

小型集積パワーレーザー 及び光素子

自然科学研究機構 分子科学研究所 社会連携研究部門

特任教授

理化学研究所放射光科学研究センター レーザー駆動電子加速技術開発

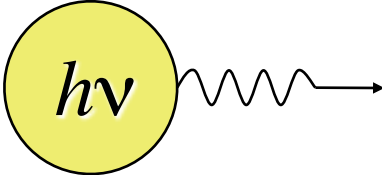
グループディレクター

平等 拓範

2022年5月13日

従来技術とその問題点

光子（フォトン）


$$= 30,000 \text{ K}$$



光は集めて強くできる ▶ レーザー

注) 単位光子エネルギー（可視域） : $E = h\nu \sim 2.5 \text{ eV}$
単位熱エネルギー（300K） : $E = kT \sim 0.025 \text{ eV}$

従来技術とその問題点

世界最強レーザー：米LLNL レーザー核融合施設

2 MJ のレーザー光（3 倍波）を 250-350 μ m に集光
： >10⁸K まで昇温し核融合を引き起こす

Ref. K. Schaffers et al., IWCGT-4 (2008).



フットボール
スタジアム3面分



● ドーナツのカロリー

» 409 kcal

エネルギー換算

» 409 kcal x 4.186 J/cal
= 1.712 x 10⁶ J
~ 2 MJ

“レーザー”とはエネルギー品質の変換器 ▶ 小型高輝度レーザー

従来技術とその問題点

世界最強レーザー：米LLNL レーザー核融合施設

- **世界最強レーザー**，核融合点火NIF (LLNL)：4.2MJ (波長 $1\mu\text{m}$)，1.8MJ (351nm)
- **高性能化**，ELI-DiPOLE：Nd:ガラス → Yb:YAGセラミックス，100J@150K ($1\mu\text{m}$)

NIF (LLNL)

Ref. K. Schaffers et al., IWCGT-4 (2008).



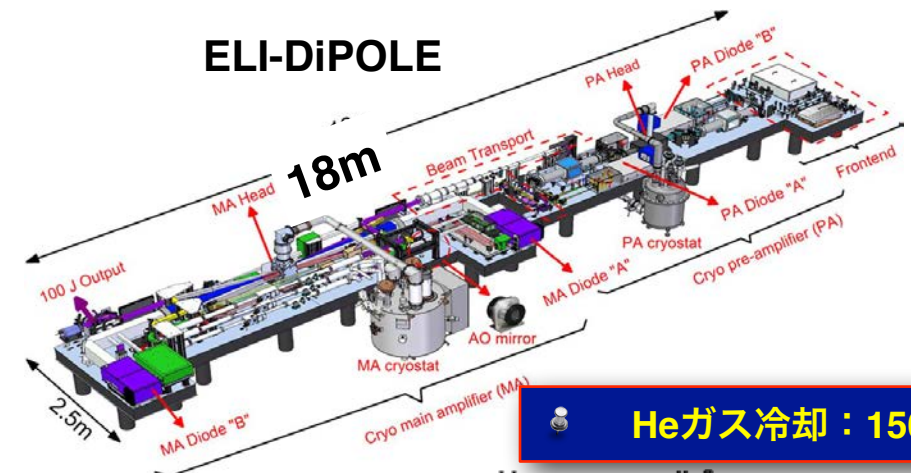
- レーザー施設：フットボールスタジアム3個分の面積

● 熱問題が深刻！

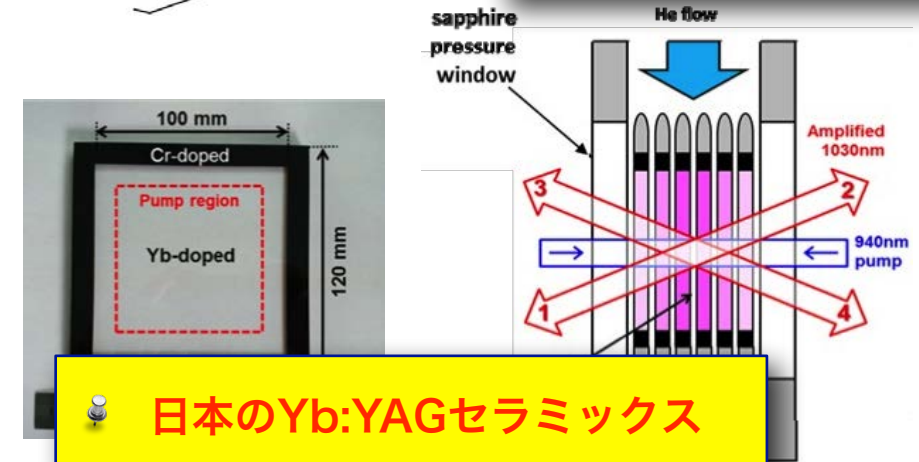
- **4.2MJ, 10^{-4}Hz → 420W 動作**

Ref. M. L. Spaeth et. al., FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY, 69, 25 (2016).

ELI-DiPOLE



● Heガス冷却：150K



● 日本のYb:YAGセラミックス

- **100J, 10Hz, 世界初の平均出力 1kW 動作**

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

従来技術とその問題点

既に実用化されている高強度パワーレーザーには、ガラスレーザーやYAGレーザーなど多くあるが

- 励起に伴う量子欠損に起因した熱発生
- 熱レンズや熱複屈折効果、熱歪による破壊

等の問題を解決するために装置が複雑かつ大型となった。さらに効率が低いだけでなく、温度変化や振動に弱いため実験室からなかなか持ち出せず、広く利用されるまでには至らなかった。

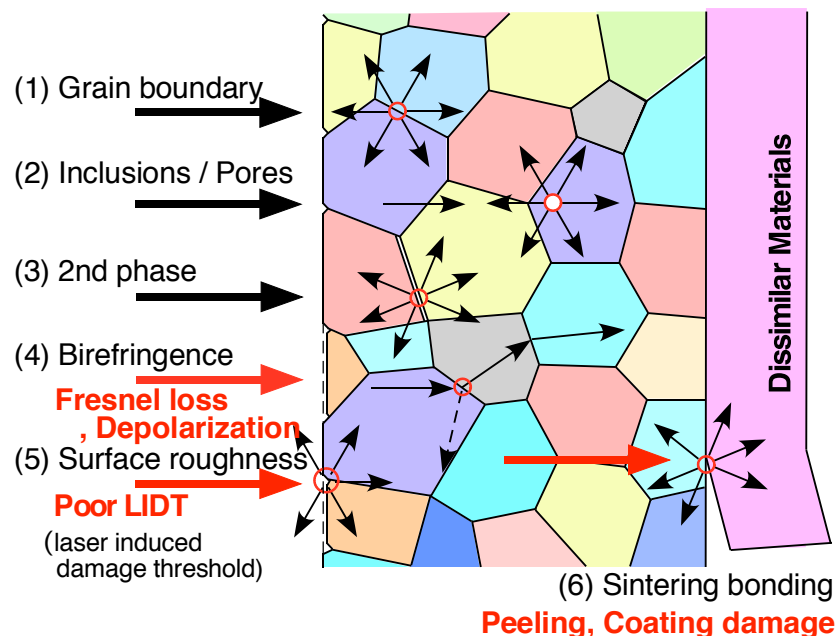
従来技術とその問題点

多結晶レーザー材料の利点

- 大型均質材料の量産
- 相転移材料への対応
- 添加元素の種類・量の自由度向上
- スペクトル・構造の機能設計
- 構造材としての強度向上

散乱損失大 ▶ レーザー発振は不可能

T. Taira, A. Ikesue, and K. Yoshida: OSA TOPS, 19(3), 430 (1998).



セラミックスの散乱要因

Ref. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 13, 798 (2007). **INVITED**



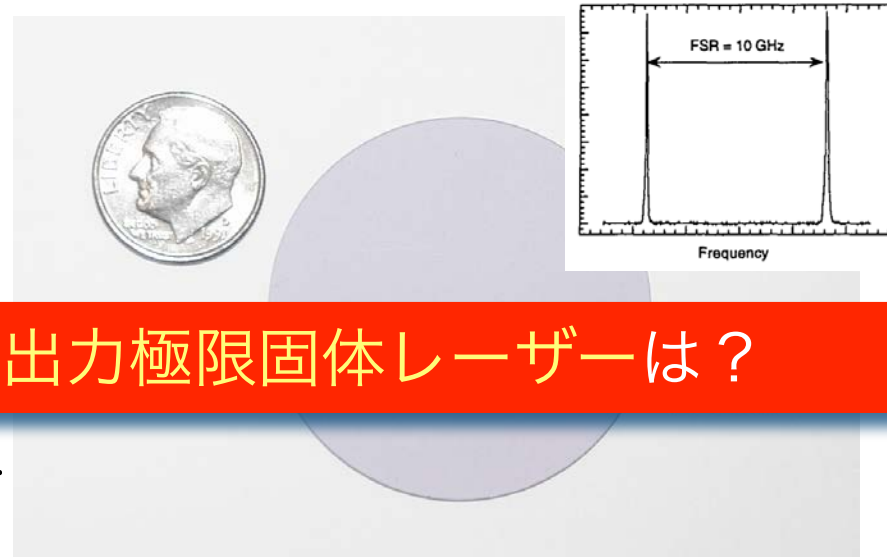
B.C. 3000, Japan

セラミックレーザー成功

- 等方的な立方晶系に限定

セラミックレーザー限界を突破する 高出力極限固体レーザーは？

- 高輝度セラミックレーザー
(1998年 ASSL報告)



A.C. 1998, JFCC/IMS, Japan

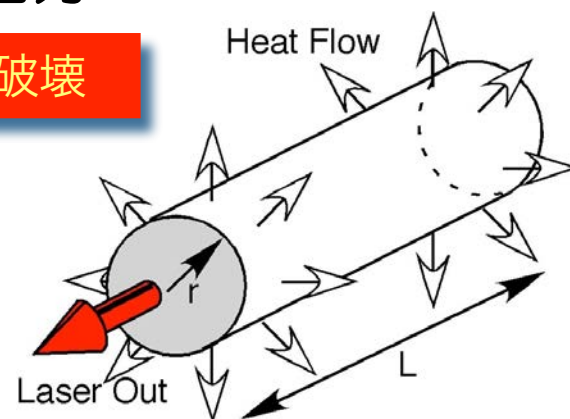
従来技術とその問題点

● 固体レーザーの限界出力

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



熱発生率：熱負荷効率：輻射量子効率（結晶場）に依存

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

← 強励起に依る自然放出抑制

量子欠損の少ない励起法

Nd:YAG上準位直接励起 → 利得・量子効率ともに大

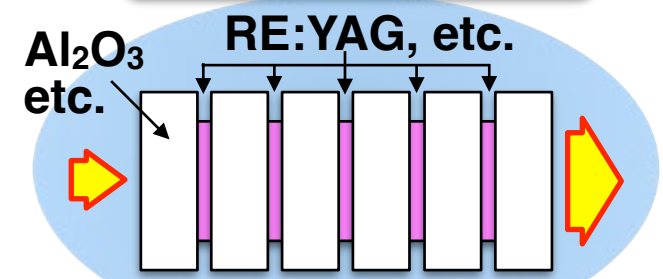
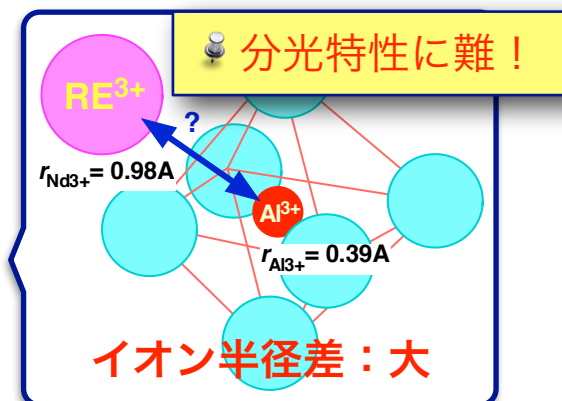
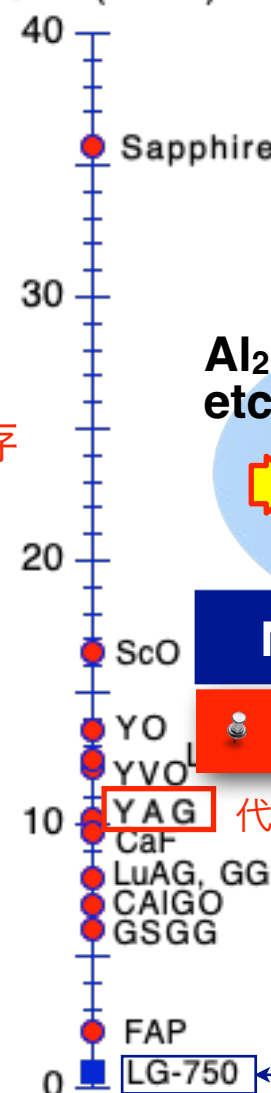
熱衝撃パラメータ：熱伝導率：物質に強く依存

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

材料探索の意義は大！

ν : Poisson ratio, E : Young's modules, α : expansion ratio, $\sigma_{\max}$: maximum tensile strength

Thermal Conductivity
 κ @RT (W/mK)



Nd:YAG in Al₂O₃ ▶ DFC

低歪みの常温接合が不可欠

代表的固体レーザー母材

Nd:glass

*DFC：分布面冷却（Distributed Face Cooling）

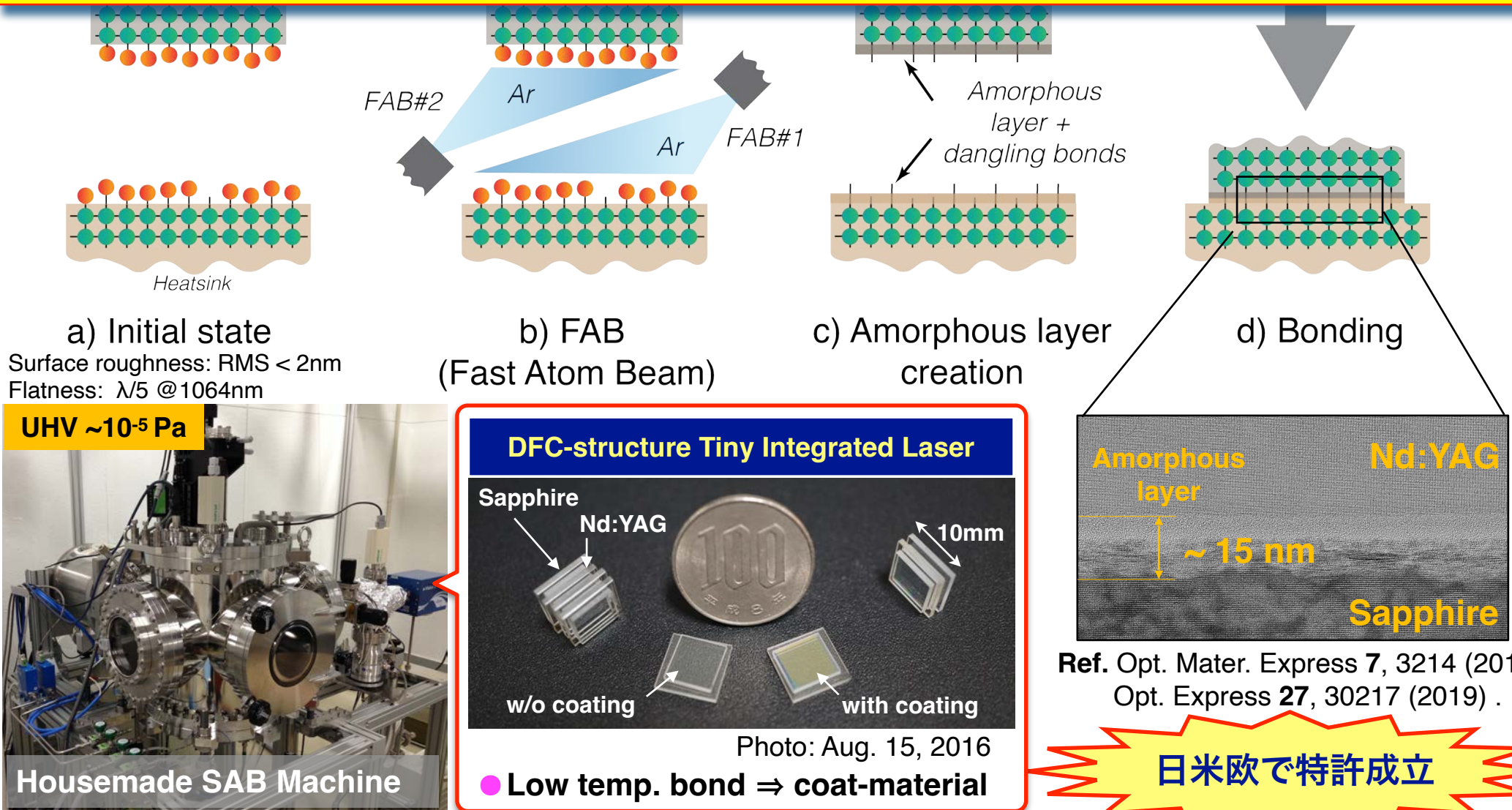
新技術の特徴・従来技術との比較

- 従来技術の問題点であった、様々なレーザー素子の常温接合に中間層を介した表面活性接合（il-SAB）法の開発により成功した。
- 従来は線膨張係数を考慮し同種材料の接合に限られていたが、常温での接合が可能になったため、熱伝導率の高いヒートシンクや機能発現のための異種材料接合が可能になった。
- 本技術の適用により、高強度の小型集積レーザー（TILA）がウェハープロセスにより可能となる。

新技術の特徴・従来技術との比較

il-SAB : Intermediate Layer assist Surface Activated Bonding^{Mechanical}

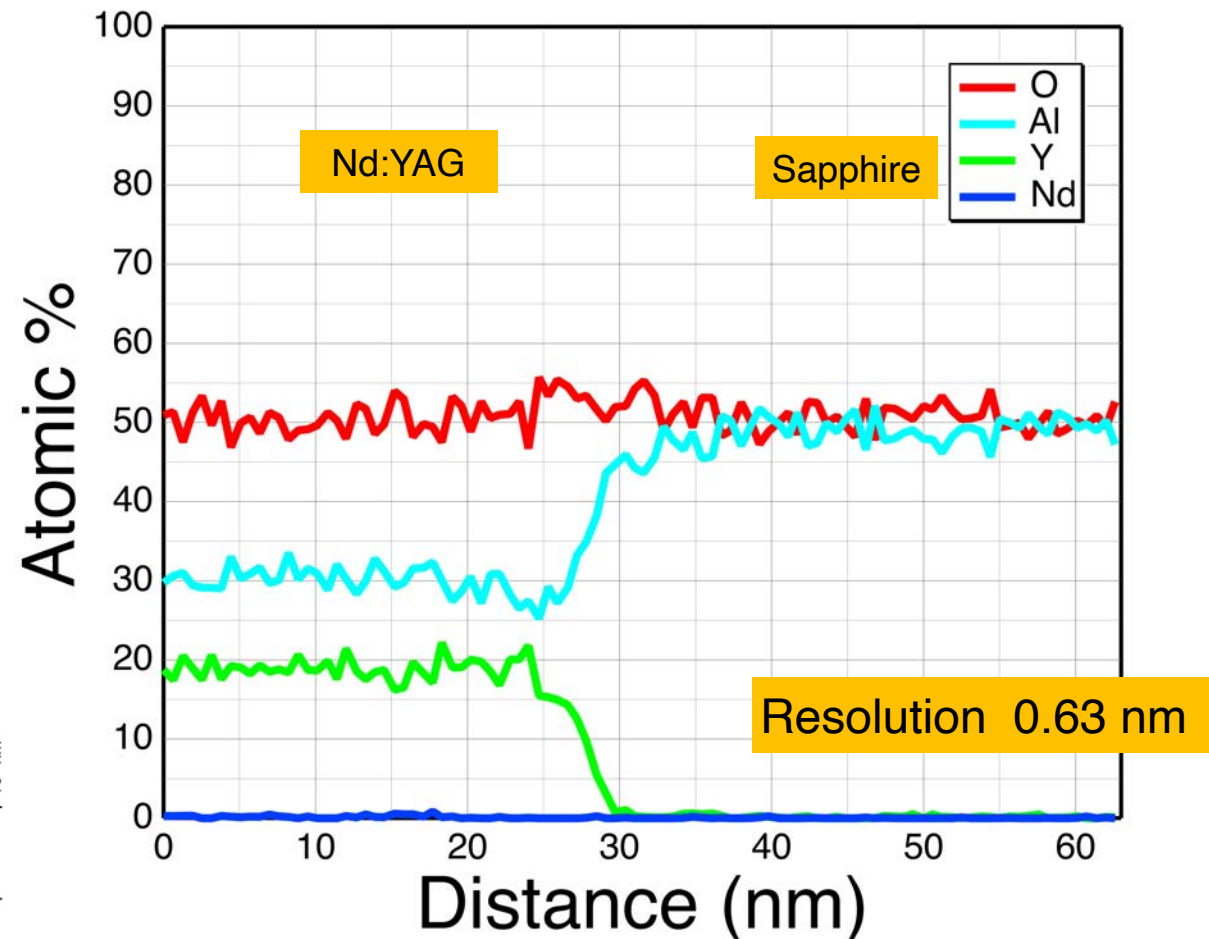
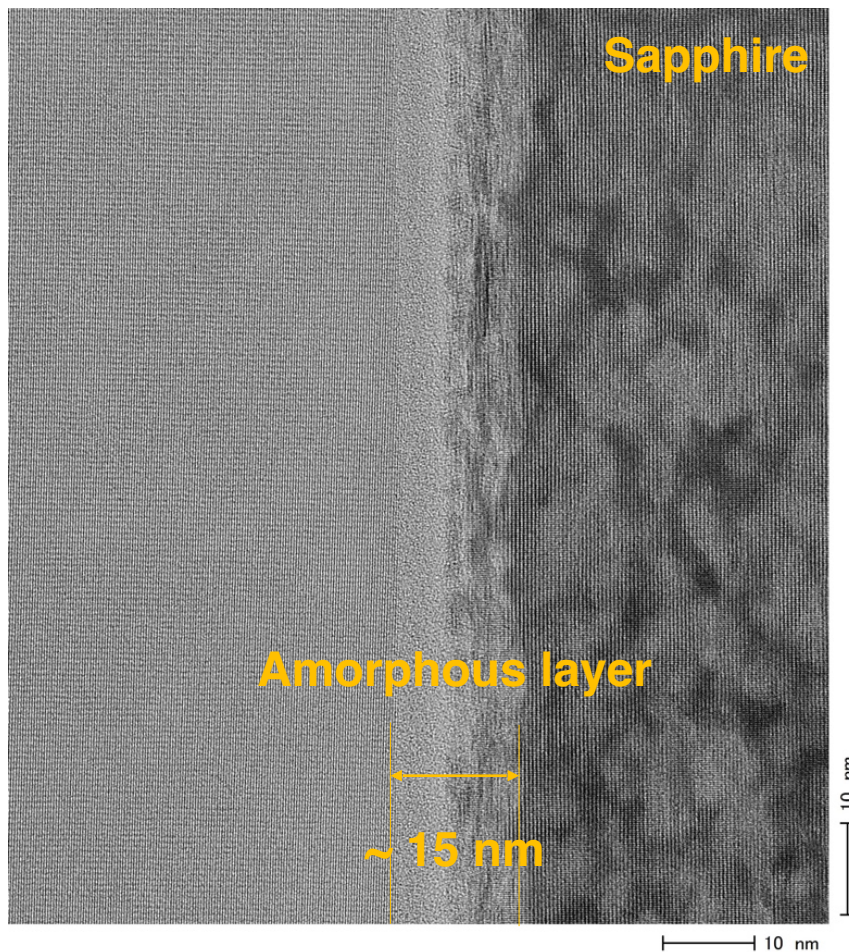
(表面活性 + アモルファス層) により (異種) 光学材料の常温接合が可能



新技術の特徴・従来技術との比較

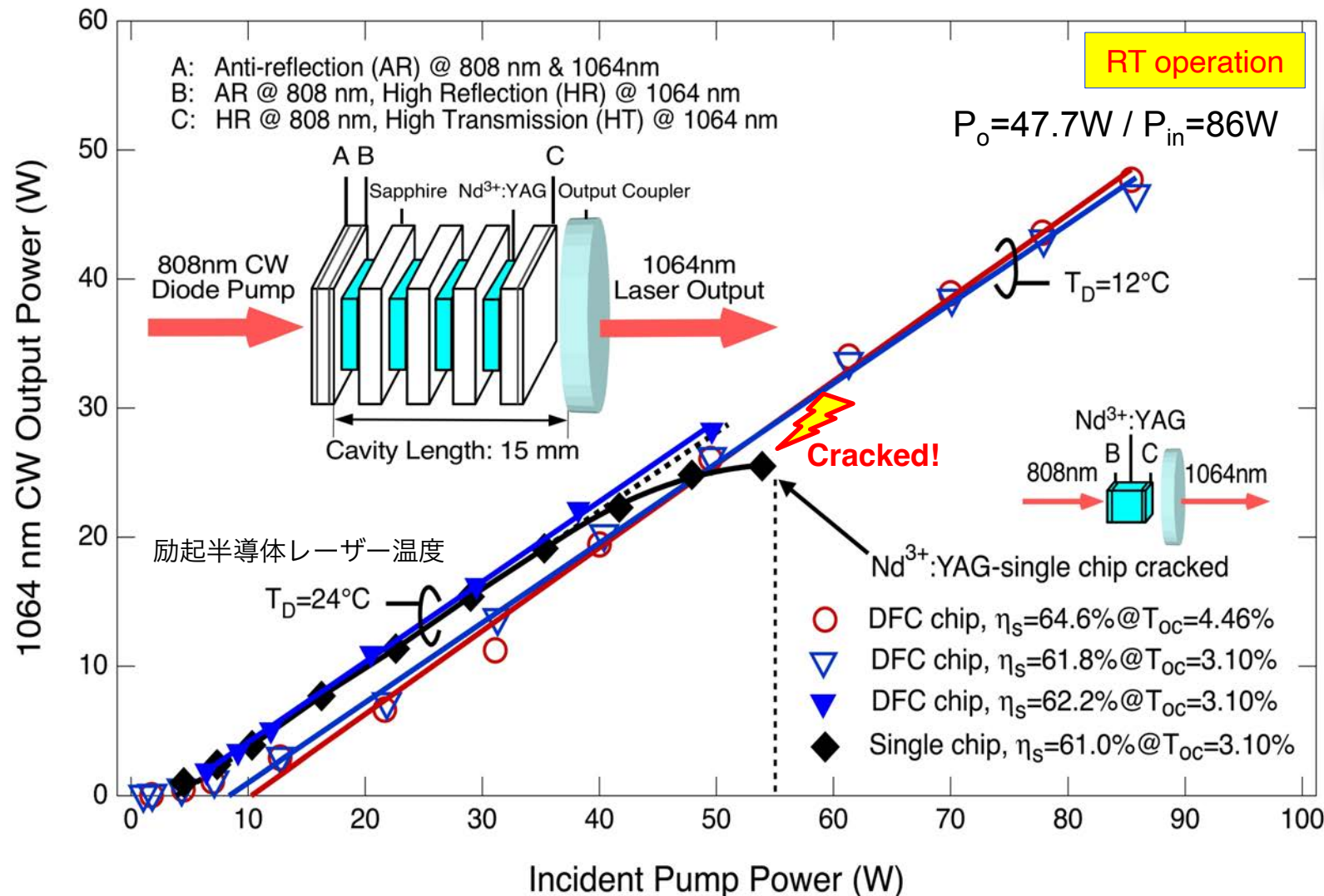
DFC構造小型集積レーザー DFC-structure for Tiny Integrated Laser

TEM and EDX analysis of SAB boundary



新技術の特徴・従来技術との比較

Ref. L. Zheng, A. Kausas, T. Taira, Opt. Mater. Express 7, 3214 (2017)



- Nd:YAG : 4 chips
- Sapphire : 5 chips

● フレネル損失 >95%

✳ 接合不良なら発振停止する程の損失なのに実際は >64% と高効率発振？

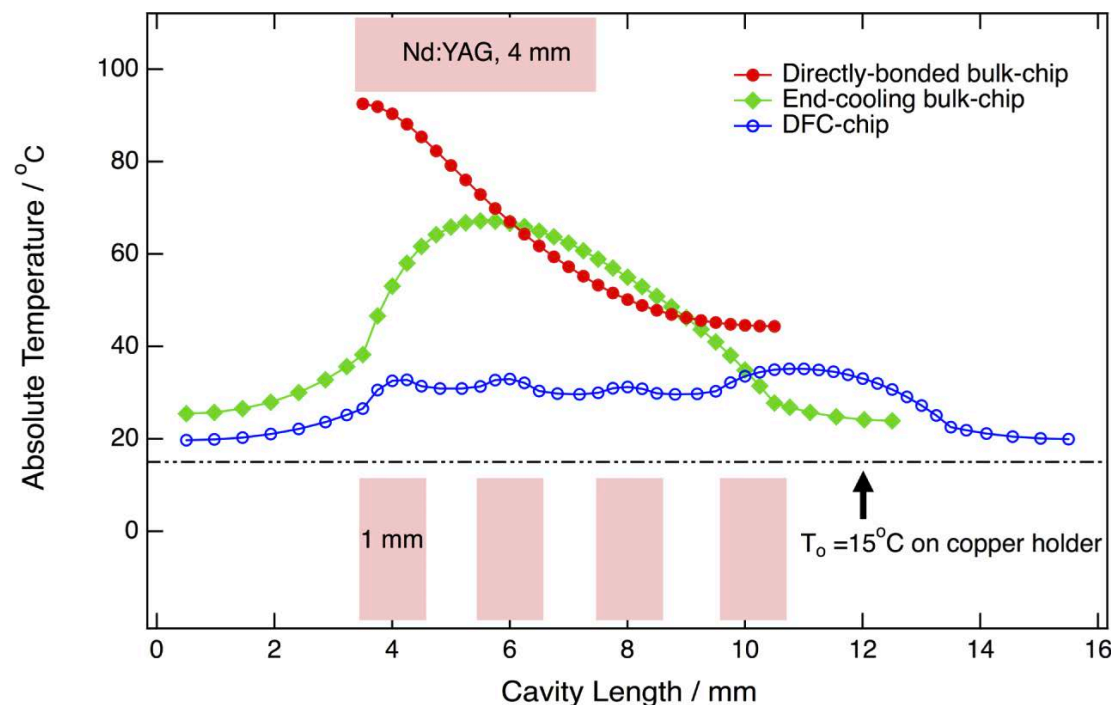
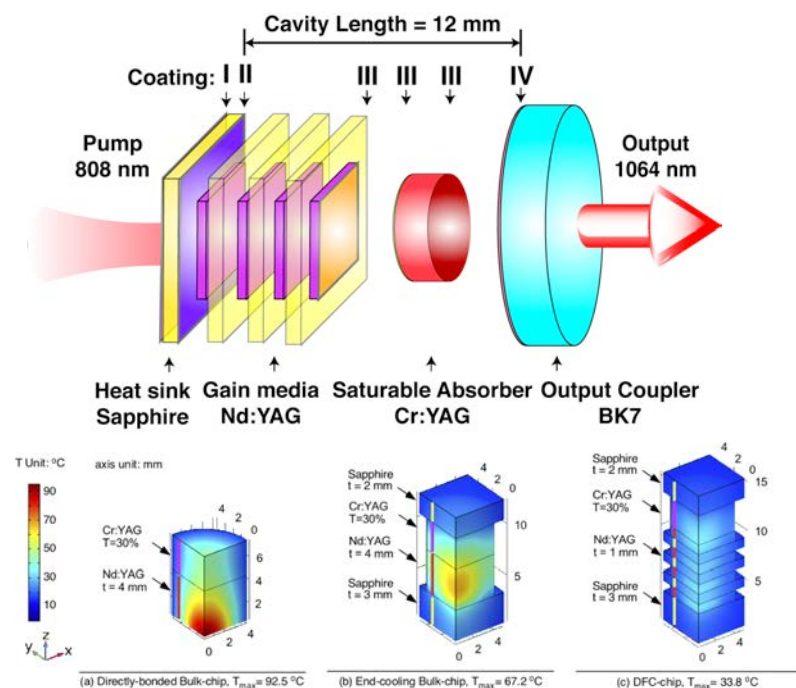
残留損失を実験から計算

$$L_i = \frac{(T_2/T_1) \cdot T_1 - (\eta_{s2}/\eta_{s1}) \cdot T_2}{\eta_{s2}/\eta_{s1} - T_2/T_1}$$

● 実験からは
 $L_i = 0.51\%$
と原子レベルの接合確認

新技術の特徴・従来技術との比較

Ref. L. Zheng, A. Kausas, T. Taira, Opt. Express **27**, 30217 (2019).



Repetition Rate / Hz	Temperature Difference, ΔT / °C			
	(a) Directly-bonded bulk-chip	(b) End-cooling bulk-chip	(c) DFC-chip with different Nd:YAG thickness	
			Nd:YAG 1 mm	Nd:YAG 0.2 mm
10	3.3	2.5	0.8	0.8
100	39.2	31.5	8.3	2.9
1000	458.9	393.2	111.6	34.9

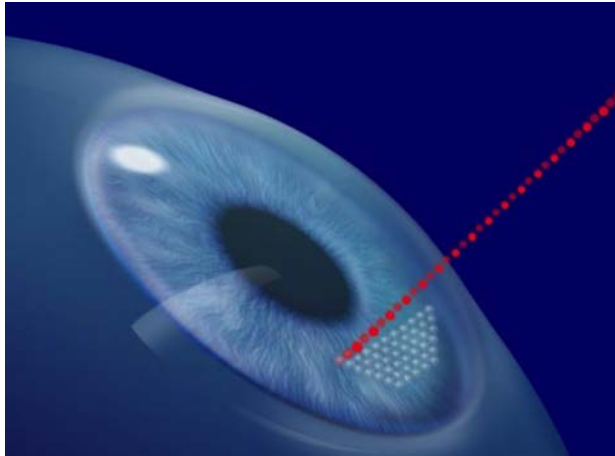
受動 Q-sw. with Cr:YAG $\Rightarrow$ 21.5mJ, 32.3MW@10Hz $\Rightarrow$ >20mJ@100Hz Now!

想定される用途

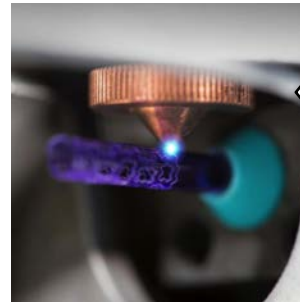
- 本技術はパワーレーザーが小型集積化されたことで恩恵を受ける様々な分野に波及する。
- 非熱微細化加工から衝撃波を用いた製造業、インフラ整備のための超音波非破壊計測、さらにはピーニングによる表面改質や塑性加工などに有用である。
- また、衝撃波による緑内障、白内障などの眼科治療、シミやアザとりなどの患者負担が軽減される手術などにも展開できる。

想定される用途

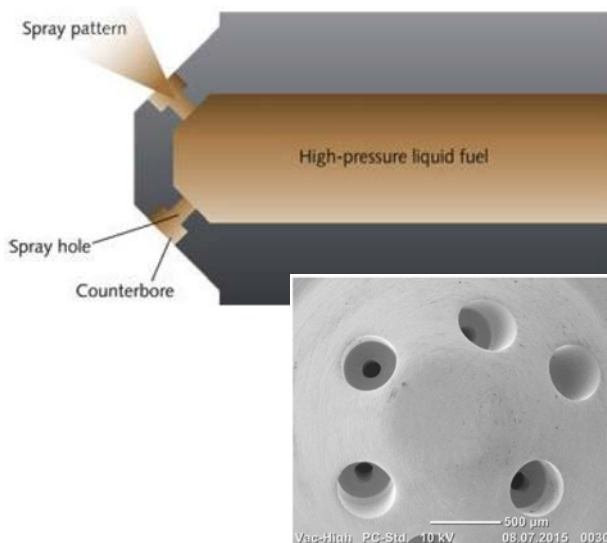
- LASIK - FLAP CUTTING/
CATARACT SURGERY



- CUTTING OF
STENTS/TUBES



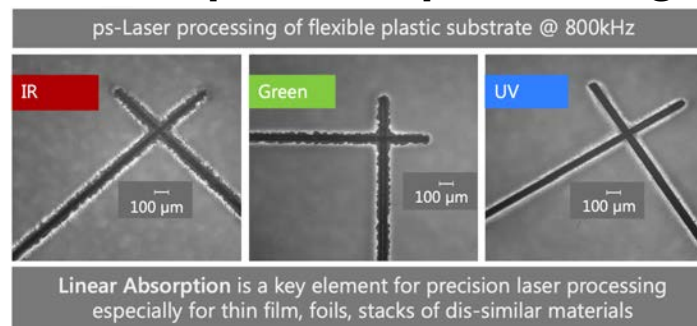
- FUEL INJECTOR
NOZZLE DRILLING



- OLED – FOIL
CUTTING



ps-Laser processing



40W, 1035nm, 1MHz, 300fs

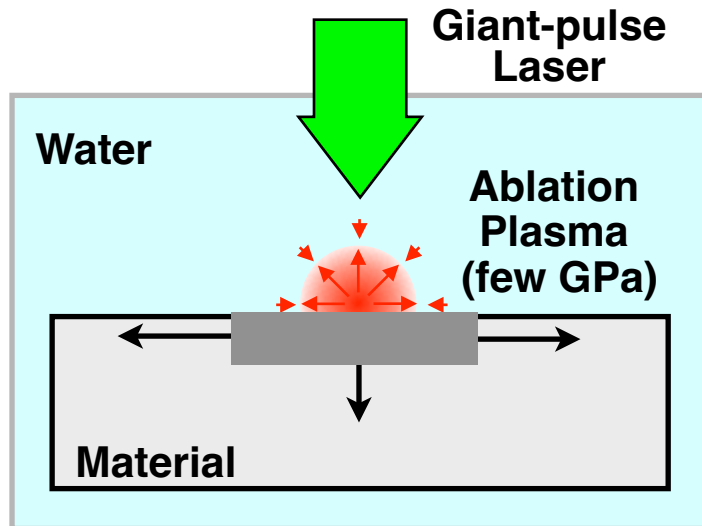


- 高強度レーザー ▶ 大型
- 加工対象 ▶ 小型

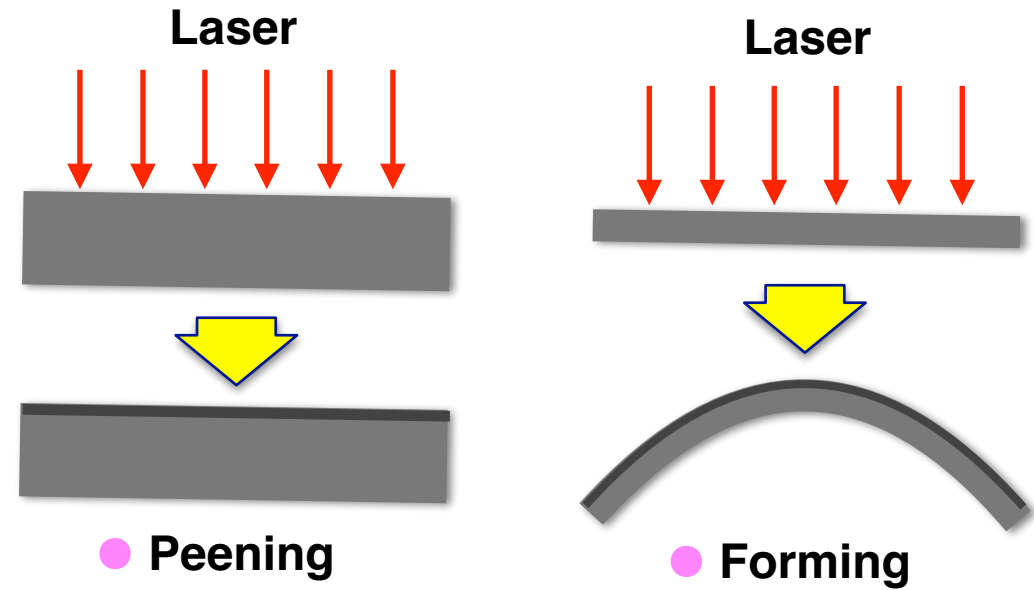
高強度光：
ファイバー伝送 難！

想定される用途

ピーニング：金属の表面を叩いて押し延ばすことにより、表面に圧縮残留応力（くっ付け合う力）を与える

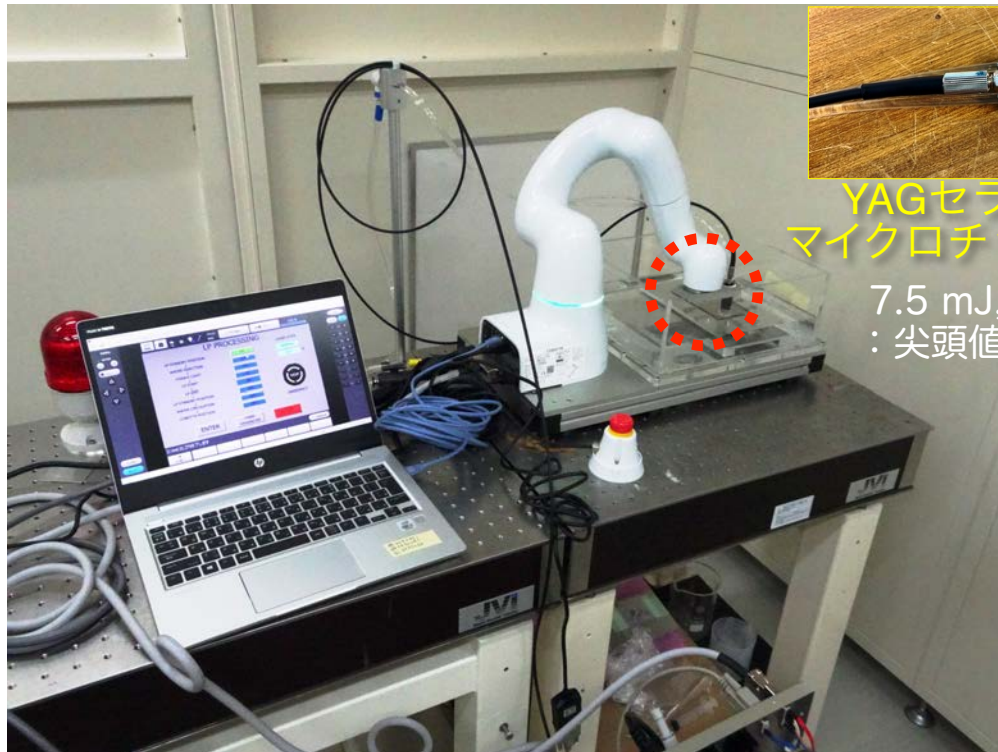


- ジャイアントパルス光照射により高圧（数GPa）の金属プラズマ発生
- 衝撃波が発生・伝搬、材料を塑性変形
- 内部の弾性拘束により表面に圧縮応力が残留（**ピーニング**）
- 薄い材料では表面が伸びて曲がるため、表面に発生する残留応力は小さい（**フォーミング**）



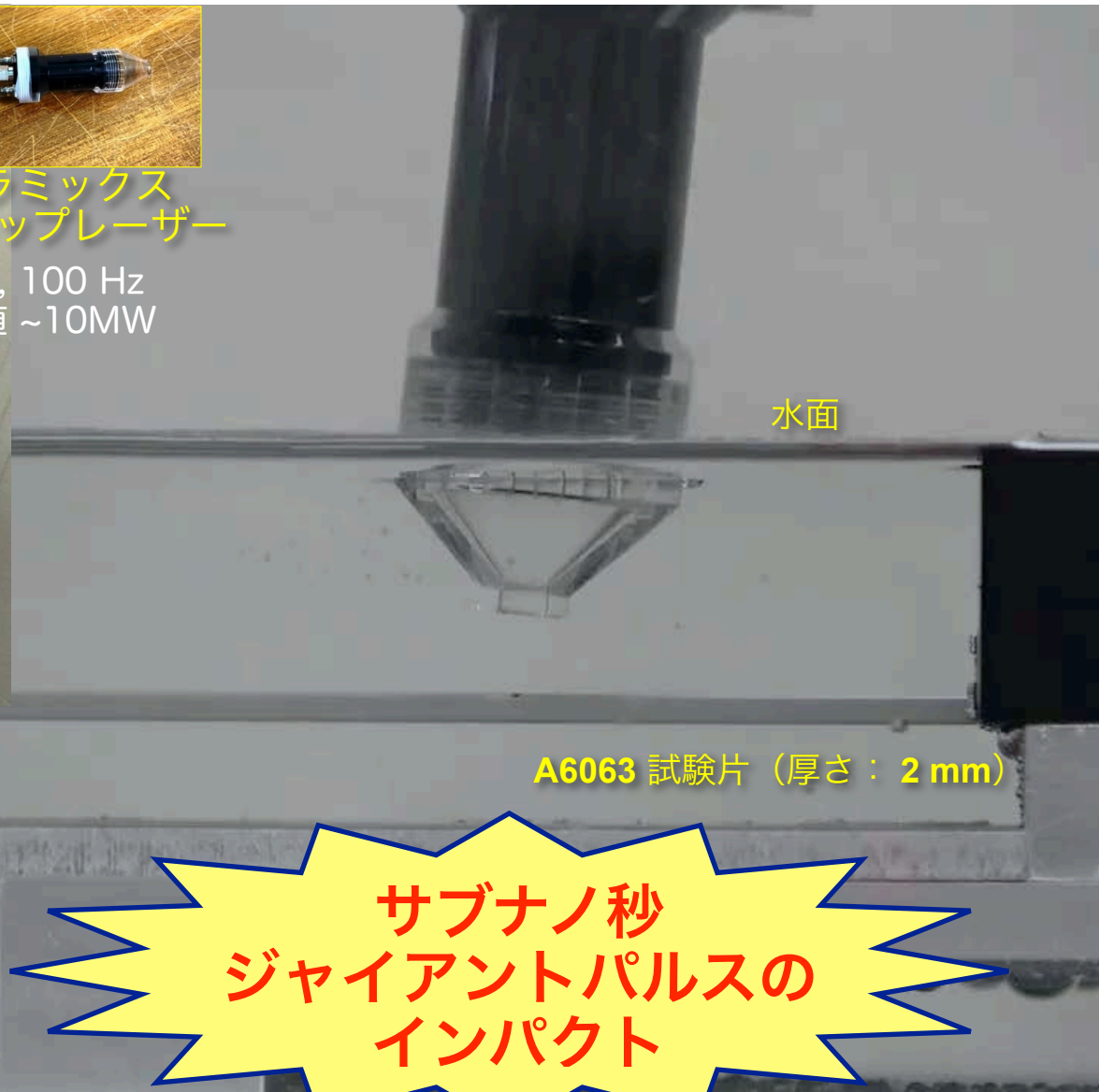
- マイクロチップレーザー
：5mJ, 400ps, $f_{rep}=100\text{Hz}$, $M^2<1.03$
 - ▶ 輝度 B : $1.3 \times 10^{15} \text{ W/sr}\cdot\text{cm}^2$
 - ▶ 輝度温度 T_B : $\sim 8.2 \times 10^{20} \text{ K}$
- 衝撃波特性
 - ▶ 照射光強度 : 77.8 W/cm^2
 - ▶ プラズマ圧力 : 12.5 GPa

想定される用途



YAGセラミックス
マイクロチップレーザー

7.5 mJ, 100 Hz
：尖頭値 ~10MW



水面

A6063 試験片 (厚さ：2 mm)

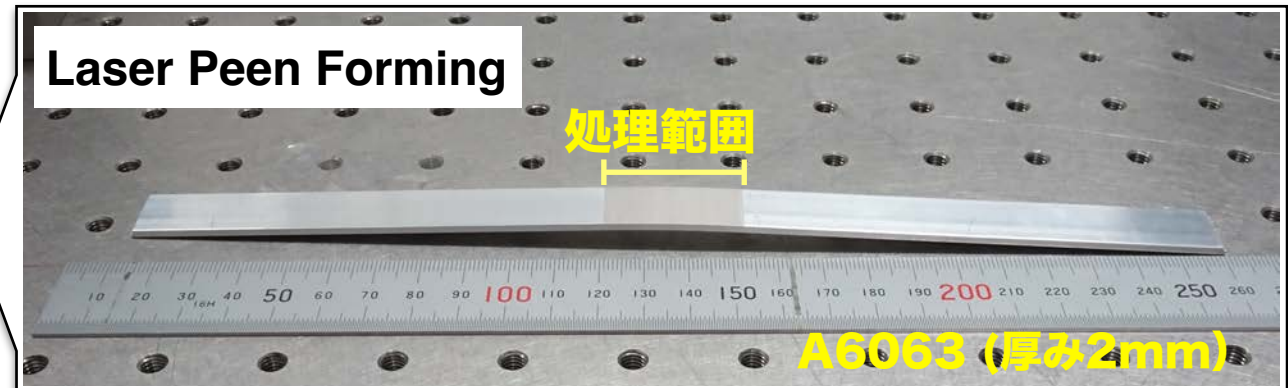
サブナノ秒
ジャイアントパルスの
インパクト

● 鐵を鍛える・曲げる衝撃波 ⇒ 大型レーザーが必要？

想定される用途

- 航空機翼・胴の成形：ストレッチフォーミング等の現行技術を制御性の高いレーザーピーンフォーミングに置換え、複雑な3次元構造を成形
- 成形後の熱処理が不要（熱処理には巨大な炉が必要）
- 成形物の表裏両面に圧縮残留応力が生じるため、疲労強度も向上

協力：大阪大学浅井研究室



想定される用途

製造ライン向けレーザーピーニング装置 (LSPT、MICが実用化済み) メンテナンス用レーザーピーニング装置 (サポインでLAcubedが開発中)

<https://www.lsp technologies.com/>

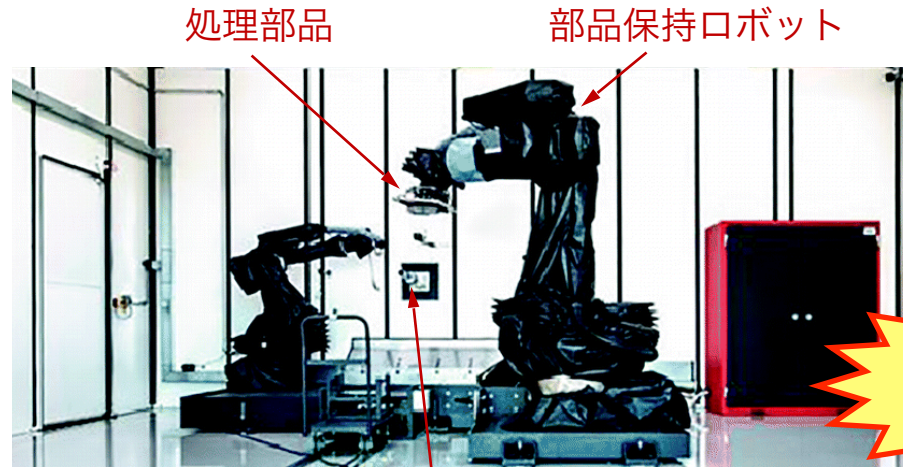


レーザー発振器・増幅器
(右のケース内に設置)

レーザー装置 (10J, 20Hz)



TILA
の
適用



パイプを通して隣の部屋からレーザーを照射
<https://www.hamburg-aviation.de/>

ゲーム
チェンジ

- 高価 (数億円)
- 大型で移動が困難
- 大きな物は不可
- 狭隘部は不可



TILA
(20mJ, 100Hz)



ロケットでレーザーを動かしながらピーニング

- 安価 (数千万円)
- 小型で移動が容易
- 大きな物も処理可
- ファスナ穴内面も可

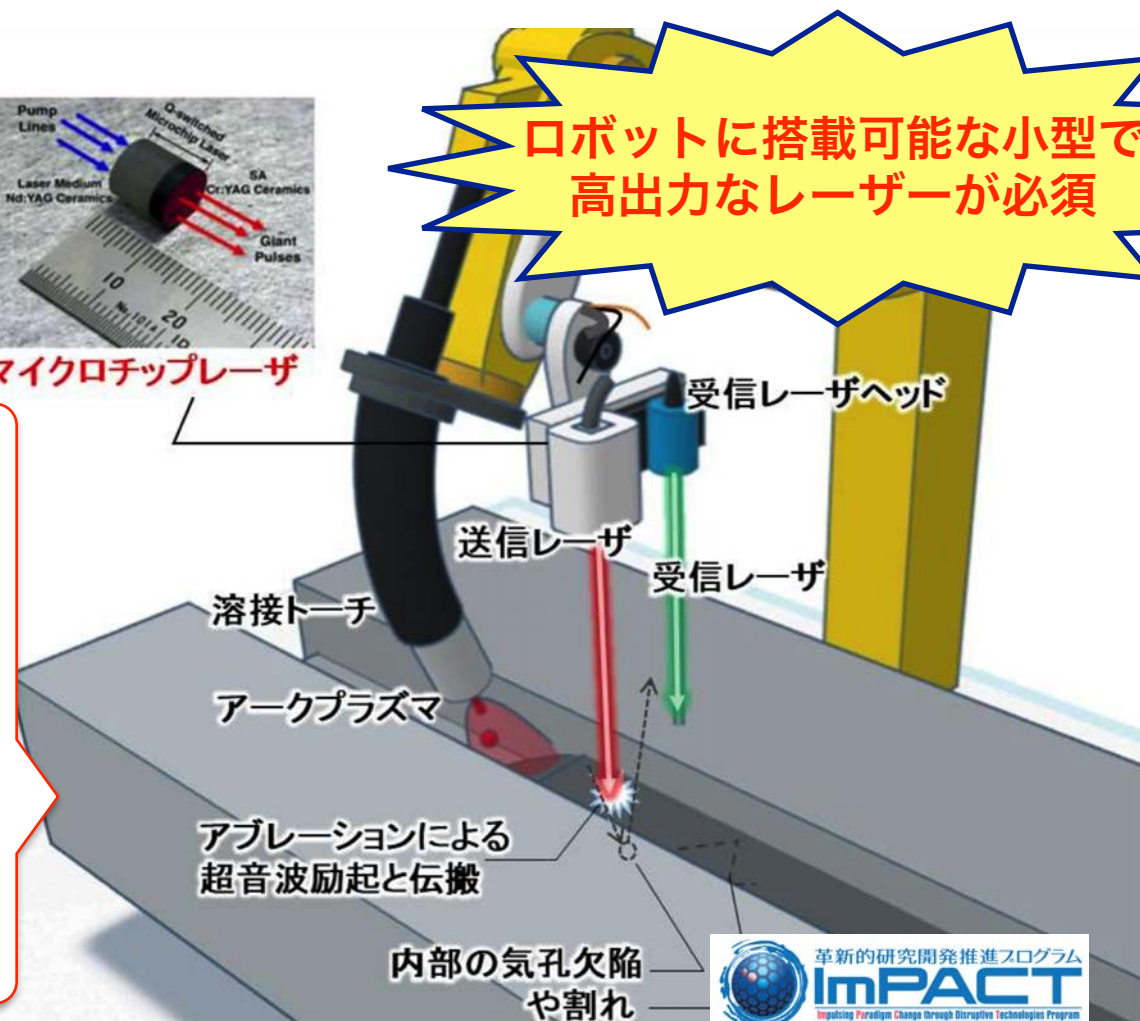
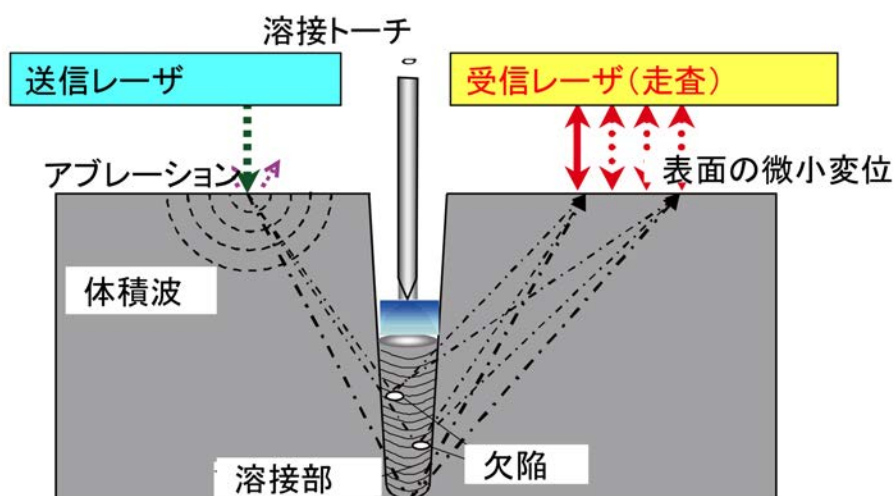
想定される用途

🔧 建築ラッシュによる溶接士不足，工期短縮要求 ⇒ 現場溶接のロボット化

- レーザー超音波法による溶接時モニタリングにより溶接不良を施工時に検出
- 溶接時に品質保証をすることで工期を短縮（不良時のやり直しも無くなる）



レーザー超音波法による溶接欠陥の検出



実用化に向けた課題

- 現在、小型集積化されたパワーレーザーのロボットアームに搭載が可能のところまで開発済み。しかし、装置としての作り込みが未解決だった。
- 今後、長期信頼性について実験データを取得し、過酷環境下に適用する場合の条件設定を行う。
- 実用化に向けて、歩留まりや長期安定性を向上できる技術の確立を図る。

企業への期待

- 未解決の作り込みについては、ウェハープロセスにより克服できると考えている。
- ユーザー企業との共同研究を希望。
- また、ドローンやロボットを開発中の企業、レーザー加工導入やインフラ、医療・美容分野への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。

想定される用途

TILAコンソーシアム (<https://tila.ims.ac.jp/>)

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年度完成
- ・マイクロチップレーザーの製品化，販売が浜ホトに続きオプトクエスト、ユニタックからも販売開始



本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : レーザー部品
- 特許番号 : 特許6245587号
- 出願人 : 自然科学研究機構
- 発明者 : 平等拓範, A. Kausas, L. Zheng

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 光学素子の製造方法及び光学素子
- 特許番号 : 特許6955302号
- 出願人 : 自然科学研究機構
- 発明者 : 平等拓範, A. Kausas, L. Zheng

産学連携の経歴

- 平成25-27年度，先端計測分析技術・機器開発プログラム（実証・実用化タイプ）
- 平成26-30年度，革新的研究開発推進プログラム (ImPACT)
- 平成29-38年度（令和8年度），未来社会創造事業（大規模プロジェクト型）
- 令和元年-現在，TILAコンソーシアム（企業・金融機関など有料会員 36団体），社会連携研究部門発足

お問い合わせ先

大学共同利用機関法人自然科学研究機構
岡崎統合事務センター総務部国際研究協力課

T E L 0564-55-7136

FAX 0564-55-7119

e-mail r7136@orion.ac.jp