

Dependence of pure copper layer formation on substrate materials in the multi-beam method using blue diode lasers

大阪大学 接合科学研究所 レーザプロセス学分野

特任研究員 東野 律子

(2024 年度 国際会議等参加助成 AF-2024258-X1)

キーワード：青色半導体レーザ，純銅，クラッディング，マルチビーム，アディティブマニュファクチャリング

1. 開催日時

2025 年 1 月 26 日～1 月 30 日

2. 開催場所

米国カリフォルニア州サンフランシスコ
Moscone Center

3. はじめに

2025 年 1 月 26 日～1 月 30 日に米国・サンフランシスコ Moscone Center にて SPIE 主催の国際会議 Photonics West 2025 が開催され、貴財団からの助成によりサンフランシスコの地に向かい Photonics West 2025 に参加することができた。本会議は LASE, BiOS, OPTO, Quantum West の 4 つの会議に加えて展示会も併催され非常に密度の濃い時間を過ごすことができた。主に LASE の会議及び展示会に参加し、研究内容である「Dependence of pure copper layer formation on substrate materials in the multi-beam method using blue diode lasers」について講演し多くの技術者と議論することができた。併せて近年の青色半導体レーザ世界最新技術動向を収集することができた。以下に会議参加報告を記す。

4. 研究発表報告

LASE 3D プリンティングセッションにおいて青色半導体レーザのアプリケーションの一つとして基板の違いによる純銅皮膜の影響について成果発表を行った。

5. 発表概要

銅は熱伝導性や電気伝導性、抗菌・抗ウイルス不活性などに優れているため、自動車産業や電気産業などのさまざまな分野で広く応用されている¹⁾。例えばカーボンニュートラル社会において注目されている電気自動車では銅製品が多く使われている。また抗菌性やウイルス不活性などの優れた性質を持っているため、感染症予防のために多くの人が触れる手すりやドアノブなどへの使用にも期待が寄せられており、銅の加工技術が必要となる。銅の加工には Additive Manufacturing 技術（以下 AM 技術）が重要となる。この AM 技術の 1 つである Directed Energy Deposition (以下 DED) 技術で銅加工を試みた。DED では 3D 造形やリペア、皮膜形成等の加工が可能であり、本研

究はその中の皮膜形成技術に関しての新方式を採用したものである³⁻⁵⁾。従来主に基板を溶かしてモルテンプールを作つてそこに粉末を供給し皮膜を形成していたが、新方式では基板と粉末の両方を溶融し皮膜形成を行なう。本方式では大きな溶融層を必要とせず、薄い溶融層だけで皮膜形成ができるため非常に高効率な手法である。しかし本手法を実現するためには、粉末の温度勾配をなくしてフラットにする必要がある。そこで複数のビームを組み合わせてマルチビーム方式にすることで、粉末の温度勾配をなくすことに成功し、新手法のマルチビーム方式を実現した。

さらに本研究では純銅粉末を利用した。純銅は光吸収率が低いため、従来の材料加工用レーザを使用して加工するのは困難である。銅の光吸収率は光の波長に大きく依存し、波長が短いほど吸収率が高くなることが知られている²⁾。そこで、波長 450 nm の青色半導体レーザに着目し、高輝度青色ダイオードレーザーを用いたマルチビーム型 DED 法を開発し皮膜形成を行なった。

本研究では基板材料により皮膜形成閾値（最低出力で皮膜ができ始める出力を皮膜形成閾値と定義）に影響を与えることに着目した。閾値は基板の吸収率・反射率、熱伝導率などに影響されることから以下の式で示すことができる。

$$P_{\text{subth_x}} = A_x (1-A) P_{L1\text{th}} - P_{\text{dif_x}}$$

ここで

$P_{\text{subth_x}}$: Power threshold for melting substrate surface

A : Absorption rate (powder)

A_x : Absorption rate

P_{L1} : Power before laser incidence on powder

$P_{\text{dif_x}}$: Thermal diffusion

熱伝導率が大きくなると基板からの熱損失などが大きくなり皮膜が形成しにくくなることから、入熱をコントロールすることで皮膜閾値を検討した。皮膜は断面表面の両方から観測し、形成された断面積を計測した。

本実験ではステンレス鋼 (SUS304) : 熱伝導率 16.7 W/m·K と銅合金 (C5191P) : 熱伝導率 67W/m·K の材料を使い純銅皮膜形成した。パワー密度を増加させると材料によらずに線形的に断面積は増加する傾向を示した。測定結果より閾値領域を示すことができ、ステンレス鋼基板に対して銅合金基板では皮膜形成閾値には約 3 倍のパワー密度を必要とすることが分かった。

将来、さらに熱伝導率の高い純銅基板に純銅積層造形を行うためのデータベースとして利用でき、今後さらに解析を進めていく予定である。

6. まとめ

青色半導体レーザは、銅に対して吸収率が高く材料加工に適したレーザである。しかし他の研究機関では青色半導体レーザ光源に関する発表はなされているがアプリケーションとしての報告はまだ殆どされていない。当研究室では、これまでの研究をベースに世界に先駆けて一足早く青色半導体レーザのアプリケーション技術に着手することができた。本会議でアプリケーションの一つとして新方式 D E D を用いた純銅皮膜形成について紹介し、基板材料の影響を報告することができた。また今回は S P I E より invited oral の機会が与えられ、当研究室の研究成果を講演し多くの研究者とディスカッションすることができた。

様々な分野の研究者が青色半導体レーザを用いた DED 技術について興味を持って下さり、講演後にもメールで質問を送ってください、非常に有意義な機会となつた。

7. 青色半導体レーザ関連技術動向調査報告

Photonics West 2025 会期中同時開催された展示会では 1200 社を超える各国の企業が出展されていて、連日賑わいを見せていた。金属加工用としての青色半導体レーザの出展をしている企業は少なく、低出力での照明や LiDAR 等の紹介が多くみられた。展示会の中で特に気になった展示内容について報告する。

昨年も出展していた、半導体レーザチップを取り扱う **BLUGLASS [Australia/USA]** からは GaN Laser diode の紹介がされていた。波長帯域 395 nm～525 nm シリーズのラインナップがある。青色素子 (450 nm) はマルチモードで 1.6 W～3.5 W、シングルモード 250 mW の出力が可能であるとの紹介があった。同社からは昨年から新しいラインナップは紹介されていなかった。同社は日本国内の展示会出展はないため、本展示会で 1 年に 1 度動向を調査していくことは非常に重要であると考えている。

BWT Beijing Ltd. [China] からは 100～200 W コア径 105 μm、NA0.22 青色半導体レーザモジュールの展示があった。また本モジュールを組み込んで 2kW 青色半導体レーザシステム BDL-CW2000 の展示がされていた。最大出力 2kW、ファイバーコア径は 600μm で溶接やクラッディング、表面処理をはじめ、リチウムイオンバッテリーの製造に利用できるとの紹介がされていた。

Laserline [Germany] より昨年 11 月にアメリカボストンにある「WBC Photonics 社」の株式の 70% を取得したとプレスリリースがあった。WBC Photonics 社はパナソニックと子会社のテラダイオード社から分離独立して設立されたレーザーメーカーで、近赤外線及び青色レーザの製造を手掛ける。パナソニック（株）は青色半導体レーザを波

長合成方式 (WBC) を使って高輝度高出力を実現し 2023 年の Photonics West2023 で大々的に出展し高パワー密度に絞れる当社の青色半導体レーザはひときわ注目を集めていた。しかし青色半導体レーザから撤退するとの発表があり、WBC Photonics 社に分離独立したところである。現在は laserline 傘下にあり、本ブースにて青色半導体レーザ 400W@50μm シリーズと 800W@100μm シリーズの紹介および展示を行っていた。また併せて高出力システムとして 6kW・コア径 600μm の青色半導体レーザシステムのパネル展示が行われていた。

青色半導体レーザに関しては、高輝度高出力を必要とする金属材料への加工用としてはまだまだ少ないように感じたが、青色半導体レーザ分野に新たな動きが見え始め今後も継続して動向を調査していく必要があると感じた。



図 1 展示会の風景

8. まとめ

Photonics West 2025 の開催地であるサンフランシスコの街中を見回すと自動運転車のタクシーが自由自在に走りまわる光景が繰り広げられていた。1 年前に渡米した際にはさほど目にすることがなかったが、この 1 年で完全に街中に溶け込んでいて科学技術の進歩に驚きを隠せなかった。そのような街で Photonics West 2025 が開催され、世界各国から光学に関する研究者が一堂に集まり活気に満ち溢れていた。会議と展示会、イベント等盛りだくさんで時間が足りないと思う 5 日間であった。

SPIE が主催するイベントでは会場内的一角に設置された犬と触れ合いコーナーが毎年開催されており、今年も人気を集めていた。犬好きの研究者たちと犬を囲んで会議のひと時に優しい目をした犬たちに幸せな時間を与えてもらいながら見知らぬ研究者との距離を縮めることができた（図 2）。

世界の研究者が集まる本会議で青色半導体レーザのアプリケーションの新たな成果を示し、青色半導体レーザの優位性を発信できたこと、また世界の最新の技術動向を情報収集する機会を与えられたことに深く感謝する。本経験を活かし今後さらに世界の科学技術の発展・青色半導体レーザの社会実装に貢献できるよう研究活動に精進していく所存である。



図2 イベント会場風景

謝 辞

本研究を実施するにあたり高出力青色半導体レーザは日亜化学工業の支援を頂きましたことに深く感謝申し上げます。

また、本国際会議参加にあたり、天田財団 2024 年度 国際会議等参加助成頂いたことに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 塚本雅裕”カーボンニュートラル社会実現に貢献する青色半導体レーザによる純銅加工”オプトニコーズリサーチ&アリス vol18.No3
- 2) The Laser Society of Japan, “Laser Handbook” 2nd Edition Ohmsha pp.830.
- 3) Keisuke Takenaka, Yuji Sato, Kazuhiro Ono, Yoshinori Funada, and Masahiro Tsukamoto“Pure copper layer formation on stainless-steel and aluminum substrate with a multibeam laser metal deposition system with blue diode laser” Journal of Laser Applications 33, 042033 (2021)
- 4) Y.Sato,Y.Morimoto,K.Ono,K.Takenaka,T.kamata,M.Heya, M.Tsukamoto “Copper alloy layer formation with multibeam type laser coating with blue diode lasers” IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering vol 10 p. 1075-1080(2022)
- 5) 森本健斗、佐藤雄二、竹中啓輔、林良彦、辰巳佳宏、阿部信行、塚本雅裕”青色半導体レーザを用いた飛行粉末溶融型マルチレーザビームクラッディングにおける純銅皮膜形成に関する研究” Journal of Smart Processing vol.13 P135-p144(2024)