

一般セッション(口頭講演) | 3 光・フォトンクス：3.4 レーザー装置・材料

■ 2025年9月8日(月) 13:30 ~ 16:30 | 会場 N106 (共通講義棟北)

■ [8p-N106-1~11] 3.4 レーザー装置・材料

北島 将太郎(名大)、野邑 寿仁亜(日大)

13:30 ~ 13:45

[8p-N106-1] ガスオプティックスの動作機構のモデリング

○米田 仁紀¹、道根 百合奈¹ (1.電通大レーザー)

13:45 ~ 14:00

[8p-N106-2] 高エネルギーレーザー用大型ガスオプティックスの開発

○道根 百合奈¹、米田 仁紀¹ (1.電通大レーザー)

14:00 ~ 14:15

[8p-N106-3] 加工用70 WハイブリッドArFレーザー

○小池 陸生¹、五十嵐 裕紀¹、盛合 靖章¹、上場 康弘¹、淵向 篤¹、三浦 泰祐¹ (1.ギガフォトン)

14:15 ~ 14:30

[8p-N106-4] 193 nm 固体レーザーのための小型光パラメトリック増幅器の開発

○盛合 靖章^{1,2}、小又 公拓¹、五十嵐 裕紀²、淵向 篤²、三浦 泰祐²、東口 武史¹ (1.宇都宮大学、2.ギガフォトン株式会社)

14:30 ~ 14:45

[8p-N106-5] 青色LD励起アレキサンドライトレーザーの高出力化

○佐藤 篤¹、瀧田 佑馬²、南出 泰亜² (1.東北工大工、2.理研RAP)

14:45 ~ 15:00

[8p-N106-6] 小型・高繰り返し Cr^{2+} :ZnSモード同期レーザーの開発○(D)昆野 愛夕¹、戸倉川 正樹^{1,2} (1.電通大レーザー研、2.電通大脳医工研)

◆ 奨励賞エントリー

15:15 ~ 15:30

[8p-N106-7] 固体レーザー共振器の自律制御に向けた深層強化学習の導入

○池谷 有貴^{1,2}、関根 尊史¹、遠藤 翼²、乙津 聡夫²、森田 宇亮¹、玉置 善紀¹、加藤 義則¹、川嶋 利幸¹、小林 洋平¹ (1.浜松ホトニクス(株)、2.東大物性研)

◆ 奨励賞エントリー

15:30 ~ 15:45

[8p-N106-8] Fe:ZnSe 増幅に用いる EO Q スイッチ Er,Cr:YSGG レーザーの開発

○桐田 勇利¹、岡崎 大樹¹、Yu Linpeng²、安原 亮²、時田 茂樹¹ (1.京都大学化学研究所、2.核融合科学研究所)

15:45 ~ 16:00

[8p-N106-9] フェムト秒レーザー直描によるTm:YAGセラミックスへの導波路作製と評価

○秋山 由洸¹、中川 耕太郎¹、角田 明博²、中崎 雅人²、小林 洋平¹ (1.東大物性研、2.JX金属株式会社)

16:00 ~ 16:15

[8p-N106-10] 微結晶粒組織から成る透光性c軸配向Nd:FAPセラミックスの開発

○(PC)小泉 早苗¹、鈴木 達¹、古瀬 裕章¹ (1.物質・材料研究機構)

◆ 奨励賞エントリー ◆ 英語発表

16:15 ~ 16:30

[8p-N106-11] Characterization of Cr:LiSAF/Sapphire bonding interface and thermal properties

○(P)Florent Cassouret¹, Yoichi Sato^{2,1}, Takunori Taira^{2,1} (1.Inst. for Molecular Science, 2.Riken Spring-8 Center)

ガスオプティックスの動作機構のモデリング

Detail model of gas optics for high power laser applications

電通大レーザー ○米田仁紀, 道根百合奈

Institute for Laser Science, Univ. of Electro-Communications, °Hitoki Yoneda and Yurina Michine

E-mail: yoneda@ils.uec.ac.jp

気体を媒質としたガスオプティックスは、その高い光学損傷耐力(ナノ秒レーザーで 1.5 kJ/cm^2)、超低挿入損失 ($<10\text{ppm}$)、減反射コーティングが不要、ナノ秒のスイッチング動作、高い波面精度などを持ち、原理実証が行われた[1]後に実応用に向けて開発が進んでいる。このガスオプティックスの特徴は、0-1 に迫るような大振幅の密度波を気体中に生成できることである。[2]もとから気体の光学屈折率は 1 に近く、位相差をつけることを考えてもこの大振幅の密度波の生成は欠かせない要素となっている。しかし、詳細な動作機構を考えると、定性的な機構の説明がついていないが定量評価はできていないものが多々ある状況にある。主なものは、(1)なぜ以下の Fig.1 のような密度分布の波になるか。(2) 多モードでの構造があるにもかかわらず、繰り返し同様の粗密波の形状が保たれるか。(3)位相光学素子では、高い回折効率を達成するには光学長差が正確に 0 と π の組み合わせになっていることが必要になるが、実際には Fig.2 のように回折効率が飽和するような特性をもつのはなぜか。などである。

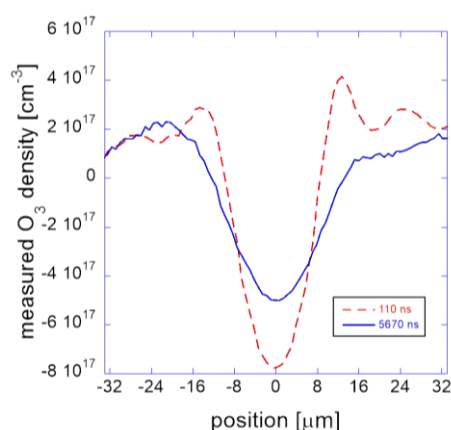


Fig.1

Fig.1

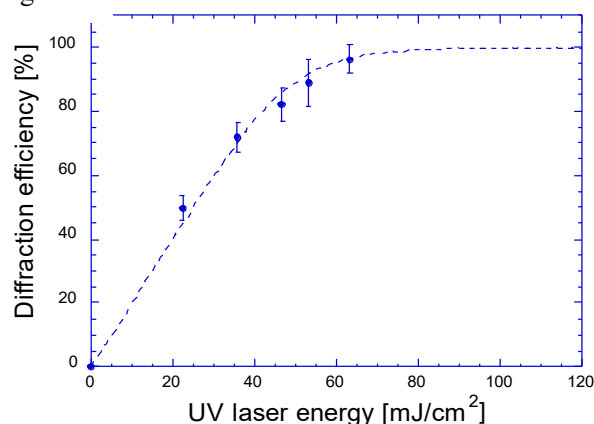


Fig.2

本研究では、この現状を開拓するために、新たな詳細物理モデルを構築している。そのモデルをもとにガスオプティックスの特性を予測し、実験データと比較することを行っているが、これらの一致性を使ってこの開発したモデルの正当性の検証を行っていく。

[1] Y. Michine and H. Yoneda, COMMUNICATIONS PHYSICS, (2020) 3: 24

[2] Y. Michine, R. M. More, and H. Yoneda, Physics of Fluids 36, 041703 (2024)

高エネルギーレーザー用大型ガスオプティックスの開発

3cm² large diameter gas optics for high energy laser system

電気通信大学レーザー新世代研究センター ○道根 百合奈, 米田 仁紀

Institute for Laser Science, Univ. of Electro-Communications

E-mail: y_michine@ils.uec.ac.jp

米国国立点火施設 (NIF) などで先導して進められているような大型の高エネルギーレーザーを利用したレーザー核融合研究では、ターゲットへの最終集光光学系の光学素子類の損傷が、さらなるレーザーシステムの高エネルギー化のための問題の一つとなっている。特に紫外光では光学材料のバンドギャップに近いことから赤外光よりも損傷しやすく、頻繁な交換が避けられない。産業でも高エネルギーレーザーによる加工研究開発が進んでおり、システムの小型化とメンテナンス性、耐力向上を狙った光学素子類品質改善のための開発が各光学素子メーカーでも進められている。

我々はその中で、原理的に固体材料より損傷閾値が高くできる中性気体を媒質とした光学素子開発を行ってきた。数 mm~1cm の厚みのオゾン混合ガスに対して、紫外パルスレーザー (266nm, 5ns pulse) を干渉照射し気体中に音波とエントロピー波から成る粗密波を励起させることで、気体中に大振幅の密度変調構造を生成させることができる。この密度変調のピーク時間は数 10ns 後にピークを迎えるので、ピーク時間に合わせて被制御レーザー光を入射させれば過渡的な透過型体積回折格子として機能させることができる。損傷閾値は典型的にはナノ秒レーザーに対して 1.6kJ/cm² であるので、10kJ レーザー制御を行うには、3cm 角のガスオプティックスを生成できれば良い。

ここでは、気体の流路を制御し 3cm 角の開口オゾン混合ガス流路の開発を行った。1cm 程度の開口であればガスの流入・流出速度を制御すればよいが、開口部が大きくなると乱流の影響が回避できなくなる。(図 1) そこで、酸素・オゾン・酸素の 3 層の流路を作成し、それぞれの流入出速度を制御することで開口部での均一なガス厚み・ガス密度が確保できる条件の探索を行った。実際のガス密度計測結果等についても報告する。

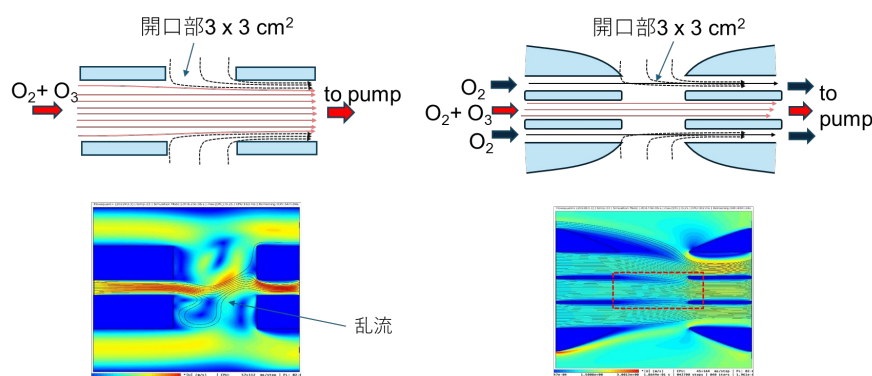


図 1 : (左) 単層ガス流路 (右) 3 層ガス流路 の流体シミュレーション

加工用 70 W ハイブリッド ArF レーザ

70-W Hybrid ArF Laser for Material Processing

ギガフォトン¹ 〇小池 陸生¹, 五十嵐 裕紀¹, 盛合 靖章¹, 上場 康弘¹, 淵向 篤¹, 三浦 泰祐¹

Gigaphoton Inc.¹ 〇Rikuo Koike¹, Hironori Igarashi¹, Yasuaki Moriai¹,

Yasuhiro Kamba¹, Atsushi Fuchimukai¹, Taisuke Miura¹,

E-mail: rikuo_koike@gigaphoton.com

当社は半導体露光プロセス用のエキシマレーザの製造・販売を行っており、露光用 ArF レーザの最大出力は 90 W に達している。我々はこの高出力 ArF レーザを半導体露光以外の分野にも展開すべく、レーザ加工への応用を目指している。しかしながら、Fig.1.(a)に示すように、露光用 ArF レーザはビーム品質を示す M^2 値が 59 と大きく集光性に乏しいため、直接的な加工用途への展開は困難である。このため高ビーム品質を持つ DUV 固体レーザを種光とし、これを ArF レーザで増幅するハイブリッド ArF レーザの開発を進めている[1]。ハイブリッド ArF レーザは、固体レーザに由来する優れたビーム品質と、ArF レーザによる高利得増幅を両立することで集光性に優れた高出力な DUV 光源としての可能性を有している。我々はレーザ加工において重要なパラメータであるパルス形状に着目し、本発表では固体レーザ側でパルス形状の制御[2]を可能としたパルス形状可変ハイブリッド ArF レーザの増幅特性について報告する。

具体的には、Fig.1.(b)に示すようにパルス幅が長い単一パルス（パルス幅(FWHM)：10 ns、以下ロングパルス）や短いパルスを高繰り返しで発生させるバーストパルス（単一パルス幅：0.7 ns、サブパルス間隔：3 ns、サブパルス数：1~4）の発生を可能にした。Fig.1.(c)にロングパルスおよびバーストパルス動作時の出力特性を示す。ロングパルス動作では繰り返し周波数 6 kHz において 70 W 以上の出力を確認した。また高出力動作時のロングパルスの集光特性を Fig.1.(d)に示す。ここでは M^2 値が 7.1 と大きく改善されており、Fig.1.(a)に示す露光用 ArF レーザと比較して、集光性の大幅な向上が確認された。さらに、バーストパルス動作（Fig.1.(e)）においてもビーム品質を保持したまま安定した出力が得られており、加工用途への有効性が期待される。以上より、ハイブリッド ArF レーザは従来の ArF レーザでは困難であったビーム集光性及びパルス形状制御性を兼ね備えており、新たなレーザ加工プロセスの開拓や新産業分野への応用が期待される。

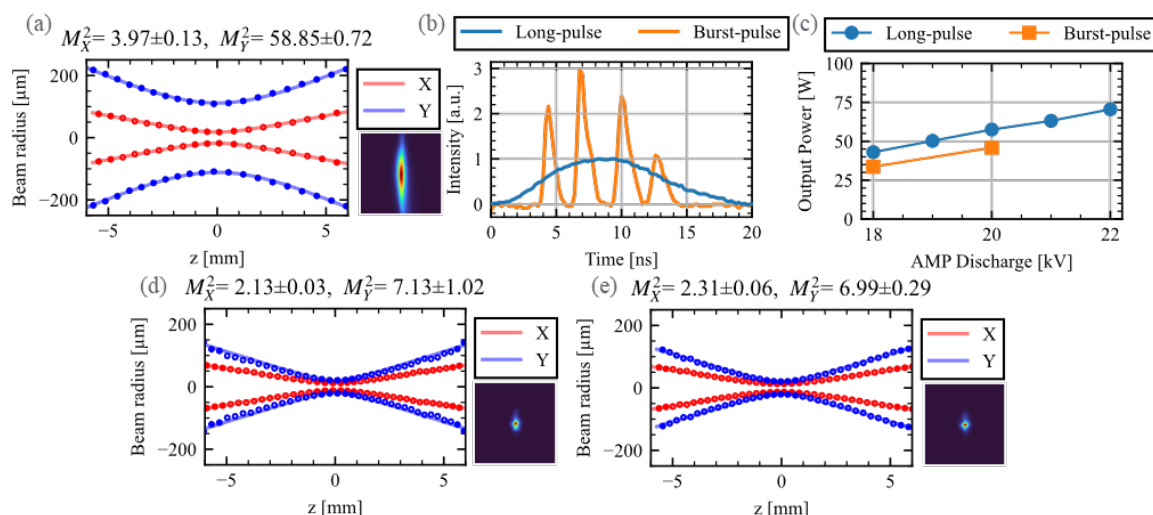


Fig.1.(a) Focusing property of the ArF laser for lithography (inset: beam waist profile); (b) Pulse shape of Hybrid ArF Laser. (c) Amplification characteristics of Hybrid ArF Laser; Focusing properties of (d) the long-pulse and (e) the burst-pulse in Hybrid ArF Laser (insets: beam waist profile)

[1] 五十嵐 裕紀, 上場 康弘, 小野瀬 貴士, 淵向 篤, 三浦 泰祐, “加工用短パルスハイブリッド ArF エキシマレーザの開発”, レーザ研究 **52**, 1 (2024).

[2] Yasuaki Moriai, Yasuhiro Kamba, Hironori Igarashi, Atsushi Fuchimukai, and Taisuke Miura "Development of pulse shape controlled DUV solid-state light source for hybrid ArF laser", Proc. SPIE 13341 (2025).

193 nm 固体レーザーのための小型光パラメトリック増幅器の開発

Development of compact Optical Parametric Amplifier for 193 nm solid-state laser

宇都宮大学¹, ギガフォトン株式会社², [○](D) 盛合 靖章^{1,2}, (M2) 小又 公拓¹, 五十嵐 裕紀²,
淵向 篤², 三浦 泰祐², 東口 武史¹

Utsunomiya Univ.¹, Gigaphoton Inc.², [○](D) Yasuaki Moriai^{1,2}, (M2) Kimihiro Omata²,
Hironori Igarashi², Atsushi Fuchimukai², Taisuke Miura², and Takeshi Higashiguchi²

E-mail: dc247214@s.utsunomiya-u.ac.jp

ハイブリッド ArF エキシマレーザーは、193 nm 固体レーザー（シード光）と ArF エキシマ増幅器を組み合わせることで、高光子エネルギー、高パルスエネルギー、高いビームクオリティといった特徴を持つ [1]。そのため、微細加工や難加工材料の加工への応用に有望な光源である。

波長が 193 nm の固体レーザーの構成を図 1 に示す [2]。基本波である 1030 nm 光パルスは Yb ドープファイバーレーザーで発生させ、Yb:YAG 固体増幅器で増幅される。波長を安定化しかつ 1030 nm 光パルスと同期させるため、もう一方の基本波である 1553 nm 光パルスは、DFB-LD からの 1553 nm CW 光を種光とし 1030 nm 光パルスをポンプ光として光パラメトリック発生 (OPG) で発生させ、さらに光パラメトリック増幅 (OPA) により 1553 nm シグナル光を増幅した。非線形光学結晶で 1030 nm 光の第 4 高調波を発生させ、1553 nm 光との和周波発生を二度行うことで 193 nm 光を発生させる。本研究では、この 1553 nm 光源の小型化と低コスト化のため、OPG と OPA を 1 つの結晶で行うダブルパス OPA 光源を構築した。

ダブルパス OPA の構成を図 2 に示す。種光は 1553 nm CW 光、ポンプ光は 1030 nm パルス光（繰返周波数 60 kHz、パルス幅 3 ns）、OPA 結晶は結晶長 50 mm の MgO:PPLN を用いた。ファラデーローテータとポラライザの組み合わせによりダブルパス後の光がポラライザから出力されるようにした。ポンプ光のピーク強度が 42.4 MW/cm² のときに出力 700 mW、パルス幅 3 ns のシグナル光が得られた。このときの増幅効率は 9.3 %であった。現在、ダブルパス OPA の増幅条件の最適化や出力特性を評価している。

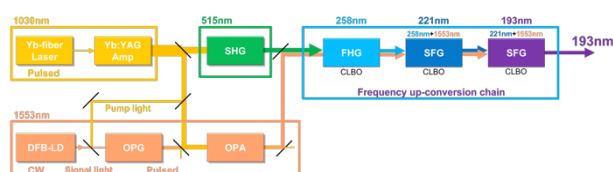


Fig. 1. Configuration of a 193 nm solid-state laser.

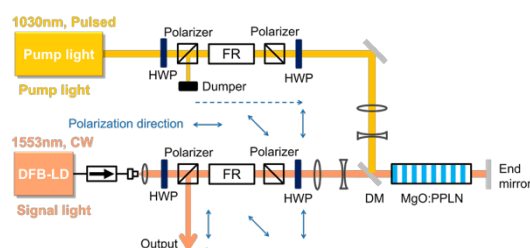


Fig. 2. Optical layout of a double-pass OPA.

参考文献

- [1] M. Arakawa, Y. Tamaru, A. Fuchimukai, Y. Sasaki, T. Onose, M. Tamiya, T. Miura, T. Nakazato, S. Watanabe, and T. Matsunaga, "Amplification of DUV solid-state laser pulse using ArF laser," CLEO Europe 2017, CA-1.6 SUN (2017).
- [2] C. Qu, Y. Tanaka, H. Igarashi, Y. Tamaru, A. Fuchimukai, Y. Murakami, T. Miura, K. Kakizaki, "OPA Based Compact 193 nm Light Source for Hybrid ArF Laser," ASSL 2020, JTh6A.2 (2020).

青色 LD 励起アレキサンドライトレーザーの高出力化

High-Energy Operation of a Blue-Diode-Pumped Alexandrite Laser

東北工大¹, 理研 RAP² ○佐藤 篤¹, 瀧田 佑馬², 南出 泰亜²

Tohoku Inst. of Tech.¹, RIKEN², ○Atsushi Sato¹, Yuma Takida², Hiroaki Minamide²

E-mail: atsushi@tohotech.ac.jp

1. はじめに

アレキサンドライトレーザーは、従来より医療・美容分野で広く使われているが、近年、加工用途でニーズが高い青色 LD の高出力化が進んでいることから、これを励起光源に用いた高出力アレキサンドライトレーザーの開発が可能になってきた¹⁾。我々はこれまでシングルエミッター型の低出力青色 LD 励起により 1 W 以上の連続発振出力を達成している²⁾。本研究では、ファイバー結合型高出力青色 LD 励起によるアレキサンドライトレーザーの高出力化について実験的に検討したので報告する。

2. 実験結果

Fig. 1 に試作したアレキサンドライトレーザーの共振器構成を示す。励起光源は最大出力 200 W のファイバー結合型 LD であり、これを繰り返し周波数 50 Hz、パルス幅 400 μ s で疑似連続発振 (QCW) 動作させた。レーザー結晶には、Cr ドープ率 0.2 at.%、長さ 1.9 mm のアレキサンドライトを使用した。結晶の励起側端面には、波長 700-820 nm に対する全反射 (HR) コーティング及び波長 440-460 nm に対する高透過 ($T > 97\%$) コーティング、出力側端面にはレーザー波長に対する無反射コーティングが施されている。共振器は、結晶の HR コーティング面と反射率 99% の出力鏡により構成した。Fig. 2 に結晶温度 20°C 及び 50°C で測定した QCW 励起下での入出力特性を示す。結晶温度 50°C のとき、励起エネルギー 43 mJ に対し、出力エネルギー 3.9 mJ が得られた。この実験では、出力鏡反射率が 99% と高かったため、スローブ効率は 10% と低かった。発振しきい値が十分低く、さらに出力結合を大きく取れることがわかったため、今後、出力鏡反射率を最適化することにより出力向上を図る。フリーランニングでのレーザーパルス波形は、スパイク状パルスが続くバーストモード発振となっている。パルス発振モードについては、レーザーの最適化後、Q スイッチ発振に移行する予定である。

参考文献

- 1) H. Xiao *et al.*, Opt. Express **31**, 5832 (2023).
- 2) A. Sato, CLEO-PR 2024, P1_015.

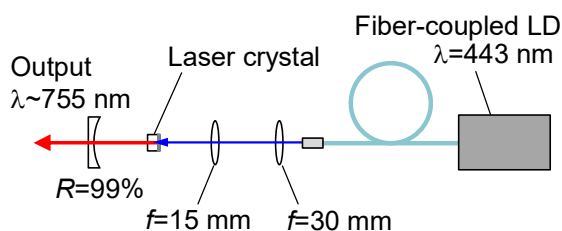


Fig. 1 Cavity configuration of the diode-pumped alexandrite laser.

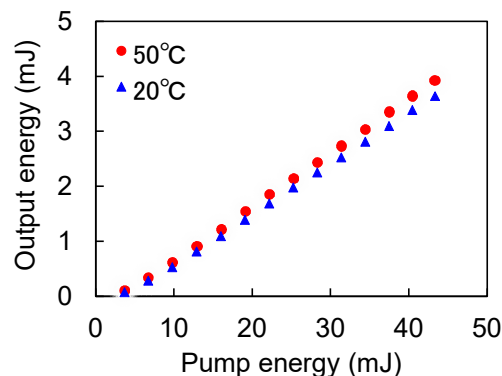


Fig. 2 Output energy as a function of pump energy.

小型・高繰り返し Cr²⁺:ZnS モード同期レーザーの開発

Development of a Compact High-Repetition-Rate Cr:ZnS Mode-Locked Laser

○(D1) 昆野 愛夕¹, 戸倉川 正樹^{1,2}(電通大レーザー研¹, 電通大脳・医工研²)

○Ayu Konno¹, Masaki Tokurakawa^{1,2}(ILS UEC¹, CNBE UEC²)

1. はじめに

中赤外の波長領域は分子の指紋領域とも呼ばれており, 多数の原子・分子の吸収線が存在する. そのため中赤外領域の超短パルスレーザー(光周波数コム)は, 生体観測・環境計測などの応用から注目を集めている. この時共振器の小型化は可用性を向上のみならず, パルスの高繰り返し化, 及び高平均出力化・縦モード輝度向上に寄与する.

本研究では, 2~3 μm 帯に広帯域な利得を持つ Cr²⁺: ZnS[1] を利得媒質とし, SESAM を用いた小型・堅牢で可用性のある高繰り返し中赤外超短パルス光源の開発を目指した.

2. 実験構成

図 1 に, 短尺 Cr²⁺:ZnS 共振器の構成を示す. 利得媒質には Cr²⁺:ZnS (4 mm, 5.2 at.%) を用い, 波長 1611 nm Er:Yb 共添加 fiber laser により励起している. 共振器は曲率 100 mm かつ透過率 3% の凹面鏡 M1, 及び SESAM から構成されている. 実験では, 特性の異なる 2 種の SESAM を使用した. それぞれの諸特性は図 1 の表内に示す. 共振器長は 100 mm(1.5 GHz 相当)となっている.

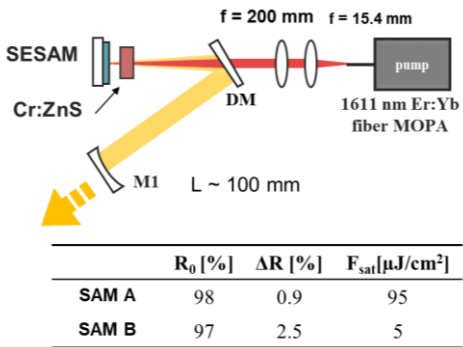


Fig. 1. Experimental Setup

3. 実験結果

図 1 の共振器において, 励起パワー3.2 W 時に最大出力 0.7 W(SAM A), 0.8 W(SAM B)が確認された. スロープ効率は 26%, 34%となった. SAM A ではスペクトル構造の変化は確認されたが, パルシングの発生は認められなかった. 一方で, SAM B を使用した際に以下の図 2 に示すような, Q スイッチパルス(励起パワー0.5 W)及びスペクトル帯域の拡大が観測された.

しかし, 励起パワーを増加させてQMLパラメータで定義される CWML の閾値[2]を超えた領域においても, 発振スペクトルには依然として SESAM と結晶間隔に起因するエタロン効果によると考えられるスペクトル構造が残存しており, CWML に至っていない. そこで現在, このエタロンの抑制に向けた Brewster 研磨の Cr²⁺:ZnS を用いたモード同期実験を進めており, 当日はこの結果についても報告する.

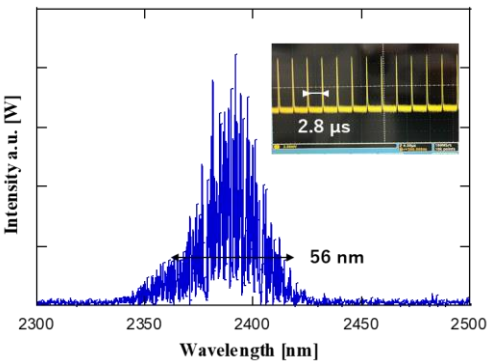


Fig. 2. Temporal and spectral characteristics of the Q-switched laser

参考文献

[1] C. Y. Cho, et al., Opt. Lett. 42, 5226-5229 (2017).
[2] C. Hönninger, et al., Opt. Soc. Am. B. 16,46-56 (1999).

固体レーザー共振器の自律制御に向けた深層強化学習の導入

Implementing Deep Reinforcement Learning for autonomous laser cavity optimization

浜松ホトニクス(株)¹, 東大物性研², [○]池谷 有貴^{1,2}, 関根 尊史¹, 乙津 聡夫²,

遠藤 翼², 森田 宇亮¹, 玉置 善紀¹, 加藤 義則¹, 川嶋 利幸¹, 小林 洋平²

Hamamatsu Photonics K.K.¹, ISSP, Univ.Tokyo², [○]Yuki Ikeya^{1,2}, Takashi Sekine¹, Toshio Otsu²,

Tsubasa Endo², Takaaki Morita¹, Yoshinori Tamaoki¹, Yoshinori Kato¹,

Toshiyuki Kawashima¹, and Yohei Kobayashi², E-mail: yuki.ikeya@hpk.co.jp

レーザー発振器の開発において、目的に応じた理想的な出力光の波面や強度分布を得るには、共振器内の膨大なパラメータ探索と高度な空間モード制御技術が必要となる。強化学習（目的と状況に応じて最適な行動を選択する学習手法）の適用はレーザーの自律的な制御が期待できることから、課題解決の有効な手段と考えられる。しかし、実験系では大量のデータ取得に時間がかかることと、個々の実験系で実際に試してみないと有効性がわからないことから強化学習の適用は限られる。我々は、レーザー共振器内の空間モードを高精度に制御するための手段の一つとして、共振器ミラーの代わりに空間光位相変調器(LCOS-SLM)を用いることで、ミラーの角度やレンズの曲率などを動的かつ高速に制御することを可能にした。初期検証として深層強化学習の一つであるDQN(Deep Q Network)を用いた単一パラメータでの出力上昇試験に取り組んできた[1]。本講演では制御パラメータを3つに増やした条件における出力上昇試験の結果を報告する。

Fig.1 に実験系を示す。LCOS-SLM には焦点距離(f)と座標(x, y)で生成されるフレネルレンズの位相パターンを表示し、可変凹面ミラーとして用いた。凹面ミラーの上下（左右）方向の角度を振ることがフレネルレンズの $y(x)$ 座標を動かすことに相当する。焦点距離(f)と座標(x, y)の3パラメータに、発振画像から抽出した2つの値を加えた計5つの値で共振器の「状態」を表した。また f 値 ± 12 mm、 $x(y)$ 値 ± 12 ピクセルの範囲（計 15,625 パターン）を探索範囲として「行動」に設定した。そして、出力が大きいほど高い「報酬」を与える学習を行った。Fig.2 に、学習回数に対し平均報酬（学習回数 100 回ごと）をプロットした結果を示す。出力値は報酬に対して別途測定した対応関係に基づき、参考として併記したものである。学習回数の増加に伴い報酬が大きくなり、出力が上昇することを確認した。レーザーシステム自らが試行錯誤を行うことで学習が進んだこの結果から、より広範囲でのパラメータ探索の可能性が期待できる。

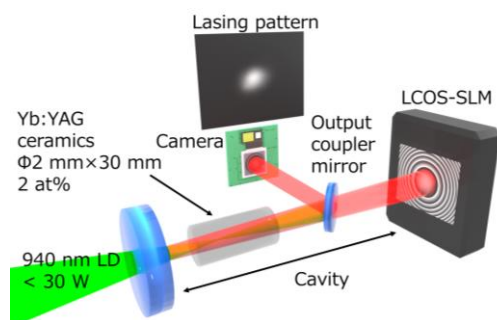


Fig.1 Experimental setup

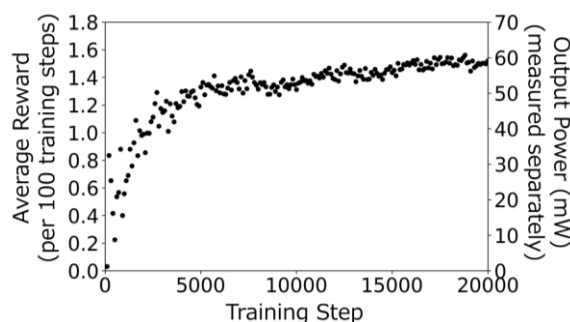


Fig.2 Learning Progress

[1] 池谷有貴 他 第72回応用物理学会春季学術講演会 14p-K309-3 (2025).

Fe:ZnSe 増幅に用いる EO Q スイッチ Er,Cr:YSGG レーザーの開発

Development of an EO Q-switched Er,Cr:YSGG Laser for Fe:ZnSe Amplification

京大化研¹, 核融合研² ○桐田 勇利¹, 岡崎 大樹¹, Yu Linpeng², 安原 亮², 時田 茂樹¹

ICR, Kyoto Univ.¹, NIFS²,

°Yuri Kirita¹, Daiki Okazaki¹, Linpeng Yu², Ryo Yasuhara², Shigeki Tokita¹

E-mail: kirita@laser.kuicr.kyoto-u.ac.jp

これまでの高次高調波発生に関する研究では近赤外帯の超短パルス光源を用いた前例が数多く存在するが、生体細胞が観察可能な水の窓領域やそれを超えるような波長帯では強度が不足しているのが現状である。より高次の高調波を効率よく生成するためにはより長波長な超短パルスを用いた方が効果的であることから^[1]、中赤外高強度超短パルスレーザーの開発が急務となっている。Fe²⁺イオンの放出スペクトルは波長 4 μm 帯に存在し、これをドーブした ZnSe 結晶を用いた光増幅が可能である^[2]。我々は Fe:ZnSe 結晶をレーザー利得媒質として 4 μm 帯フェムト秒パルスのチャープパルス増幅をおこなっている。

Fe²⁺イオンは 3 μm 近傍に吸収スペクトルをもつため、先行研究^[3]では励起源として 40 mJ/150 us の Er:YAG レーザーを用いていた。このレーザーはパルス幅が長いため、Fe:ZnSe 増幅に必要なパルスエネルギーの増加に加え、寄生発振により十分な反転分布を維持することが困難であった。そこで本研究では、EO 素子を用いた Q スイッチ Er,Cr:YSGG レーザーを開発した。図 1 は開発された Q スイッチ Er,Cr:YSGG レーザーの模式図(a)およびそのパルス時間波形(b)である。パルス時間幅(FWHM)は従来のフリーラン発振よりも 3 桁以上短い 61 ns を得ることが可能となった。さらに、フラッシュランプ励起エネルギーを変えた時のパルスエネルギーの変化を示したグラフが図 1 (c)である。これにより最大 11 mJ のパルスエネルギーで Fe:ZnSe 結晶の励起が可能となった。

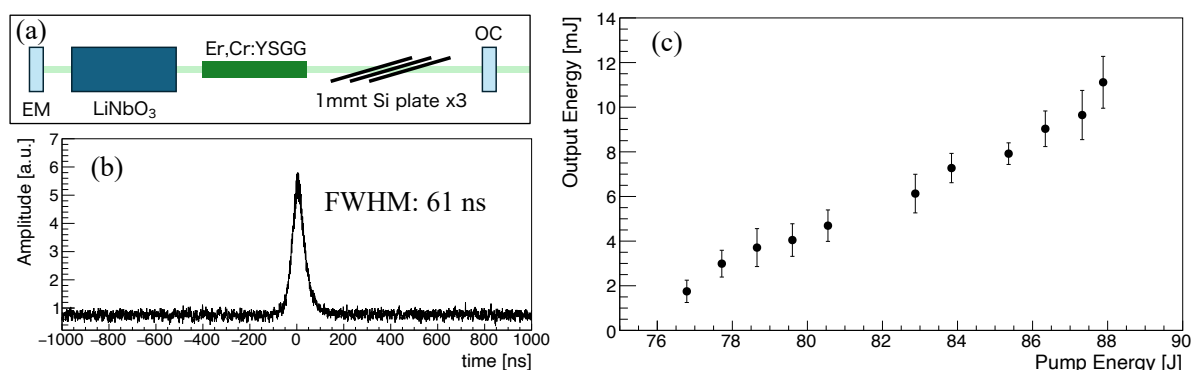


図 1 (a) Q-SW Er,Cr:YSGG レーザーの模式図および (b) パルス時間波形。 (c) パルスエネルギーのフラッシュランプ励起エネルギー依存性。

[1] T. Popmintchev *et al.*, *Science*, Vol 336, Issue 6086, pp. 1287-1291, 8 Jun 2012.

[2] A. Pushkin *et al.*, *Photonics* **2023**, 10, 1375.

[3] Daiki Okazaki *et al.*, *EPJ Web of Conference*, Vol 307, 04069 (2024).

フェムト秒レーザー直描による Tm:YAG セラミックスへの

導波路作製と評価

Femtosecond-Direct-Laser-Written Waveguides in Tm:YAG Ceramics

東大物性研¹ JX 金属株式会社² ○秋山 由洸¹, 中川 耕太郎¹, 角田 明博², 中崎 雅人²,
小林 洋平¹

ISSP, Univ. Tokyo¹, JX Advanced Metals Co.², ○Yukihiro Akiyama¹, Kotaro Nakagawa¹,
Akihiro Tsunoda², Masato Nakazaki² and Yohei Kobayashi¹

E-mail: akiyuki@issp.u-tokyo.ac.jp

波長 2 μm のレーザーはアイセーフかつポリマーの精密加工や半導体製造技術に使用可能な光源として応用が期待されており、特に高出力・高効率な光源の開発が求められている。この要求に対し、有望な利得媒質の一つが Tm イオン添加材料である。中でも Tm:YAG セラミックスは、高い熱伝導性、優れた機械的特性、そして量産性といった利点を有する。こういった利得媒質中にフェムト秒レーザー直描法を用いて直接導波路を形成する技術は、レーザー発振器や増幅器の高効率化・小型化を実現する強力な手法であり、Er:YAG などに適用されてきた[1]。Tm 添加媒質を用いた導波路レーザーは主にシングルモード光励起で研究されてきた[2, 3]。我々は、導波路レーザーによる高出力増幅の実現を目指している。そのために、母材として YAG セラミックスを用いることと、マルチモード LD を励起光として用いるシステムの実現を目標としている。

本研究では、高品位な Tm:YAG セラミックス (JX 金属株式会社製, 3.0 at.% Tm) に対し、繰り返し周波数 1 kHz の Ti:Sapphire フェムト秒レーザーを用いた直描により、クラッド型の直線導波路を作製した (Fig. 1)。加えて Tm 添加ファイバーレーザーを光源として用いて波長 2 μm 帯信号光の導波路伝搬実験を行った (Fig. 2)。

本講演では、この導波路の作製プロセスとその特性について述べる。

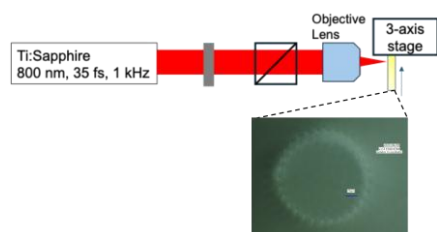


Fig. 1 The setup of fs-Direct Laser Writing and the created waveguide

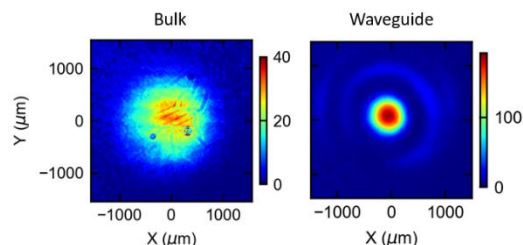


Fig. 2 The beam profile through the bulk or the waveguide

- [1] T. Sumiya, *et al.*, *Opt. Express*, **33**(5), 10047-10056 (2025).
- [2] Llamas V, *et al.*, *Opt Express*. **28**(3), 3528-3540 (2020).
- [3] Esrom Kifle, *et al.*, *Opt. Lett.* **42**, 1169-1172 (2017).

微結晶粒組織から成る透光性 c 軸配向 Nd:FAP セラミックスの開発

Synthesis and Characterization of Transparent Nd-Doped Fluorapatite Laser Ceramics

with Fine-Grained Microstructure and c-Axis Orientation

物質・材料研究機構 ^{○(PC)}小泉 早苗, 鈴木 達, 古瀬 裕章

National Institute for Materials Science, ^{○(PC)}Sanae Koizumi, Tohru S Suzuki, Hiroaki Furuse

E-mail: KOIZUMI.Sanae@nims.go.jp



【緒言】新規光学材料創出において、非立方晶系の透明多結晶セラミックスが注目されている。非立方晶材では、多結晶体中の残留気孔や他相に加えて、結晶粒界の屈折率差による粒界散乱も透光性低下の主要因となる^[1]。粒界散乱の大きさは、結晶粒のサイズや隣接結晶の屈折率差に比例するため、これまでに結晶粒の微細化や配向制御によって、その抑制が試みられてきた(e.g., [2-4])。

本研究では、非立方晶系レーザーセラミックスのさらなる高品位化を目指し、「微細結晶粒」と「配向性」を両立した試料の合成に取り組んだ。対象とした材料は、蛍光・レーザー・赤外応答・生体応用が可能な光機能性材料である六方晶系の Nd:Ca₁₀(PO₄)₆F₂ (Nd:FAP) である。磁場配向制御による成形体作製過程において、Nd:FAP 微粒子の作製条件が配向度に及ぼす影響を検討した。

【実験】原料にH₃PO₄、Ca(OH)₂、NdCl₃を用い、液相法によりNd添加ハイドロキシアパタイト (Nd:HAP) 前駆体粉末を合成した。得られた前駆体にフッ素化処理を施し、600～1400℃の範囲で仮焼して粒子径の異なるNd:FAP微粒子を作製した。得られた微粒子に分散処理を施し、最適な分散条件を検討した。分散後の粉末を12テスラの回転磁場中で鋳込み成形を行い、配向成型体を得た。試料は放電プラズマ焼結装置を用いて緻密化した。得られた試料に対して、粒度分布、結晶構造、微細組織、化学組成、透過率および蛍光特

性の測定と評価を行った。

【結果および考察】XRD の結果から、合成した微粒子は単一相であることを確認した。SEM による一次粒子径評価の結果、仮焼温度の変化により平均粒径が約 50 nm から 2.6 μm の範囲で変化した。配向成形体および焼結体の XRD 測定から、得られた試料は c 軸配向を示した (Fig. 1)。得られた透光性多結晶体の平均粒径は 300 nm 以下であった。講演では、Nd:FAP の配向度および光学特性評価の結果を報告する。また、焼結条件の最適化や、配向度向上に向けた粒成長挙動の検討結果についても議論する予定である。

参考文献：

- [1] R. Apetz, et al., *J. Am. Ceram. Soc.* **86**, 480-486 (2003)
- [2] J. Akiyama et al., *Opt. Lett.* **35**, 3598-3600 (2010).
- [3] H. Furuse H. et al., *Sci Rep* **9**, 10300 (2019).
- [4] X. Liu et al., *J. Eur. Ceram. Soc.* **42**, 6642-6653 (2022).

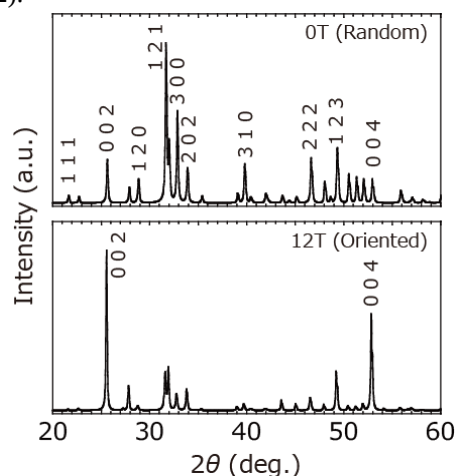


Fig. 1 : Nd:FAP多結晶体のXRDパターン

Characterization of Cr:LiSAF/Sapphire bonding interface and thermal properties

Inst. for Molecular Science ¹, Riken Spring-8 Center. ², °Florent Cassouret¹, Yoichi Sato^{2,1},

Takunori Taira^{2,1}

E-mail: florent-cassouret@ims.ac.jp

1. Introduction

Despite being a more efficient material for tunable CW lasers compared to Ti:sapphire, Cr:LiSAF-based lasers are not widely spread, mainly because their output power is limited by thermal problems due to low thermal conductivity of the gain medium. In order to improve the heat extraction inside Cr:LiSAF, aimed to use inter-layer surface activated bonding (il-SAB) technique which consist to bond the low thermal conductivity Cr:LiSAF (~2.5 W/mK) with high thermal conductivity transparent sapphire (~36 W/mK). In this work we present the analysis of bonding interface between Cr:LiSAF and sapphire as well as the thermal properties of such chip stacks.

2. Bonding and interface analysis

Successful bonding between uncoated 5 mm diameter and 1 mm thick c-cut Cr:LiSAF and same dimension sapphire crystal was realized after surface activation using ion beam under high vacuum conditions (10^{-5} Pa). After bonding, the interface was analyzed using TEM and EDX (Fig. 1.a). The results mainly show the diffusion of Oxygen and Fluoride through the bonding interface between Cr:LiSAF and sapphire. The thickness of the amorphous layer forming the bonding interface can be estimate at around 40 nm. Also, the bonding interface seems more extended on the Cr:LiSAF side indicating a longer diffusion depth of Oxygen in Cr:LiSAF (compared to Fluoride diffusion in sapphire) and a higher sensitivity of Cr:LiSAF to the ion beam performed for surface activation.

3. Thermal properties measurements

First, thermal diffusivity was measured by laser flash lamp method for the bulk c-cut Cr:LiSAF crystal and for the bonded samples in the 22 to 100°C range (Figure 1-a). The results show that the bonded materials present a 2.5-3 times higher thermal diffusivity ($2.693 \text{ mm}^2/\text{s}$) compared to the bulk crystal ($0.961 \text{ mm}^2/\text{s}$). Also, the difference between measured and calculated thermal diffusivity of the bonded sample was estimated to be similar to the standard deviation of the measurement (~3%). In that case, the thermal resistance of the bonded layer can be neglected. In addition, Cr:LiSAF specific heat was also measured in the -20-200°C to accurately calculate its thermal conductivity using the relation $\kappa(T) = D(T) \cdot C_p(T) \cdot \rho(T)$, with $\rho(T)$ the volume mass estimated using the thermal expansion coefficients of Cr:LiSAF. Finally, the effective thermal conductivity of the bonded material κ_{eff} was calculated to be around 6.6 W/mK, ~2.5 times the one of bulk Cr:LiSAF (2.5 W/mK) considering no thermal resistance of the bonding interface.

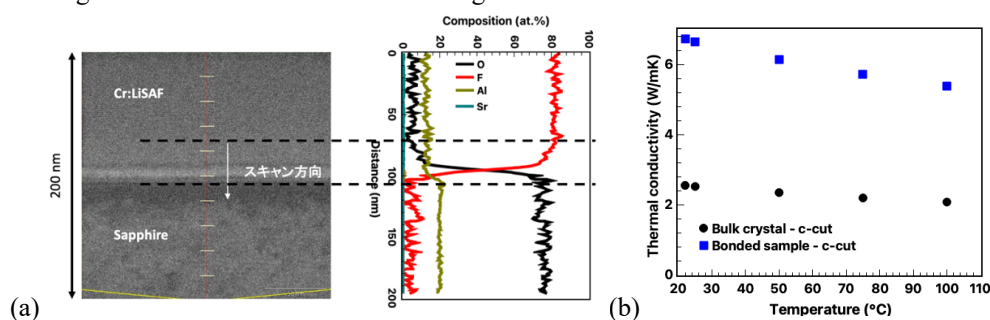


Fig. 1. Measured thermal diffusivity for bulk Cr:LiSAF and bonded samples (a) and calculated thermal conductivity of Cr:LiSAF bulk crystal and of bonded samples (b).

4. Summary

Successful bonding at room temperature between low thermal conductivity fluoride (Cr:LiSAF) and high thermal conductivity oxide (sapphire) crystals was demonstrated using il-SAB technique. Bonding analysis revealed that Cr:LiSAF is more sensitive to FAB compared to sapphire, resulting in a 40 nm thick amorphous layer, more extended on the Cr:LiSAF side. In addition, accurate measurements of thermal properties of bonded materials showed that the amorphous layer do not induce thermal resistance. As a results, >2.5 times higher effective thermal conductivity was demonstrated for the bonded sample. These results are promising for the power scaling of Cr:LiSAF and fluoride-based laser systems by using bonded chips as gain medium.

Acknowledgements:

This work was supported by the Moonshot project (JPMJMS2269), ARIM-NEXT project (JPMXP122MS1046) and the ATLA project (JPJ004506).