

一般セッション(口頭講演) | 3 光・フォトンクス：3.6 レーザープロセッシング (旧3.7)

■ 2023年9月21日(木) 13:30 ~ 15:45 | 会場 B205 (市民会館)

■ [21p-B205-1~8] 3.6 レーザープロセッシング (旧3.7)

花田 修賢(弘前大)、小幡 孝太郎(理研)

13:30 ~ 13:45

[21p-B205-1] 深層学習の適用による光学透過像からのガラス溝加工時クラック発生状態の検知

○吉富 大¹、小川 博嗣¹、佐藤 大輔¹、高田 英行¹、田中 真人¹、黒田 隆之助¹、奈良崎 愛子¹ (1.産総研)

13:45 ~ 14:00

[21p-B205-2] 深層学習を用いた最適化のための加工パラメーター空間への距離の導入

○谷 峻太郎¹、小林 洋平¹ (1.東大物性研)

14:00 ~ 14:15

[21p-B205-3] 高精度レーザー加工のための空間光変調器を用いたビームスタビリティの向上

○長谷川 智士¹、早崎 芳夫¹ (1.宇都宮大)

14:15 ~ 14:30

[21p-B205-4] 熱影響を考慮した超短パルスレーザー・誘電体間の相互作用に関する研究

○小池 匠¹、伊藤 佑介¹、任 国旗¹、杉田 直彦¹ (1.東大院工)

14:45 ~ 15:00

[21p-B205-5] 二波長フェムト秒ダブルパルス照射によるチタン合金の表面周期構造

○欠端 雅之¹、大村 英樹¹、屋代 英彦¹ (1.産総研 電子光基礎)

15:00 ~ 15:15

[21p-B205-6] 多光子光電子放出に駆動される金属の超短パルスレーザーアブレーション過程

○谷 峻太郎¹、小林 洋平¹ (1.東大物性研)

15:15 ~ 15:30

[21p-B205-7] レーザー直描による Er:YAG セラミクスへの導波路作製

○(D)住谷 大志¹、谷 峻太郎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)

15:30 ~ 15:45

[21p-B205-8] 二温度模型の有効的な熱拡散係数のビーム径依存性に関する理論的研究

○加藤 洋生¹、石川 顕一¹ (1.東大院工)

深層学習の適用による光学透過像からの ガラス溝加工時クラック発生状態の検知

Detection of crack formation from the optical transmission image in laser grooving of glasses using deep neural network

産総研 ○吉富 大, 小川 博嗣, 佐藤 大輔, 高田 英行, 田中 真人,
黒田 隆之助, 奈良崎 愛子

AIST ○Dai Yoshitomi, Hiroshi Ogawa, Daisuke Sato, Hideyuki Takada, Masahito Tanaka,
Ryunosuke Kuroda, Aiko Narazaki

E-mail: d.yoshitomi@aist.go.jp

ガラスの穴あけ・切断・溝形成等のレーザー加工において発生するクラックは、加工精度の低下や衝撃による損傷の原因となる。クラック発生を抑制することは重要な課題である。我々は、加工中にクラック発生状態をリアルタイムに検知し、レーザーをアクティブに制御することにより、クラックを抑制する高品位加工技術の開発をめざしている。本研究では、深層学習を用いて、超短パルスレーザーによるシリカガラスの溝加工時に取得した LED 照明の光学透過像からクラック発生状態を判定することに成功した。

移動ステージにセットしたシリカガラス基板に超短パルスレーザー(パルス幅 400 fs, 波長 1033 nm)を照射した。同軸で LED 光を照射し、裏面に設置した対物レンズを通して、カメラで光学透過像の動画撮影を行った。クラックの多い条件と少ない条件で加工したときの動画から合計 3000 枚以上の教師データ静止画像を抽出し(Fig. 1 (a))、深層畳み込みニューラルネットワークを用いて、クラック判定の学習を行った。3000 枚以上の検証用画像では、正答率 100%の判定結果が得られた。次に、レーザー強度を周期的に変調し、周期的にクラック発生が起きる状況で撮影した動画に対して、クラック判定を行ったところ、Fig. 1 (b) のように、周期的にクラック発生状態と判定される結果が得られた。現在、撮影画像からリアルタイムにクラック判定が可能なシステムの構築を進めている。

謝辞：本研究成果の一部は、NEDO の委託事業と天田財団の助成による。

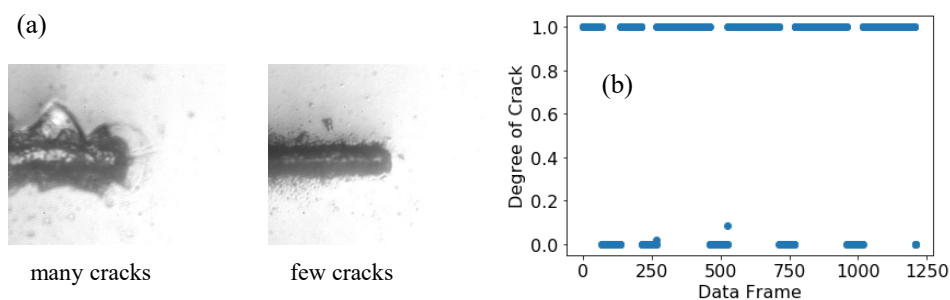


Fig. 1. (a) Examples of training data (optical transmission images). (b) Results of crack discrimination under the periodical modulation of laser intensity.

深層学習を用いた最適化のための加工パラメーター空間への距離の導入

Quantification of laser-machined surface morphology for parameter optimization

東大物性研¹, °谷 峻太郎¹, 小林 洋平¹

ISSP, Univ. Tokyo¹, °Shuntaro Tani¹, Yohei Kobayashi¹

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

超短パルスレーザーによる加工は精密な微細構造や機能性を持つ表面を形成する手法として盛んに研究が行われている[1-2]。目的とする表面形状を実現する加工パラメーター探索のため、多くの人的・時間的労力が必要であり、数値モデルに基づくパラメーター最適化が求められている。一方、多くの時空間スケールを跨ぐレーザー加工現象を記述可能な物理モデルは確立しておらず、加工パラメーターと加工結果の対応に基づく数値モデルの構築が行われている。これらのモデル構築で大きな問題となるのは、加工パラメーターが現象の多階層性を反映して多種多様であるということである。例を挙げると、パルス幅のようなサブピコ秒スケールのパラメーターから、ビーム掃引速度のようなマイクロ秒からミリ秒スケールのパラメーターが混在しており、パラメーター毎の次元も多種多様である。またビーム掃引速度と繰り返し周波数およびビーム照射間隔のようにほぼ縮退したパラメーターも存在、回帰的な手法でのモデル構築およびモデルを用いた最適化の妨げとなっている。我々は様々な加工パラメーターの結果として作られる表面形状に着目し、深層学習を用いた表面形状の定量化に取り組んできた[3]。本講演では全自律的に動作するレーザー加工測定装置 (Meister Data Generator, MDG) [4]を用いて大量に収集したデータを元にして、表面形状を元に加工パラメーターに距離の概念を導入した結果について報告する。

本研究では MDG を用いて、パルス幅、パルスエネルギー、ピッチ、GHz バーストの 4 次元パラメーター空間の大規模精密データを取得した。結果として得られたパラメーター空間と表面形状の組み合わせに対して教師なし深層学習を行うことで、表面形状によって距離が定めるようにパラメーター空間の写像を構築した。ニューラルネットワークによる構成されたこの写像は定義域全体で微分が定義され、目的とする形状を実現するような最適化を勾配降下により行うことができるため広大なパラメーターを効率的に探索可能となった。

本研究の一部は、SIP 委託事業「光・量子を活用した Society 5.0 実現化技術」により実施した。

[1] A. Y. Vorobyev and C. Guo, *Laser Photonics Rev* **7**, 385 (2013).

[2] I. Gnilytskyi, *et al.*, *Scientific Reports* **7**, 8485 (2017).

[3] S. Tani and Y. Kobayash, *Scientific Reports* **12**, 5837 (2022).

[4] Y. Kobayashi et al., *IEEE J. Sel. Topics in Quant. Electronics*. **27**, 8900108 (2021).

高精度レーザー加工のための空間光変調器を用いた ビームスタビリティの向上

Improvement of beam stability using spatial light modulator for high-precision laser processing

宇都宮大 ○長谷川 智士, 早崎 芳夫

Center for Optical Research and Education (CORE), Utsunomiya Univ.

E-mail: hasegawa_s@cc.utsunomiya-u.ac.jp

空間光変調素子 (SLM) に表示された計算機ホログラム (CGH) を用いたホログラフィックレーザー照射技術は、蛍光顕微鏡、光遺伝学光、光ピンセット、補償光学、光造形、レーザー加工の応用において、スループットの増大や収差補正、およびビームスタビリティの向上を含むビーム品質の改良に用いられている。レーザー加工機が設置される製造現場は、環境の温度変化や外部振動による光学配置のズレ、および空気ゆらぎによる擾乱を含む場合があるため、必ずしも静粛とは言えず、レーザーのビームポインティングや出力の安定性が課題となる。そのビームスタビリティの向上は、高精度なレーザー加工において重要となる。通常、ビームスタビリティの向上には、ビーム位置安定化装置や音響光学素子 (AOM) が用いられるが、レーザー加工機に追加で複数の装置を実装する手間とコストが生じる。本研究では、ホログラフィックレーザー加工機における SLM を用いたビームスタビリティの向上を報告する。構築した系は、ホログラフィックレーザー加工機の基本構成を変更せずに、追加で特殊な装置を実装する手間もなく、ビームスタビリティの向上が可能となる。

Figure 1 はビームスタビリティの検出と向上を可能にするホログラフィックレーザー加工機を示す。光源から出射されたフェムト秒レーザー (Light Conversion, Pharos, 中心波長 515nm, 繰り返し周波数 10kHz) は、ビームエキスパンダー (Thorlabs, GBE02-A) を通して位相回折格子が表示された SLM (Meadowlark, HSP1920-500-1200-HSP8) に照射された。SLM のフーリエ面に配置されたイメージセンサー (Imaging Source, DMK33UP2000) により 1 次回折光の集光ビームが撮影され、その重心位置よりビームポインティングが計測された。また、SLM の反射後にビームスプリッターで切り出された 1 次回折光強度が、パワーメーター (Ophire, PD10-C) により計測された。計測された回折光のビームポインティングと強度の情報をもとに、SLM に表示する位相回折格子の空間周波数と位相変調深さをそれぞれ制御することで、ビームスタビリティが改善された。空間的・時間的に安定化されたビームは、対物レンズ (Sigma, EPLE-50, $\times 50$, NA = 0.55) で構成される縮小光学系を介して、石英ガラス (厚さ 2mm) に照射された。

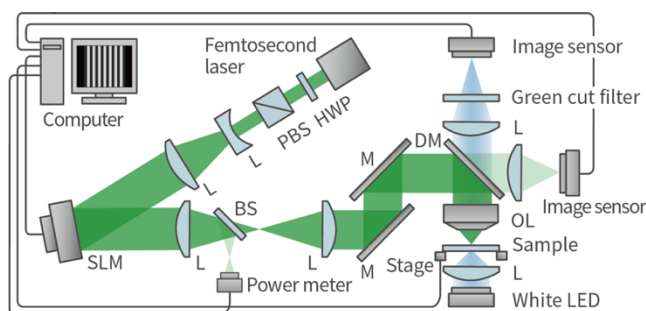


Fig. 1 Experimental setup.

熱影響を考慮した超短パルスレーザー・誘電体間の相互作用に関する研究

Study on the interaction between ultrashort pulse laser and dielectric material

considering thermal effects

東大院工 ○(D)小池 匠, 伊藤 佑介, (P)任 国旗, 杉田 直彦

Univ. Tokyo., °Takumi Koike, Yusuke Ito, Guoqi Ren, Naohiko Sugita

E-mail: t.koike@mfg.t.u-tokyo.ac.jp

ガラス、サファイア等の透明絶縁体はその優れた物性のために、航空宇宙・医療・通信をはじめとした様々な分野の先端機器に不可欠な材料である。そのため、当該材料を微細かつ精密に加工する技術への需要は極めて高い [1]。これら材料を微細加工するツールとして超短パルスレーザー、特にフェムト秒-ピコ秒パルスレーザーが有望視されている。しかしながら、これらパルスの照射時には、その高いピーク強度により非線形光学効果が発現する。さらに、ピコ秒パルスの場合には材料への熱影響が顕著となる。このような光子、電子、フォノンの相互作用により複雑化した光伝搬、およびそれに伴う材料除去過程を正確に把握することは一般に極めて困難である。本研究では、集光パルスの照射時に発現する超高速現象の時間分解計測、および非線形効果・熱影響を組み込んだ数値モデルによって、当該現象の解明を試みた。ここで、高強度光-材料間の相互作用は式 (1), (2) で、それに起因する電子系・格子系の温度変化を式 (3) で、温度および電子密度の時間発展に伴う材料物性の変動を式 (4) でモデル化した [2]。その結果を Fig.1 に示す。図から分かるように、熱影響の考慮によって、高強度光の照射に由来する材料変質の時間スケールがより正確に再現されることが明らかになった。

$$-2j\mu_0\varepsilon\omega\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{\partial^2 E}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial E}{\partial r} + 2jk_0n_r\frac{\partial E}{\partial z} + (\varepsilon\mu_0\omega^2 - k_0^2n_r^2)E, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = W_{PI} + \alpha_c I \rho - \frac{\rho}{\tau_r} \quad (2)$$

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = k_e \nabla^2 T_e - G(T_e - T_l) + S, \quad C_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = k_l \nabla^2 T_l + G(T_e - T_l) \quad (3)$$

$$\nu_e^{-2} = (\nu_{ee} + \nu_{ep})^{-2} + (\nu_{en} + \nu_{ei})^{-2} + \nu_c^{-2} \quad (4)$$

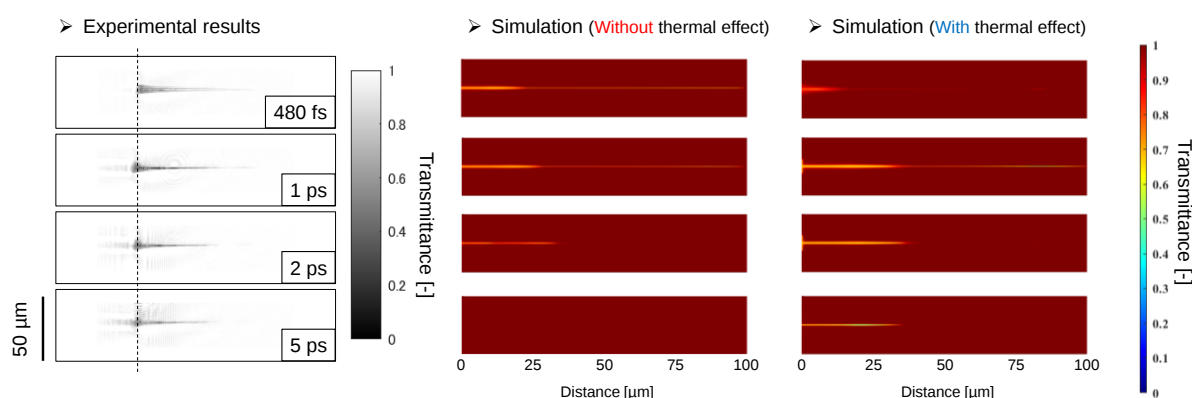


Fig. 1 Comparison between experimentally obtained and simulated transmittance.

[1] Y. Ito, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **113**, 061101 (2018).

[2] B. Chimier, *et al.*, *Phys. Rev. B.* **84**, 094104 (2011).

二波長フェムト秒ダブルパルス照射によるチタン合金の表面周期構造

Laser-induced periodic surface structure on Titanium alloy formed by irradiations of femtosecond two-color double-pulse sequences

産総研 電子光基礎技術 [○]欠端雅之、大村英樹、屋代英彦

RIAEP, AIST, [○]Masayuki KAKEHATA, Hideki OHMURA, Hidehiko YASHIRO

E-mail: kakehata-masayuki@aist.go.jp

[背景] レーザーを適切な条件で固体表面に複数パルス照射するとレーザー誘起周期的表面構造 (Laser-Induced Periodic Surface Structure: LIPSS) が形成され、材料や照射条件により異なる形態を示すことが知られている。医療部材や機械部材に用いられるイットリア安定化正方晶ジルコニア多結晶 (3Y-TZP) では偏光に平行で周期 Λ が波長 λ より僅かに大きな LIPSS が形成され、チタンでは波長よりも小さく偏光に直交する LIPSS が形成される (LSFL)。3Y-TZP への波長 800 nm の直交偏光ダブルパルス照射では、ダブルパルスが時間的に重ならない遅延では LIPSS は入射パルスの順番の影響を受け、時間的にパルスが重なる遅延ではパルス間の相対位相に依存する LIPSS 形態の周期的変化が観測された[1]。前回、ダブルパルス照射の拡張として、二波長直交ダブルパルス照射実験を 3Y-TZP に対し行い、アブレーション深さや LIPSS 形態の遅延依存性を報告した[2]。今回、チタン合金に対する実験結果について報告する。

[実験方法] 中心波長 800 nm、パルス幅 ~ 100 fs、繰り返し 1 kHz のチタンサファイアレーザーを基本波(F)に用いた。非線形光学結晶(BBO)で二倍波(SH:400 nm)を発生し、誘電体多層膜鏡(M1)で基本波と二倍波を分離し、移動ステージ(TS)とピエゾステージ(PZT)を併用し遅延を与えた後、誘電体多層膜鏡(M2)で同軸に合成した(Fig. 1(a))。デュアル波長板 (DWP) で基本波の偏光方向を調整し、二波長直交偏光か平行偏光を選択する。直交偏光を選択した場合、後段のアクロマティック 1/4 波長板(QWP)の角度で、直交偏光か逆回り円偏光に調整できる(Fig. 1(b))。遅延の符号は、基本波が二倍波より先に入射する場合を正とした。遅延範囲は約 ± 100 ps、遅延分解能は 1/10 波長(40 nm)以下である。フルエンス比 $F_F:F_{SH}$ と全フルエンスを調整し、パルス対を 40 ショット凹面鏡で集光照射した。縞方向 (θ_{LIPSS}) は水平方向を 0° 、鉛直方向を 90° とした ($0 \leq \theta_{LIPSS} \leq 180$)。

[実験結果] 直線偏光の基本波、二倍波のみを照射した場合、アブレーション閾値はそれぞれ $F_{th} \sim 0.12$ J/cm², $F_{th} \sim 0.07$ J/cm² であった。また基本波、二倍波のみで形成される周期構造は、フルエンスが低い領域においては偏光に平行で周期が 100 nm 前後の HSFL が形成され、アブレーション閾値フルエンス近傍においては偏光に直交し基本波と二倍波に対して周期が ~ 530 nm, ~ 280 nm の LSFL が観察された。そして二波長直交偏光ダブルパルス照射では、遅延とフルエンス (および空間的位置) に依存し、上記の周期構造とその組み合わせのような多様な形態が観察された。チタンではフルエンス依存の二つの LIPSS 形態があることから、3Y-TZP に比較してより多様な形状が観察された。

本研究の一部は JSPS 科研費 22K04977 の助成、および文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業 (課題番号: JPMXP1222AT0015) の支援を受けた。

[1] M. Kakehata *et al.*, Ultrafast Phenomena 2020, M4A.2 (2021). M. Kakehata *et al.*, Proc. LPM2018, #18-037 (2018).

[2] 欠端、大村、屋代、2022 年第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 23p-C301-4.

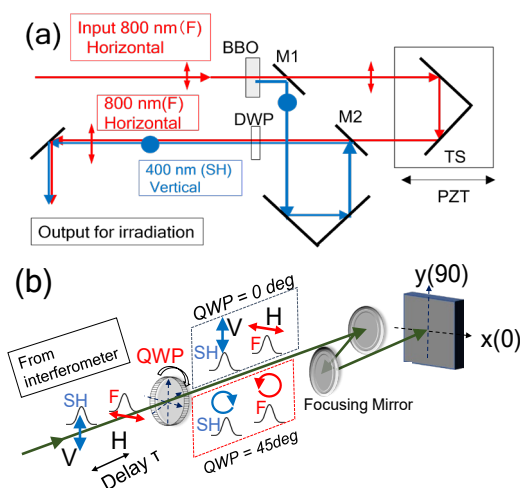


Fig. 1 (a) Setup for two-color double-pulse generation. (b) Schematic of irradiation setup. Polarizations can be controlled by a quarter-wave plate (QWP).

多光子光電子放出に駆動される金属の超短パルスレーザーアブレーション過程

Ultrashort pulse laser ablation process in metals driven by multiple-photon photoemission

東大物性研¹, °谷 峻太郎¹, 小林 洋平¹

ISSP Univ. Tokyo¹, °Shuntaro Tani¹, Yohei Kobayashi¹

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

フェムト秒レーザーアブレーションは精密かつ高品位な加工を実現する技術として、基礎研究から産業応用まで幅広く使われている。一方、強い光電場による物質状態の塗り替えの基礎過程は未だ明らかになっておらず数多くのモデルが提案されている状況である。金属においては溶解・蒸発などの相転移や、衝撃波に伴い発生する希薄波により引き起こされるスパレーションなどが主要なメカニズムと考えられている一方、これらのメカニズムでは金属のアブレーションレート現象論として重要な gentle アブレーションを説明することができない。前述のメカニズム以外にも、クーロン爆発や静電アブレーションなど、光電子放出に伴うアブレーションモデルが提案されてきたが、金属の持つ高い電気伝導性のためこれらの過程は寄与しないという理解がコンセンサスであった [1]。

我々は時間領域テラヘルツ分光法を用いて、レーザーアブレーションに伴い発生する電磁波からアブレーション過程での電荷ダイナミクスの測定を行ってきた[2]。この測定により得られた電荷ダイナミクスは、レーザーアブレーションの際に金属表面近傍に巨大な電荷の偏りができていることを示している。我々は強いレーザーパルス照射下で発生する多光子光電子放出とその結果生じる鏡像電荷によるクーロン引力の釣り合いにより生じる電荷密度分布に関する解析解を導出することにより、多光子光電子放出の結果、表面近傍に生じる電場強度を見積もった (図 1)。光照射下で生じる電場強度はアブレーション閾値近傍で 30 V/nm 程度に及び、物質からイオンを引き出すのに十分な電場強度であることがわかった。講演では解析の詳細と想定されるイオンのダイナミクスについて報告する。

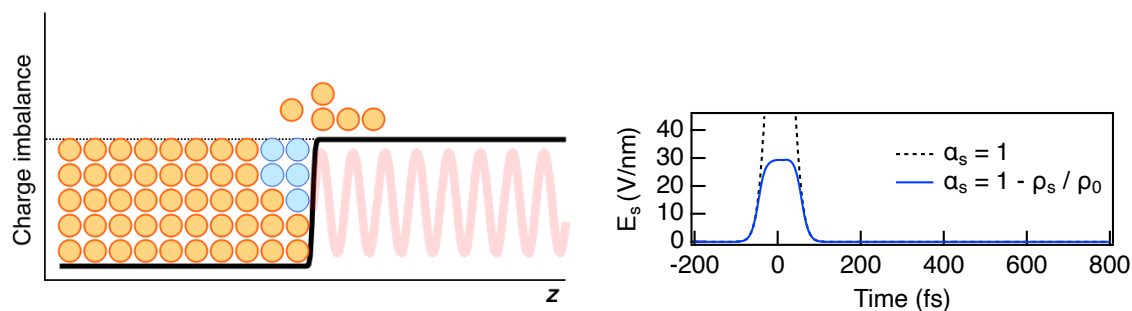


Fig. 1 Balance between multi-photon photoemission and Coulombic attraction (left). Temporal evolution of outward electric field(right).

[1] N. M. Bulgakova *et al.*, Phys. Rev. B 69, 054102 (2004). [2] S. Tani *et al.*, SPIE Proc. Opt. Mani. Conf. 10252, 43

(2017). 謝辞：本研究成果の一部は NEDO(TACMI Project)と科研費により行われた。

レーザー直描による Er:YAG セラミクスへの導波路作製

The Direct Laser Written Waveguide in Er:YAG Ceramics

東大物性研¹, JX 金属株式会社², [○](D)住谷 大志¹, 谷 峻太郎¹, 角田明博², 中崎雅人², 小林 洋平¹

Issp, Univ. Tokyo.¹, JX Metals Co.², [○]Taishi Sumiya¹, Shuntaro Tani¹, Akihiro Tsunoda²,

Masato Nakazaki², and Yohei Kobayashi¹

E-mail: t-sumiya@issp.u-tokyo.ac.jp

透明材料内部に超短パルスを集光し、屈折率変化を誘起して光学素子を作製する手法はフェムト秒レーザー直描と呼ばれ、導波路作製などの研究がなされてきた[1]。本研究ではフェムト秒レーザー直描を使って利得媒質中に導波路状の共振器構造を描き込み、安定で小型の発振器や増幅器をワンステップで手軽に作製することを目指している。我々はフェムト秒レーザー直描を行う加工装置および導波路機能を確認するためのビームモード測定装置を開発し、導波路が作製される条件の探索を行って、利得媒質内に導波路型増幅器の作製を行ってきた。

Er:YAG は 1.65 μm 帯に発振波長を持ち、アイセーフレーザーとして LIDAR などへの応用が期待されている[2]。レーザー直描を用いて媒質内で完結した小型で安定なレーザーの開発を目指して、今回この媒質に導波路作製を行った。

本実験ではまず Er:YAG セラミクス(JX 金属株式会社製)を用いて固体レーザーの発振を行った。厚み 2 mm の 0.5at%Er:YAG セラミクスをレーザー媒質とする Bow-Tie 型共振器を構築し、これを 1532 nm で励起してレーザー発振を確認した(Fig. 1)。この共振器を用いて利得を確認した上で、同材料にフェムト秒レーザー直描でクラッドを描き込み、直線型の導波路を作製した(Fig. 2)。本講演ではこの導波路の特性について報告する。

【謝辞】本成果の一部は Q-LEAP「光量子科学によるものづくり CPS 化拠点」により得られたものです。

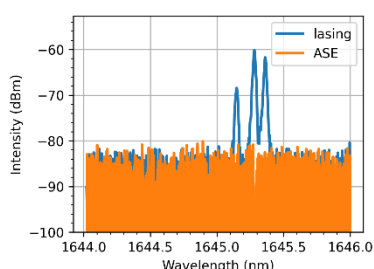


Fig. 1 Laser output spectrum at 1645 nm.

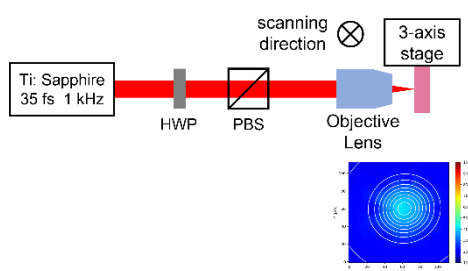


Fig. 2 The setup of direct laser writing and the mode profile at the exit of the fabricated waveguide.

[1] K. M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto and K. Hirao, OPTICS LETTERS. 21. 21. (1996).

[2] Li, K, Ren, T, Wu, C, Yu, Y, Li, C, Sun, SW. *Microw Opt Technol Lett.* 65: 1525- 1534. (2023).

二温度模型の有効的な熱拡散係数のビーム径依存性に関する理論的研究

A theoretical study on the beam diameter dependency of the effective diffusion constant of two-temperature model

東大工¹ °加藤洋生¹, 石川顕一^{1,2}

School of Engineering, the University of Tokyo, °Hiroki Katow¹, Kenichi L. Ishikawa²

E-mail: hkatow@atto.t.u-tokyo.ac.jp

二温度模型はレーザー強励起下の非平衡ダイナミクスを記述する最も基本的な模型である。この模型では電子格子それぞれに独立に温度 T_e , T_L を割り当て、電子格子相互作用で結合した二成分の拡散方程式で表現される。近年では、電子格子の二成分系から正孔やフォノンブランチごとに部分系の数を増やした多温度模型への一般化や、キャリアのレート方程式と結合させる形での拡張が試みられている。この模型は長い歴史を持つにも関わらず、模型を特徴づける普遍的性質については詳細に検討されてこなかった。我々はこれまでの研究により、パラメータを固定した線形な模型が固有値問題に落とし込めることを利用して、部分系の数に依らない普遍的性質を明らかにした[1]。この描像では、温度ダイナミクスは長寿命と短寿命の2つのモードの重ね合わせで表現される。特に、格子系の温度が電子系の温度を上回る「温度反転」の長い寿命とその出現条件の解明は模型が予言するダイナミクスの理解を深めるものである。また、系を励起するガウシアンビームのビーム径がある程度より大きい場合、電子格子の熱拡散プロセスは2種類の有効熱拡散係数で特徴付けられることを我々は示した。このビーム径の条件は、波数空間上でモード固有値がパラボリックな分散で近似可能な領域に対応する。このことは、励起された温度分布の実効的な拡散係数が励起された初期温度分布の空間的広がり依存性を示唆しており、1温度模型に無い特徴である。実際、Au でビームの侵入長を 40nm とした時、試料の深さ方向についてビーム径の条件は破れている(図 1)。そこで我々は、励起するビーム径をパラメータとし、フィッティングにより得られる実効的な拡散係数のビーム径依存性について報告する。また、模型のパラメータが温度に依存することによる非線形性の効果に関しても議論する。

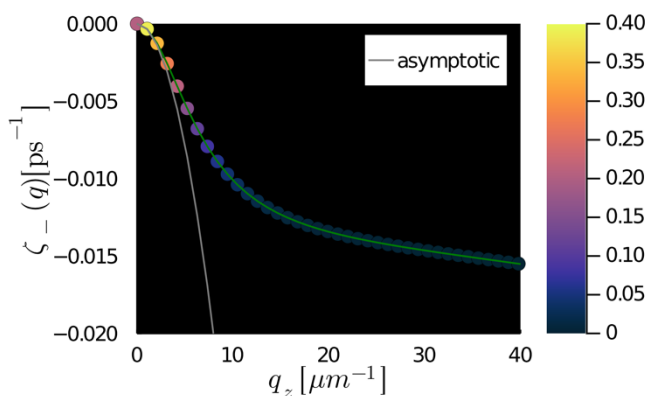


図 1 : バルクの Au に対し侵入長 40nm のビームで励起された時の、長寿命モードの波数空間での振幅の分布。灰色線は固有値分散を波数の2次で展開した漸近的な曲線である。

参考文献

[1] H. Katow and K. L. Ishikawa, *Applied Physics A*, volume **129**, 165(2023).