

Nghiên cứu và tích hợp hệ khắc tạo màu trên bề mặt kim loại sử dụng laser sợi quang công suất cao với cấu hình MOPA

Trần Thị Vân Anh^{*}, Đỗ Xuân Tiên¹, Phạm Chí Hiếu¹, Vũ Văn Liệu¹, Giang Mạnh Khôi¹,
Đỗ Anh Tuấn¹, Nguyễn Thị Thu Hương²

¹Trung tâm Công nghệ Laser, Viện Ứng dụng Công nghệ

²Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

Ngày nhận bài 5/7/2022; ngày chuyên phản biện 8/7/2022; ngày nhận phản biện 29/7/2022; ngày chấp nhận đăng 4/8/2022

Tóm tắt:

Bài báo trình bày các kết quả nghiên cứu trong việc phát triển hệ khắc tạo màu trên bề mặt kim loại sử dụng laser sợi quang công suất cao với cấu hình MOPA (khuếch đại dao động chủ) tích hợp từ các mô-đun bán thành phẩm. Bằng việc sử dụng hệ khắc tạo màu laser trên bề mặt kim loại đã phát triển được, các ảnh hưởng của thông số laser như công suất laser, tần số lặp lại xung laser, tốc độ quét tia, độ rộng đường khắc lên quá trình hình thành màu cũng được nghiên cứu và đánh giá tường minh để đưa ra được bộ thông số tối ưu cho các màu cần khắc trên từng kim loại inox, titan cụ thể.

Từ khóa: gia công vật liệu, khắc laser tạo màu, laser sợi quang.

Chỉ số phân loại: 2.5

Researching and integrating colour laser marking system on a metal surface using high power fiber laser with MOPA configuration

Thi Van Anh Tran^{*}, Xuan Tien Do¹, Chi Hieu Pham¹,
Van Lieu Vu¹, Manh Khoi Giang¹, Anh Tuan Do¹,
Thi Thu Huong Nguyen²

¹National Center for Laser Technology,
National Center for Technological Progress

²Quang Ninh University of Industry

Received 5 July 2022; accepted 4 August 2022

Abstract:

This paper presents the results of research and fabrication of a colour laser marking device on metal surfaces using a high-power fiber laser with a MOPA (Master oscillator power amplifier) configuration by intergrating semi-finished modules. Using our manufactured colour laser marking device, the effects of laser parameters such as laser power, laser pulse repetition frequency, beam scanning speed, line width on forming colour process have been researched and evaluated explicitly to provide the optimal set of parameters for the colours on each specific stainless steel and titanium metal.

Keywords: fiber laser, laser colour marking, MOPA fiber laser.

Classification number: 2.5

Mở đầu

Laser có nhiều ứng dụng quan trọng trên nhiều lĩnh vực khoa học và công nghệ như trong hóa học, vật lý, kỹ thuật, khoa học vật liệu, y học, thông tin lượng tử, quang điện tử, sinh học và khoa học môi trường [1-3]. Với các đặc tính ưu việt như chất lượng chùm tia tốt, độ ổn định cao, giá thành thấp, nhỏ gọn..., laser sợi quang đã được ứng dụng nhiều trong công nghệ gia công vật liệu như cắt, hàn, khắc tạo màu... [4-8].

Phương pháp khắc laser tạo màu có ưu điểm hơn cả do có độ bền màu cao, chi phí vận hành thấp, năng suất cao và tiến hành đơn giản. Trong công nghệ khắc tạo màu trên bề mặt kim loại, cơ chế hình thành màu sắc trên bề mặt kim loại dựa trên quá trình nhiệt hóa trên bề mặt vật liệu gây ra bởi sự hấp thụ chùm tia laser. Từ đó, dẫn đến sự hình thành màng oxit trong suốt hoặc bán trong suốt trên bề mặt vật liệu [9-11]. Khi ánh sáng trắng chiếu vào, nó có thể được phản xạ từ bề mặt trên và dưới của màng oxit. Giao thoa của các chùm phản xạ làm cho bề mặt xuất hiện một màu nhất định, được xác định bởi độ dày màng, chỉ số khúc xạ của oxit. Các nghiên cứu khác cho thấy, màu sắc nội tại của các oxit kim loại cũng đóng vai trò quan trọng. Khi thay đổi các thông số của chùm tia laser chiếu tới như: công suất, vị trí hội tụ, tần số lặp lại xung, tốc độ quét tia... sẽ ghi nhận được các màu sắc khác nhau của lớp oxit trên bề mặt kim loại. Đây chính là nguyên lý của kỹ thuật khắc laser tạo màu theo phương pháp oxy hóa bề mặt. Do vậy, để tạo được màu sắc khắc thay đổi liên tục thì việc phát triển nguồn laser công suất cao thay đổi được các thông số như tần số lặp lại, độ rộng xung... là vô cùng cần thiết. Một phương pháp để tạo được chùm laser công suất cao với tần số lặp lại xung lớn (lên đến 1.000 kHz) đó là MOPA. Với phương pháp này, có thể tạo ra chùm laser với năng lượng lên đến hàng kW [12-14]. Hiện nay, việc nghiên cứu và ứng dụng các laser sợi quang công suất cao sử dụng MOPA để khắc tạo màu trên bề mặt kim loại được nhiều nhà khoa học trên thế giới quan tâm nghiên cứu.

Tại Việt Nam, chưa có nhiều nghiên cứu về quá trình khắc tạo màu trên bề mặt kim loại sử dụng laser nói chung và laser sợi quang nói riêng. Các thiết bị khắc sử dụng laser sợi quang thương mại chủ yếu

^{*}Tác giả liên hệ: Email: vananhlaser@gmail.com

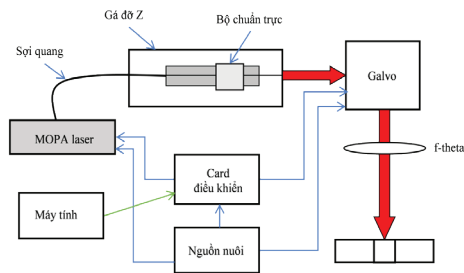
được nhập nguyên chiếc dẫn đến hạn chế trong ứng dụng cũng như khó khăn trong việc làm chủ công nghệ khác. Do vậy, việc thiết kế, tích hợp hệ laser công suất cao với MOPA thành một hệ khác laser hoàn chỉnh cũng như đánh giá các thông số laser để đưa ra được bộ thông số tối ưu trong quá trình khắc tạo màu là cần thiết.

Trong bài viết này, các tác giả đã nghiên cứu và chế tạo hệ thiết bị khắc màu trên bề mặt kim loại và nghiên cứu tường minh cơ chế tạo màu trên bề mặt kim loại inox, titan... sử dụng nguồn phát laser sợi quang với MOPA. Từ đó, đưa ra bộ thông số tối ưu cho các màu cần được khắc trên từng kim loại cụ thể.

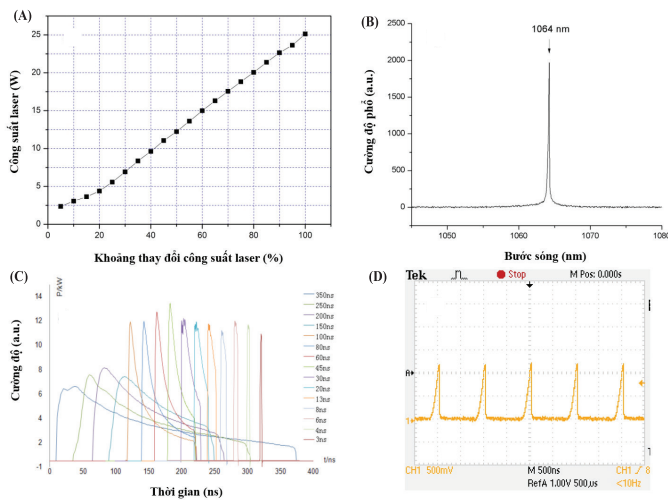
Kết quả và bàn luận

Thiết kế và xây dựng hệ khác tạo màu trên bề mặt kim loại sử dụng laser sợi quang công suất cao

Sơ đồ thiết kế khối thiết bị khác tạo màu trên bề mặt kim loại sử dụng laser công suất cao được thể hiện ở hình 1.



Hình 1. Sơ đồ khối thiết bị khác laser tạo màu trên bề mặt kim loại.

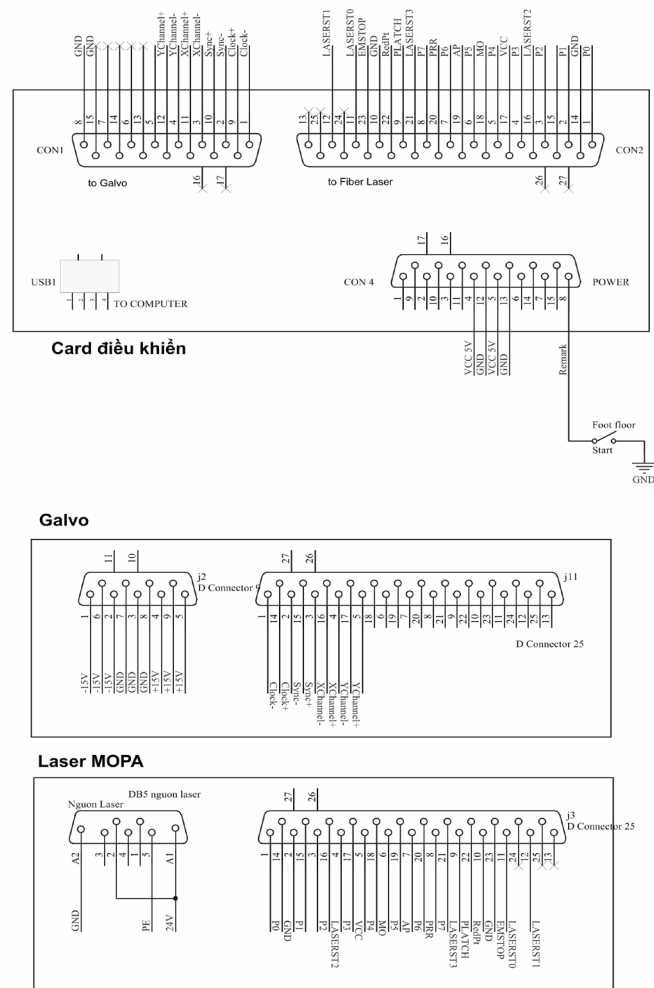


Hình 2. Thông số của laser sợi quang công suất cao. (A) Công suất laser lõi ra; (B) Bước sóng laser; (C) Độ rộng xung laser; (D) Tần số lặp lại xung.

Cấu hình tổng thể của thiết bị khác laser bao gồm: khối nguồn phát laser sợi quang công suất cao với MOPA model JPT M7 (Trung Quốc); hệ quét chùm tia Galvo hurryScan II-10 của Hãng Scanlab (Đức), thấu kính hội tụ f-theta tiêu cự 254 mm của Hãng Sino-Laser; card điều khiển laser USB-FBLMCB-V4, nguồn nuôi cung cấp năng lượng và hệ thống được điều khiển bằng phần mềm khác laser EzCad2.

Các thông số kỹ thuật chùm laser lõi ra của hệ laser sợi quang công suất cao với MOPA model JPT M7 đã được khảo sát chi tiết. Đường đặc trưng công suất của laser được chỉ ra trên hình 2A. Có thể thấy rằng, công suất laser sợi quang lõi ra lớn nhất là 25 W với khoảng thay đổi công suất 0-100% (tương ứng với công suất 0-25 W) ở bước sóng 1.064 nm (hình 2B). Độ rộng xung laser có thể thay đổi được trong khoảng 3-350 ns (hình 2C) và tần số lặp lại của xung từ có thể thay đổi được từ 2 đến 1.000 KHz (hình 2D). Với các thông số laser này, ta có thể dễ dàng thay đổi trong quá trình ứng dụng khắc tạo màu trên bề mặt kim loại.

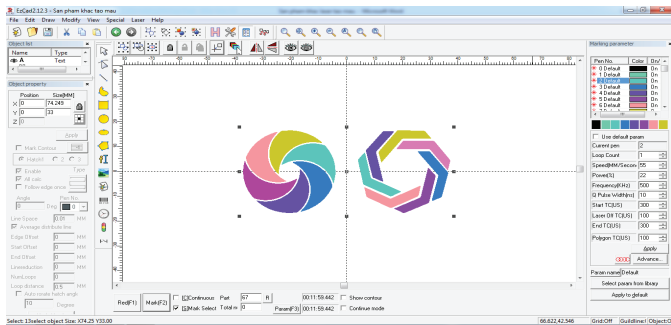
Sơ đồ kết nối mạch điều khiển của máy khác laser được trình bày ở hình 3. Theo đó, đầu quét chùm tia galvo được kết nối với card điều khiển thông qua cổng DB-15 theo chuẩn XY2-100 Digital. Khối phát laser sợi quang được kết nối qua cổng BD-25 cho phép điều khiển các chế độ hoạt động của laser. Ngoài ra, card điều khiển cũng được ghép nối với máy tính qua cổng USB 2.0 và được nuôi bằng bộ nguồn 5 VDC bên ngoài.



Hình 3. Sơ đồ kết nối mạch điều khiển của máy khác laser.

Quá trình khác laser các hình ảnh thiết kế trên máy tính được thực hiện bằng cách kết hợp đồng bộ giữa chuyển động trong đầu quét galvo và chùm tia laser thông qua card điều khiển trung tâm. Toàn bộ quá trình này được thực hiện trên phần mềm khác laser EzCad2 thực

hiện trên máy tính (hình 4). Trong đó, người sử dụng có thể dễ dàng thiết lập trực tiếp trên phần mềm các thông số khắc laser như: công suất, tần số lặp lại xung, tốc độ quét tia, khoảng cách đường khắc... Ngoài ra, phần mềm EzCad2 cũng hỗ trợ nhiều định dạng tệp tin đồ họa khác nhau (như .plt, .dxf, .ai, .jpg) nhằm tối ưu hóa thiết kế, hoạt động và quan sát trước các hình ảnh khắc laser.



Hình 4. Chương trình điều khiển hệ khắc laser tạo màu trên máy tính.

Hệ thiết bị khắc tạo màu trên bề mặt kim loại đã được chế tạo thành công và thể hiện ở hình 5.



Hình 5. Hệ thiết bị máy khắc laser tạo màu được chế tạo.

Hệ thiết bị máy khắc laser đã được đo đạc và kiểm nghiệm các điều kiện hoạt động ổn định trong thời gian dài, các thông số của hệ được trình bày ở bảng 1. Từ đó, có thể được sử dụng để nghiên cứu, thử nghiệm kỹ thuật khắc laser tạo màu trên bề mặt vật liệu kim loại.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của hệ thiết bị khắc tạo màu bằng laser được chế tạo.

Loại laser	Laser sợi quang MOPA
Bước sóng	1.064 nm
Công suất laser lõi ra lớn nhất	25 W
Độ ổn định công suất	<5%
Đường kính chùm laser	9 mm
Chất lượng chùm M ²	<2
Độ rộng xung	3-350 ns
Kích thước vùng khắc	150x150 mm
Tần số lặp lại xung	2-1.000 KHz
Tốc độ khắc lớn nhất	5.000 mm/s
Làm mát bằng	Không khí
Nguồn điện	220 V/50 Hz

Nghiên cứu quá trình khắc tạo màu trên bề mặt kim loại sử dụng laser công suất cao với cấu hình MOPA

Sự hình thành lớp oxit bề mặt dẫn đến hình thành các màu sắc khác nhau phụ thuộc vào giá trị mật độ năng lượng của chùm tia laser chiếu tới [15]:

$$F = \frac{2\sqrt{2}P}{\pi\omega_0 V}$$

trong đó: F là mật độ năng lượng của chùm tia laser (J/cm²); P là công suất laser trung bình (W); ω_0 là bán kính chùm tia laser tại điểm hội tụ; V là tốc độ quét tia laser.

Sự ảnh hưởng của các thông số như: công suất, tần số lặp lại, độ rộng xung laser, tốc độ khắc, vị trí hội tụ và khoảng cách đường khắc laser lên quá trình khắc tạo màu bằng laser công suất cao đã được khảo sát. Khi tăng mật độ năng lượng chùm tia laser, nhiệt độ trong khu vực được laser chiếu tới trên bề mặt kim loại cũng sẽ tăng lên. Điều này giúp tăng cường sự khuếch tán oxy vào bề mặt và đẩy nhanh phản ứng oxy hóa. Tuy nhiên, khi mật độ năng lượng là quá lớn, sự phát triển của lớp oxit bề mặt có thể bị ảnh hưởng bởi sự bốc bay hạt kim loại tại bề mặt và làm giảm độ dày của lớp oxit bao phủ.

Mẫu thử nghiệm là vật liệu inox 304 bề mặt sáng bóng BA, inox 201 mặt xước HL, inox 316 mặt nhám B2 và hợp kim titan grade 5 có chiều dày 1 mm (hình 6).



Hình 6. Mẫu thử nghiệm khắc laser tạo màu trên các vật liệu: inox 304, 201, 316 và hợp kim titan grade 5.

Từ kết quả nghiên cứu trong việc tạo màu trên bề mặt kim loại sử dụng laser công suất cao, chúng tôi đã đưa ra được bộ tham số tối ưu cho từng màu riêng biệt. Các kết quả thử nghiệm khắc tạo màu trên vật liệu inox 304 và hợp kim titan grade 5 mặt bóng đã được ghi nhận và phân loại theo bảng màu (bảng 2 và 3).

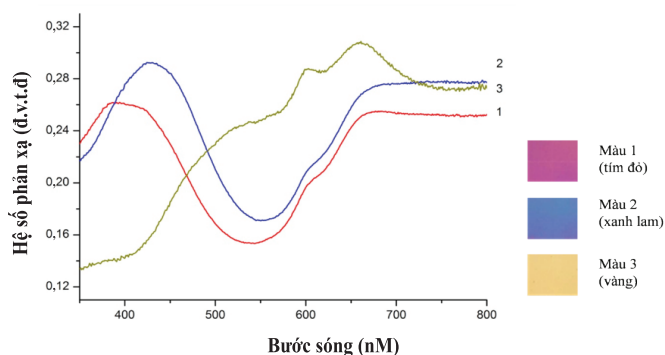
Đối với các bề mặt được khắc tạo màu, việc đánh giá được độ phản xạ của chúng là vô cùng quan trọng. Các phép đo kiểm phổ phản xạ bề mặt được khắc laser trong vùng bước sóng 350-800 nm dựa trên hệ máy quang phổ Cary-5000 (Aglient) và mô-đun đo phổ phản xạ Praying Mantis (Harrick) đã được thực hiện. Các kết quả đo cho thấy, phổ phản xạ của các mẫu có sự khác nhau về vị trí và cường độ của các đỉnh phổ cực đại (hình 7). Các đỉnh phổ cũng hiện lên rõ ràng và có sự thay đổi rõ rệt trong vùng phổ ánh sáng nhìn thấy. Điều này chứng tỏ các màu sắc được khắc laser có sự khác biệt rõ rệt.

Bảng 2. Số liệu bộ thông số khắc laser tạo màu trên vật liệu inox 304 BA.

TT	Màu sắc	Tốc độ khắc (mm/s)	Công suất laser P (W)	Tần số lặp lại xung f (kHz)	Khoảng cách đường khắc H (mm)	Vị trí hội tụ Δz (mm)
1	Vàng (cam)	50	4,86	400	0,01	0
2	Đỏ	110	4,86	550	0,01	0
3	Tím (nhạt)	115	5,1	500	0,01	0
4	Tím	100	4,86	500	0,01	0
5	Tím (đậm)	85	4,86	500	0,01	0
6	Xanh lam	70	4,86	500	0,01	0
7	Xanh lơ	65	4,86	500	0,01	0
8	Xanh lá	110	3,64	100	0,01	0
9	Đen	500	9,62	40	0,01	0
10	Trắng (bạc)	1.000	4,38	35	0,01	0

Bảng 3. Số liệu bộ thông số khắc laser tạo màu trên vật liệu hợp kim titan grade 5.

TT	Màu sắc	Tốc độ khắc v (mm/s)	Công suất laser P (W)	Tần số lặp lại xung f (kHz)	Khoảng cách đường khắc H (mm)	Vị trí hội tụ Δz (mm)
1	Ghi	150	4,38	1.000	0,01	0
2	Xanh lơ	200	4,38	1.000	0,01	0
3	Xanh lam	250	4,38	1.000	0,01	0
4	Xanh lam (đậm)	320	4,38	1.000	0,01	0
5	Tím nâu	370	4,38	1.000	0,01	0
6	Vàng (đậm)	450	4,38	1.000	0,01	0
7	Vàng (nhạt)	700	4,38	1.000	0,01	0
8	Trắng bạc	700	5,57	50	0,01	0
9	Đen	100	14,99	1.000	0,01	0



Hình 7. Phổ phản xạ bề mặt của 3 màu thử nghiệm.

Kết luận

Hệ khắc tạo màu trên bề mặt kim loại sử dụng laser công suất cao đã được chế tạo thành công. Các thông số của hệ đã được ghi nhận: công suất đầu ra 25 W, tần số điều chỉnh được từ 2 đến 1.000 KHz, độ rộng xung 3-350 ns. Các kết quả thử nghiệm khắc tạo màu theo phương pháp oxy hóa bề mặt trên một số vật liệu kim loại như inox, hợp kim titan với độ bền màu, độ sắc nét, tốc độ xử lý, tính linh hoạt

cao, khả năng tạo ra các tính năng chính xác và màu sắc khác nhau trên một diện tích nhỏ và thân thiện với môi trường. Việc chế tạo thành công hệ thiết bị khắc laser tạo màu góp phần mở ra một số hướng ứng dụng của công nghệ laser trong việc tạo ra các hình ảnh khắc laser có nhiều màu sắc đa dạng hơn rất nhiều so với các máy khắc laser đen trắng thông thường. Việc áp dụng công nghệ này tạo nên những sản phẩm khắc chất lượng, thẩm mỹ, nghệ thuật và có giá trị cao.

LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn Trung tâm Công nghệ Laser, Viện Ứng dụng Công nghệ, Bộ Khoa học và Công nghệ đã tài trợ cho nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] X. Yu, et al. (2014), “Laser-induced breakdown spectroscopy application in environmental monitoring of water quality: A review”, *Environ. Monit. Assess.*, **186**(12), pp.8969-80.

[2] L. Fiorani, et al. (2010), “Environmental monitoring by laser radar”, *Romanian Journal of Physics*, **56**(3), pp.448-459.

[3] L.F. Viana, et al. (2019), “Use of fish scales in environmental monitoring by the application of Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)”, *Chemosphere*, **228**, pp.258-263.

[4] <https://www.sme.org/technologies/articles/2016/february/fiber-lasers-continue-to-gain-market-share-in-material-processing-applications/>.

[5] <https://www.laserfocusworld.com/industrial-laser-solutions/article/14215551/highpower-fiber-lasers-gain-market-share>.

[6] N.Z. Michalis, et al. (2014), “High power fiber lasers: A review”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **20**(5), pp.219-241.

[7] C.P. Katherine, et al. (2015), “Ultrafast laser processing of materials: A review”, *Advances in Optics and Photonics*, **7**(4), pp.684-712.

[8] S. Popov (2009), “Chapter 7: Fiber laser overview and medical applications”, *Tunable Laser Applications*, CRC Press.

[9] R. Lukas, K.N. Plataniotis (2006), *Color Image Processing: Methods and Applications*, 600pp, CRC Press.

[10] V.P. Veiko, et al. (2013), “Availability of methods of chemical thermodynamics and kinetics for the analysis of chemical transformations on metal surfaces under pulsed laser action”, *Laser Phys.*, **23**(6), DOI: 10.1088/1054-660X/23/6/066001.

[11] A.A. Slobodov (2013), “Modeling of laser thermochemical action on metals by chemical thermodynamics and kinetics methods”, *Proceedings of Fundamentals of Laser Assisted Micro - and Nanotechnologies*, 62pp.

[12] S. Shakir, J. Sousa (2010), “MOPA fiber laser with controlled pulse width and peak power for optimizing micromachining applications”, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, **7584**, DOI: 10.1117/12.846928.

[13] A. Galvanauskas (2001), “Mode-scalable fiber-based chirped pulse amplification systems”, *J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **7**(4), pp.504-517.

[14] J. Limpert, et al. (2002), “High-power femtosecond Yb-doped fiber amplifier”, *Opt. Express*, **10**(14), pp.628-638.

[15] E.M. Westin, et al. (2009), “Effect of laser color marking on the corrosion performance of stainless steel”, *ICALEO 2009 - International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*, **102**, pp.1245-1250.