

「ジャイアント・マイクロフォトンクスによる高出力極限固体レーザー」

平等拓範

(国立研究開発法人理化学研究所)



分子・原子レベルの物質操作によるレーザー素子の新機能発現と高出力極限固体レーザーの開発

新透明レーザーセラミックス、表面処理、低温接合など“ジャイアント・マイクロフォトンクス”による高効率レーザー (DFC-PowerChip) および波長変換 (QPM-PowerChip) を用いたパワースケラブルな高出力極限固体レーザーを実現するとともに、次世代XFELを見据えたTHz波誘電体レーザー加速 (THz-DLA) による超小型電子加速技術の検証

研究の目的と体制

セラミックレーザーには課題・極限波長は未開拓 ▶ 限界を突破する 極限固体レーザー？

目的：ジャイアント・マイクロフォトンクス ▶ スケラブルな高出力極限固体レーザー

- ミリ波に至る高輝度THz波レーザー**
- ブレッドボードサイズ THz 出力 >10mJ (輝度温度: >10²⁰K)**
理研, 分子研, 三菱電機
- パワースケラブルな高出力密度レーザー**
- サブナノ秒5J級超小型構成 1μmレーザー素子 (>250MW/cm²)**
分子研, 理研, 三菱電機, 物材機構, 神島化学
- 先端高出力レーザーの社会実装**
- 小型パワーレーザーの新たな応用 (重要な波長域)**
分子研, 理研, 日本7イオンビーム協会

高出力極限固体レーザーに向けた提案

新材料探索・発見のための指針：優れた発光特性と熱特性

イオン半径が倍以上違う

Thermal Conductivity κ @RT (W/mK)

Sapphire

Al₂O₃ RE:YAG etc.

RE:YAG in Al₂O₃ ▶ DFC

YAG 代表的固体レーザー材料

ELI-DIPOLE ▶ レーザーセラミックス

新提案

NIF (レーザー核融合) Nd:glass

Ref. レーザー研究, 50(7), 382 (2022).

● 4.2MJ, 10⁴Hz → 420W Average
Ref. M. L. Spaeth et al., FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY, 69, 25 (2016).

● 100J, 10Hz, World first 1kW average
Ref. P. Mason et al., Optica 4(4) 438 (2017).

* DFC: Distributed Face Cooling

DFC (分布面冷却) 構造小型集積レーザー

Laser materials

各種材料の特長を集積

- 実績ある材料の優れた光学特性
- Al₂O₃ 等の高い熱伝導率 ⇒ 光学材料の実効熱伝導率向上
- 光学材料を個別に設計可能 ⇒ 端面励起レーザーの最大限活用 (温度分布, 利得分布)

● 端面励起の高効率・光ビーム品質特性をスケリングできる

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

ゲームチェンジ

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

- 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

光学特性が優れても熱伝導率が低く見捨てられた材料の復活が望める

プロセス創製

● 原子レベルの表面洗浄
Surface roughness: RMS < 2nm
Flatness: $\lambda/5$ @1064nm

● レーザーセラミック用バッファレイヤ作製

● 界面観察でモデル化 in-site boundary measurement

● 焼結プロセスによる強靱化 Pressure & High temperature

(a) FAB/IB activation (b) Amorphous layer creation (c) Buffer layer deposition (d) Bonding at RT (e) Ceramics process

● 磁場配向, 焼結プロセスの高度化による異方性レーザーセラミックスなどの配向制御

● 光リソと組み合わせた局所電場印加, 局所加熱・応力印加による周期的極性反転

● 常温接合による周期的極性反転 (レーザー損傷等)

● PLDによる高品質結晶育成 (電子ビーム源となるMgB₂など), バッファレイヤ作製

量子ビーム創成 (小型集積レーザー)

New power laser facility (Building D)

2021.5 Building 2022.2.4 Clean room 2022.7.13 Start 2022.9.20

Power laser for particle accelerators

GA-MCL → Pre-Amp → Amp 1 → Amp 2 → NLO 1 → THz-DLA

5~10mJ Micro-MOPA 200mJ SG: 2J Final: 5J

Nonlinear section for different applications

NLO 1 High Brightness THz THz-DLA

N x 1J @532nm PW class laser

NLO 2 Ti:S LPA

Parasitic Osc.

	1st set	2nd set
Energy	2J	2.8J
Rep. rate	2Hz	20Hz
Average power	4W	56W
Pulse duration	800ps	800ps
Peak power	2.5GW	3.5GW

Ref. Opt Express, 32(8), 14377 (2024).

Ref. ASSL 2024, ATH1A.7

位置付け：ELI-DIPOLEと比較して Ref. P. Mason et al., Optica 4(4) 438 (2017).

	Energy E (J)	Rep. f _{rep} (Hz)	Apertur (cm ²)	Fluence E (J/cm ²)	Fluence I _a (W/cm ²)	Temp. (K)	
ELI-DIPOLE	105	10	10 x 10	1.05	10.5	150K	
This work	2.8	20	1.5 x 1.5	0.9	24.9	15.6	RT
Goal	5	100	1.5 x 1.5	2.22	222	> 26.7	RT

室温ながらフルエンスで ELI-DIPOLE を超える！

先端高出力レーザーの社会実装

● 小型パワーレーザーの新たな応用 (波長変換で重要な波長域に展開)

三菱電機 (株) 開発の超小型高出力紫外レーザー, Ref. ASSL 2024, ATu1A.3

小型集積パワーチップレーザー創生

60+ years of Lasers: High-Power Lasers ICO-25, TS 1-7, 5 Sept., 2022

Peak Power, P₀ [MW]

Year

Breakthrough!

Nd:YAG/Cr:YAG

Plateau

Rapid progress

2005 2010 2015 2020 2025

Downsizeによるイノベーション

- 掌サイズ ロボット搭載
- 搭載打音検査
- 搭載LiDAR
- テラヘルツ波

将来展望

● 次世代加速器基礎研究

超小型X線源・中性子源・超小型加速器・次世代XFEL

10mJ-THz, 10cm-DLAで 100MeV 目指す? ⇒ 100MeV/0.1m = 1GV/m!

新たな加速原理 THz-DLA による次世代粒子加速 (1GV/m) の検証

加速長を10mにするなら? THz波加速器 ~ 10m x 1GV/m アンジュレーター

⇒ 10GeV!

比較: 高性能マイクロ波加速管 ~ 200m (x 50MV/m = 10GeV)

パワースケラブルを支える基盤技術開発 PowerChip

● 衝撃波 ● 廃炉加速 ● 航空・宇宙 ● 核融合

● セキュリティ ● 量子コンピュータ

参考文献

