

Oral presentation | 3 Optics and Photonics : 3.4 Laser system and materials

📅 Fri. Mar 14, 2025 1:30 PM - 5:45 PM JST | Fri. Mar 14, 2025 4:30 AM - 8:45 AM UTC 🏠 K309 (Lecture Hall Bldg.)

[14p-K309-1~14] 3.4 Laser system and materials

Masaki Tokurakawa(UEC), Masayuki Suzuki(Doshisha Univ.), Furuse Hiroaki(NIMS)

1:30 PM - 2:00 PM JST | 4:30 AM - 5:00 AM UTC

[14p-K309-1]

[The 26th Optics and Quantum Electronics Achievement Award Speech] Research and development of extreme laser technologies, from hard X-ray atomic state lasers to ultra-high damage strength optics

○Hitoki Yoneda¹, Yurina Michine¹ (1.ILS/Univ. EElectro-Comm.)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[14p-K309-2]

Development of a high NA gas lense

○Yurina Michine¹, Hitoki Yoneda¹ (1.ILS, UEC)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[14p-K309-3]

Autonomous optimisation of laser cavity using Deep Reinforcement Learning

○Yuki Ikeya¹, Takashi Sekine¹, Shuntaro Tani², Toshio Otsu², Endo Tsubasa², Takaaki Morita¹, Yoshinori Tamaoki¹, Yoshinori Kato¹, Toshiyuki Kawashima¹, Yohei Kobayashi² (1.Hamamatsu Photonics K.K., 2.ISSP, Univ.Tokyo)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[14p-K309-4]

Detection of Pre-Laser Damage by Induced Vibration in MHz Range

○Ryouichi Akiyoshi¹, Katsuhiko Mikami¹, Yasuhiro Miyasaka² (1.Kindai Univ., 2.QST KPSI)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[14p-K309-5]

Investigation of output change on DUV light generation using CsLiB₆O₁₀ (III)

○(B)Takumi Hara¹, Shimada Kyosuke², Yamamoto Kaho³, Murai Ryota^{2,4}, Nambu Tomoaki³, Takahashi Yoshinori^{2,4}, Okada George⁵, Usami Shigeyoshi², Imanishi Masayuki², Maruyama Mihoko², Mori Yusuke^{2,4}, Yoshimura Masashi^{3,4} (1.Sch. of Eng., Osaka Univ., 2.Grad. Sch. of Eng., Osaka Univ., 3.ILE, Osaka Univ., 4.SOSHO CHOKO Inc., 5.Spectronix Corp.)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[14p-K309-6]

Investigation of time-dependent changes in DUV transmittance of CsLiB₆O₁₀ crystals

○(B)Kotaro Morita¹, Ryunosuke Oura¹, Tomoaki Nambu¹, Ryota Murai², Hironori Igarashi³, Makoto Nakajima¹, Yusuke Mori^{2,4}, Masashi Yoshimura^{1,2} (1.ILE, Osaka Univ., 2.SOSHO CHOKO Inc., 3.Gigaphoton Inc., 4.Grad. Sch. of Osaka Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[14p-K309-7]

Fabrication of highly efficient walk-off compensated β -BaB₂O₄ wavelength-conversion devices using room-temperature bonding

○(M1)Shion Naito¹, Riku Ogura¹, Ichiro Shoji¹ (1.Chuo Univ.)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[14p-K309-8]

Study on QPM-Quartz construction by multi-plate bonding

○Hideki Ishizuki^{1,2}, Yoichi Sato^{1,2}, Takunori Taira^{1,2} (1.RIKEN RSC, 2.IMS)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[14p-K309-9]

Thermal Resistance and Effective Thermal Conductivity of Layered Optical Composites

○Yoichi Sato^{1,2}, Arvydas kausas^{1,2}, Takunori Taira^{1,2} (1.RIKEN RSC, 2.Inst. Mol. Sci.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award ◆ English Presentation

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

[14p-K309-10]

Thermal properties of Cr:LiSAF/Sapphire bonded materials

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

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

4:45 PM - 5:00 PM JST | 7:45 AM - 8:00 AM UTC

[14p-K309-11]

Development of Yb:YAG composite microchip MOPA using room-temperature bonding

○(M1)Sadafumi Ishizuka¹, Tomoya Yamada¹, Ichiro Shoji¹ (1.Chuo Univ.)

5:00 PM - 5:15 PM JST | 8:00 AM - 8:15 AM UTC

[14p-K309-12]

Improving the Orientation Control in Yb:FAP Ceramics Under Rotating Magnetic Flux

○Yoichi Sato^{1,2}, Takunori Taira^{1,2} (1.RIKEN RSC, 2.Inst. Mol. Sci.)

5:15 PM - 5:30 PM JST | 8:15 AM - 8:30 AM UTC

[14p-K309-13]

Approach to perovskite semiconductor solar-pumped lasers | |

○Yosuke Kume¹, Taiki Sakaguchi¹, Takaaki Ishikawa¹, Shijun Shi², Masato Soutome³, Takashi Kondo^{2,3}, Ichirou Shoji¹ (1.Chuo Univ., 2.Univ. of Tokyo, 3.RCAST, Univ. of Tokyo)

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[14p-K309-14]

Introduction of Nanoporous into Silicone via Quadruple-Mixture-Emulsion Method

○Riku Matsuzaki¹, Hayato Koga², Yushi Yoshioka¹, Hiroaki Yoshioka¹, Yuji Oki¹ (1.I.S.E.E. Kyushu Univ., 2.Eng. Kyushu Univ.)

ハードX線原子準位レーザーから超高耐力光学素子までの極限レーザー 技術開発研究

Research and development of extreme laser technologies, from hard X-ray atomic state
lasers to ultra-high damage strength optics

電気通信大学レーザー新世代研究センター °米田仁紀、道根百合奈

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

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

本講演は、第26回光・量子エレクトロニクス業績賞（宅間宏賞）の受賞を受け、これまで我々が行ってきた極限レーザー技術の開発経緯や、今後の展望について紹介する。特に、SACLAに代表されるX線自由電子レーザーの完成を受け始まった原子準位を利用したハードX線レーザーの研究[1]では、その提案経緯と研究の進展だけでなく、現在行われているハードX線領域での周波数安定化レーザーの開発などについて紹介する。また、ナノ秒のレーザーに対し、 kJ/cm^2 を超える耐力を紫外光領域でも達成できている気体光学素子の開発[2]では、その開発・構想の第一歩となった大気プラズマ研究から、現在新たに進めている超低損失光学素子として気体光学素子を利用した光蓄積によるパルスレーザー発生法の開発などについても紹介していく。

[1] H. Yoneda, et al., Atomic inner-shell laser at 1.5-ångström wavelength pumped by an X-ray free-electron laser, *Nature* volume 524, pages446–449 (2015)

[2] Y. Michine and H. Yoneda, Ultra high damage threshold optics for high power lasers, *Communications Physics* volume 3, Article number: 24 (2020)

気体レンズの高NA化手法の開発

Development of a high NA gas lense

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

高エネルギーレーザーシステムにおける光学素子は、レーザー光による損傷を回避するために損傷閾値を十分に下回る安全係数を考慮した運用になっているが、大型・高エネルギーレーザーや、レーザー加工の最終光学系へのデブリによる影響とクリーン度的に厳しい環境下などでは、光学素子の汚染や損傷が避けられない問題になっている。我々はこれを根本的に解決するために、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 (図 1)。この密度変調のピーク時間は、初期の紫外レーザー光の照射空間周期間隔によって決まる。典型的には数 10ns 後でピークを迎え、その後ゼロになり、再びピークを迎える、と時間的に繰り返すので、ピーク時箇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。

最近では、紫外レーザー光の球面波と平面波を干渉照射させることで、不等間隔の曲率をもった位相レンズ (回折レンズ) もできるようになってきた。ところが、被制御レーザー光の入射角許容幅の問題から、不等間隔の格子に対して回折効率の高い、大面積の回折レンズを作成することが困難であった。最近になって図 1 のような実際の密度変調分布を観測し、実際の形状が明らかになってきたために、計算により被制御レーザーの入射角、回折レンズの格子間隔、それを作る 2 本の紫外レーザーの干渉条件、などの最適値探索を行った。講演では、被制御レーザーの入射角度を空間的に分布させる形で、不等間隔の格子に合った最適入射角に補償を行い、大面積レンズの生成を行った結果について報告を行う。またさらなる回折レンズの高 NA 化のためにはどのような条件が必要であるか、計算を行い、試験を行った結果についても報告する。

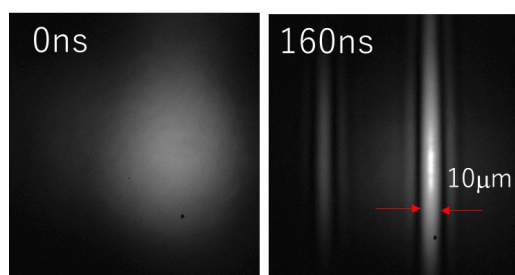


図 1 : 気体中粗密波の紫外レーザー照射後からの密度変調時間発展の吸収計測像

深層強化学習によるレーザー共振器の自律最適化

Autonomous optimisation of laser cavity using Deep Reinforcement Learning

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, 谷 峻太郎²,

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, Shuntaro Tani²,

Toshio Otsu², Tsubasa Endo², Takaaki Morita¹, Yoshinori Tamaoki¹, Yoshinori Kato¹,

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

レーザー共振器の開発において出力光の波面・強度分布の均一性や動作安定性など所望の特性を達成するためには光学系の制御パラメーターを最適化する必要がある、これには熟練した技術者でも膨大な時間を要する。強化学習(目的と状況に応じて最適な行動を選択する機械学習手法)はレーザーの自律最適化に適した手法であると考えられるが、ノイズや環境揺らぎが存在する現実のレーザーシステムへ適用できるかは未知である。レーザー共振器の制御手段の1つとして、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、自由度の高い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考えた。LCOS-SLMを配置した共振器において、Qテーブルを用いた強化学習の原理実証に取り組んできた [1]。講演では、LCOS-SLMを配置した共振器に初めてディープQネットワーク(DQN)を適用し、出力最大化を試みた結果を報告する。

Fig.1に実験セットアップを示す。LCOS-SLMにフレネルレンズの位相パターン情報を与えた。フレネルレンズの焦点距離(f)と発振画像から算出した輝度の積算値との2つを「状態」として定め、 $\pm 20\text{mm}$ (1 mm 間隔)の焦点距離を「行動」として設定し、出力が大きいほど高い「報酬」を与えることで出力が最大化するように学習させた。出力最大化の探索を行い、学習回数に対してDQNにより選択した f の結果を Fig.2に示す。2000回の試行後に学習をスタートさせた。学習回数の増加に伴い選択された f が150 mm付近に収束し、到達出力が増大していることも確認できた。これは学習が進むにつれてネットワークが適切に更新されていることを示している。測定結果のばらつき実際の実験系で深層強化学習が有効であることを示唆したこの結果は、今後、多次元パラメーターでの深層強化学習の適用が期待できる。講演では実験系や検証結果の詳細を報告する。

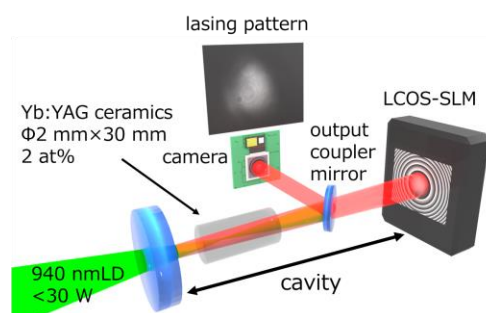


Fig.1 Experimental setup

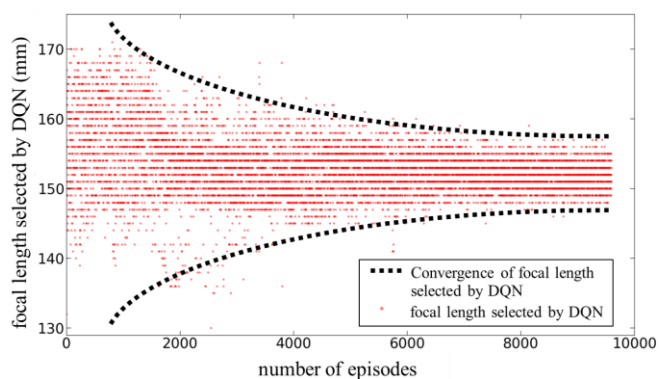


Fig.2 focal length selected by DQN vs. number of episodes

[1] 池谷有貴 他 第85回応用物理学会秋季学術講演会 20P-A37-4 (2024).

MHz 帯域振動検知によるレーザー損傷の事前検出

Detection of Pre-Laser Damage by Induced Vibration in MHz Range

近大生物理工¹, 量研関西研² ◯(M1) 秋吉諒一¹, 三上勝大¹, 宮坂泰弘²

Kindai Univ.¹, QST KPSI², ◯(M1) Ryoichi Akiyoshi¹, Katsuhiko Mikami¹, Yasuhiro Miyasaka²

E-mail: 2433730016m@waka.kindai.ac.jp

1. はじめに

レーザー損傷は高強度レーザーシステムの運転を妨げる重大な要因である。従来の損傷検出方法は、目視や顕微鏡検査により実施されている。したがって、見落としの発生や時間を要するといった問題がある。そこで、我々は、損傷発生時に誘起される振動を検知することで、in-situ な損傷検出手法を開発した。前回の講演では、熱拡散が本手法における決定的なパラメータであることを明らかにした^[1]。レーザー損傷が生じる主要な原因として、微小吸収に起因する電子雪崩が報告されている^[2]。微小吸収の立ち上がりをも光音響信号として検出し、直ちにレーザーを停止することで、光学素子の不可逆的な損傷を避けることができる。本研究では、計測振動の周波数帯域を MHz 領域に広げることで、損傷が生じる予兆の検出を目指した。

2. 実験方法

ダメージテストは、波長 1064 nm、パルス幅 7 ns の Nd:YAG レーザーを使用し、N-on-1 方式で実施した。サンプルとして、石英基板 (Φ 30 mm, 厚さ 1 mm) 上に成膜した Ta₂O₅ 単層膜を使用した。パルスレーザー照射時に、周波数帯域 30 k ~ 3 MHz の振動計測を同期したレーザードップラー振動計で行った。レーザー未照射時より強い振動を検知した時を、本研究における N-on-1 試験の停止条件とし、実体顕微鏡による損傷発生有無の確認を行った。

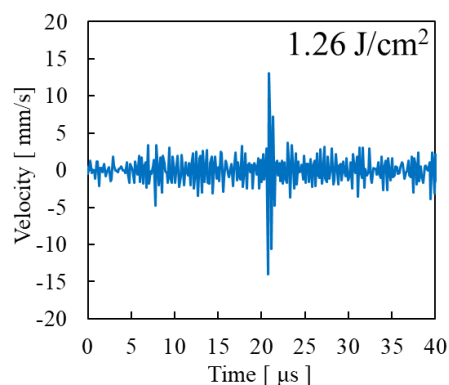


Fig. 1. Waveform of laser-induced vibrational velocity

3. 結果

パルスレーザー照射後に顕微鏡でサンプルを観察したところ、照射箇所でもレーザー損傷が発生せず、振動が生じた計測点が確認された。この時、同実験系で得られた顕微鏡評価による損傷閾値 (8.32 J/cm²) と比較し、振動検出した最低のフルーエンスは Fig.1 に示すように約 1/7 倍低い 1.26 J/cm² であった。Fig.1 における横軸は計測時間、縦軸はレーザードップラー振動計で検出した振動速度波形である。この振動をフーリエ解析したところ、MHz 帯域の周波数が支配的であった。これらの知見から、基材の固有周波数である可聴領域の振動では損傷検出や発生位置特定ができると同時に、MHz 帯域の超音波振動を組み合わせることで、レーザー損傷の予兆を振動発生で事前検出できることが示唆された。詳細は講演に譲る。

[参考文献]

- [1]. 秋吉諒一, 他; 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 20p-A37-3
- [2]. 西岡一, 河角孝行, 植田憲一, 宅間宏. (1992). 紫外光学薄膜の多光子吸収と電子雪崩の測. レーザー研究, 20(5), 344-354.

CsLiB₆O₁₀ を用いた深紫外光波長変換における出力変化の調査 (Ⅲ)Investigation of output change on DUV light generation using CsLiB₆O₁₀(Ⅲ)阪大工¹, 阪大院工², 阪大レーザー研³, 創晶超光⁴, スペクトロニクス⁵○(B)原 拓海¹, 島田 恭丞², 山本 果穂³, 村井 良多^{2,4}, 南部 誠明³, 高橋 義典^{2,4},
岡田 穰治⁵, 宇佐美 茂佳², 今西 正幸², 丸山 美帆子², 森 勇介^{2,4}, 吉村 政志^{3,4}Sch. of Eng., Osaka Univ.¹ Grad. Sch. of Eng., Osaka Univ.², ILE, Osaka Univ.³,
SOSHO CHOKO Inc.⁴, Spectronix Corp.⁵○Takumi Hara¹, Kyosuke Shimada², Kaho Yamamoto³, Ryota Murai^{2,4}, Tomoaki Nambu³,
Yoshinori Takahashi^{2,4}, George Okada⁵, Shigeyoshi Usami², Masayuki Imanishi²,
Mihoko Maruyama², Yusuke Mori^{2,4}, and Masashi Yoshimura^{3,4}

E-mail: thara@cryst.eei.eng.osaka-u.ac.jp

非線形光学結晶 CsLiB₆O₁₀ (CLBO) は潮解性対策と内部の水不純物を脱離させるため、一般的に 150°C に加熱して用いられる。最近、低温の 80°C で深紫外光変換特性を調査したところ、出力が低下し続ける現象が確認された¹⁾。本研究ではこの出力低下の原因を明らかにするため、新しい育成条件で作製した内部欠陥の少ない CLBO 素子について同様の調査を行った。

本実験で使用した光学系模式図を Fig. 1 に示す。評価用 CLBO 素子 (5×5×10 mm³) をセル内に設置し、波長 532 nm、平均パワー 20 W のピコ秒パルスレーザー光を入射して、波長 266 nm の深紫外光波長変換を行った。水不純物を脱離させるために 6 日目までは 150°C で加熱を行い、その後は 80°C で加熱を続けた。出力の測定は 80°C に降温して行い、紫外光は測定時のみ発生させた。本実験では先行研究の素子 (CLBO A)¹⁾ と新しく開発した素子 (CLBO B) の比較を行った。紫外光出力の経時変化では、CLBO A が低下傾向であったのに対し、CLBO B は増加傾向を示し、結晶品質によって出力経時変化の様子が異なることが明らかになった (Fig. 2)。さらに、加熱 20 日目の 80°C における入出力特性を比較したところ、Fig. 3 に示すように紫外光出力が高い領域においても CLBO B は良好な変換特性であった。なお、150°C での出力特性にはこのような差異は見られないことを確認している。現在、出力の低下は紫外光誘起吸収欠陥の形成に伴う部分的な熱位相不整合によるものと考えられており、80°C では紫外光誘起吸収欠陥の熱緩和が抑制されるため、結晶品質の差が明確になったものと考察している。本研究より、結晶成長時の欠陥抑制が紫外光発生時の長期安定動作につながると言える。

本研究は JSPS 科究費 JP22H01993 の助成を受けて得られた成果である。

1) 山本果穂他, レーザー学会学術講演会第 45 回年次大会, B10-23p-II-03 (2025).

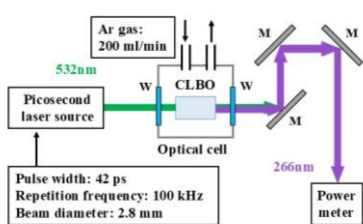


Fig. 1. Experimental setup.
W: AR 532/266-nm window,
M: HR 266-nm mirror

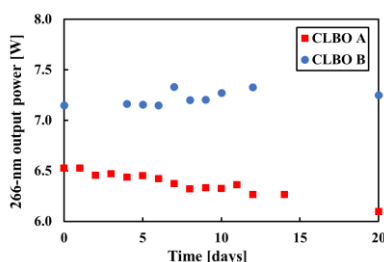


Fig. 2. Change of the 266-nm output during the heating process.

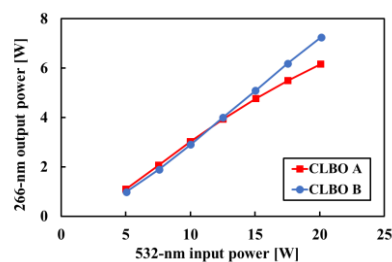


Fig. 3. 532-nm input / 266-nm output characteristics after 20 days.

CsLiB₆O₁₀ 結晶の深紫外光透過率の経時変化の調査Investigation of time-dependent changes in DUV transmittance of CsLiB₆O₁₀ crystals阪大レーザー研¹, 創晶超光², ギガフォトン³, 阪大院工⁴,○森田 孝太郎¹, 大浦 龍之介¹, 南部 誠明¹, 村井 良多², 五十嵐 裕紀³中嶋 誠¹, 森 勇介^{2,4}, 吉村 政志^{1,2}ILE, Osaka Univ.¹, SOSHO CHOKO Inc.², Gigaphoton Inc.³, Grad. Sch. of Eng., Osaka Univ.⁴,○Kotaro Morita¹, Ryunosuke Oura¹, Tomoaki Nambu¹, Ryota Murai², Hironori Igarashi³,Makoto Nakajima¹, Yusuke Mori^{2,4}, and Masashi Yoshimura^{1,2}

E-mail: yoshimura.masashi.ile@osaka-u.ac.jp

CsLiB₆O₁₀ (CLBO) 結晶を用いた深紫外光源の高出力化に向けて、結晶の深紫外光吸収や出力低下が課題となっている¹⁾。前回の講演では CLBO 結晶に波長 221 nm の深紫外光を集光照射した際、透過率低下が時間的に緩和される現象について述べた²⁾。本研究では、素子内部の水不純物が脱離する前後での透過率の経時変化の挙動を詳しく調査した。

Figure 1 に示す光学系を用い、光学セル内に固定した CLBO 素子に 221 nm 光を集光照射した。セルには Ar ガスを 100 ml/min の流量で常時流入させた。CLBO 素子は Li-poor 組成溶液からインゴットを育成した³⁾評価用の波長 266 nm 光発生方位素子 (5×5×10 mm³, 2 面研磨) を使用した。まず、室温 23 °C, 入射偏光は o 偏光, 集光点のパワー密度 2.0~7.0 GW/cm² (計算値) の条件で透過率の経時変化を測定した。次に、素子を 150 °C に昇温し、4 日間加熱することで内部の水不純物を脱離した。その後、室温に降温してから加熱前と同じ条件で透過率の経時変化を調べた。Figure 2 (a) にパワー密度 6.0 GW/cm² で照射した時の結果を示す。加熱前の素子では、10 秒程度変化が見られない状態が続いた後、急速に透過率が低下して 80 秒後にバルク損傷が生じた。一方、加熱処理した後は照射直後から透過率は指数関数的に低下し、130 秒後にバルク損傷が生じた。透過率の経時低下は紫外光誘起吸収欠陥の形成の結果と考えているが、加熱前後の低下挙動の違いからそのメカニズムは大きく異なっていることが本研究で明らかになった。加熱後の透過率経時変化を解析するために、指数関数 $T(t) = A + B \exp(-t/\tau)$ を用いてフィッティングした。Figure 2 (b) の実線は実験値に対するフィッティングを示し、時定数 $\tau = 60$ s 程度でよく一致した。当日は他の光学材料の光誘起吸収欠陥を参考に、CLBO 結晶中の欠陥生成機構や緩和現象について考察する。

本研究は JSPS 科研費 JP22H01993 の助成を受けて得られた成果である。

- 1) 折井他, レーザー研究, **45**, 580 (2017).
- 2) 大浦他, 応用物理学会秋季学術講演会, 20a-A37-2 (2024).
- 3) R. Murai *et al.*, Appl. Phys. Express, **12**, 075501 (2019).

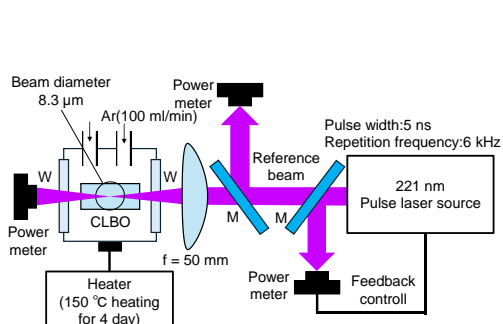


Fig.1. Schematic of experimental setup.

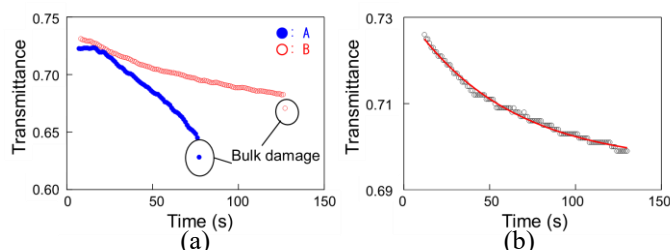


Fig.2. (a) Temporal changes in transmittance at before heat treatment (filled circles, A) and after heat treatment (open circles, B). (b) Markers represent transmittance after heat treatment. Solid line is curve fitting.

常温接合を用いたウォークオフ補償 β -BaB₂O₄ 紫外波長変換デバイスの高効率化 Fabrication of highly efficient walk-off compensated β -BaB₂O₄ wavelength-conversion devices using room-temperature bonding

中央大理工 °内藤 師音, 小倉 陸, 庄司 一郎

Chuo Univ. Shion Naito, Riku Ogura, Ichiro Shoji

E-mail: a20.n6p4@g.chuo-u.ac.jp

β -BaB₂O₄ (BBO)は代表的な紫外波長変換材料であるが、結晶中で基本波と第2高調波が分離するウォークオフ効果により波長変換効率が大幅に低下する。その改善策として、我々は Fig.1 のように光軸の向きを交互に反転した複数の結晶プレートからなるウォークオフ補償構造を、常温接合を用いて開発している [1]。

BBO プレートは、基本波垂直入射時に位相整合が達成されるよう用意する必要がある。しかしながら、位相整合角が垂直入射からずれているプレートが多く、そのばらつきはメーカーごとに大きく異なることが分かった [2]。ずれ角が大きいプレート同士を接合した場合、第2高調波パワーがピークとなる入射角が複数存在し効率が上がらない。そこで、ずれ角の小さいプレートが最も多かったメーカーから新たに30枚のプレートを購入し、ずれ角のばらつきを再度測定するとともに、ウォークオフ補償構造を作製し性能を評価した。

垂直入射時に基本波波長 636 nm に対し Type I 位相整合となり (光軸との角度 37.6°), 公差 $\pm 0.1^\circ$ の条件で、BBO プレート (2.5 mm \times 3.5 mm \times 厚さ 1.0 mm) を購入した。全てのプレー

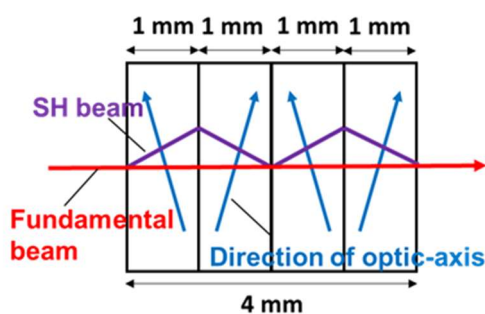


Fig.1 Walk-off compensating structure

トについて、垂直入射からの位相整合角のずれを測定した結果を Table 1 に示す。1/3 程度が 0.1° 以内に収まっていた。

Table 1 Distribution of plates at each angle of deviation-from normal incidence

| Deviation angle δ | Number of plates |
|-------------------------------------|------------------|
| $\delta \leq 0.1^\circ$ | 11 |
| $0.1^\circ < \delta \leq 0.2^\circ$ | 5 |
| $0.2^\circ < \delta \leq 0.3^\circ$ | 2 |
| $0.3^\circ < \delta$ | 12 |

角度ずれが小さいプレートを用いて4枚接合ウォークオフ補償構造を作製し (Fig.2), 基本波パワー 110 mW における第2高調波パワーの入射角依存性を測定した。その結果を Fig.2 に示す。4枚接合構造からは1枚のプレートよりも3.2倍大きな出力が得られた。長さ 4 mm のバルク結晶では 1 mm の結晶に比べ第2高調波パワーは 2.7 倍にしかならないと見積もられるため、4枚接合構造はそれよりも効率が高く、ウォークオフ補償が有効に機能していると言える。

今後は、ずれ角の小さいプレートのみを用いて接合枚数を増やしさらなる効率の向上を目指す。

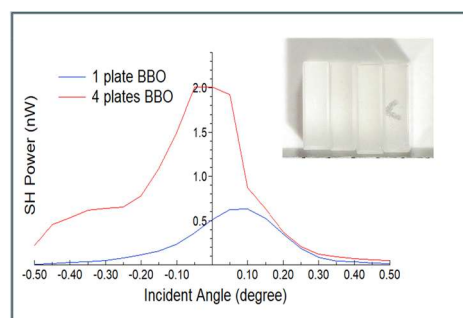


Fig.2 SH power vs. incident angle. Inset: fabricated 4 plates walk-off compensating structure.

- 1) Hara *et al.*, *Appl. Phys. Express* **5**, 052201 (2012).
- 2) Naito *et al.*, *CLEO Pacific Rim* 2024, P1-034

薄板多接合方式によるQPM水晶構築の検討

Study on QPM-Quartz construction by multi-plate bonding

理化学研究所¹ 分子科学研究所² ○石月秀貴^{(*)1,2} 佐藤庸一^{1,2} 平等拓範^{1,2}

RIKEN SPring-8 Center¹, Inst. Molecular Science (IMS)² ○Hideki Ishizuki^{1,2}, Yoichi Sato^{1,2}, Takunori Taira^{1,2}
e-mail (*): ishizuki@spring8.or.jp

【QPM水晶】 水晶は光学的高透過特性や高レーザー照射耐久性に加えTHz波域で室温低吸収であり、THz波域用の非線形光学材料として期待できる[1]。我々は短周期の擬似位相整合(QPM)構造形成に適したスタンプ法での応力印加を介したQPM水晶などを報告してきた[2]。しかしバルク水晶への応力印加による極性反転は、PPLNやPPKTPに代表される強誘電体QPM素子での電界印加分極反転と同様に短周期化に適する一方で大口径化と相性が悪い点が高出力波長変換適用への妨げであった。

一方で、半導体材料や光学材料を高精度低損失で積層/接合する接合技術の進展は著しく、高出力レーザーにおける結晶放熱特性改善用DFC素子の実現にも利用されている[3]。この接合技術のQPM素子への適用例としては、光学接触によるQPM水晶[4]、常温接合によるQPM GaAs[5]、無反射コーティングを施したLiNbO₃結晶の単純積層などが報告されている[6]。本報告では、大口径QPM水晶の実現を目的として、プラズマ処理を介した水晶薄板の接合とその特性評価を行ったので報告する。

【水晶薄板接合】 QPM水晶に必要な構造周期 Λ は動作波長に依存し、例えば1064nm光励起で1THz波発生の場合には約540 μm となる。今回は直径20mmの水晶基板(0.5mm厚及び1.0mm厚)を準備し、光学研磨後にプラズマ処理による結晶接合を実施した。洗浄や研磨処理が不適切な場合、接合失敗や干渉縞が発生するが、適切な条件下では清浄な接合が確認できた(図1、0.5mm厚×2枚)。

【接合特性評価】 可視域(450-650nm)での透過特性評価結果を図2に示す。波長532nmでの平均屈折率 ~ 1.55 から、水晶1枚(空気/水晶界面×2)および水晶2枚(未接合、空気/水晶界面×4)の理論透過率はそれぞれ91%、81%であり、測定結果もほぼこれに一致した。一方で2枚接合水晶の透過率測定結果は91%であった。これはフレネル損失を抑制した接合の達成を示している。

次にsub-nsパルスレーザーを用いた損傷特性評価を行った。2枚接合水晶(1.0mm厚×2枚)に対し、1.0-1.5mm間隔で損傷特性評価を実施した。図3に示す特性評価時において、全ての損傷は裏面側(レーザー光入力面の反対側)から生じ、実験中あるいは実験後に接合剥離などは生じなかったことから、初期評価として十分な接合強度を有していることを確認した。

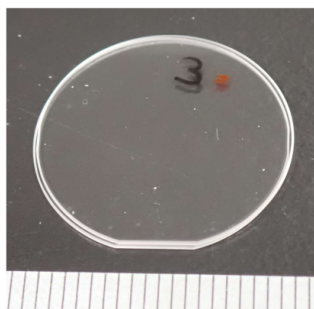


図1 接合した水晶

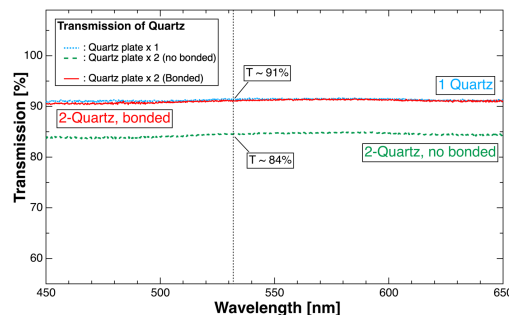


図2 各種水晶の可視域透過特性

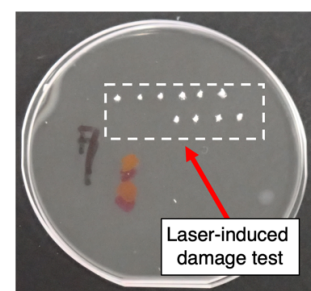


図3 損傷特性評価

【今後の予定】 接合試料の非破壊検査手法として、結晶の熱伝導特性測定が利用できる[7]。今後、光学透過特性や損傷特性評価に加え、熱伝導特性評価を実施しつつ接合条件の改善を進め、最終的には大口径QPM水晶の構築を目指す。

【謝辞】 本研究は、JST来社会事業JPMJMI17A1、防衛装備庁安全保障技術研究推進制度JPJ004596などの支援を受け実施したものである。

- [1] 石月他, 2024年春季応物シンポジウム, 23p-71B-3 (2024). [2] H. Ishizuki, et. al., Opt. Express **28**, 6505 (2020).
[3] L. Zheng, et. al., Opt. Mat. Express **7**, 3214 (2017). [4] M. Okada, et. al., Opt. Commun. **18**, 331 (1976).
[5] R. Tanimoto, et. al., J. Opt. Soc. Am. B **38**, B30 (2021). [6] N. H. Matlis, et. al., Opt. Express **32**, 33875 (2024).
[7] Y. Sato, et. al., Opt. Express. **14**, 10528 (2006).

層状コンポジット光学素子における層間熱抵抗及び実効熱伝導率

Effective Thermal Conductivity of Optical Composites by Surface Activated Bonding

理研¹, 分子研² ○佐藤 庸一^{1,2}, アルヴィダス カウシャス^{1,2}, 平等 拓範^{1,2}

RIKEN¹, Inst. Mol. Sci.², °Yoichi Sato^{1,2}, Arvydas Kausas^{1,2}, Takunori Taira^{1,2}

E-mail: yoichi.sato@spring8.or.jp

【緒言】近年のレーザー装置のユビキタス化により、レーザー装置の価格・運用コスト低減とレーザー性能向上が促進されてきた。それを可能とするのがレーザー共振器の小型高出力化であるが、最大の障害となるのがレーザー媒質における発熱密度の増大である。これを解決する手法として、我々は室温下での表面活性接合によるレーザー利得媒質と透明ヒートシンクとのコンポジット素子を開発し、排熱性の大幅な向上を実現した [1]。層状コンポジット媒質の排熱性は壯観熱抵抗に大きく依存するが、我々は以前レーザー媒質そのものの熱抵抗に対して透明誘電体結晶の表面活性接合界面における熱抵抗が無視できることについて確認している [2]。一方で、熱接触を改善するためのインジウムによるシールや、もしくはただ重ねただけの接合していない状態での界面熱抵抗がどの程度であるかについて議論は無かった。今回、様々な接合状態のサファイア/Nd:YAG 単結晶積層試料についてそれぞれの層間熱抵抗を評価したので報告する。

【実験方法】 本実験では、直径 12.7 mm の c-cut サファイアおよび 1at.%Nd:YAG 単結晶について、(1)表面活性接合により接合、(2) 厚さ 0.1mm のインジウムフォイルを挟み 6 kN を印加する、(3) ただ重ねただけ、の 3 種類の試料を準備し、フラッシュ法 (LFA467 Hyper flash, ネット) により実効熱拡散率 D_{eff} を 0 °C ~ 150 °C の温度範囲において計測した。層間熱抵抗 R は

$$R = \frac{\xi_{\text{sapphire}} + \xi_{\text{YAG}}}{6\xi_{\text{sapphire}}\xi_{\text{YAG}}} (L_{\text{sapphire}} + L_{\text{YAG}})^2 \left[\frac{1}{D_{\text{eff}}} - \frac{1}{D} \right], \quad (1)$$

$$D = \frac{(\xi_{\text{sapphire}} + \xi_{\text{YAG}})(L_{\text{sapphire}} + L_{\text{YAG}})^2 D_{\text{sapphire}} D_{\text{YAG}}}{(\xi_{\text{sapphire}} + 3\xi_{\text{YAG}}) D_{\text{YAG}} L_{\text{sapphire}}^2 + (3\xi_{\text{sapphire}} + \xi_{\text{YAG}}) D_{\text{sapphire}} L_{\text{YAG}}^2}, \quad (2)$$

で評価できる [3]。ここで L_i , D_i , ξ_i はそれぞれ層 i の厚さ、熱拡散率、密度・比熱・厚さの積である。

【実験結果と考察】 図 1 にサファイア/Nd:YAG 積層媒質の D_{eff} を示す。サファイア/Nd:YAG 積層媒質における D_{eff} は表面活性接合で接合した場合においては熱抵抗ゼロの状態 (D) と等しく熱抵抗は $10^{-7} \text{ m}^2\text{K/W}$ オーダー以下であるのに対し、インジウムを挟んだ試料や重ねただけの試料では D より明らかに小さくなっており、図 2 で示される通り有意な大きさの層間熱抵抗を持つことが確認された。これらの複合媒質における実効熱伝導率など詳細は当日報告する。

【謝辞】本研究は、防衛装備庁が実施する安全保障技術研究推進制度 JPJ004596 の支援を受けた。

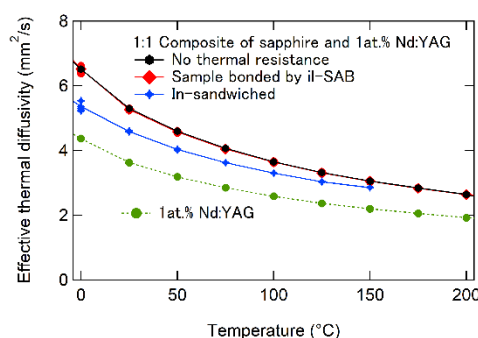


図 1 サファイア/Nd:YAG 積層媒質の D_{eff}

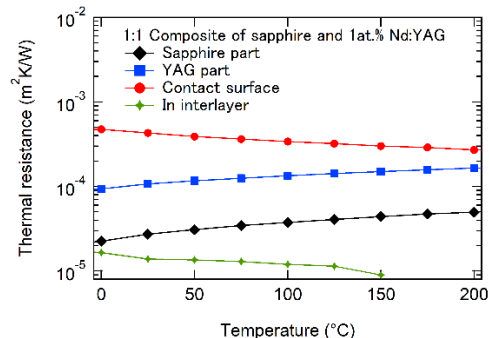


図 2 サファイア/Nd:YAG 複合媒質の層間熱抵抗

[1] A. Kausas 他、第 68 回応用物理学会春季講演会, 16p-Z11-5 (2021).

[2] 佐藤他、第 84 回応用物理学会秋季学術講演会, 21a-B204-4 (2023).

[3] T. Baba, JJAP 48(5), 05EB04 (2009).

Thermal properties of Cr:LiSAF/Sapphire bonded materials

Inst. for Molecular Science¹, 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 a transparent sapphire with high thermal conductivity (~36 W/mK). In this work we presents the improvement of Cr:LiSAF thermal properties using room temperature bonding.

2. Bonding

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 Fast Atom Bombardment (FAB) under high vacuum conditions (10^{-5} Pa). An inter-layer was deposit on the samples surface before FAB to simulate the anti-reflection coating which will be required to match the refractive index difference between the two materials. Additional sample composed of Cr:LiSAF sandwiched by two sapphires was bonded for thermal properties measurements.

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 (3.04 mm²/s for the two layers material) compared to the bulk crystal. Higher dispersion of the measured values can be noticed for the sandwiched sample as transverse thermal diffusion can occurs due to the higher length/diameter (1/2) aspect ratio compared to the two layers one (3/10). Additionally, the specific heat at constant pressure (C_p) of Cr:LiSAF was measured in the -20 to 220°C using Differential Scanning Calorimetry (DSC) method.

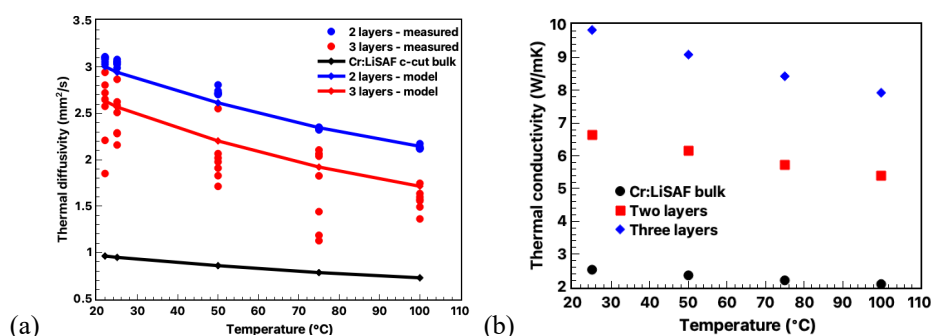


Fig. 1. Measured thermal diffusivity for bulk Cr:LiSAF and bonded samples (a) and calculated thermal conductivity of Cr:LiSAF bulk crystal and of bonded samples (b).

Then the difference between the calculated ideal thermal diffusivity and the measured value was estimated to be 3.7 % which is closed to the standard deviation of the measurement (3 %). In this case, the thermal resistance of the bonded interface between Cr:LiSAF and sapphire can be neglected. Finally, the thermal conductivity of the bonded material was calculated using the previous results in the 25-100°C range (Figure 1-b). The results show a 4 times improvement from bulk (2.52 W/mK @25°C) to sandwiched sample (9.84 W/mK @25°C), highlighting the effect of the bonding on the thermal properties improvement.

4. Summary

We successfully demonstrated bonding between Cr:LiSAF and sapphire at room temperature. The thermal properties of the bulk and bonded samples were measured between 25 and 100°C. A ~4-time improvement of thermal conductivity was demonstrated for bonded sample (9.84 W/mK) compared to bulk (2.52 W/mK). These results are promising for the power scaling of Cr:LiSAF using bonded laser chip.

Acknowledgements:

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

常温接合を用いた Yb:YAG 複合構造マイクロチップ MOPA の開発

Development of Yb:YAG composite microchip MOPA using room-temperature bonding

中央大理工 ○(M1)石塚 貞史, (B)山田 智哉, 庄司 一郎

Chuo Univ. Sadafumi Ishizuka, Tomoya Yamada, Ichiro Shoji

E-mail: a20.p76d@g.chuo-u.ac.jp

固体レーザーでは励起時の発熱が、熱レンズ効果や熱屈折効果を引き起こし、ビーム品質や出力を低下させる。また、最終的には熱歪みにより結晶破壊に至るため、出力が制限される。したがって、固体レーザーの高効率・高出力・高ビーム品質化を図るためには、レーザー媒質の排熱が重要であり、レーザー活性イオン添加材料と無添加材料を一体化した複合構造レーザーは有効な手段の一つとなっている[1]。

複合構造の作製手法は主に拡散接合が用いられているが、高温プロセスのため、熱膨張係数が異なる異種材料の接合が困難である。我々は常温接合法[2]を用い、レーザー媒質と排熱効果の高い無添加材料を一体化した複合構造レーザーの開発に取り組んできた[3]。そして、最近では Yb:YAG マイクロチップの両端を無添加 YAG でエンドキャップした複合構造マイクロチップレーザーを作製し、単一縦モードで 500 mW の出力を実現した[4]。本研究ではさらなる出力向上を目指し、無添加 YAG, Yb:YAG マイクロチップ, Yb:YAG 増幅器を一体化させた複合構造マイクロチップ MOPA (Master oscillator power amplifier) 構造を、常温接合を用いて初めて作製するとともに、そのレーザー発振に成功したので報告する。

直径 5 mm, 厚さ 0.1 mm のディスク型の 20 at. %Yb:YAG 結晶の入射端側に、直径 5 mm, 厚さ 5 mm の円柱型の無添加 YAG 結晶を、出力端側に直径 5 mm, 厚さ 3 mm の円柱型の 7 at. %Yb:YAG 結晶を接合した。無添加 YAG の接合面には、発振波長 1033 nm で高反射、励起光波長 940 nm で高透過、Yb:YAG 増幅器の接合面出射側には 1033 nm で反射率 95%, 940 nm で高透過のコーティングを施し、マイクロチップレーザー共振器を構成した。

まず、クリーンブース内で接合面を入念にクリーニングし、常温接合機内にセットする。次に、無添加 YAG の接合面と Yb:YAG マイクロチップ表面に、常温真空中でアルゴン原子ビームを照射して活性化した後、両者を接触、加圧して接合した。引き続き、出射端側の Yb:YAG マイクロチップ表面と、Yb:YAG 増幅器の接合面にアルゴン原子ビームを照射し接合、一体化した。作製した複合構造マイクロチップ MOPA 構造の写真を図 1 に示す。

波長 940 nm のファイバ結合半導体レーザーからの出射光をコリメートした後、複合構造の Yb:YAG マイクロチップ部分に集光したところ、レーザー発振に成功した。Fig. 2 にレーザー出力の励起光吸収パワー依存性を示す。励起光吸収パワー 9.42 W で、最大出力 476 mW が得られた。

現状では励起光とレーザー光とのモードマッチング効率が小さいため、Yb:YAG 増幅器部分で効果的な増幅ができていないと考えられる。今後は、マイクロチップ部分での励起光集光径を大きくし、広がり角を小さくすることで、Yb:YAG 増幅器でのモードマッチング効率を改善し、高出力化を目指す。

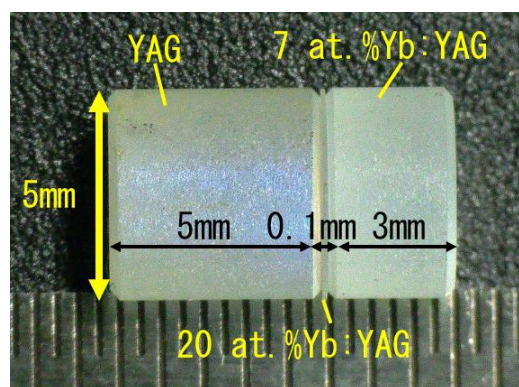


Fig. 1 YAG/Yb:YAG/Yb:YAG composite microchip MOPA structure

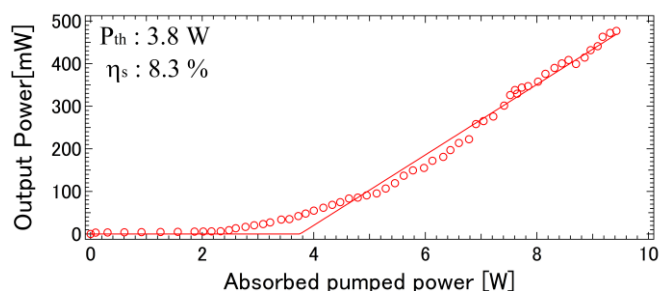


Fig. 2 Laser characteristic of composite microchip MOPA

- [1] F. Hanson, Appl. Phys. Lett. **66**, 3549 (1995).
- [2] T. Suga *et al.*, Acta Metall. Master. **40**, S133₃ (1992).
- [3] H. Ichikawa *et al.*, Opt. Express **25**, 22797 (2017).
- [4] Y. Uematsu *et al.*, APLS 2023, ATu1-04.

磁場回転方式による Yb:FAP セラミックスの配向制御特性改善

Improving the Orientation Control in Yb:FAP Ceramics Under Rotating Magnetic Flux

理研 RSC¹, 分子研² ○佐藤 庸一^{1,2}, 平等 拓範^{1,2}

RIKEN SPring-8 Center¹, Institute for Molecular Science²

E-mail: yoichi.sato@spring8.or.jp

【緒言】材質が等方性結晶媒質に限られるというレーザーセラミックスの問題点について、我々はマイクロドメイン制御による結晶配向制御で解決することを提案している[1]。実際に高エネルギー出力が期待できる 2at.% Yb:FAP を用いて透明異方性セラミックスを作製し、kW 級のジェイアントパルス生成に成功している[2]。この Yb:FAP セラミックスはロットゲーリング因子(LF)で 0.90 まで配向制御されているが[3,4]、複屈折散乱の除去という観点からは更なる配向特性の改善が期待される。本研究においては Yb:FAP セラミックスにおける回転磁場を用いた配向制御プロセスを改善し、LF=0.99 を達成したので報告する。

【実験】回転数 17 rpm の 1.4-T 回転磁場下で 3at.% Yb:FAP 粉末を鋳込み成形し、得られた成形体を 200MPa の CIP 処理後に石膏鋳型接触面から厚みで 20%ほど削り落とし、1300°C で 20 時間真空焼成を実施した。プロセスの各段階で成形体および焼成体の配向特性評価を粉末 X 線回折 (Empyrean, Malvern Panalytical)により実施した。さらに、回転磁場下での鋳込成形中に鋳型を静置することを目的に、機械的駆動力を必要としない完全電気式の回転磁場生成装置を開発した[5]。

【結果及び考察】磁場中鋳込成形後の鋳型接触面の LF は 0.02 程度であり、ほぼ配向していない状況が確認されたが、これは磁場印加してからある程度時間がたてば大きなサイズの一次粒子ほど配向は磁場により制御されやすいが、鋳型に初期に着肉した成形領域では大径の一次粒子が配向制御されないままに沈殿していることを意味する。しかし、配向特性の悪い部分を削り落とすと、LF は 0.18 まで改善される。この配向体を焼成することにより、図 1 に示す通り LF は 0.99 以上に改善された。これはセラミックス内粒界における配向が焼成時の優先成長により大きな一次粒子の配向を引きずる形で制御されるためである。

今回開発した磁場生成装置においては図 2(a)に示される通り対向三方コイルに三相交流を印加することにより回転磁場を生成している。今回製作したプロトタイプ(図 2 b)においては数 100rpm の回転磁場を完全に電気制御によりプログラマブルに生成することができ、最大常用磁束密度は 0.7 T である。詳細は当日報告する。

【謝辞】本研究の一部は(株)コンボン研究所の助成を受けて行われた。XRD は文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業(課題番号 JPMXP1224MS1046)の支援を受け自然科学研究機構分子科学研究所で実施された。試料作製には理研の松田美帆氏に協力いただいた。回転磁場装置の試作には分子科学研究所装置開発室にご協力いただいた。

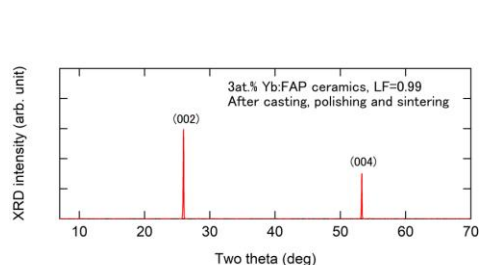


Fig. 1 XRD pattern of 3at.% Yb:FAP ceramics

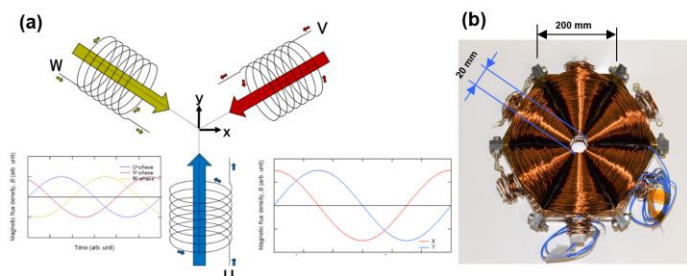


Fig. 2 Non-mechanical rotating magnetic field generator. (a) Schematic concept. (b) Photo of 1/5-scale prototype.

[1] T. Taira, Opt. Mater. Express **1**, 1040 (2011).

[3] Y. Sato et al., Opt. Mater. Express **4**, 2006 (2014).

[5] S. Ito, et al., Japan Patent: JP2024-158274A.

[2] Y. Sato et al., Sci. Rep. **7**, 10732 (2017).

[4] F. K. Lotgering, J. Inorg. Nucl. Chem. **9**, 113 (1959).

ペロブスカイト半導体を用いた太陽光励起レーザの検討 II

Approach to perovskite semiconductor solar-pumped lasers II

中央大理工¹, 東大工², 東大先端研³ ○(M1)久米 陽介¹, (M2)阪口 大生¹, (B)石川 剛旭¹, 石 仕駿²,

五月女 真人³, 近藤 高志^{2,3}, 庄司 一郎¹

Chuo Univ.¹, Univ. of Tokyo², RCAST, Univ. of Tokyo³, °Yosuke Kume¹, Taiki Sakaguchi¹, Takaaki Ishikawa¹,

Shijun Shi², Masato Soutome³, Takashi Kondo^{2,3}, Ichiro Shoji¹

E-mail: a20.w4p4@g.chuo-u.ac.jp

太陽光励起レーザは宇宙空間での利用や酸化マグネシウムの還元への応用等, カーボンニュートラルの観点からも注目されている. レーザ媒質としては主に Cr 共添加 Nd:YAG が用いられてきたが, 太陽光からレーザ光への変換効率が低く, 大面積の集光系が必要であった. 一方, 太陽電池の新たな材料として, 近年, ペロブスカイト半導体が注目されている [1]. 特に $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (MAPbI₃)はバンドギャップエネルギーが 1.6 eV (吸収端波長 775 nm) 程度であり, 厚さ 1 μm 程度の薄膜で太陽光スペクトルの大半を吸収する.

本研究ではペロブスカイト半導体 MAPbI₃ をレーザ媒質として用い, 小型・高効率なメンブレン型太陽光励起レーザを開発することを目指している. 前回, 真空蒸着膜がスピコート膜より散乱損失が格段に小さいことを報告した [2]. 今回, さらなる低損失化と耐久性の向上について検討した.

波長 775 nm に対して無反射コーティングしたサファイア基板上に厚さ 500 nm の MAPbI₃ 薄膜を三元共蒸着法 [3] を用いて形成した. それら試料 2 個の薄膜同士を貼り合わせ合計厚さ 1000 nm とし, 空気が混入しないよう接着剤で側面を封止した.

Fig. 1 に透過および発光スペクトル(励起レーザ波長 532 nm)の測定結果を示す. 貼り合わせ前の試料は薄膜-空気間のフレネル反射により透過率は最大 80 % 程度だったが, 貼り合わせた試料では波長 788 nm で 90 % を超える透過率が得られた. 発光スペクトルのピーク波長は 775 nm, 半値全幅 45 nm であった.

発光強度の時間依存性を Fig. 2 に示す. 空気にさらされた薄膜では, レーザ照射部が空気中の水分と反応し, PbI₂ に分解するため, 励起光強度 110

W/cm²程度で発光強度が低下する. 一方, 薄膜同士を貼り合わせ側面を封止した試料では, 励起光強度 570 W/cm² までは出力低下を抑えることができた.

今後は透過率および耐久性の更なる向上を実現し, レーザ発振を目指す.

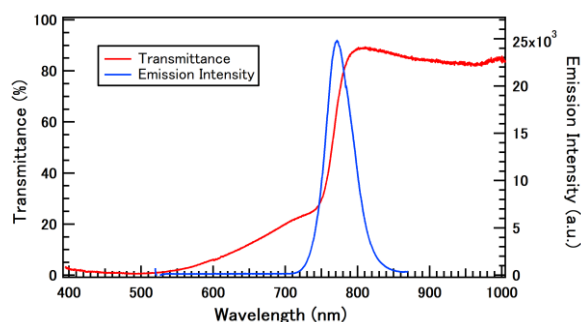


Fig. 1 Transmittance and emission spectra of MAPbI₃

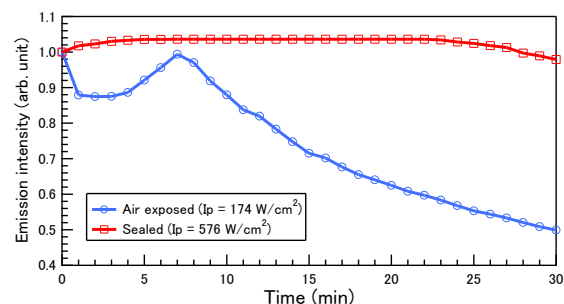


Fig. 2 Time dependence of emission intensity

参考文献

- [1] A. Kojima *et al.*, *J. Am. Soc. Chem.* **131**, 6050 (2009).
- [2] 渡邊他, 2023 年春季応物 16p-A305-7.
- [3] Y. Nakamura *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **60**, 015505 (2021).

四重混合エマルジョン法によるシリコンへのナノフォーム導入

Introduction of Nanoporous into Silicone via Quadruple-Mixture-Emulsion Method

九州大システム情報¹ 九大工², 松崎 李空, 古賀 颯斗, 吉岡 優志, 吉岡 宏晃, 興 雄司

¹Grad. Sch. of I.S.E.E, Kyushu Univ., ²Fac. of Eng. Kyushu Univ.,

Riku Matsuzaki¹, Hayato Koga², Yushi Yoshioka¹, Hiroaki Yoshioka¹ and Yuji Oki¹

E-mail: oki@ed.kyushu-u.ac.jp

ナノポーラスで形成される多孔質媒質は柔軟性の向上や高いガス浸透性を持つなどの特徴を有し、各材料において様々な作製手法が研究されている[1]. 我々は、容易かつ制御可能な低屈折率化[2]や光学特性付与の後導入を目的に、高透明で安定なシロキサン系エラストマー(Polydimethylsiloxane: PDMS)に透過率を維持したままナノポーラス構造を導入する探索・研究を行った。

ポーラス構造を導入する手法としては水エマルジョン法が先行研究されている[3]. 疎水の高粘度エラストマーに水を10%程度導入し、超音波剪断や遊星攪拌等で水泡を細分化し、その後固体化を行う。攪拌や剪断による水泡の細分化が終了後、物理エネルギーの不在により、その後処理時中の水泡の再凝集を如何に低減するが重要となる。我々はここで粘度における剪断—凝集の trade-off を解決するため、攪拌プロセス中に過渡的な粘度変化を促す揮発性良溶媒を導入することを試み、これを 4 重混合エマルジョン(4ME)法と命名した。

4ME によるナノポーラス導入テンプレートを示す。PDMS (KE-1606, 信越化学)の未架橋液体にトルエンを混合し、水・IPA 混合溶液を加え

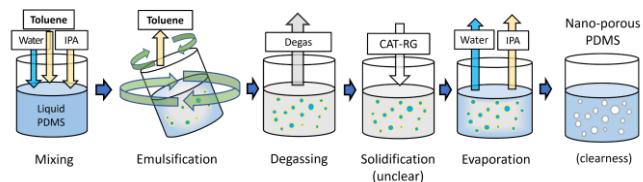


Fig. 1 4重混合エマルジョン法によるナノポーラス導入の概略図

て遊星式攪拌機(AR-100, THINKY 社)でエマルジョンを生成する。トルエン添加で攪拌前の PDMS の粘度が一時的に低下し、剪断効率は上昇する一方、剪断で生じる熱で蒸気圧が大きなトルエンは水や IPA に先んじて蒸発し、マトリクスの粘度はエマルジョン化進行と同時に上昇する。

Fig. 2 にトルエン添加の有無による反射 SEM 像と空孔分布の比較を示す。トルエン添加によって、作製されたポーラス PDMS の空孔の内、ナノサイズの空孔の割合が約 41%から約 56%まで増加した。4重混合エマルジョンの粘度調整によるポーラスサイズ縮

小を応用して、溶媒溶解性があり PDMS を組成に持つ新材料 Super-PDMS でも 4ME をベースとしたナノポーラス構造の導入の検討も行っている。(本研究は JSPS 科研費 JP22K04969 の助成を受けたものである)

- [1] Gi Seok Jeong, et al., Nat Commun 3, (2012) 977
 [2] N. Obata, et al., Adv. Pho. Res..3, (2022). 2200018
 [3] Y. Kwak, et al., RSC Adv., 11, (2021) 18067

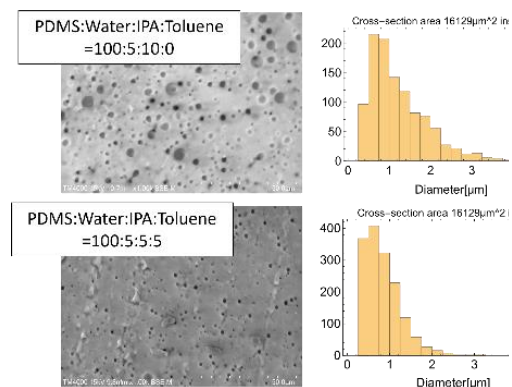


Fig. 2 トルエン添加有(上)とトルエン添加無(下)の反射 SEM 画像と空孔分布の比