

Nghiên cứu và tích hợp hệ thiết bị khắc trên vật liệu nhựa sử dụng laser UV bước sóng 355 nm

Trần Thị Vân Anh*, Đỗ Xuân Tiến, Cung Hồng Kiên, Đinh Văn Giang, Trương Đức Toàn, Trần Xuân Thịnh

Trung tâm Công nghệ Laser, Viện Ứng dụng Công nghệ, C6, phường Thanh Xuân Bắc, quận Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 3/7/2023; ngày chuyển phản biện 5/7/2023; ngày nhận phản biện 17/7/2023; ngày chấp nhận đăng 20/7/2023

Tóm tắt:

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu, thiết kế và tích hợp hệ thiết bị khắc laser trên vật liệu nhựa sử dụng laser UV bước sóng 355 nm, công suất 5 W được tích hợp từ các mô-đun bán thành phẩm có sẵn trên thị trường. Nhóm nghiên cứu đã khảo sát sự ảnh hưởng của các thông số kỹ thuật đến quá trình khắc laser UV lên vật liệu nhựa như: bước sóng, công suất laser lõi ra, độ rộng xung, tần số lặp lại xung, tốc độ khắc, kích thước vùng khắc, nguồn điện... Kết quả, nhóm nghiên cứu đã đưa ra được bộ tham số tối ưu của hệ thiết bị chế tạo cho một số loại vật liệu nhựa riêng biệt. Một số sản phẩm khắc thử nghiệm laser UV trên vật liệu nhựa của hệ thiết bị chế tạo được cho thấy hình ảnh có độ sắc nét và tương phản cao, vùng ảnh hưởng nhiệt nhỏ, có thể khắc được kích thước nhỏ cỡ micromet, tốc độ khắc nhanh. Kết quả nghiên cứu cho thấy thiết bị laser UV là sự lựa chọn tốt cho những ứng dụng của laser trong ngành công nghiệp bán dẫn, cơ khí vi mô, y học và thiết bị ngoại vi...

Từ khóa: khắc laser UV, laser khắc nhựa, laser UV.

Chỉ số phân loại: 2.5

1. Đặt vấn đề

Trong những năm gần đây, laser UV có nhiều ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực kinh tế - xã hội nhờ những đặc tính ưu việt như bước sóng ngắn và chất lượng chùm cao, chùm tia có thể được hội tụ đến kích thước điểm cỡ vài micromet ($\sim 10 \mu\text{m}$), tốc độ lặp lại cao và điểm hội tụ nhỏ làm cho những tia laser này rất phù hợp để gia công cắt, khắc độ chính xác cao. Khi tia laser UV được chiếu đến bề mặt vật liệu nhựa, laser UV cung cấp tỷ lệ hấp thụ vật liệu cao hơn các loại laser khác như laser CO_2 , laser sợi quang..., điều này giúp không cần tăng công suất để tạo ra các vết khắc rõ nét cũng như giảm sự khuếch tán nhiệt của vật liệu làm cho quá trình khắc ít bị ảnh hưởng bởi các biến dạng nhiệt (thiệt hại do nhiệt) ở các lớp bên trong và các khu vực lân cận của vùng cần gia công. Nhờ vậy, laser UV mở ra một loạt các ứng dụng mà các nguồn laser vùng khả kiến và hồng ngoại không thể giải quyết được, đặc biệt thích hợp để khắc các vật liệu nhựa, tấm bảng mạch điện tử cứng, tấm mềm và rất nhiều phụ kiện yêu cầu gia công chính xác cỡ micromet. Có thể nói rằng, laser UV nói chung và laser UV bước sóng 355 nm nói riêng đã trở thành công cụ gia công chủ đạo trong công nghiệp hiện nay, đặc biệt cho những ứng dụng gia công cỡ micromet [1-6].

Về công nghệ chế tạo, các laser UV bước sóng 355 nm dùng trong công nghiệp hiện nay hầu hết được chế tạo bằng cách điều biến nhân tần từ bước sóng cơ bản 1064 nm của laser rắn Neodymium (Nd^{3+}) hoặc laser sợi quang. Việc sử dụng kết hợp một số tính thể quang học phi tuyến sẽ cho phép chuyển đổi từ bước sóng vùng hồng ngoại sang bước sóng tử ngoại 355 nm của chùm tia laser lõi ra phù hợp cho gia công trong công nghiệp.

Tại Việt Nam, nhu cầu thị trường khắc trên vật liệu nhựa trong các nhà máy, doanh nghiệp sản xuất bắt đầu phát triển, các nghiên

cứu về quá trình khắc trên vật liệu nhựa sử dụng laser UV bước sóng 355 nm vẫn còn rất hạn chế. Các thiết bị khắc sử dụng laser UV thương mại chủ yếu được nhập nguyên chiếc dẫn đến hạn chế trong các ứng dụng cũng như khó khăn trong việc làm chủ công nghệ khắc. Hiện tại trong nước chưa sản xuất, chế tạo được thiết bị này, vì vậy chúng tôi đặt mục tiêu nghiên cứu, chế tạo, tích hợp được hệ thiết bị khắc laser UV bước sóng 355 nm ứng dụng khắc tem nhãn trên vật liệu nhựa để nắm bắt, làm chủ công nghệ, chủ động trong chế tạo thiết bị cũng như làm chủ quy trình khắc trên các loại vật liệu nhựa khác nhau theo yêu cầu của thị trường.

2. Nội dung nghiên cứu

Trong bài báo này chúng tôi trình bày kết quả thiết kế và tích hợp hệ khắc laser trên vật liệu nhựa sử dụng laser UV bước sóng 355 nm từ các mô-đun và linh kiện bán thành phẩm có sẵn trên thị trường. Điều này giúp đảm bảo chất lượng và độ ổn định của thiết bị trong quá trình sử dụng. Hệ thiết bị được chế tạo bước đầu đưa vào thử nghiệm để khắc trên vật liệu nhựa PVC, ABS, PP. Từ kết quả nghiên cứu, chúng tôi đã tìm ra được số liệu bộ thông số khắc trên vật liệu nhựa PVC, ABS, PP của hệ thiết bị laser UV vừa chế tạo.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Thiết kế và xây dựng hệ khắc laser trên vật liệu nhựa sử dụng laser UV bước sóng 355 nm

Hệ khắc laser trên vật liệu nhựa được nhóm nghiên cứu thiết kế, tích hợp trên cơ sở tìm hiểu tài liệu kết hợp với khảo sát thực tế. Sơ đồ thiết kế hệ thống cũng như lựa chọn các mô-đun linh kiện, thông số kỹ thuật của hệ thống được xây dựng trên cơ sở tìm hiểu, khảo sát giải mã một số cấu hình thiết bị, mô-đun bán sẵn trên thị

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

Research and integrate laser marking system on plastic materials using 355 nm UV laser

Thi Van Anh Tran*, Xuan Tien Do, Hong Kien Cung, Van Giang Dinh, Duc Toan Truong, Xuan Thinh Tran

National Center for Laser Technology,
National Center for Technological Progress,
C6, Thanh Xuan Bac Ward, Thanh Xuan District, Hanoi, Vietnam

Received 3 July 2023; revised 17 July 2023; accepted 20 July 2023

Abstract:

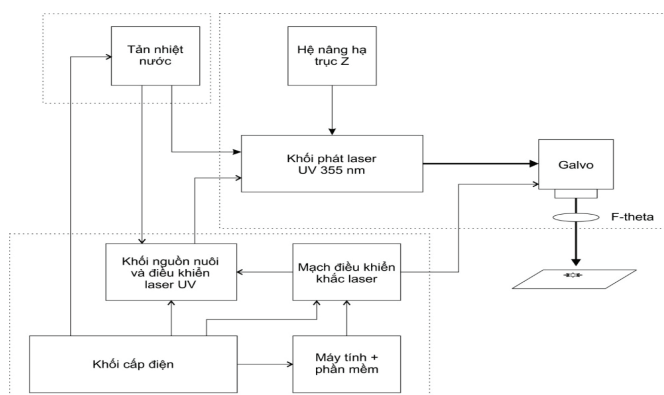
This article presents the results of research, design and integration of a laser equipment system on plastic materials using a UV laser of wavelength 355 nm, power of 5 W, integrated from semi-finished modules available on the market. The research team investigated the influence of technical parameters on the UV laser engraving process on plastic materials such as wavelength, output laser power, pulse width, engraving speed, engraving area size, electricity source... As a result, the research team has come up with a set of parameters for the manufacturing equipment system for a number of specific plastic materials. Some experimental UV laser engraving products on plastic materials of the manufactured equipment system show images with high sharpness and contrast, small heat-affected areas, can engrave sizes as small as micrometers, with a high speed. Research results showed that UV laser equipment is a good choice for laser applications in the semiconductor industry, micro-mechanics, medicine and peripheral equipment...

Keywords: plastic marking laser, UV laser, UV marking laser.

Classification number: 2.5

trường. Việc lựa chọn, sử dụng những mô-đun linh kiện từ các nhà sản xuất uy tín nhằm đảm bảo chất lượng và độ ổn định của thiết bị chế tạo tích hợp trong nước do trình độ khoa học của chúng ta chưa thể tự chế tạo được tất cả các bộ phận của thiết bị.

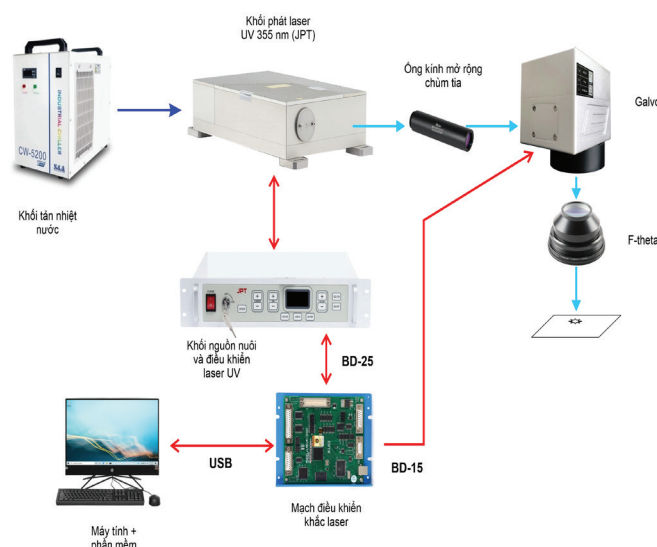
Sơ đồ thiết kế hệ thiết bị khắc trên vật liệu nhựa sử dụng laser UV bước sóng 355 nm được thể hiện ở hình 1.



Hình 1. Sơ đồ khối hệ thiết bị khắc laser UV bước sóng 355 nm.

Cấu hình tổng thể của thiết bị khắc laser UV bao gồm các khối bộ phận như: khối nguồn phát laser UV bước sóng 355 nm công suất 5 W của Hãng JPT (Trung Quốc); hệ quét chùm tia Galvo model ST10scan (355 nm) với chuẩn giao tiếp XY2-100, thấu kính hội tụ f-theta tiêu cự 254 mm; card điều khiển laser LMCV2-DIGIT của BJJCZ; nguồn nuôi cung cấp năng lượng và hệ thống được điều khiển bằng phần mềm khắc laser.

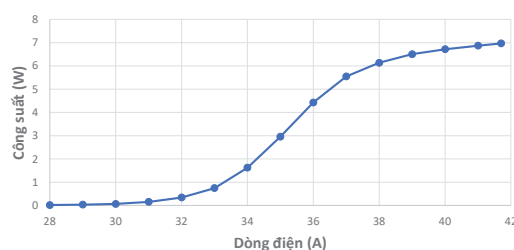
Các khối bộ phận này đều được kết nối và liên hệ chặt chẽ với nhau giúp thiết bị hoạt động ổn định và đạt hiệu quả cao. Sơ đồ ghép nối được trình bày ở hình 2.



Hình 2. Sơ đồ ghép nối các bộ phận tích hợp của thiết bị khắc laser UV.

3.2. Khảo sát thực nghiệm, đo đạc các thông số kỹ thuật của hệ thiết bị vừa được chế tạo, tích hợp

Sau khi thiết kế, tích hợp hệ thiết bị, chúng tôi khảo sát một số thông số kỹ thuật chùm laser lõi ra của hệ laser UV bước sóng 355 nm vừa tích hợp tại phòng thí nghiệm của đơn vị. Đường đặc trưng công suất của laser được chỉ ra ở hình 3. Phép đo được thực hiện bằng cách đo trực tiếp công suất chùm tia laser UV, sau hệ quang học lõi ra của đầu phát laser. Hệ laser hoạt động ở chế độ phát xung Q-switch. Công suất trung bình chùm tia laser lõi ra được đo bởi đầu đo công suất nhiệt S322C và được hiển thị trên bảng điều khiển PM100D.



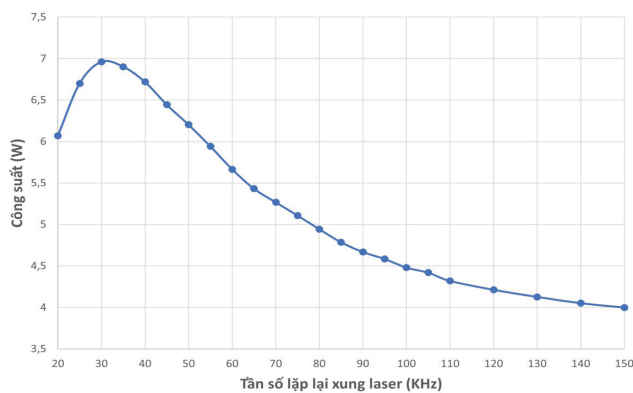
Hình 3. Đồ thị công suất laser UV lõi ra thay đổi theo dòng điện nuôi laser diode bơm.

Khi thay đổi cường độ dòng điện nuôi laser diode bơm, công suất laser UV lồi ra cũng thay đổi theo. Số liệu đo công suất laser P (W) theo cường độ dòng điện nuôi laser diode bơm I (A) được thể hiện ở bảng 1.

Bảng 1. Số liệu đo công suất laser P (W) theo cường độ dòng điện nuôi laser diode bơm I (A).

I (A)	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	41,7
P (W)	0,017	0,035	0,066	0,156	0,343	0,748	1,625	2,96	4,431	5,548	6,136	6,505	6,718	6,871	6,971

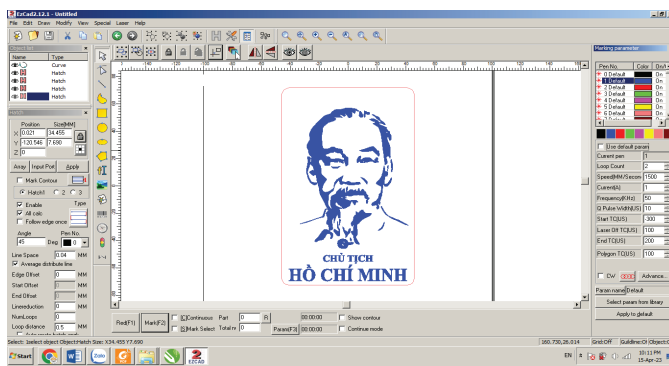
Tần số lặp lại của xung từ có thể thay đổi được từ 20 đến 150 KHz, công suất laser lồi ra thay đổi theo tần số lặp lại xung laser được thể hiện ở hình 4, độ rộng xung laser nằm trong khoảng từ 7 đến 31 ns. Với các thông số laser này, ta có thể dễ dàng thay đổi trong quá trình ứng dụng trong khắc trên vật liệu nhựa.



Hình 4. Đồ thị đặc trưng công suất laser lồi ra thay đổi theo tần số lặp lại xung của laser UV.

Quá trình kết nối mạch điều khiển của máy khắc laser như sau: 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 UV 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.

Quá trình khắc 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.



Hình 5. Chương trình điều khiển hệ khắc laser UV bước sóng 355 nm trên máy tính.

Toàn bộ quá trình này được thực hiện trên phần mềm khắc laser EzCad2 thực hiện trên máy tính. 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... Ngoài ra, phần mềm này cũng hỗ trợ nhiều định dạng tệp tin đồ họa khác nhau (ví dụ: .plt, .dxf, .ai, .jpg) nhằm tối ưu hóa thiết kế, hoạt động và quan sát trước các hình ảnh khắc laser (hình 5).

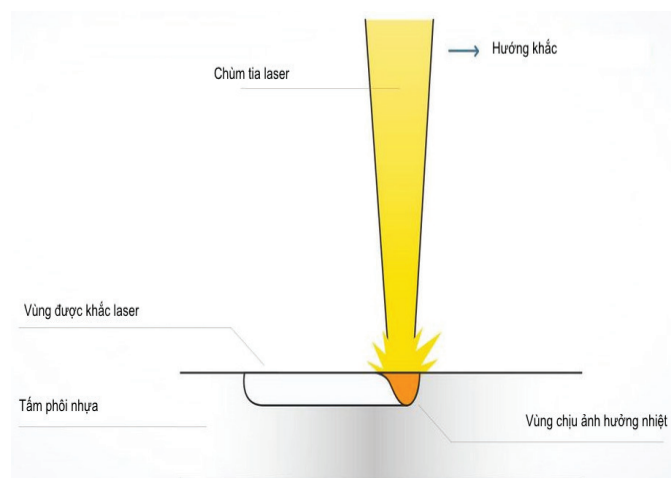
Hệ thiết bị máy khắc laser UV bước sóng 355 nm bước đầu được đo đạc và thử nghiệm các điều kiện hoạt động ổn định (bảng 2). Từ đó, có thể được sử dụng để nghiên cứu, thử nghiệm kỹ thuật khắc laser trên một số vật liệu nhựa.

Bảng 2. Thông số kỹ thuật của hệ thiết bị khắc laser UV được chế tạo.

Loại laser	Laser UV
Bước sóng	355 nm
Công suất laser lồi ra	>5 W
Độ rộng xung	7÷31 ns
Tần số lặp lại xung	20÷150 KHz
Tốc độ khắc	<6000 mm/s
Kích thước vùng khắc	110x110 mm
Làm mát bằng nước, ổn định nhiệt độ	25±2°C
Nguồn điện	220 V/50 Hz

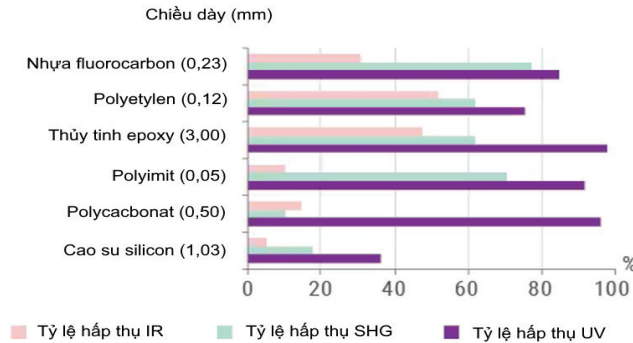
3.3. Nghiên cứu quá trình khắc laser UV trên vật liệu nhựa

Khắc laser trên vật liệu phi kim là quá trình tương tác giữa chùm tia laser với bề mặt vật liệu. Thông thường, toàn bộ ánh sáng trong một xung quang học sẽ được vật liệu hấp thụ và chuyển hóa thành nhiệt, do đó gây ra sự gia tăng nhiệt độ tức thời trong vật liệu, dẫn đến sự nóng chảy và phân giải bề mặt, làm carbon hóa, phân hủy hóa học... Kết quả thường bao gồm một vùng vật liệu đã bị biến đổi về màu sắc, thành phần và sẽ tạo thành các hình khắc laser tại vị trí chùm tia laser chiếu tới như minh họa ở hình 6 [5].



Hình 6. Sự hình thành vết khắc dưới tác dụng của chùm tia laser.

Chất lượng vết khắc phụ thuộc vào mức độ hấp thụ bức xạ của vật liệu. Tỷ lệ hấp thụ của vật liệu với mỗi loại laser khác nhau thì cũng khác nhau. Hình 7 mô tả tỷ lệ hấp thụ của một số vật liệu phi kim loại với các loại laser khác nhau.



Hình 7. Tỷ lệ hấp thụ vật liệu với các loại laser.

Ta thấy laser UV có tỷ lệ hấp thụ 70-90%, cao hơn hẳn so với các loại laser khác. Sử dụng loại laser không phù hợp để khắc trên vật liệu nhựa có thể dẫn đến hư hỏng vật liệu trong quá trình gia công do nhiệt sinh ra.

Sự hấp thụ của vật liệu nhựa dưới tác dụng của chùm tia laser chiếu tới phụ thuộc vào mật độ năng lượng của chùm tia laser và tính chất của vật liệu. Mật độ năng lượng của chùm tia laser được tính theo công thức sau:

$$F = \frac{2\sqrt{2}P}{\pi\omega_0 V} \quad (1)$$

trong đó: F là mật độ năng lượng của chùm tia laser (J/cm^2); 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.

Năng lượng hấp thụ E trên một đơn vị thể tích ở độ sâu z trong vật liệu có dạng hàm e mũ [4]:

$$E(z) = I_0 \alpha e^{-\alpha z} \quad (2)$$

trong đó: α là hệ số hấp thụ tại bước sóng laser đối với vật liệu được khắc; I_0 là cường độ chùm tia laser chiếu tới vật liệu (tỷ lệ với mật độ năng lượng F); Δt là thời gian xung laser.

Công thức mô tả đơn giản về quá trình nung nóng và tăng nhiệt độ ΔT (trên một đơn vị khối lượng) đối với một thể tích vật liệu ở độ sâu z là:

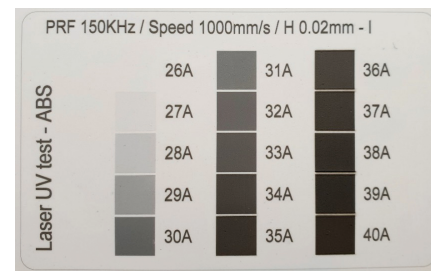
$$\Delta T = \frac{\text{Nhiệt lượng thêm vào} - \text{Nhiệt dẫn đi}}{\text{Nhiệt dung riêng của vật liệu}}$$

trong đó: nhiệt lượng thêm vào được xác định bởi lượng ánh sáng laser được hấp thụ trong vật liệu ở độ sâu z; nhiệt dẫn đi được xác định bởi độ dẫn nhiệt của vật liệu.

Vì xung laser có thời gian hữu hạn, nên công thức mô tả này phải được lấy tích phân theo thời gian. Sự nóng chảy và bốc bay của vật liệu cũng góp phần vào sự cân bằng năng lượng. Ngoài ra, quá trình hấp thụ bức xạ laser cũng phụ thuộc rất nhiều vào nhiệt độ của vật liệu.

Từ các công thức (1) và (2) nhận thấy, quá trình khắc laser trên vật liệu phi kim sẽ chịu ảnh hưởng của nhiều tham số như: bước sóng laser, công suất chùm tia laser chiếu tới, độ rộng xung laser, tần số lặp lại xung, phân bố chùm tia... Đây đều là những tham số cần phải xét đến khi sử dụng một hệ thiết bị máy khắc laser.

Sự ảnh hưởng của các thông số của hệ laser lên quá trình khắc laser UV lên vật liệu nhựa bước đầu được khảo sát bằng hệ thiết bị khắc laser UV vừa chế tạo. Công suất laser được thay đổi bằng cách thay đổi dòng điện I (A) nuôi laser diode bơm tinh thể laser rắn trong hệ thống thiết bị; giá trị này được điều chỉnh từ 0 đến 42 A. Hình ảnh khắc thử nghiệm trên vật liệu nhựa ABS nền màu trắng có chiều dày 1 mm với sự thay đổi của công suất laser được hiển thị ở hình 8.



Hình 8. Thử nghiệm khắc trên vật liệu nhựa ABS bằng cách thay đổi công suất laser (điều khiển bằng thay đổi cường độ dòng điện).

Nhóm tác giả đã tiến hành thử nghiệm khắc trên một số vật liệu nhựa khác nhau như PVC, ABS và PP nền màu trắng có chiều dày 1 mm. Từ kết quả nghiên cứu trong việc khắc trên các vật liệu nhựa khác nhau, chúng tôi bước đầu đã đưa ra được bộ tham số tối ưu của hệ thiết bị chế tạo cho một số loại vật liệu nhựa riêng biệt. Các kết quả thử nghiệm thông số khắc trên vật liệu nhựa PVC, ABS, PP đã được ghi nhận ở bảng 3.

Bảng 3. Số liệu bộ thông số khắc trên vật liệu nhựa PVC, ABS, PP của hệ thiết bị laser UV vừa chế tạo.

Loại nhựa	Nhựa PVC		Nhựa ABS		Nhựa PP	
	Đen	Xám	Đen	Xám	Đen	Xám
Công suất laser P điều khiển theo dòng điện I (A)	29,5	29	32	30	35	34
Tần số f (KHz)	40	40	40	40	40	40
Tốc độ khắc (mm/s)	1000	1000	900	1000	800	1000
Khoảng cách đường khắc (mm)	0,02	0,05	0,02	0,05	0,02	0,05

Hình 9 là hình ảnh một số sản phẩm thử nghiệm khắc laser UV trên vật liệu nhựa PVC, ABS, PP dựa trên các thông số khắc laser tối ưu ở bảng 3. Các kết quả thử nghiệm cho thấy, hình ảnh được khắc laser có độ rõ nét và tương phản cao, đặc biệt là các ký tự nhỏ đều được hiển thị đầy đủ và sắc nét. Ngoài ra, vết khắc

laser UV trên vật liệu nhựa không có hiện tượng bị cháy hay phồng rộp như khi được khắc bằng chùm tia laser hồng ngoại IR 1064 nm khác.



Hình 9. Một số mẫu thử nghiệm khắc laser UV bước sóng 355 nm trên các vật liệu nhựa PVC, ABS, PP.

4. Kết luận

Hệ thiết bị khắc trên vật liệu nhựa sử dụng laser UV bước sóng 355 nm đã được chế tạo thành công với các thông số của thiết bị như: công suất đầu ra 5 W, tần số điều chỉnh được từ 20 đến 150 KHz, độ rộng xung 7-31 ns. Một số kết quả khắc thử nghiệm trên vật liệu nhựa như ABS, PVC, PP có độ sắc nét, độ tương phản cao, tốc độ xử lý, tính linh hoạt cao và khắc kích thước nhỏ cỡ micromet. Việc chế tạo thành công hệ thiết bị khắc laser UV sóng 355 nm góp phần chủ động trong công nghệ chế tạo, tích hợp thiết bị cũng như làm chủ quy trình khắc trên một số loại vật liệu phi kim loại, từ đó mở rộng, đa dạng hóa ứng dụng của laser trong công nghiệp, công nghiệp phụ trợ, gia dụng, y tế.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được thực hiện trong khuôn khổ đề tài cấp Bộ Khoa học và Công nghệ năm 2022-2023: “Chế tạo hệ thiết bị khắc trên vật liệu phi kim sử dụng laser UV bước sóng 355 nm để khắc tem nhãn trên vật liệu nhựa” do Trung tâm Công nghệ Laser, Viện Ứng dụng Công nghệ chủ trì. Các tác giả xin trân trọng cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] <https://www.keyence.com.vn/ss/products/marketing/lasermarker/knowledge/uv-laser.jsp>, accessed 8 June 2023.
- [2] L. Liu, Z. Hou, R. Guo, et al. (2019), “High efficiency and high energy 355 nm generation in $\text{NaSr}_3\text{Be}_3\text{B}_3\text{O}_{10}\text{F}_4$ crystal”, *Optical Materials Express*, **9(8)**, pp.3527-3534, DOI: 10.1364/OME.9.003527.
- [3] Y. Yua, C.Y. Cheng, X. Peng, et al. (2015), “High power 355 nm diode-pumped solid-state laser”, *Proceedings of The International Conference on Optical and Photonic Engineering (icOPEN 2015)*, DOI: 10.1117/12.2189431.
- [4] J.F. Ready (2001), *Handbook of Laser Material Processing*, Springer, 717pp.
- [5] D.L. Elliott (1995), *Ultraviolet Laser Technology and Applications*, Elsevier Inc, Academic Press, 350pp.
- [6] N. Ikeda, T. Akaba, F. Inoue (2003), “Diode-pumped solid-state ultraviolet laser micro processing system”, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., *Technical Review*, **40(2)**, pp.1-5.