

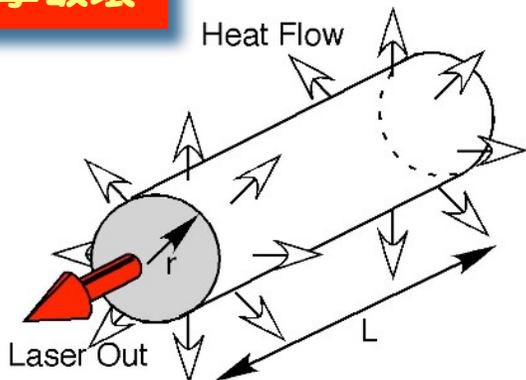
**アーティフィシアルレーザー材料の深化は新材料発見と同等またはそれ以上の効果**

● 固体レーザーからの出力限界

**励起に伴う発熱 ▶ 熱衝撃破壊**

$$P_{ex} \leq \frac{8\pi R_T L}{\chi}$$

L: rod length



**熱衝撃パラメータ：**

$$R_T = \frac{\kappa(1-\nu)\sigma_{max}}{\alpha E} \propto \frac{\kappa\sigma_{max}}{\alpha}$$

$\nu$ : Poisson ratio,  $E$ : Young's modulus,  $\alpha$ : expansion ratio,  $\sigma_{max}$ : maximum tensile strength

熱伝導率：物質に強く依存

● **材料探索の意義は大！**

**熱発生率：** 輻射量子効率(結晶場)に強く依存

$$\chi = \frac{\eta_h}{\eta_p \left( \frac{\lambda_p}{\lambda_f} \frac{1 - e^{-t_p/\tau_f}}{t_p/\tau_f} \right)}$$

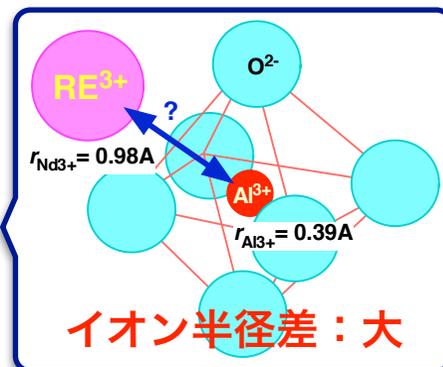
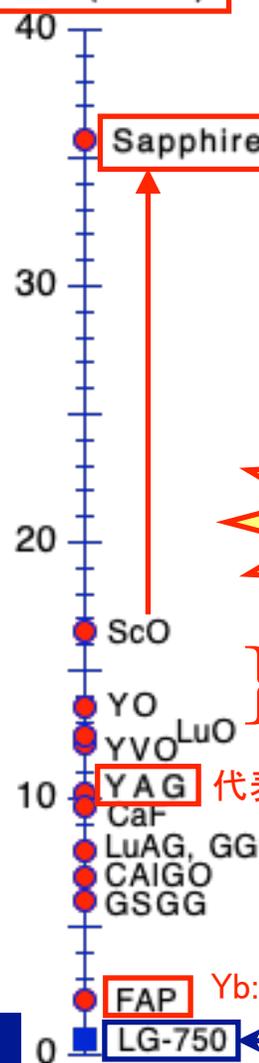
● **材料開発の意義は大！**

← 強励起に依る自然放出抑制

← 量子欠損の少ない励起法

**冷却構造を変える ▶ Distributed Face Cooling (DFC)**

Thermal Conductivity  
 $\kappa$  @RT (W/mK)



● **分光特性に難！**

**Nd:YAG in Sapphire**  
▶ **DFC**

} 単結晶育成難 → セラミックス

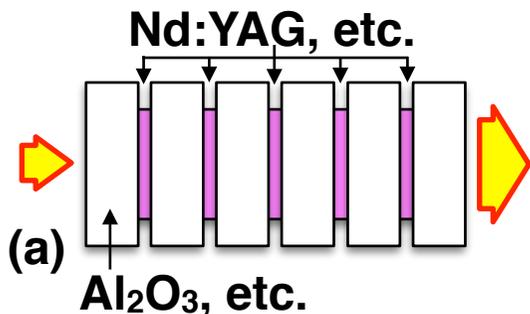
代表的固体レーザー母材

Yb:FAPは魅力的だが育成が難

# DFC (分布面冷却) 構造小型集積レーザー

分光特性を含め総合的にYAGは優れている

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ダイヤモンドのκは高い



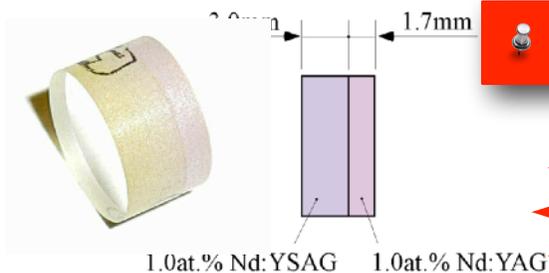
DFCで各種材料の特長を集積

- Nd:YAG 等の優れた発光特性
  - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等の高い熱伝導率
- ⇒ RE:YAG 熱伝導率の劇的向上

**Nd:YAG  
in Sapphire**

- スペクトル合成の提案

**Nd:YAG/Nd:YSAG**



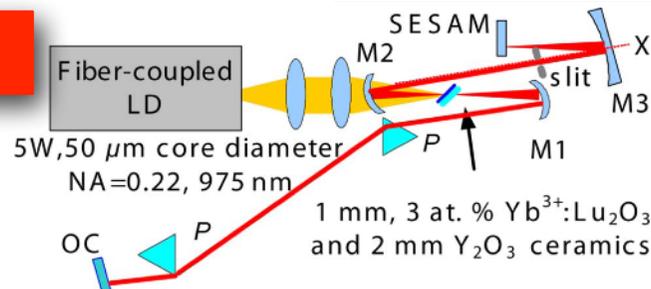
昇温接合は常温で歪!

原子レベル  
常温接合

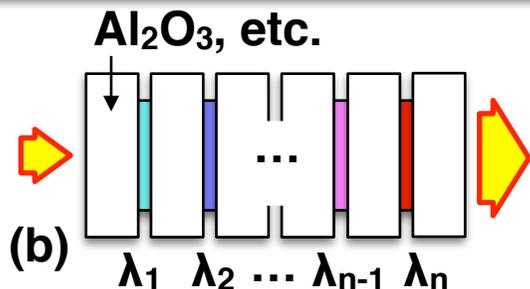
Ref. Y. Sato, et al., IEEE JSTQE13(3), 838 (2007)

- 超短パルス発生

**Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**



Ref. M. Tokurakawa et al., Opt. Lett. 33 (12) 1380 (2008).



$$\lambda_{total} = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n$$

- 各材料のスペクトルを加算
- ⇒ 形状も含めたスペクトル合成

**ゲームチェンジ**

\* DFC: Distributed Face Cooling

## 量子効率改善：Nd上準位直接励起法

### 特長

- Ndの上準位 ( $4F_{3/2}$ ) に直接励起 ▶ 量子効率を改善
- $4F_{5/2}$ と $4F_{3/2}$  遷移 (赤点線) 省略 ▶ 発熱30~50%減
- 室温で大きな利得 ( $\sigma_e$ ) ▶ Yb:YAGの10倍以上
- 室温で四準位レーザー ▶ 室温でも下準位損失は無し

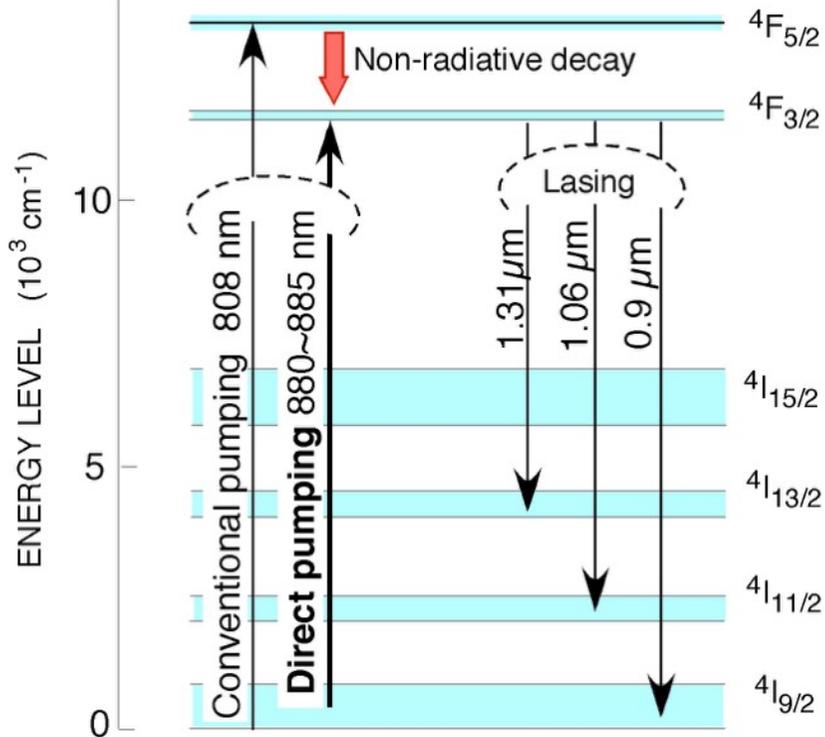
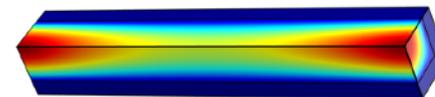


Fig. Energy diagram of Nd-laser.

### FEMシミュレーション (COMSOL)

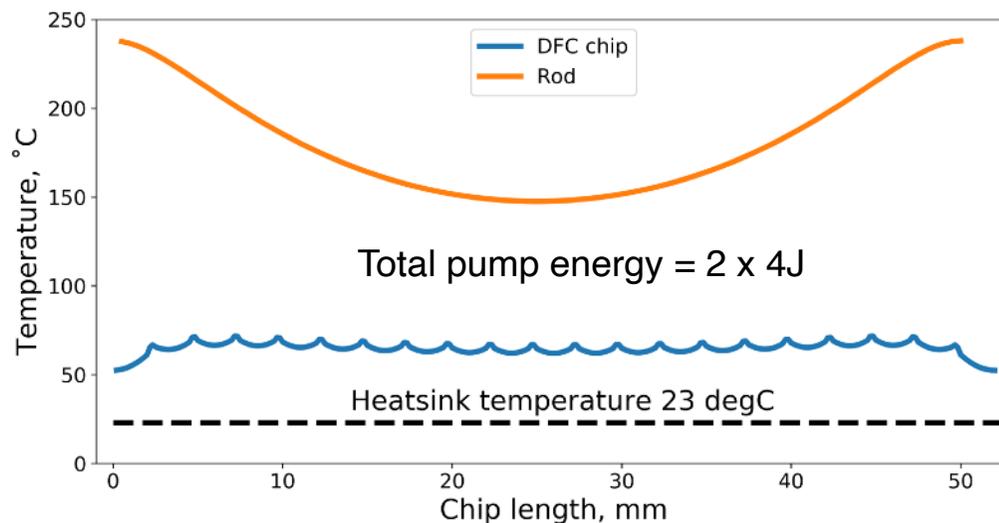
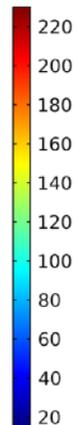
Nd<sup>3+</sup>:YAG rod  
1.0-at%  
50 mm length



DFC chip  
1.1-at%  
53 mm length

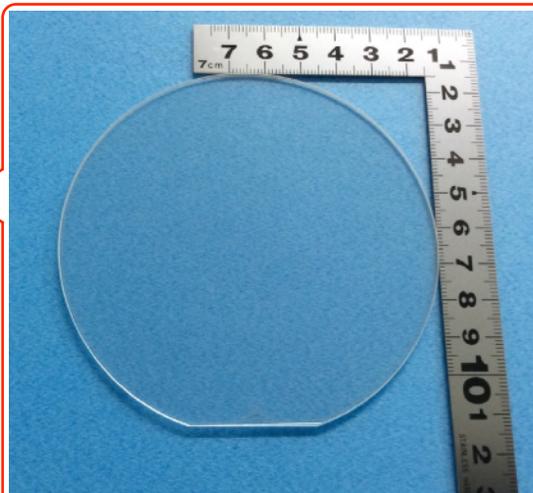
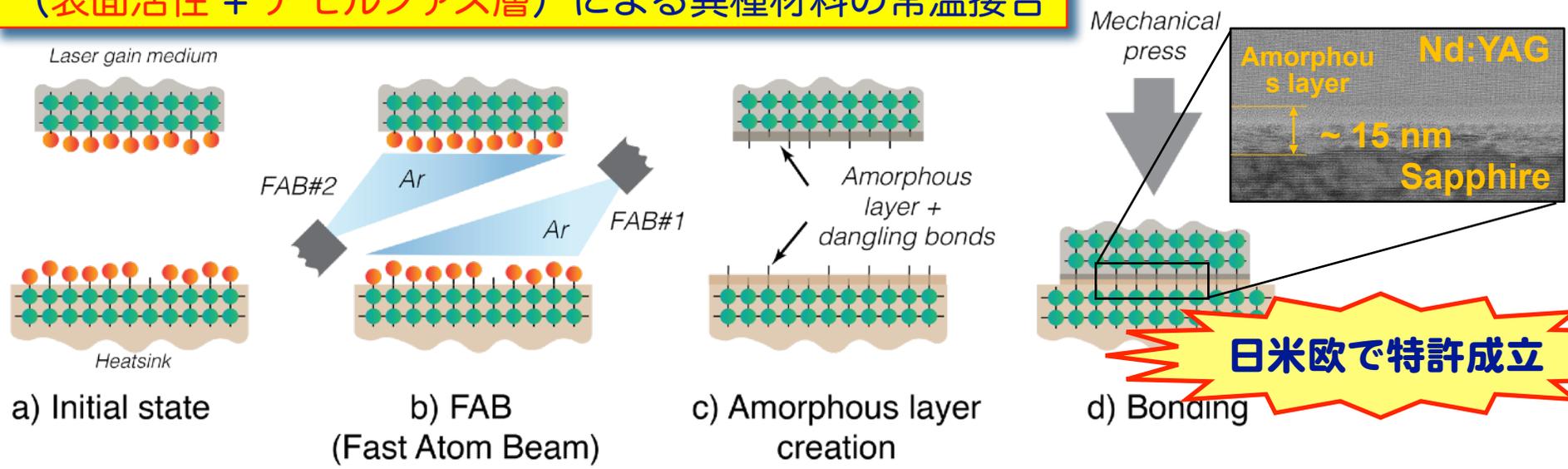


degC

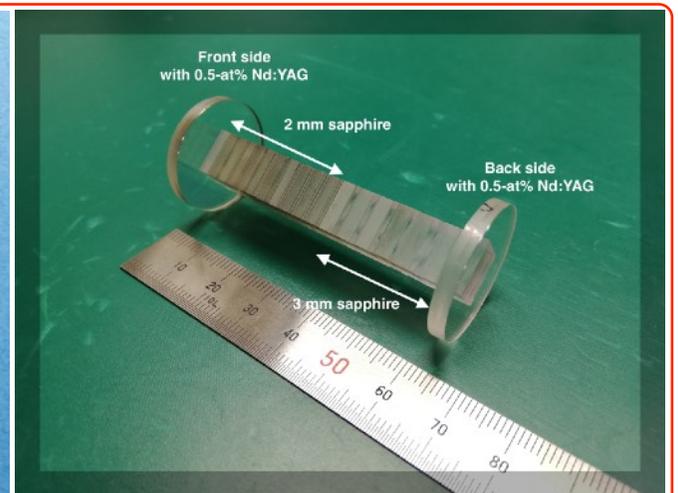


# DFC チップを可能とする表面活性接合装置の開発

(表面活性 + アモルファス層) による異種材料の常温接合

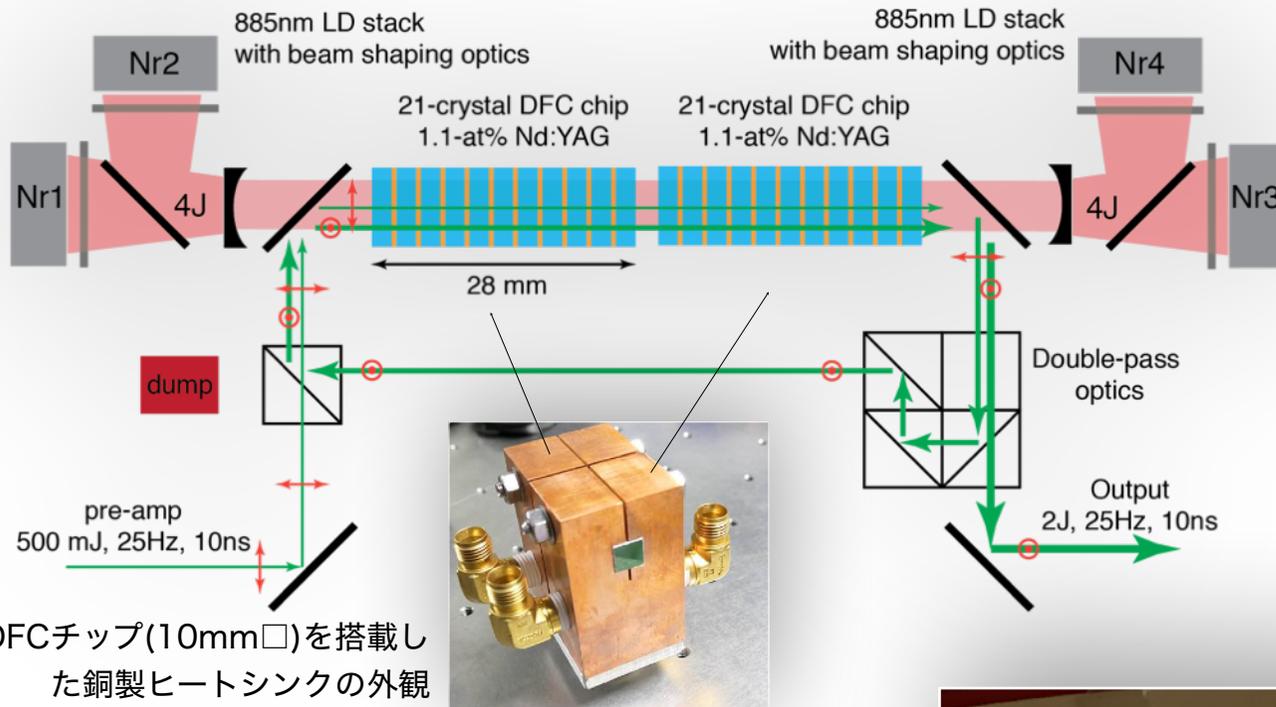


大口径 (10cm  $\phi$ )  $Al_2O_3$ 板の常温接合



異なるNd:YAG (濃度) /  $Al_2O_3$ チップ連続常温接合

# 室温動作 2J-DFC チップ増幅器 (分子研、理研、KEK)



DFC chip 2x (gain length 10 mm)

1.1-at% doped Nd<sup>3+</sup>:YAG

10x10x0.5 mm<sup>3</sup>

c-cut Sapphire

10x10x2 mm<sup>3</sup>

Pump 4x LD modules

Wavelength 885 nm

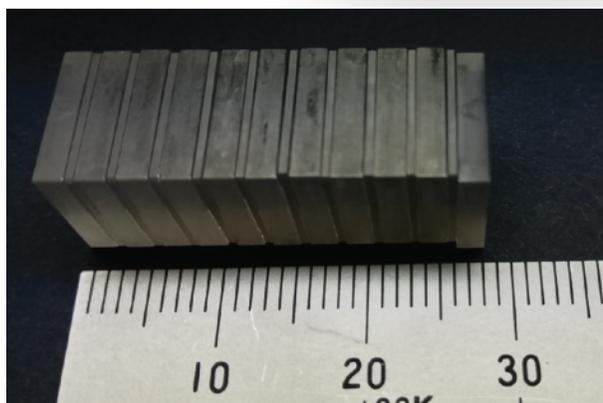
Rep. rate 1 Hz to 50 Hz

Pump pulse 250 μs

Pump power 8 kW per LD

Pump energy 2 J per LD

DFCチップ(10mm□)を搭載した銅製ヒートシンクの外観



21枚の接合DFC (0.5mm Nd:YAG/ 2mm sapphire)



(a) 基本波 (1064nm)

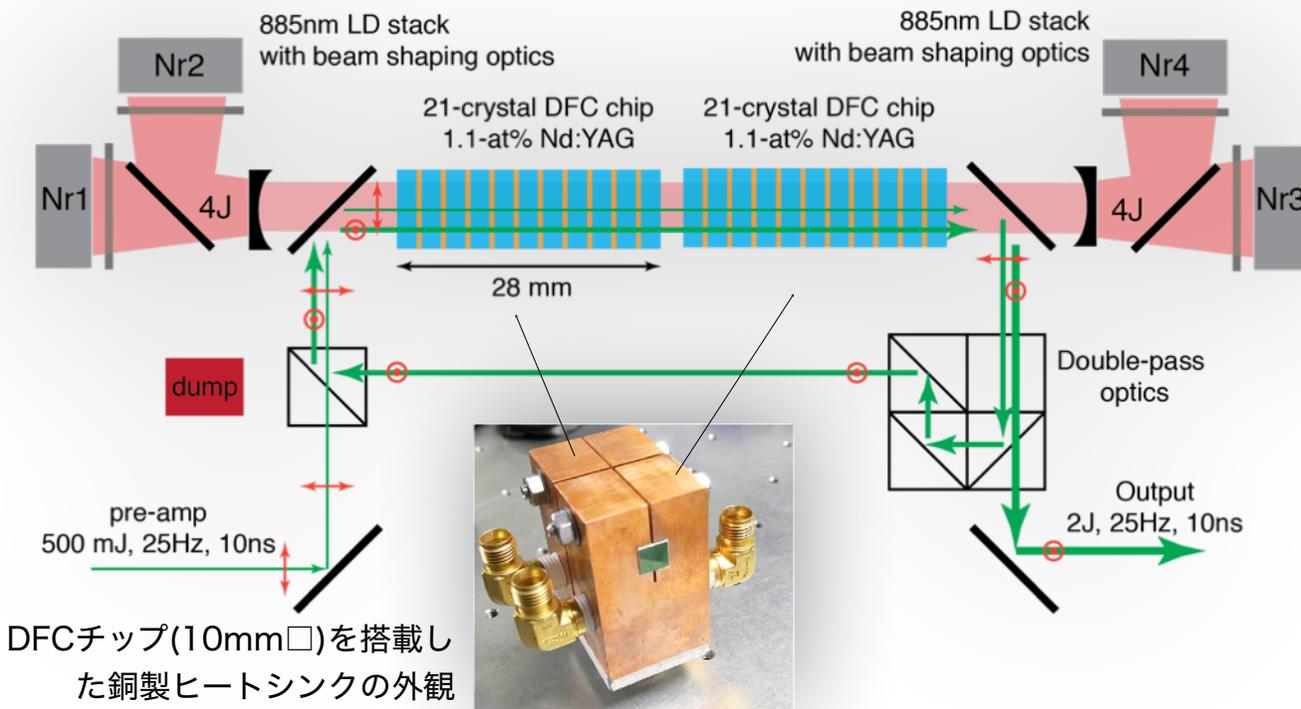


(b) SH波 (532nm)

**基本波 >2J, 50Hz DFCチップレーザー(室温)を検証**

**→ 偏光結合により 100Hz 動作が可能**

# 室温動作 2J-DFC チップ増幅器 (分子研、理研、KEK)



DFC chip 2x (gain length 10 mm)

1.1-at% doped Nd<sup>3+</sup>:YAG

10x10x0.5 mm<sup>3</sup>

c-cut Sapphire

10x10x2 mm<sup>3</sup>

Pump 4x LD modules

Wavelength 885 nm

Rep. rate 1 Hz to 50 Hz

Pump pulse 250 μs

Pump power 8 kW per LD

Pump energy 2 J per LD

	Energy	Rep. rate	Aperture	Fluence		Temp.
	E (J)	f <sub>rep</sub> (Hz)	(cm x cm)	E (J/cm <sup>2</sup> )	P <sub>AV</sub> (W/cm <sup>2</sup> )	
ELI-DiPOLE	100	10	10 x 10	1	10	150K
This work	2	50	1 x 1	2	100	RT

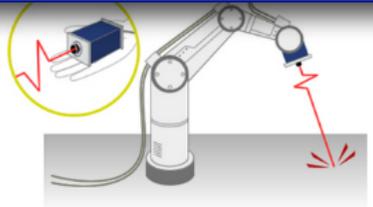
室温ながらELI-DiPOLEを超える!

# 電子加速に向けたレーザー装置の開発



**ブレイクダウンして社会実装 ⇒ 産業展開**

10Jモジュールを企業と協力し産業展開  
↓  
低価格化



**束ねて究極を目指す ⇒ 先端科学**

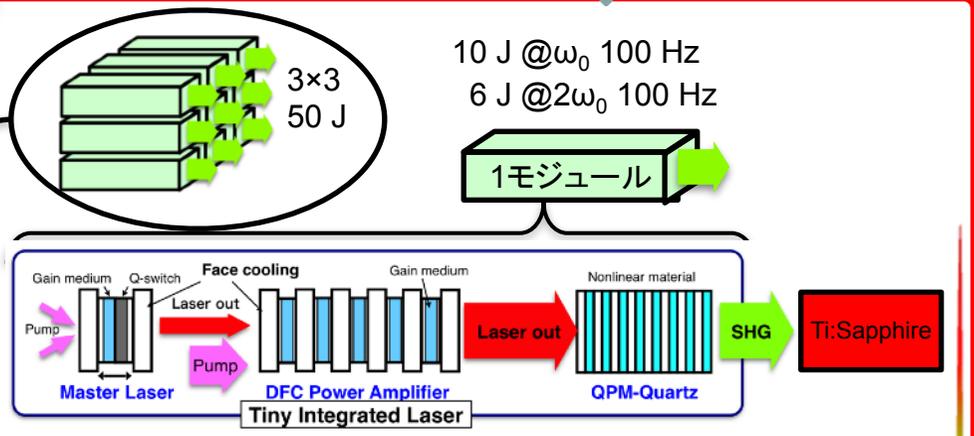
現在  
励起用ガラスレーザー

25 J @ 0.1 Hz

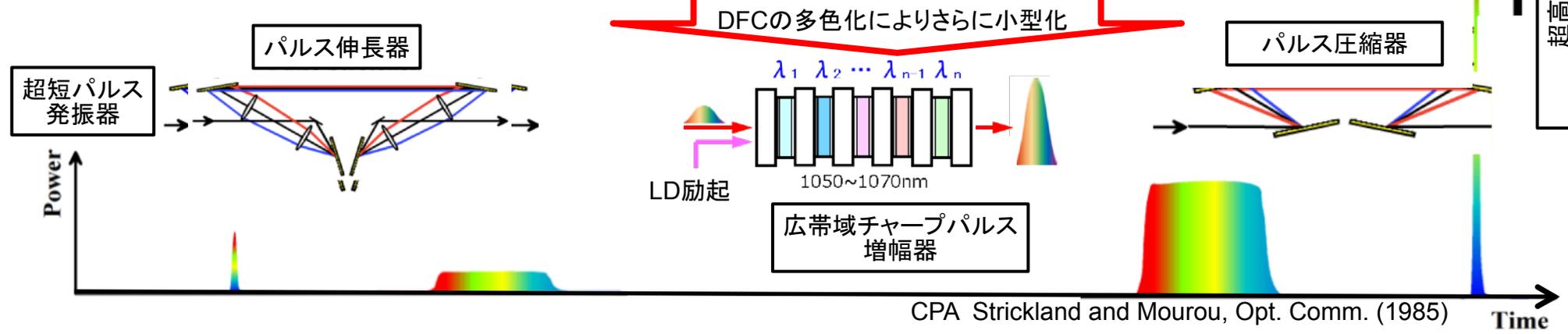
本提案  
DFC 6Jモジュールを必要数  
並べてTi:Sapphireを励起

イメージ図

50 J @ 100 Hz



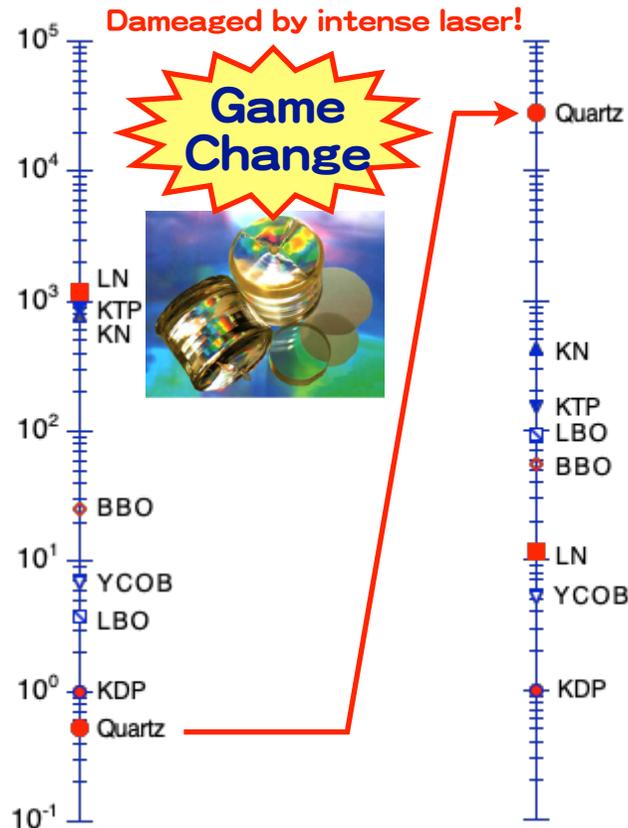
↑  
超高峰出力の発生



**Table** 代表的非線形光学波長変換材料特性

Material	LBO	LN	Quartz
Formula	LiB <sub>3</sub> O <sub>5</sub>	LiNbO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
Refractive index @1.064 μm	$n_x = 1.5656$ $n_y = 1.5905$ $n_z = 1.6055$	$n_o = 2.234$ $n_e = 2.144$	$n_o = 1.5341$ $n_e = 1.5428$
Laser damage th. intensity, $I_{DT}$ @1.064 μm	45 GW/cm <sup>2</sup> @1.1 ns	~300 MW/cm <sup>2</sup> @10 ns	<b>600 GW/cm<sup>2</sup> @ 0.7 ns</b>
Nonlinear coefficient, (pm/V) @1.064 μm	$d_{31} = 0.67$ $d_{32} = 0.85$ $d_{33} = 0.04$	$d_{31} = 4.6$ $d_{33} = 25.2$	$d_{11} = 0.30$
Transparent range	0.16 - 2.6 μm	0.33 - 5 μm	<b>0.15 - 2.8 μm</b>

- 位相整合が取れない ▶ 擬似位相整合
- 小さな非線形性 ( $d$  定数) ▶ 強力なレーザー



(a) Conventional FOM (b) Offered FOM : Include  $I_{DT}$   
FOM of nonlinear optics (normalized by KDP)

水晶 (Quartz) Excimer Laser

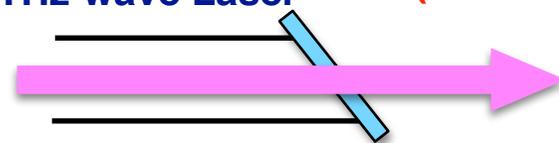


VUV (> 150nm) に至る窓材



- 最高値の損傷耐性
- 地上に豊富な資源
- 極限波長で透明
- 潮解性が無い

THz-wave Laser 水晶 (Quartz)



THz波 (> 40μm) における窓材

- 関連情報
- ・高性能レーザーの社会実装のためのコラボスペースとして分子研建屋リニューアルを開始, R3度完成予定
  - ・マイクロ
  - ・佐野PM
- 販売開始  
に提案・採択

**パワーレーザーのダウンサイズ ⇒ 社会実装**

## 小型集積レーザーの応用イメージ



<https://tila.ims.ac.jp/>

\*上記研究は理化学研究所放射光科学センターとJST未来社会創造事業と協力し推進しています。

産官金有料会員：32社（発足時：17社）

# 室温動作 2J×100Hz DFCチップレーザーの開発

- エネルギーフルーエンス：2J/cm<sup>2</sup>
- 平均パワーフルーエンス：100W/cm<sup>2</sup>

室温ながらELI-DiPOLEを超える！

パワーレーザーの  
小型集積化  
⇒ 新たな価値

- 極限的粒子加速の探求 ⇒ 先端科学
- パワーレーザーのダウンサイズ ⇒ 社会実装（産業化）



TILA  
Tiny Integrated Laser



## ご清聴ありがとうございました