

Oral presentation | 3 Optics and Photonics : 3.6 Laser processing

📅 Thu. Sep 19, 2024 1:00 PM - 4:45 PM JST | Thu. Sep 19, 2024 4:00 AM - 7:45 AM UTC 🏛️ B2 (Exhibition Hall B)

[19p-B2-1~14] 3.6 Laser processing

Takashi Nakajima(Kyoto Univ.), Hiroaki Nishiyama(山形大)

📌 English Presentation

1:00 PM - 1:15 PM JST | 4:00 AM - 4:15 AM UTC

[19p-B2-1]

Ring-shaped gold nanocluster array fabricated by CTAB-assisted fs laser near-field reduction

○Shi Bai¹, Ozasa Kazunari¹, Koji Sugioka¹ (1.RAP, RIKEN)

1:15 PM - 1:30 PM JST | 4:15 AM - 4:30 AM UTC

[19p-B2-2]

Structure estimation based on scattered light image of nano-periodic structure using deep learning

○(M2)Ryota Masuda¹, Yoshio Hayasaki¹, Satoshi Hasegawa¹ (1.Center for Optical Research and Education, Utsunomiya Univ.)

1:30 PM - 1:45 PM JST | 4:30 AM - 4:45 AM UTC

[19p-B2-3]

First-principles calculations of energy transfer from femtosecond laser pulse to amorphous silicon

○Eiyu Gushiken¹, Tomohito Otobe², Mizuki Tani², Shunsuke Yamada², Kenichi Ishikawa¹ (1.The Univ. of Tokyo, 2.QST)

1:45 PM - 2:00 PM JST | 4:45 AM - 5:00 AM UTC

[19p-B2-4]

In-situ Observation of Ultrashort Pulsed Laser writing of Type II Optical Waveguide

○Reina Yoshizaki¹, Tomohiro Fukui¹, Yusuke Ito¹, Junya Hattori¹, Yuta Teshima¹, Shogo Kitamura¹, Naohiko Sugita¹ (1.Tokyo Univ.)

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

[19p-B2-5]

In-line measurement of structure using optical interferometry in holographic laser processing

○Oren umetsu¹, Yoshio Hayasaki¹, Satoshi Hasegawa¹ (1.Utsunomiya Univ. Center for Optical Education and Research)

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

[19p-B2-6]

Parallel Laser writing by photo-reduction-triggered nanomaterial deposition

○(M1)Hayato Sato¹, Masaharu Aoyama¹, Hiroaki Nishiyama¹ (1.Grad. Yamagata Univ.)

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

[19p-B2-7]

Incubation effects near the laser ablation threshold of copper

○Keisuke Takabayashi^{1,2}, Tsubasa Endo², Toshio Otsu², Shuntaro Tani², Makoto Yamaguchi¹, Yohei Kobayashi² (1.Akita Univ., 2.ISSP, Univ. of Tokyo)

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

[19p-B2-8]

Thrust Force Characteristics of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) by Laser-Induced Ablation

○Hiroshi Kasuga¹, Tomohiro Tsukihana¹, Hideaki Yamane¹, Katsuhiko Tsuno¹, Yutaka Nagata¹, Norihito Saito¹, Takayo Ogawa¹, Satoshi Wada¹ (1.RIKEN)

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

[19p-B2-9]

Topological data analysis of the laser ablation process using persistent homology

○(PC)Hiroki Katow¹, Kenichi L. Ishikawa¹ (1.the Univ. of Tokyo)

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

[19p-B2-10]

The effect of beam shape on underwater laser-induced breakdown spectroscopy

○Kota Tanabe¹, Yuko Yokoyama¹, Naoya Nishi¹, Tetsuo Sakka¹ (1.Kyoto Univ.)

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

[19p-B2-11]

Time- and space-resolved detection of micro/nano dusts during laser decontamination

Atsushi Kosuge¹, Keisuke Yamamoto², ○Takashi Nakajima² (1.JAEA, 2.Kyoto Univ.)

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

[19p-B2-12]

Electrolytic performance of Ni electrodes textured by ns NIR/UV lasers

Siniya Mondal¹, Yoshiharu Uchimoto¹, ○Takashi Nakajima¹ (1.Kyoto Univ.)

◆ English Presentation

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

[19p-B2-13]

Laser Ablation of Copper using GHz Bursts of Green Wavelength fs Laser Pulses

○(P)Ashkan MomeniBidzard¹, Shota Kawabata¹, Kotaro Obata¹, Koji Sugioka¹ (1.RIKEN)

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

[19p-B2-14]

Fine line writing by femtosecond laser photothermal reduction deposition inhibited by polyvinylpyrrolidone-added nickel glyoxylic acid complexes

○(M2)Minori Takahashi¹, Phuong Nam Ha¹, Tomoji Ohishi², Mizue Mizoshiri¹ (1.Nagaoka Univ. of Tech., 2.Shibaura Inst. of Tech.)

Ring-shaped gold nanocluster array fabricated by CTAB-assisted fs laser near-field reduction

Shi Bai¹, Kazunari Ozasa¹, Sugioka Koji¹

Advanced Laser Processing Research Team, RAP, RIKEN

E-mail: ksugioka@riken.jp

Gold plasmonic superstructures consisting of nanoclusters were fabricated by femtosecond laser induced near-field reduction [1, 2]. To control the morphology of nanocluster, hexadecyltrimethylammonium bromide (CTAB) was used in the laser induced near-field reduction, resulting in successful fabrication of a ring-shaped gold nanocluster array as shown in Figure 1. The size and morphology of ring-shaped nanocluster can be controlled by adjusting the processing parameters, including reduction time, laser wavelength and concentration of CTAB. Generally, the nanoclusters created with irradiation time of 10 min contained ~ 10 nanoparticles with a size of ~ 20 nm. The number of nanoparticles in nanocluster increased to ~ 25 by extending the irradiation time to 20 min. The experimental results have shown that CTAB prohibits the aggregation of gold nanoparticles in laser near-field reduction, leading to separated gold nanoparticles in a nanocluster and forming a ring-shaped nanostructure eventually. In contrast, the bowl-shaped nanostructure was formed without the CTAB. Owing to the enhanced electric field between the nanoparticles in nanocluster array, the performances of surface-enhanced Raman scattering (SERS) were evaluated by rhodamine 6G, showing high sensitivity and uniform enhancement which were verified by Raman mapping.

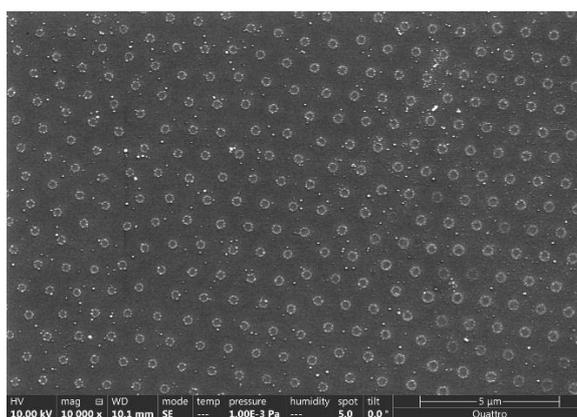


Figure 1. Ring-shaped gold nanocluster array fabricated by laser near-field reduction. The period is $1 \mu\text{m}$ with a nanocluster size of ~ 280 nm.

References:

1. Bai S. et al. *Nanomaterials* 2022, 12, 970
2. Bai S. et al. *Frontiers in Physics* 2022, 10, 917006.

深層学習を用いたナノ周期構造の散乱光画像にもとづく構造推定

Structure estimation based on scattered light image of nano-periodic structure using deep learning

宇都宮大学オプティクス教育研究センター ○(M2)増田 諒太, 早崎 芳夫, 長谷川 智士

Center for Optical Research and Education, Utsunomiya University,

○Ryota Masuda, Yoshio Hayasaki, Satoshi Hasegawa

E-mail: masuda_r@opt.utsunomiya-u.ac.jp

フェムト秒レーザーパルスを固体表面へ照射すると、レーザーの波長よりも短い周期を持つナノ構造が形成される。そのナノ周期構造は、構造色の発現や生体適合性の向上、および撥水制御への応用を目的として実用化が進められている。しかし、ナノ周期構造の形成や配向は、レーザー照射パラメータや加工材料の特性、材料表面の状態を含む様々な条件により変化するため、安定した生成が難しい。この課題の解決には、レーザー加工中に形成されたナノ周期構造をその場 (In-situ) で観測し、レーザー照射パラメータをその都度調整することが有効である。しかし、ナノ周期構造の大きさは光の波長以下であるため、光学的手法では観測できず、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いることが一般的であるが、真空環境下での観測が必要であり、In-situ での構造観測には課題があった。

本研究では、シリコン基板表面に形成されたナノ周期構造からの散乱光 (フーリエ変換) 画像を入力とし、ナノ周期構造の SEM 画像を出力する深層学習モデルの構築を行った。深層学習モデルには cGAN (conditional Convolutional Generative Adversarial Network) を用いた。この手法により、In-situ でのナノ周期構造の推定が可能となれば、所望のナノ周期構造を得るためのレーザー照射パラメータの迅速な最適化が行える。

はじめに、提案手法の有効性をシミュレーションで検証した。図 1(a)は、ナノ周期構造の SEM 画像のフーリエ変換画像を示す。ナノ周期構造は、シリコン基板へのフェムト秒レーザー照射 (波長 1030nm, パルス幅 150fs, レーザー出力 0.81mW, 繰り返し周波数 10kHz, 走査速度 0.3mm/s) により生成された。また、フーリエ変換画像は計算機により得られた。そのフーリエ変換画像は、学習済みの深層学習モデルへ入力された。図 1(b)は、予測されたナノ周期構造の SEM 画像を示す。結果より、提案手法の有効性が確認された。

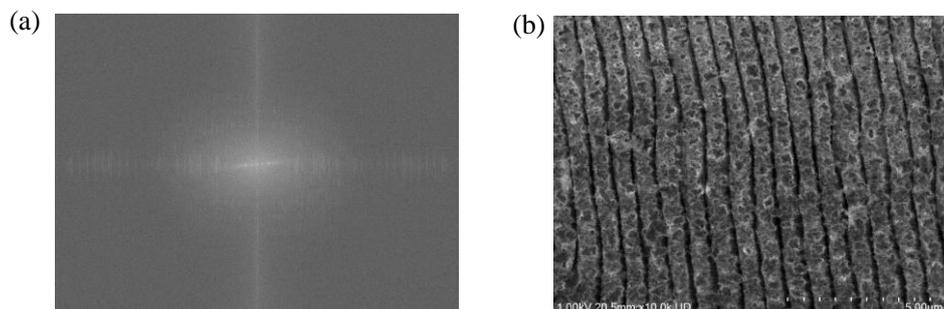


Fig. 1 (a) Fourier transform image of SEM image of nano-periodic structures. (b) SEM image of the predicted nano-periodic structure.

フェムト秒レーザーパルスからアモルファスシリコンへの エネルギー移行の第一原理計算

First-principles calculations of energy transfer from femtosecond laser pulse to amorphous silicon

東大院工¹, 量研², °(M2) 具志堅英雄¹, 乙部智仁², 谷水城², 山田俊介², 石川顕一¹

The Univ. of Tokyo¹, QST², ° Eiyu Gushiken¹, Tomohito Otobe², Mizuki Tani², Shunsuke Yamada²,
Kenichi L. Ishikawa¹

E-mail: Gushiken-eiyu20003@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

超短パルスによるアブレーションは熱的影響を抑えた精密加工を可能にするため、多くの工業生産過程に導入されている。超短パルスを半導体に照射すると極短時間内に光吸収による電子励起が生じ、複数の物理的過程を経て非可逆変化が起こる。フルエンスが十分大きい場合にはアブレーションが起こるが、その閾値未満の領域ではアモルファス化などの非アブレーション現象が生じる[1,2]。アモルファス物質と光の相互作用への理解は超短パルスレーザー加工過程の学理解明において重要である。本研究では先行研究による大規模アモルファスモデルをもとに、第一原理計算手法である密度汎関数理論(Density functional theory, DFT)に基づき構造最適化を行い、その構造を評価する。また、得られたスーパーセルを用いて時間依存密度汎関数理論(Time-dependent density functional theory, TDDFT)に基づきフェムト秒レーザーパルス下のアモルファスシリコンの光エネルギー吸収量を評価する。

機械学習に基づく原子間ポテンシャルを用いた分子動力学法により、実験値を良く再現するアモルファスシリコンの原子配置が得られている[3]。この大規模モデル(4096 原子)から任意の原子数を含むスーパーセルをサンプリングし、平面波基底と擬ポテンシャル法に基づく DFT 計算により構造最適化を行なった。図 1 に構造最適化によって得られた各サンプルの動径分布関数と実験値[4]を示す。得られた構造はサンプルに固有の局所構造を反映しつつ、大局的には一致することがわかった。また TDDFT 計算から、エネルギー吸収量は単結晶シリコンよりも非常に多く、スーパーセルの構造に依存することがわかった。

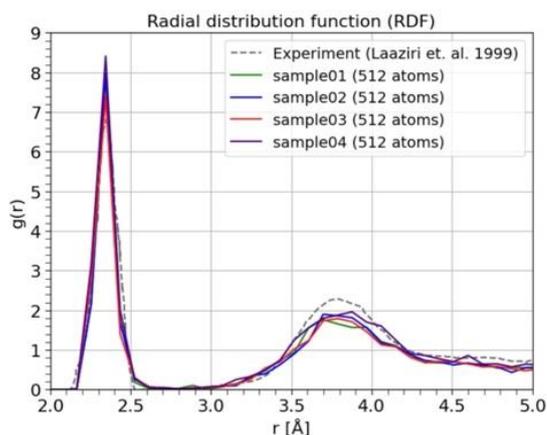


Fig. 1: Radial distribution function.

参考文献

- [1] J. Bonse, H. Sturm, D. Schmidt, and W. Kautek, *Appl. Phys. A* **71**, 657-665 (2000).
- [2] C. Florian, et. al, *Materials* **14**, 1651, (2021).
- [3] V. L. Deringer, et. al, *J. Phys. Chem. Lett.*, **9**, 2879-2885 (2018).
- [4] K. Laaziri, et. al, *Phys. Rev. B.* **60**, 13520 (1999).

Type II 型光導波路レーザ書き込み過程の直接観察

In-situ Observation of Ultrashort Pulsed Laser writing of Type II Optical Waveguide

東大院工¹ ○吉崎 れいな¹, (M2)福井 智大¹, 伊藤 佑介¹, 服部 隼也¹, (M2)手嶋 勇太¹, (M1)北村 章吾¹, 杉田 直彦¹

Univ. Tokyo¹ ○Reina Yoshizaki¹, Tomohiro Fukui¹, Yusuke Ito¹, Junya Hattori¹, Yuta Teshima¹,

Shogo Kitamura¹, Naohiko Sugita¹

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

透明材料内の光導波路は次世代コンピュータでの活用が期待される光集積回路に必要な不可欠である。ダイヤモンド、水晶などの透明材料では、超短パルスレーザー (USPL) 照射による密度低下の改質で導波路は簡便に書き込まれ[1], 材料のアモルファス化に伴うひずみで導光部の屈折率を増加させる応力導入型の光導波路は比較的高い伝搬損失を有している[2]。低損失化のために加工パラメータの最適化が試みられている[3]ものの、なぜそのパラメータで光導波路の損失が低くなるかは明らかではない。そこで本研究は密度低下の改質部を2本並べて書き込む、Type II 型光導波路書き込み過程の直接観察と光導波路評価で、ミクロな視点の加工現象とマクロな視点の光導波路性能 (伝搬損失) の関係を明らかにすることを旨とする。波長 1030 nm, パルス幅 10 ps, パルスエネルギー 6 μJ の USPL は空間光変調器 (LCOS-SLM X15213-03; 浜松ホトニクス) で球面収差補正と d μm 間隔の二点に分岐する変調が施され, 20 倍の対物レンズで α 水晶の 200 μm 内部に集光された。加工後の屈折率変化はマッハツェンダー干渉計で計測された。光導波路書き込みを模し p μm 試料を動かし計 5 回 USPL を照射した際の屈折率変化量を Fig. 1(a)(b)に示す。また, パルス間隔が p μm となるように各条件でレーザーを 1 kHz で連続照射することで光導波路を制作し, 評価した結果を Fig. 1(c)に示す。 $d=16$ μm においてレーザーの照射回数の増加につれて, 改質の近辺だけでなく改質間の中央部においても屈折率が上昇していく様子が確認できる (Fig. 1(a)(b1))。一方 $d=24$ μm において中央部では屈折率が上昇していない (Fig.1 (b3))。書き込まれた光導波路においても, $d=16$ μm では光が改質の間の中央部で伝送され, 伝搬損失が 6 dB/cm である (Fig. 1(c1)) のに対し, $d=24$ では光が改質の近辺で伝送され (Fig. 1(c4)), 伝搬損失が大きい。導光部が改質から遠く形成することが伝搬損失を低くするうえで重要であることが確認できた。

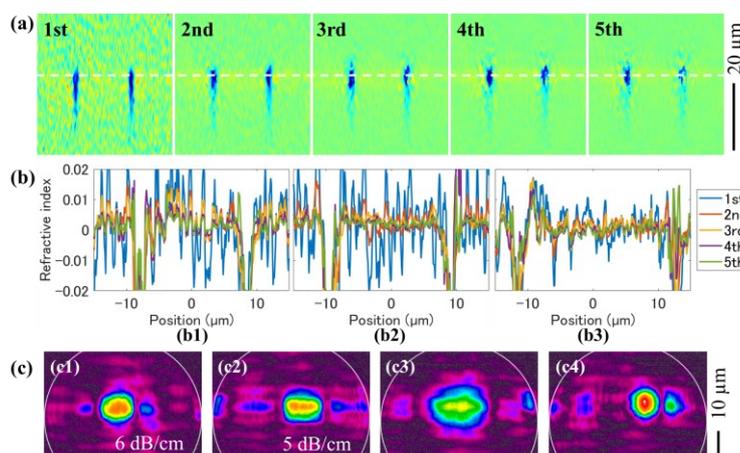


Fig. 1 (a) Refractive index change with multiple shots with the irradiation spacing $d=16$ μm and with $p=1.5$ μm . (b) Refractive index change with $p=2.0$ μm at the white dashed line in (a). (b1) $d=16$ μm , (b2) $d=18.4$ μm and (b3) $d=24$ μm . (c) Field distributions of waveguides written with (c1) $d=16$ μm , (c2) $d=18.4$ μm (c3) $d=20$ μm and (b3) $d=24$ μm .

- [1] F. Chen & J. R. Vázquez de Aldana, *Laser Photon. Rev.*, 8(2), 251-275 (2014).
- [2] A. Okhrimchuk, et al. *Opt Express* 20:4:3832–3843(2012).
- [3] S. Nolte, et al. In: Commercial and Biomedical Applications of Ultrafast Lasers IV. SPIE, 164-171 (2004).

ホログラフィックレーザー加工における光干渉法を用いた構造のインライン計測

In-line measurement of structure using optical interferometry in holographic laser processing

宇都宮大学オプティクス教育研究センター ○梅津 廉, 早崎 芳夫, 長谷川 智士

Center for Optical Research and Education, Utsunomiya University,

○Ren Umetsu, Yoshio Hayasaki, Satoshi Hasegawa

E-mail: umetsu_r@opt.utsunomiya-u.ac.jp

超短パルスレーザーによる加工は、パルス幅、エネルギー、繰り返し周波数を含む様々なレーザー照射条件に影響される。一般に、目的の加工を得るための最適なレーザー照射条件の探索には、ポストプロセス計測による繰り返し実験が必要となる。本研究では、レーザー照射条件の効率的な探索を目的として、レーザー加工された構造の光干渉計によるインライン計測を行った。

フェムト秒レーザー（中心波長 1028nm, 繰り返し周波数 10kHz, パルス幅 150fs）は、対物レンズ（20x, NA=0.40, f=10mm）を用いて試料（スライドガラス）表面に集光照射された。自動ステージに固定された試料を走査（100 μ m/s）しながらレーザーパルスを照射することで、溝構造が作製された。加工の終了後に、レーザー加工機に取り付けられた光干渉計の測定範囲まで、試料を自動ステージで移動させ、加工された構造の3次元形状が自動で計測された。

Fig. 1 は実験に用いた照射ビームパターンを示す。各ターゲット溝形状に応じて、スポット強度の調整された3つのビームパターンが予め用意された。加工において、パルスエネルギーは0.95 μ J, 自動ステージの走査回数は1~5に設定された。Fig. 2 は、Fig. 1 の各照射ビームパターンにより得られた溝構造の3次元形状を示す。結果より、初期の照射ビームパターンで得られた構造は、ターゲット形状と比較して形状に差が見られた。講演では、ターゲット形状との差分評価にもとづき照射ビームパターンの調整を試みたので、その結果を報告する。

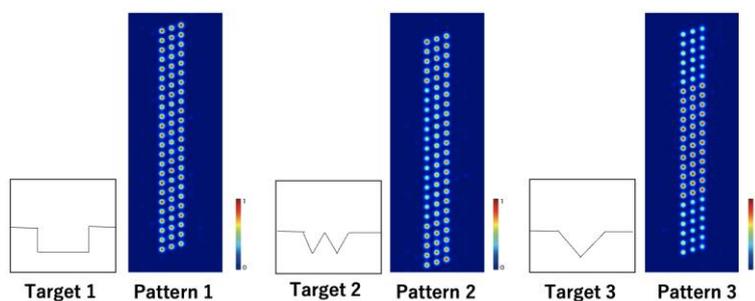


Fig. 1 Irradiated beam patterns corresponding to each target.

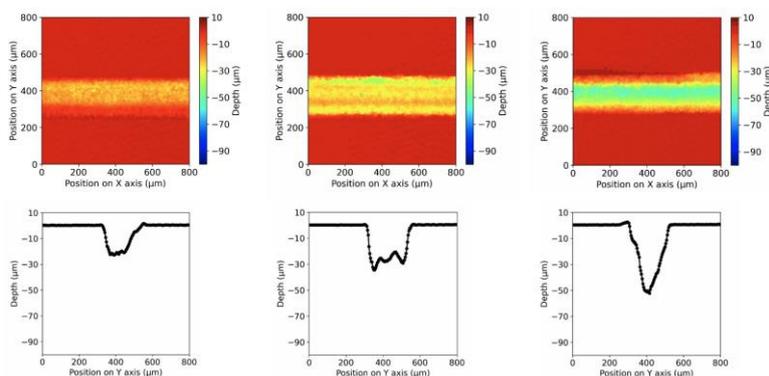


Fig. 2 3D shape of the groove structure fabricated by each irradiated beam pattern.

空間光位相変調を用いたレーザー集積固化プロセスの並列化 Parallel Laser writing by photo-reduction-triggered nanomaterial deposition

山形大院理工¹ ◦佐藤 勇斗¹, 青山 昌央¹, 西山 宏昭¹

Grad. Yamagata Univ.¹, ◦Hayato Sato¹, Masaharu Aoyama¹, Hiroaki Nishiyama¹

E-mail: nishiyama@yz.yamagata-u.ac.jp

レーザー直接描画プロセスは、光照射によって機能性マイクロパターンを形成する手法である。集光部では光重合や熔融、焼成、酸化などの反応が進行し、集光の走査で連続的パターンが描画される。同プロセスはシンプルかつフレキシブルな手法であるが、適用材料は適切な光吸収や反応経路を有する感光性材料に限定されている。我々は、これまでに集光部での多光子還元反応を起点としたナノ粒子の集積固化プロセスの開発に取り組んできた。同プロセスは感光性が必ずしも必要なく、高透過性材料をはじめ、導電性、半導体、生体親和性、量子ドットなど多様な機能性材料群でのマイクロパターン描画が可能である。本研究では、同集積固化プロセスの実効的描画速度向上を目指し、空間光位相変調器を用いた並列描画について報告する。

光源として、グリーンフェムト秒レーザー（中心波長 517 nm, パルス幅 88 fs）を用いた。試料として、代表的な非感光性材料である SiO₂ ナノ粒子が分散した AgNO₃ 溶液を用いた。

図 1 は、空間光位相変調器を介して 10 個の集光スポットを形成し、ステージ走査で並列的に描画したラインパターンの光学顕微鏡像である。各スポット走査でラインが形成されたことが分かり、また、ラインの中心間距離はおよそ 5.0 μm であった。ライン断面の観察から、単一の集光スポットの場合と同様に、各ラインは Ag ベースのコアとその上のナノ粒子集積層からなる階層的断面を有していた。個々の描画ラインに要するパワーは単一スポットで描いた場合とほぼ同等であり、実効的に描画速度が向上した。これら粒子集積では集光部近傍のレーザー駆動対流が重要な役割を果たしている。当日は並列描画特性の詳細とともに、これまでに我々が提案している粒子集積機構との関係についても議論する。

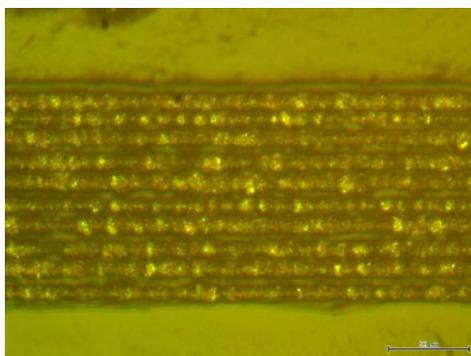


Fig.1. Optical microscope image of line structures formed by parallel laser writing.

銅のレーザーアブレーション閾値付近での蓄積効果

Incubation effects near the laser ablation threshold of copper

秋田大学¹, 東京大学² ○高林 圭佑^{1,2}, 遠藤 翼², 乙津 聡夫², 谷 峻太郎²,
山口 誠¹, 小林 洋平²

Akita Univ.¹, ISSP Univ. of Tokyo², ○Keisuke Takabayashi^{1,2}, Tsubasa Endo², Toshio Otsu²,
Shuntaro Tani², Makoto Yamaguchi¹, Yohei Kobayashi²

E-mail: d8522010@s.akita-u.ac.jp

超短パルスレーザー加工は産業に利用され始めてきたが、さらなる高品質・高効率加工へ向けて、根底にある物理現象の理解を目指す研究が行われている。実用的なレーザー加工の多くはマルチショットで行われており、表面の破壊閾値はショット数を増やすほど低下することが知られ、インキュベーション効果と呼ばれる。インキュベーションの起源は金属では表面粗さや欠陥による吸収の増大やレーザー誘起の塑性変形の蓄積などが提案されているが、未だ議論の最中である[1]。インキュベーションは言い換えれば、シングルショット閾値の少し下でマルチパルス照射を続けると、あるパルス数で破壊に至ることを意味する。我々は、破壊にかかるパルス数およびそのばらつきの分布はインキュベーションの物理的起源を反映しているのではないかと考えた。そこで高繰り返しレーザーを用いた大量のデータ収集を行い、解析を行った。

BK-7 上に製膜した多結晶銅(20 mm×20 mm×10 μm)を対象に、加工用光源として繰り返し 10 MHz、スポット半径 1.9 μm、パルス幅 30 fs の加工用光源を作成し使用した。マルチショット加工におけるインキュベーション効果を探るには、熱蓄積効果との区別が重要となる。熱蓄積の程度を見積もるために実験条件でのパルス照射時の温度上昇 ΔT を数値計算した。Fig. 1 に温度上昇のパルス数依存性を示す。ここで、温度上昇とは、パルス照射時に瞬間的に上がる温度のピーク温度のことを示す(Fig. 1 挿入図参照)。スポット径が小さいことに由来して 1 ショットと 10^6 ショットでの温度上昇の差はたかだか数 K である(図中矢印)。加えて、絶対温度にすると最大 772 K であり融点 1358 K に比べて低いことから、熱的破壊は起こらないこともわかる[2]。破壊パルス数計測には、破壊に起因して表面が荒れ、反射光強度が低下することを利用して、その場観察計測を行った。パルス数をメカニカルシャッターで制御し、加工用光源の反射光強度の時間変化を測定した。Fig.2 挿入図に破壊が起きた場合の反射光強度変化を示す。矢印は破壊が起きた時間を表す。この測定を 3000 回試行することで、破壊パルス数のばらつきの分布を得た(Fig.2)。大量のデータのために、分布形状が明瞭に確認できた。講演ではデータの解釈について議論する。

[1] C. S. R. Nathala, *et al.*, *Appl. Phys. A* **122**, 107 (2016). [2] T. Endo, *et al.*, *Opt. Express* **31**, 36027 (2023).

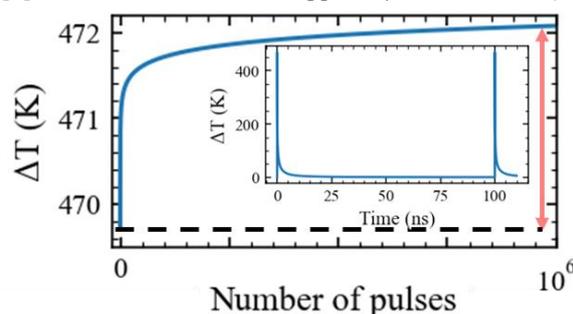


Fig.1 The heat accumulation (a pulse duration of 30 fs, a repetition rate of 10 MHz, a spot radius of 1.9 μm and a peak fluence of 0.42 J/cm²).

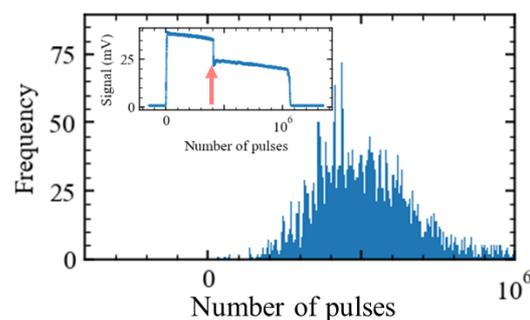


Fig.2 Distribution of number of pulses required for ablation (subset: a typical sample of single measurement).

レーザーアブレーションによる炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の推力発生特性

Thrust Force Characteristics of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) by Laser-Induced Ablation

理研¹, [○]春日 博¹, 月花 智博¹, 山根 秀公¹, 津野 克彦¹,
永田 豊¹, 斎藤 徳人¹, 小川 貴代¹, 和田 智之¹

RIKEN¹, [○]Hiroshi Kasuga¹, Tomohiro Tsukihana¹, Hideaki Yamane¹, Katsuhiko Tsuno¹,
Yutaka Nagata¹, Norihito Saito¹, Takayo Ogawa¹, Satoshi Wada¹

E-mail: h-kasuga@riken.jp

炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic: CFRP) は軽量かつ強靱な材料で、その材料特性から航空宇宙用の構造材にも使用されている。近年では大気圏への再突入を模した試験が行われ、いわゆる宇宙ゴミ (スペースデブリ) 対策の対象にもなっている。スペースデブリ対策の1つとして、レーザー推進による軌道制御がある。デブリにレーザーを照射してアブレーションを発生させ、それを推力として用いることでデブリの進行方向や回転方向を制御する。本稿では CFRP にナノ秒レーザー (波長 1064 nm) を照射し、アブレーションによって発生した推力について述べる。

現在の条件下で発生する推力は 1×10^{-5} Ns ($10 \mu\text{Ns}$) オーダーであることから、計測に適した装置を用意した。減衰機能を有する小型の釣り鐘式振り子を用い、真空環境下でアブレーション閾値を超えるレーザーを照射すると振り子は変位し、その変位は短時間で収束する。時間と変位データから振り子の初速度を算出し、初速度と振り子+試料の質量から力積 I を求めた。得られた力積の効率を示す指標には、単位エネルギー当たりの力積である推力結合係数 (Momentum coupling factor: C_m) を用いた。照射エネルギーを変化させ、それぞれの照射条件(a)-(k)で照射位置を変更したときのフルエンスと推力結合係数の関係を図1に示す。

条件(a)-(k)の初回照射時に推力結合係数は高い値を示した。同じ照射条件下の2回目以降は、初回照射時と比較して推力結合係数は低い値であった。

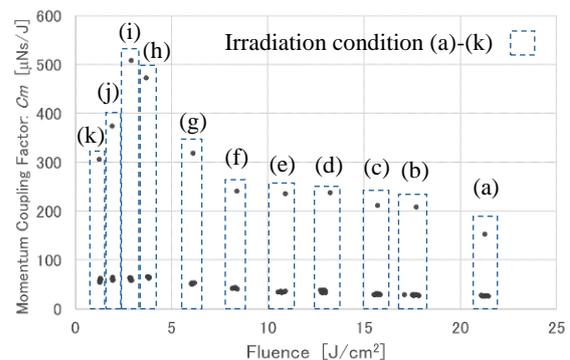


Fig. 1. Relationships between fluence and momentum coupling factor

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 の支援を受けたものである。

パーシステントホモロジーによるレーザーアブレーション過程の解析

Topological data analysis of the laser ablation process using persistent homology

東大院工¹ ◦加藤洋生¹, 石川顕一^{1,2}

1. Photon Science center, the University of Tokyo, 2. School of Engineering, the University of Tokyo,

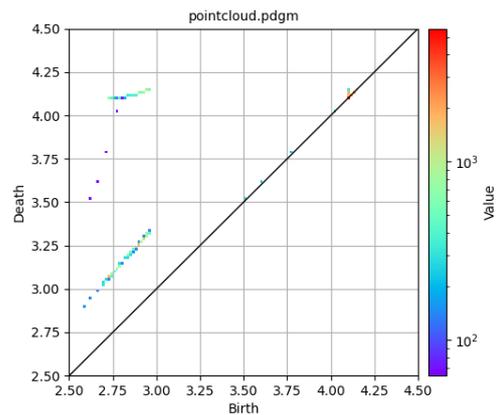
◦Hiroki Katow¹, Kenichi L. Ishikawa²

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

レーザーアブレーションは本質的にマルチスケールな現象であり、異なる空間・時間スケールごとに有効理論が開発されてきた。その一つである TTM+MD は電子系を熱拡散方程式で、格子系を古典分子動力学で記述するモデルである。電子格子系の結合に大胆な仮定を置く有効模型であるが、アブレーション過程を原子スケールで記述し得る簡潔な模型として広く使われてきた[1]。しかしながら、一般にアブレーション過程は極端に非線形・非平衡であり、現象を普遍的・定量的に特徴づけられるケースは極めて限られていた。講演者らは、二温度模型を含む N 成分熱拡散方程式系は有効熱拡散係数の概念で線形模型のダイナクスが理解できることを示している[2]。本研究では2温度模型の拡張と言える TTM+MD 模型を実装し、AI スラブ模型のレーザーアブレーションダイナクスを数値的に計算する。アブレーション過程は原子が乱雑に飛び去る一見無秩序な現象であり、微視的な構造から意味を見出すことは困難に思われる。そこで我々は、アブレーション過程の過渡的な原子構造をパーシステントホモロジー(PH)と呼ばれる位相普遍量を取り出す数学的な道具により解析する。これは直感的には原子構造に含まれる穴の数と大きさを捉える操作であり、与えられた構造の PH はパーシステントダイアグラム(PD)と呼ばれる二次元ヒストグラムのパターンとして与えられる。例えば、液体とアモルファスというどちらも構造に秩序を持たないと考えられてきた2状態を PD で区別できることから近年大きく注目されている[3]。本講演では AI スラブのアブレーション過程の構造変化ダイナクスをパーシステントホモロジーに基づいて解析し(図)、レーザーパラメータ・モデルパラメータの選び方に対する微視的構造ダイナクスの特徴づけに関する結果を報告する。

参考文献

[1] D. S. Ivanov and L. V. Zhigilei Phys. Rev. B **68**, 064114 (2003). [2] H. Katow and K. L. Ishikawa, *Applied Physics A*, volume **129**, 165(2023). [3] Y. Hiraoka et al. PNAS **113** (2016), 7035-7040. [4] I. Obayashi et al. J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 091013 (2022)



図：単位胞の 5x5x120 倍の構造を持つ AI スラブの 300K での構造のパーシステントダイアグラム。解析・描画には HomCloud[4]を用いた。

水中レーザー誘起ブレイクダウン分光法におけるビーム形状の効果

The effect of beam shape on underwater laser-induced breakdown spectroscopy

京大院工 °田辺 航太, 西 直哉, 横山 悠子, 作花 哲夫

Kyoto Univ., °Kota Tanabe, Naoya Nishi, Yuko Yokoyama, Tetsuo Sakka

E-mail: tanabe.kota.82e@st.kyoto-u.ac.jp

【緒言】水中レーザー誘起ブレイクダウン分光法（水中 LIBS）は、水の存在と高い静水圧のため既存の分析法のほとんどが原理的に困難をとまなう海底において、非接触でその場分析を行うことのできる手法として応用が期待されている[1]。しかし一般に水中のプラズマは高密度のため、発光強度を減衰させ測定の定量性を低下させる自己吸収が顕著となりやすい。本研究では、リングビーム照射によって得られる発光スペクトルを観測した。リング状にターゲットをアブレーションさせることでプラズマが広がる体積を大きくできれば、光学的に薄いプラズマとなり、自己吸収が抑制されることが期待される。観測された発光スペクトルをガウシアンビーム照射時と比較し、特に水中 LIBS においてビーム形状が自己吸収にどのような影響を及ぼすか調べた。

【結果と考察】本研究では、 $I_{k=0}(\lambda)$ を自己吸収を考慮に入れない場合のスペクトル強度、 $I(\lambda)$ を自己吸収を考慮に入れた場合のスペクトル強度とし、均一プラズマの一次元放射輸送モデルに基づいた理論フィッティングによって $1 - I(\lambda)/I_{k=0}(\lambda)$ の値を求めることで、自己吸収の大きさを評価した。この値が小さいほど強度の減衰が少なく、自己吸収が小さいことを意味する。

Fig. 1 に用いた実験セットアップを示す。ガウシアンビームをアキシコンレンズに通すことによりリングビームを得た。ターゲットにはグラファイト、銅を用いた。ターゲットがグラファイトの場合、Fig. 2 に示すようにドーナツ状の照射痕が確認され、水中ではリングビームを照射した場合の方が自己吸収が抑制された。それに対し、ターゲットが銅の場合は同じ照射条件でも点状の照射痕が確認され、自己吸収の大きさはビーム形状によりほとんど変わらなかった。グラファイトのとき自己吸収が抑制されたのは、水中ではリングビーム照射の方が早い時間に大きな気泡が生成したことでプラズマが希薄となったためと考えられる。

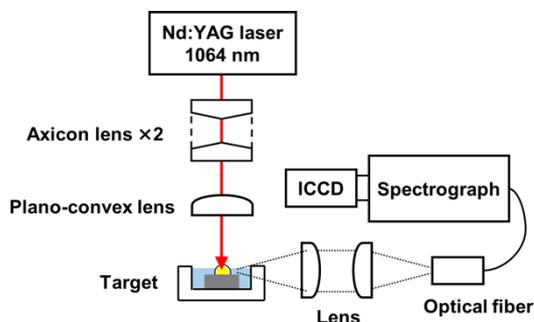


Fig. 1 実験セットアップ

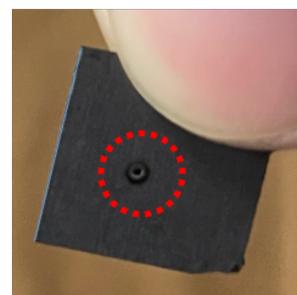


Fig. 2 ドーナツ状の照射痕

[1] B. Thornton, T. Takahashi, T. Sato, T. Sakka, A. Tamura, A. Matsumoto, T. Nozaki, T. Ohki, K. Ohki, *Deep Sea. Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.*, **2015**, 95, 20-36.

ナノ秒パルスレーザー除染によって発生する粉塵の時間空間分解計測

Time- and space-resolved detection of micro/nano dusts during laser decontamination

^a原子力機構, ^b京都大, ^a小菅淳, ^b山本恵輔, ^b中嶋 隆[○]

^aJAEA, ^bKyoto Univ. ^aAtsushi Kosuge, ^bKeisuke Yamamoto, ^bTakashi Nakajima[○]

E-mail: nakajima@iae.kyoto-u.ac.jp

原子炉の廃止措置においては大量の放射線廃棄物が発生する。これらの除去、すなわち除染を効率かつ安全に行う方法として、レーザー除染法が考えられている。レーザー除染は2000年代初頭あたりに考えられた方法であり、開発も十分にされ、実用化段階にきた「成熟技術」と考えられがちであるが、実は、原著論文研究報告は意外に少ない。また、福島第一原発においては東京電力が2019年に高出力連続波レーザー除染を実施したという報告があるが、期待されたほどの除染効率は得られていない。そもそも、海外ではパルスレーザー除染が主流であるのに対し、国内ではなぜ連続波レーザー除染が採用されているのかについても明確な実験的根拠は示されていない。

我々は、パルスレーザー除染が有力な除染方法であると考え、研究開発を開始した。レーザー除染とレーザークリーニングは一見似た手法に見えるが、前者は発生するマイクロ/ナノ粉塵が放射性であるため、ターゲット面からの放射性物質の除去だけでなく、飛散マイクロ/ナノ粉塵の挙動を知り、効率よく回収することも同程度に重要である、という点が後者と大きく異なる。

本講演では、汚染されていない金属試料(SUS304)に高繰り返しナノ秒レーザーパルス照射した際に発生するマイクロ/ナノ粉塵の時間空間分解その場計測について報告する。レーザー溶接においては、溶接部(=レーザー照射部)の物質挙動を知るための手段としてシュリーレン法やシャドウグラフ法と高速カメラを組み合わせた光学計測がよく採用されているが、レーザー除染において重要なのは、ターゲットから遠く(数cm以上)離れた、粉塵が希薄な空間領域における粉塵の空間分布および粒径分布である。このような空間領域では、シュリーレン法やシャドウグラフ法は無力である。そこで我々は、広い空間領域における粉塵の空間分解計測には、水平に広げたレーザーシート(Fig. 1, Fig. 2)を、そして、粉塵の個別計測にはコリメートレーザービームを光源としたレーザー散乱計測を行った。

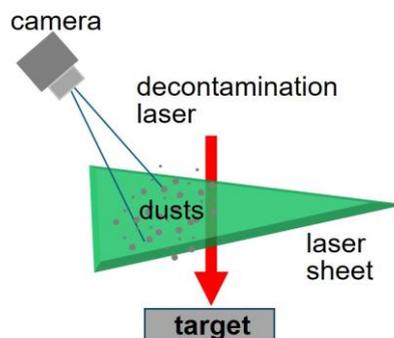


Fig. 1. Experimental setup for the detection of micro/nano dusts with laser sheet.



Fig. 2. Snap shot of the micro/nano dusts at 6 cm from the target using the laser sheet.

レーザー構造化 Ni 電極の水電解酸素発生反応における電解特性評価

Electrolytic performance of Ni electrodes textured by ns NIR/UV lasers

京都大 MONDAL Siniya, 内本 喜晴, 中嶋 隆[○]

Kyoto Univ. Siniya Mondal, Yoshiharu Uchimoto, Takashi Nakajima[○]

E-mail: nakajima@iae.kyoto-u.ac.jp

持続可能な脱炭素社会の実現に向けて、「再生可能電力を用いた水の電気分解による高効率水素製造に関する研究」が世界各国で盛んに進められている。水電解の中でも、水酸化カリウム(KOH)等のアルカリ性の電解液を用いるアルカリ水電解は卑金属を電極材料に使うことができるという利点があり、その場合、多くはNiを電極のベース材料とする。

我々は、電極面のレーザー構造化によって電解特性がどう変化するかを調べている。春の講演では、雰囲気ガス、波長、レーザー出力、スキャン速度、集光レンズ焦点距離等の条件を変えて水素発生 Ni 電極 (カソード) のレーザー構造化をおこない、その電解特性を比較した。その結果、ナノ秒レーザーを用いても、フェムト秒レーザー[1,2]と同程度の電解特性の向上が得られることが分かった。今回は、様々な条件で酸素発生 Ni 電極 (アノード) のレーザー構造化をおこない、電解特性を比較したので報告する。

Fig. 1に鏡面研磨Ni電極と種々の条件でレーザー構造化した酸素発生 Ni 電極の印加電位に対する電流密度の変化を示す。空気中での UV レーザー構造化が最も高い電解特性を示すが(Fig. 1), 100回の電圧印加後の性能低下は最も大きい(Fig. 2)。一方、窒素またはアルゴンガス中で NIR レーザー構造化した電極は、電解特性はやや劣るものの、100サイクルの電圧印加後の性能低下はUVレーザー構造化の電極よりも小さい。講演ではこの理由についての考察結果を報告する。

本研究は、NEDO「燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業/水素利用等高度化先端技術開発/常温水電解の実用化基盤研究プラットフォームの構築(JPNP20003)」により実施した。

[1] Gabler, *et al.*, *Int. J. Hydrog. Energy* **42**, 10826 (2017).

[2] Rauscher, *et al.*, *Electrochim. Acta* **247**, 1130 (2017).

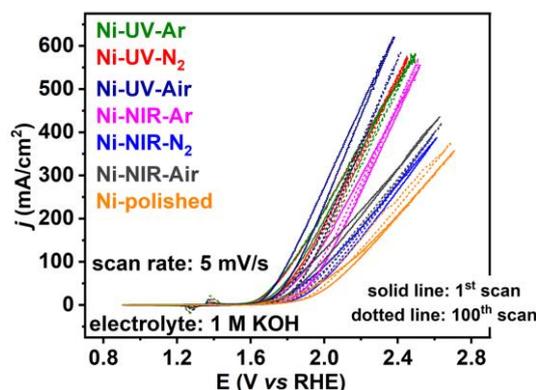


Fig. 1. Voltammetric profiles of the polished and laser-textured Ni electrodes for oxygen evolution reaction.

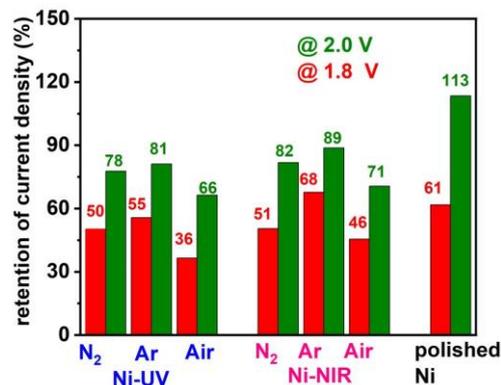


Fig. 2. Deterioration of electrode performance after applying the potential of 1.8 or 2.0 V by 100 cycles.

Laser Ablation of Copper using GHz Bursts of Green Wavelength fs Laser Pulses

(P) Ashkan Momeni¹, Shota Kawabata^{1,2}, Kotaro Obata¹, Koji Sugioka^{1*}

¹RIKEN Center for Advanced Photonics, 2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama 351-0198, Japan

²Department of Applied Physics, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Nakacho,

Koganei, Tokyo 184-8588, Japan.

E-mail: ksugioka@riken.jp

In recent years, laser ablation by using GHz bursts of femtosecond (fs) pulses has become more interesting to improve the ablation efficiency for practical applications [1]. For Cu ablation at the infrared wavelength, however, the ablation efficiency by the GHz bursts was found to be lower than the conventional irradiation scheme of single-pulse mode [2]. Meanwhile, a couple of groups has recently reported that the efficiency can be greatly improved by increasing the number of intra-pulses to more than 50 at larger laser intensity [3, 4]. In this paper, we report that the green wavelength GHz burst mode can significantly improve the ablation efficiency of Cu even at the much lower number of intra-pulses by both experimental and simulation approaches with discussion on the underlying mechanism.

As Figure 1 shows, the experimental results revealed that by using the bursts of fs pulses at the 515 nm wavelength and the intra-burst repetition rate of 4.88 GHz, better ablation quality is achieved. Furthermore, the copper ablation efficiency is improved by a factor of 2.8 at maximum for 20 intra-pulses ($P = 20$) compared to the conventional single-pulse mode. The simulation results of two-temperature model suggested that the ablation efficiency enhancement could be originated from transient absorption increase due to the interaction of subsequent intra-pulses in the GHz burst with copper melted by the preceding intra-pulses.

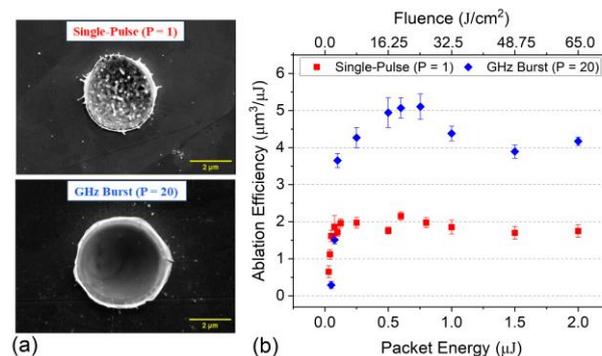


Figure 1. (a) SEM images of the laser-induced craters on the copper surface fabricated by the single-pulse mode ($P = 1$) and GHz burst mode ($P = 20$) laser ablation at the same packet energy of 0.5 μJ . (b) Comparison of the copper laser ablation efficiency for a single-pulse and a GHz burst pulse irradiation at different energies.

- [1] C. Kerse, H. Kalaycıoğlu, P. Elahi, et al. *Nature* 537, 84–88 (2016).
- [2] K. Obata, F. Caballero-Lucas, and K. Sugioka, *J. Laser Micro/Nanoeng.* 16(1), 19-23 (2021).
- [3] E. Audouard and E. Mottay, *Int. J. Extrem. Manuf.* 5 015003 (2023).
- [4] M. Park, Y. Gu, X. Mao, C.P. Grigoropoulos, and V. Zorba, *Sci. Adv.* 9, eadf6397 (2023).

ポリビニルピロリドン添加グリオキシル酸ニッケル錯体を用いた フェムト秒レーザー光熱還元析出抑制による細線描画

Fine line writing by femtosecond laser photothermal reduction deposition inhibited by polyvinylpyrrolidone-added nickel glyoxylic acid complexes

長岡技科大¹, 芝浦工大² ◯(M2)高橋 みのり^{1*}, Ha Phuong Nam¹, 大石 知司², 溝尻 瑞枝¹

Nagaoka Univ. of Tech.¹, Shibaura Inst. of Tech.², ◯Minori Takahashi^{1*}, Ha Phuong Nam¹,
Tomoji Ohishi², Mizue Mizoshiri¹

*E-mail: s213046@stn.nagaokaut.ac.jp

近年、真空を必要としない金属微細造形技術として、フェムト秒レーザー直接描画法が注目されている。これまで、多光子吸収による光化学還元析出を利用して金属微細造形が報告されているが、これらは光析出容易な Au や Ag といった貴金属に限定されている[1,2]。これらのプロセスを Cu や Ni などの一般的な金属に適用するために、我々の研究はグリオキシル酸(GA)金属錯体インクを用いたフェムト秒レーザーパルス誘起光熱還元描画に取り組んできた[3]。GA 金属錯体は、金属析出時に GA 配位子が還元剤として作用するため、金属直接描画用インクとして有望である。本研究では、より微細な Ni パターンを得るため、キャッピング剤としてポリビニルピロリドン(PVP)を添加し、その影響を調査した。

GANi 錯体を調製し、2 アミノエタノール、エタノールに溶解し、PVP 無添加インクを調製した。同インクに 2 mol% の PVP(Mw~10,000)を添加し、PVP 添加インクを調製した。調製したインクをガラス基板の上にスピコートし、インク薄膜を成膜した。波長 515 nm, パルス幅 256 fs, 繰返し周波数 10 MHz のグリーンフェムト秒レーザーパルスをインク薄膜に集光照射してパターンを描画した。作製したパターンの表面形状を電界放出型走査型電子顕微鏡(FE-SEM)で観察し、断面を透過型電子顕微鏡(TEM)で観察した。

図 1 に、両インクを用いたパターンの線幅および最小線幅の FE-SEM 像を示す。すべての描画条件において、PVP を添加することで線幅が減少した。PVP 無添加インクの最小線幅は 4.9 μm であったのに対し、PVP 添加インクの最小線幅は 1.7 μm であった。

図 2 に、パターン断面の TEM 観察像を示す。PVP 無添加インクを用いたパターンは粒径が 10-15 nm 程度であるのに対し、PVP 添加インクでは、粒径 5-10 nm 程度の微小粒子が多く存在している。添加した PVP がキャッピング剤としてパターン幅の減少に寄与したと考えられる。

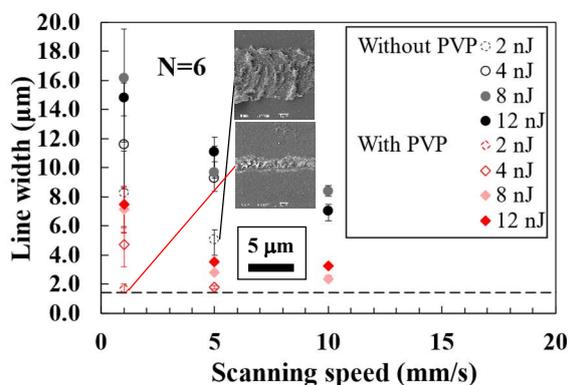


Fig. 1 Effect of PVP on the line width of Ni patterns.

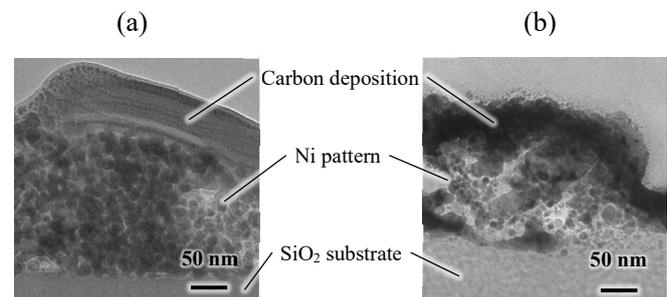


Fig. 2 TEM images of cross-sectional patterns fabricated using the complex (a) without PVP (b) with PVP.

- [1] E. Blasco, *et al.*, *Adv. Mater.*, 28 (2016) 3592, [2] T. Tanaka, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 88 (2006) 081107, [3] T. Ohishi, *et al.*, *Mater. Sci. Appl.*, 6 (2015) 799.