

MỘT PHƯƠNG ÁN THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO HỆ LASER SỢI QUANG CÔNG SUẤT 20W ỨNG DỤNG TRONG LĨNH VỰC CÔNG NGHIỆP

ThS. Trương Đức Toàn, ThS. Đỗ Xuân Tiên, KS. Trần Xuân Thịnh,

ThS. Phạm Chí Hiếu, TS. Trần Thị Vân Anh

Trung tâm Công nghệ Laser, Viện ứng dụng Công nghệ

Email: toantruong2007@gmail.com; Mobi: 0949779791

TÓM TẮT

Bài báo trình bày một phương án thiết kế và chế tạo hệ laser sợi quang ứng dụng trong lĩnh vực công nghiệp. Trong đó môi trường hoạt chất laser là sợi quang pha tạp ion đất hiếm Ytterbium (Yb^{3+}) và được bơm quang học bằng laser diode. Cấu hình buồng laser sợi quang bao gồm một tầng phát và một tầng khuếch đại cho phép đạt được công suất laser lối ra trên 20 W tại vùng bước sóng 1070 nm. Tần số lặp lại của xung laser lối ra thay đổi được trong khoảng từ 20÷80 KHz nhờ một bộ Q-switch âm-quang đặt trong buồng laser. Bộ nguồn nuôi laser diode bơm cho phép thay đổi dòng điện từ 0÷20A, điện áp 5V và được điều khiển đồng bộ từ một mạch điều khiển trung tâm ghép nối máy tính. Một số kết quả đo đặc thông số lối ra của hệ laser sợi quang trong điều kiện phòng thí nghiệm bao gồm: công suất laser, độ rộng xung, tần số lặp lại, hệ số chất lượng chùm tia M^2 ... cũng được trình bày trong bài báo này. Các số liệu đo đã cho thấy độ ổn định và tin cậy của hệ thống. Từ đó hệ laser sợi quang này được sử dụng để tích hợp trong một thiết bị máy khắc laser trên bề mặt vật liệu kim loại.

Từ khóa: laser sợi quang, laser diode bơm quang học, máy khắc laser, nguồn nuôi laser diode.

ABSTRACT

The article presents a design and manufacturing plan for a fiber optic laser system applied in the industrial field. The active laser medium is a fiber doped with Ytterbium (Yb^{3+}) rare earth ions and is optically pumped by a laser diode. The configuration of the fiber laser cavity includes an emitting layer and an amplifying layer, allowing for an output laser power of over 20 W at a wavelength of 1070 nm. The repetition frequency of the output laser pulse can be varied from 20 to 80 KHz thanks to an acousto-optic Q-switch placed in the laser cavity. The laser diode power supply allows for current adjustments from 0 to 20A, voltage of 5V, and is synchronously controlled from a central control circuit connected to a computer. Some laboratory measurement results of the fiber laser system's output parameters are also presented in this article, including laser power, pulse width, repetition frequency, and the beam quality factor M^2 . The measured data have shown the stability and reliability of the system. Consequently, this fiber laser system has been used to integrate into a laser engraving device on metal material surfaces

Keyword: fiber optic laser, optically pumped laser diode, laser engraving machine, diode laser power supply.

1. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, các loại laser sợi quang công suất cao được chế tạo dựa trên sợi quang hoạt chất lớp vỏ kép pha tạp ion Ytterbium (Yb^{3+}) đã có rất nhiều ứng dụng thương mại do những ưu điểm của chúng so với laser trạng thái rắn thông thường, chẳng hạn như hiệu suất chuyển đổi rất cao, tỷ lệ diện tích bề mặt trên thể tích cao cho phép dễ dàng tản nhiệt và chất lượng chùm tia laser lõi ra ở gần mức giới hạn nhiễu xạ. Công suất laser sợi quang lõi ra có thể dễ dàng đạt được từ vài chục W cho đến hàng KW để đáp ứng đầy đủ các yêu cầu sử dụng trong lĩnh vực gia công vật liệu như khắc, hàn, cắt... trên kim loại.

Tuy nhiên, nói chung laser sợi quang là khó thiết kế và chế tạo hơn so với laser rắn tinh thể, bởi nhiều lý do rất khác nhau, bao gồm hiệu ứng hấp thụ mạnh do cường độ quang học cao, hoạt động ở gần 3 mức năng lượng trong hầu hết các dịch chuyển laser trong sợi quang và cơ chế hình thành xung rất phức tạp trong laser sợi khóa mode. Kết quả là giá thành laser sợi quang cũng cao hơn [1].

Hầu hết các laser sợi quang đều là loại laser được bơm quang học bằng laser diode với 2 loại cấu hình chính [2]:

Cấu hình buồng cộng hưởng laser: trong đó ánh sáng đi lại theo cả 2 hướng qua môi trường khuếch đại

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

Trong bài báo này, chúng tôi trình bày các kết quả thiết kế, chế tạo và đo kiểm các thông số của một hệ laser sợi quang với công suất lõi ra 20 W. Các

quang sợi. Cấu hình MOPA (bộ khuếch đại công suất dao động chủ): trong đó môi trường dao động chủ sẽ tạo ra một tín hiệu laser mầm công suất nhỏ, sau đó sẽ được khuếch đại trong môi trường sợi quang hoạt chất.

Cấu hình dạng buồng cộng hưởng laser đang được sử dụng phổ biến hơn nhờ có cấu trúc đơn giản, khả năng chế tạo dễ dàng, cho phép đạt được công suất laser lõi ra ở mức cao hơn. Đây cũng là cấu hình hệ laser sẽ được chúng tôi lựa chọn để phân tích, thiết kế và khảo sát các thông số hoạt động với các kết quả được trình bày trong bài báo này.

Tại Việt Nam hiện nay, nhu cầu về thiết bị laser sợi quang để khắc trên bề mặt vật liệu kim loại là rất lớn; tuy nhiên các nghiên cứu thiết kế, chế tạo hệ laser này ở trong nước vẫn còn rất hạn chế. Các hệ laser sợi quang trong máy khắc laser thương mại chủ yếu được nhập khẩu nguyên chiếc, dẫn tới những khó khăn trong việc làm chủ công nghệ, sửa chữa hệ thống. Hiện tại trong nước chưa sản xuất, chế tạo được thiết bị này, vì vậy chúng tôi đặt mục tiêu nghiên cứu *thiết kế, chế tạo được một hệ laser sợi quang trong điều kiện phòng thí nghiệm*, với công suất laser lõi ra lên tới 20 W, ứng dụng để khắc trên bề mặt vật liệu kim loại; đồng thời nắm bắt, làm chủ công nghệ, chủ động trong việc bảo dưỡng, thay thế thiết bị sau này.

nội dung nghiên cứu tập trung vào việc phân tích thiết kế buồng laser sợi quang, các linh kiện thành phần và hàn ghép nối hệ thống; thiết kế bộ nguồn

nuôi laser diode bơm và mạch điều khiển trung tâm. Hệ laser sợi quang sau khi hoàn thiện sẽ được chúng tôi đo kiểm các thông số hoạt động trong phòng thí nghiệm, bao gồm: công suất laser lỗi ra, độ rộng xung và tần số lặp

lại, hệ số chất lượng chùm tia laser, các xung tín hiệu điều khiển... Từ các kết quả chế tạo này, chúng tôi đã tích hợp hệ laser sợi quang vào một máy khắc laser và tiến hành thử nghiệm khắc trên một số bề mặt vật liệu kim loại.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

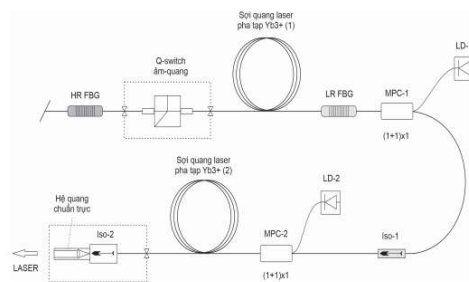
3.1. Thiết kế và chế tạo tích hợp buồng laser sợi quang

Các hệ laser sợi quang ứng dụng để khắc trên bề mặt kim loại có yêu cầu về tần số lặp lại của xung laser cao, khả năng điều biến xung dễ dàng, do đó buồng laser sẽ được thiết kế chế tạo sử dụng kỹ thuật điều biến độ phẩm chất chủ động (Q-switching). Trong chế độ Q-switching, môi trường hoạt chất laser pha tạp Yb³⁺ được bơm quang học liên tục, trong khi sự phát laser bị ngăn chặn bởi hệ số Q thấp của buồng cộng hưởng. Sau đó năng lượng tích trữ sẽ được giải phóng dưới dạng xung với độ rộng xung từ micro-giây đến nano-giây khi sự phát laser được cho phép bởi hệ số Q cao. So với laser sợi quang phát liên tục, laser sợi quang Q-switch có chất lượng chùm tia tốt, năng lượng xung lớn, hiệu suất hoạt động cao [3], [4].

Sơ đồ hệ laser sợi quang phát xung được điều biến bằng bộ Q-switch âm-quang được biểu diễn trong

Hình 1. Trong đó phần laser sợi quang Q-switch bằng bộ điều biến âm-quang được sử dụng làm bộ phát dao động

laser chủ. Công suất laser lỗi ra lên tới 20 W có thể đạt được bằng một tầng khuếch đại quang sợi.



Hình 1. Sơ đồ buồng laser sợi quang được điều biến bằng bộ Q-switch âm-quang

Trong tầng phát laser dao động chủ bao gồm các bộ phận:

- +1 laser diode ghép nối sợi quang LD-1: $P_{p1} = 10$ W, bước sóng 915 nm;
- +Cách tử quang sợi có hệ số phản xạ cao HR FBG: $R \approx 99\%$.
- +Cách tử quang sợi phản xạ thấp LR FBG: $R \approx 8\%$.

- +Bộ kết hợp laser diode bơm MPC-1 loại $(1+1) \times 1$;
- + Bộ Q-switch âm-quang.
- + Sợi quang hoạt chất laser lớp vỏ kép pha tạp Yb³⁺ (1):
 - Chiều dài: $L_1 = 4$ m;
 - Đường kính lõi sợi quang: 10 μ m, khẩu độ số phản hồi: $NA = 0,09$;
 - Vỏ sợi quang dạng bát giác, đường kính 128 μ m, khẩu độ số phản vỏ: $NA = 0,45$;

▪ Hệ số hấp thụ của sợi quang là

Trong tầng phát laser này, bộ Q-switch âm-quang có tác dụng kiểm soát độ suy hao của buồng cộng hưởng và điều khiển xung laser lồi ra. Tại đầu cuối của cách tử phản xạ cao HR FBG, sợi quang được cắt vát góc $8^{\circ} \div 15^{\circ}$ để tránh hiện tượng phản xạ ngược. Phần tử Q-switch là một bộ điều biến âm-quang ghép nối sợi quang với bước sóng trung tâm 1060 nm, tần số hoạt động 100 MHz, cho phép đã tạo ra xung laser tần số lặp lại từ 20÷80 KHz, và độ rộng xung có thể thay đổi được.

Chùm tia laser lồi ra khỏi tầng phát dao động chủ được truyền đến tầng khuếch đại quang sợi thông qua bộ cách ly quang ISO-1. Tầng khuếch đại này bao gồm:

- + 1 laser diode bơm ghép nối sợi quang LD-2, với công suất $P_{p2} = 45$ W, bước sóng 915 nm.
- + Bộ kết hợp laser diode bơm MPC-2 loại $(1+1) \times 1$.
- + Sợi quang hoạt chất laser lớp vỏ kép pha tạp Yb^{3+} :
 - Chiều dài: $L_2 = 9$ m;
 - Đường kính lõi sợi quang: 25 μm , khẩu độ số phần lõi: $\text{NA} = 0,09$;

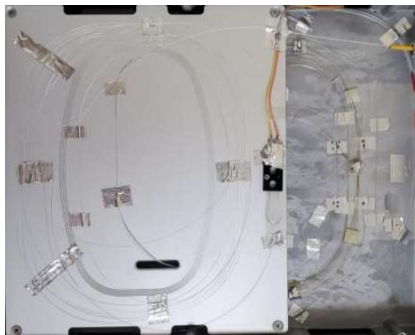
1,9 dB/m tại bước sóng 915 nm.

▪ Vỏ sợi quang dạng bát giác, đường kính 250 μm , khẩu độ số phần vỏ: $\text{NA} = 0,45$;

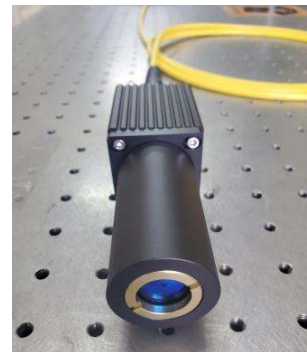
- + Hệ thấu kính chuẩn trực và bộ cách ly chùm tia laser lồi ra ISO-2.

Một bộ cách ly quang học ISO-1 được đặt ở lồi ra của tầng phát laser dao động chủ để tránh các tia phản xạ ngược. Do công suất giới hạn của bộ ISO-1 chỉ là 3 W, nên lúc này công suất laser lồi ra tầng phát dao động là thấp và được truyền đến tầng khuếch đại quang sợi. Tại đó, laser diode bơm LD-2 có công suất là 45 W cho phép tăng công suất laser lồi ra lên mức trên 20 W trong khi vẫn giữ nguyên tần số lặp lại. Tuy nhiên độ rộng xung laser lúc này sẽ bị mở rộng khi đi qua tầng khuếch đại công suất.

Cấu hình hệ laser sợi quang Q-switch gồm một tầng phát laser và một tầng khuếch đại công suất cho phép tạo ra các xung laser ngắn, tần số lặp lại cao, chất lượng chùm tia laser tốt, trong khi vẫn đảm bảo công suất laser lồi ra đạt được hàng chục Watts và hiệu suất hoạt động của hệ thống. Đây là cấu hình laser sợi quang phù hợp và đã được áp dụng trong nhiều thiết bị laser công nghiệp hiện nay.



(a)



(b)

Hình 2. Buồng laser sợi quang (a) và đầu ghép nối lõi ra laser (b)

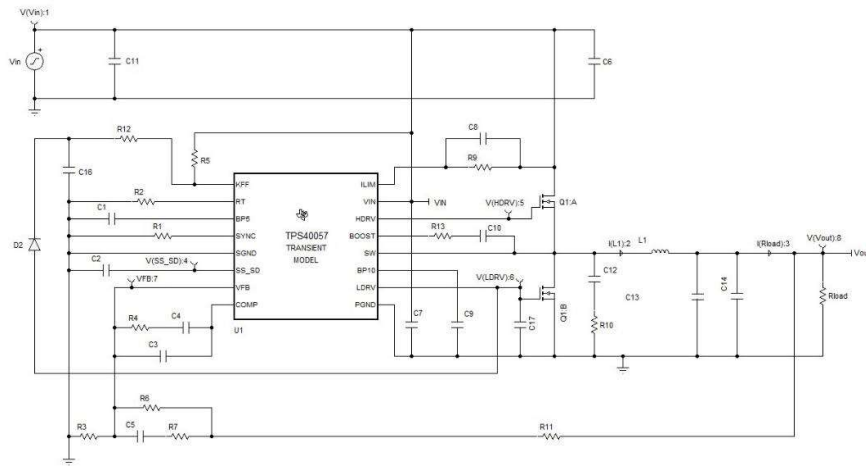
3.2. Thiết kế và chế tạo bộ nguồn nuôi các laser diode bơm

Từ những đặc trưng của laser diode, chúng ta nhận thấy rằng, để cho hoạt động laser được ổn định và đạt hiệu suất cao thì một bộ nguồn nuôi đóng vai trò hết sức quan trọng. Nói chung, 1 bộ nguồn nuôi cho laser bán dẫn phải là bộ nguồn dòng và thỏa mãn 2 yêu cầu sau: (i) Hạn chế dòng tuyệt đối và có khả năng (ii) Điều chỉnh được dòng điện. Trong nghiên cứu này, chúng tôi lựa chọn và sử dụng laser diode bơm của hãng photonic với công suất phát laser 45W, bước sóng 915nm,

đường kính lõi của lõi ra sợi quang 105μm, điện áp 5V và dòng điện tiêu thụ là 16.5A.

(i) Chúng tôi đã tính toán và thiết kế một mạch nguồn như trong Hình 3 có khả năng hạn chế dòng tuyệt đối với các thông số như sau:

- Điện áp đầu vào: 20-40V DC
- Điện áp đầu ra: 5V DC $\pm 2\%$ ($4.9V \leq V_{out} \leq 5.1V$)
- Dòng điện đầu ra lớn nhất: 20A
- Dải nhiệt độ hoạt động: -20° đến 85°C



Hình 3. Sơ đồ mạch nguồn cấp cho Laser diode

Các linh kiện chính trong sơ đồ mạch điện (Hình 3) chúng tôi sử dụng IC TPS40057 [4] và 2 MOSFET NCEP0178AK [5], từ việc lựa chọn này chúng tôi tính toán được các thông số của mạch điện như tần số tại chân SW của TPS40057 theo công thức như sau (các tính toán dựa trên công thức được sử dụng trong Datasheet của TPS40057 [4]):

$$f_{SW} = \frac{\left(\frac{V_{O(min)}}{V_{IN(max)}}\right)}{t_{ON}} = \frac{\left(\frac{4.9V}{40V}\right)}{900ns} = 136Khz \quad (1)$$

Trong đó $t_{ON} = 900ns$ được chúng tôi lựa chọn là thời gian mở MOSFET NCEP0178AK.

Từ việc lựa chọn laser diode bơm của photonic với thông số như bên trên, chúng tôi tính toán bộ hạn dòng tuyệt đối cho mạch như sau: đầu tiên chúng tôi tính toán dòng điện lớn nhất cấp cho mạch ở chế độ khởi động.

$$I_{ILIM} = \left(\frac{C_o \times V_o}{t_{START}}\right) = \frac{880\mu F \times 5V}{1ms} + 16,5 = 20.4A \quad (2)$$

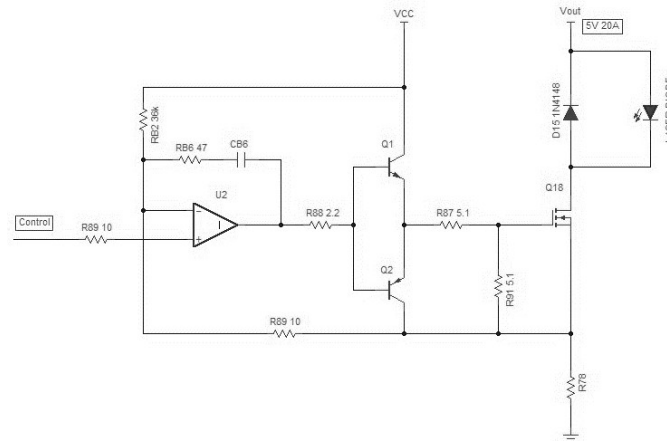
$C_o = 220\mu F \times 4$: là tụ điện đầu ra của mạch, được chúng tôi tính toán và lựa

chọn đáp ứng công suất đầu ra tại 5V 20A.

Từ dòng tiêu thụ ở chế độ khởi động $I_{ILIM} = 20.4\text{ A}$, chúng tôi tính và lựa chọn được giá trị điện trở phản hồi dòng $R9 = 100\text{k Ohm}$, vào bộ hạn dòng tại chân ILIM cho IC TPS40057 trong Hình 3. Các thông số tụ điện, điện trở,

cuộn cảm L1 và diode D2 còn lại chúng tôi tính toán dựa theo datasheet của TPS40057.

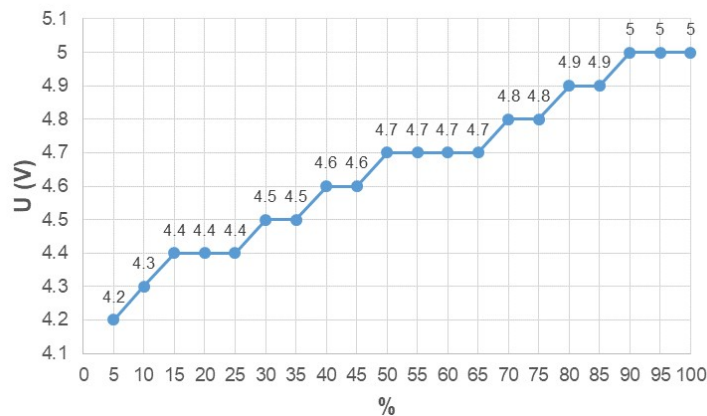
(ii) Để điều chỉnh được công suất phát xạ Laser, chúng tôi thiết kế một mạch điều khiển dòng điện cho Laser diode (Hình 4).



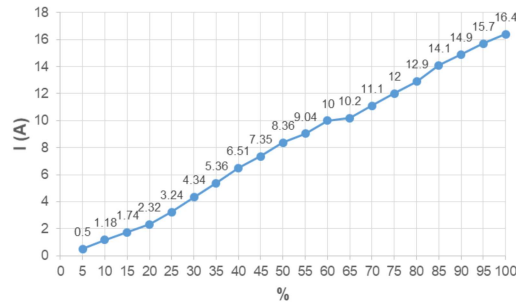
Hình 4. Mạch điều khiển dòng Laser diode

Đối với mỗi mức công suất được cài đặt từ máy tính, chúng tôi cấp một mức tín hiệu dạng mức điện áp đi qua điện trở R89 và đưa vào một mạch tích phân có phản hồi dòng từ Laser diode qua điện trở R89 và R78, từ đó điều khiển IGBT Q18 cung cấp điện áp và dòng điện tương ứng cho laser diode hoạt động.

Dựa trên các tính toán trên, trong quá trình chế tạo mạch và thử nghiệm thực tế, chúng tôi đã thu được các kết quả như Hình 5 và Hình 6 đồ thị đặc trưng điện áp và dòng điện cấp cho laser diode với các mức công suất được chúng tôi đặt từ phần mềm máy tính.



Hình 5. Đồ thị đặc trưng điện áp cấp cho laser diode



Hình 6. Đồ thị đặc trưng dòng điện cấp cho laser diode

Các kết quả thử nghiệm cho thấy mạch điện đã hoạt động ổn định, dòng điện đi qua laser diode bơm đáp ứng các mức công suất phát laser từ 0 đến 100%.

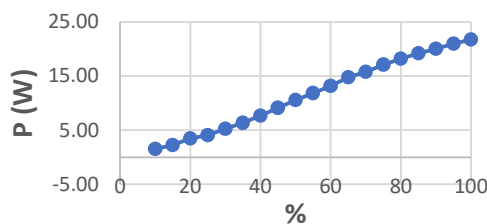
3.3. Đo kiểm các thông số lỗi ra của hệ laser sợi quang

Sau khi đã thiết kế, chế tạo được hệ laser sợi quang, chúng tôi đã tiến hành đo kiểm và đánh giá các thông số hoạt động của hệ laser trong điều kiện phòng thí nghiệm. Các đại lượng này bao gồm: công suất trung bình của laser lỗi ra, độ rộng xung laser, tần số lặp lại, phân bố vết laser, hệ số chất lượng chùm tia M^2 ... Các kết quả đo kiểm này được trình bày chi tiết dưới đây:

a. Đo công suất laser lỗi ra

Công suất trung bình chùm tia laser lỗi ra được đo bởi đầu đo công suất nhiệt S322C và được hiển thị trên bảng điều khiển PM100D (Thorlabs). Giá trị công suất được đo trực tiếp, sau đầu chuẩn trực ghép nối với sợi quang lỗi ra laser. Kết quả đo thị

Hình 7 biểu diễn công suất laser sợi quang lỗi ra thay đổi theo % giá trị cường độ dòng điện nuôi laser diode bơm. Chúng ta có thể nhận thấy, với



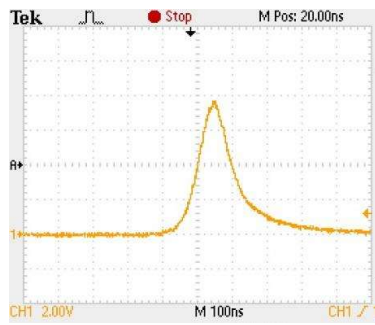
Hình 7. Đồ thị đặc trưng công suất lỗi ra của laser sợi quang

b. Đo độ rộng xung và tần số lặp lại

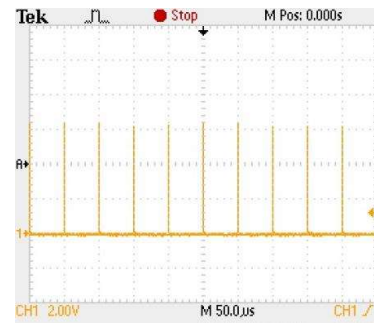
Phương pháp đo: Sử dụng photodiode nhanh PDA10A-EC (Thorlabs) để đo độ rộng xung của laser

cấu hình hệ laser sợi quang trên, công suất laser lỗi ra lớn nhất đạt được là 21,7 W, và độ ổn định công suất là nhỏ hơn 1%.

fiber và hiển thị trên dao động ký số TDS2024B (Tektronik). Hệ laser hoạt động ở chế độ phát xung với tần số lặp lại của xung laser thay đổi được.



(a)



(b)

Hình 8. Giá trị độ rộng xung (a) và tần số lặp lại (b)

khi thiết lập tần số điều biến Q-switch là 20 KHz

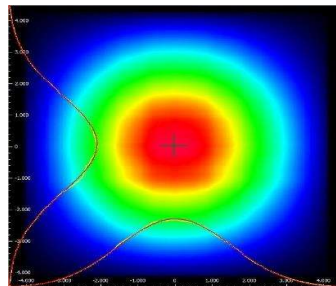
Các kết quả đo cho thấy, tần số lặp lại của xung laser lỗi ra có thể thay đổi được trong khoảng giá trị từ 20 ÷ 80

c. Đo phân bố và hệ số chất lượng chùm tia laser

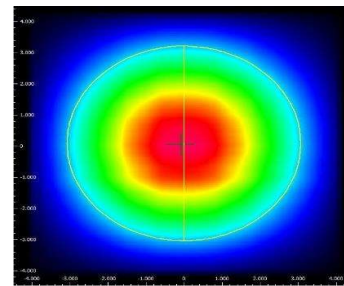
Thông số quang học của chùm tia laser sợi quang lỗi ra được thu nhận bởi hệ thiết bị phân tích chất lượng chùm tia laser M2SET-IR/M của Thorlabs

KHz tương ứng với độ rộng xung laser thay đổi từ 100 ÷ 150 ns.

với: đầu thu BP109-IR; bàn dịch chuyển 150mm; thấu kính hội tụ tiêu cự 200mm; và phần mềm Thorlabs Beam 4.0 giúp thu nhận số liệu đo và tính toán hệ số M^2 .



(a)

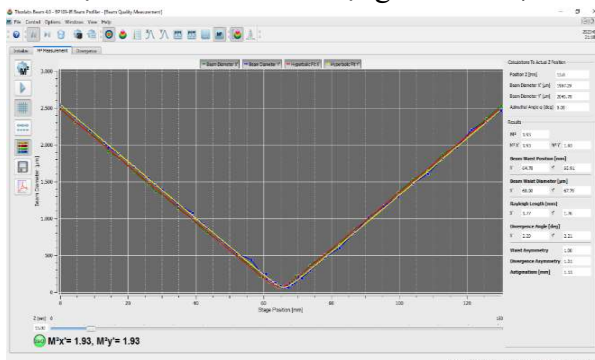


(b)

Hình 9. Phân bố chùm tia laser (a), và đường kính chùm tia (b)

Các kết quả đo phân bố chùm tia laser cho thấy: biên dạng chùm tia theo các trục X và Y đều có dạng Gaussian,

và giá trị đường kính chùm tia đo được theo chuẩn 4σ là 7,6 mm.



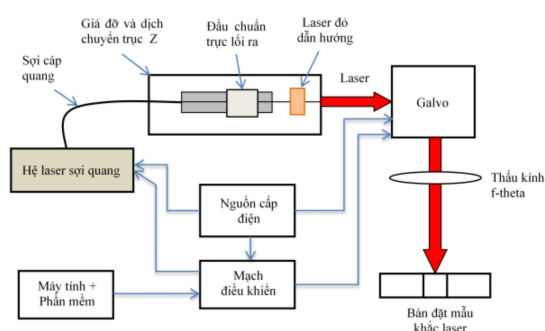
Hình 10. Kết quả đo hệ số chất lượng chùm tia laser M2

Chúng ta có thể nhận thấy, hệ số chất lượng chùm tia laser đo được là $M^2 = 1,93$ theo cả 2 phương X và Y, là rất gần với giá trị 1; đường kính chùm tia laser tại vị trí chỗ thắt là: $68 \mu\text{m}$; và

khoảng chiều dài Rayleigh là: $1,77 \text{ mm}$. Các kết quả đo kiểm này đã chứng tỏ độ ổn định và chất lượng cao của chùm tia lõi ra của hệ laser sợi quang được chế tạo theo cấu hình thiết kế.

3.4. Tích hợp hệ laser sợi quang vào thiết bị máy khắc laser trên kim loại

Hệ laser sợi quang sau khi được chế tạo đã được chúng tôi sử dụng để tích hợp trong một thiết bị máy khắc laser trên bề mặt vật liệu kim loại ứng dụng trong công nghiệp. Sơ đồ hệ máy khắc laser bao gồm: nguồn phát laser sợi quang với đầu chuẩn trực lõi ra, đầu quét tia galvo, thấu kính hội tụ f-theta, mạch điều khiển trung tâm, bộ cấp nguồn điện và các hệ giá đỡ cơ khí (



Hình 11. Sơ đồ thiết bị máy khắc laser trên kim loại sử dụng laser sợi quang

Hệ thiết bị máy khắc laser cho phép khắc được trên bề mặt các vật liệu kim loại như nhôm anode, thép, inox... với kích thước vùng khắc lớn nhất là $150 \times 150 \text{ mm}$, tốc độ khắc lên tới 5 m/s .

Thiết bị này có thể ứng dụng để khắc tem mác, logo nhãn hiệu, thông tin sản phẩm... trong các ngành quảng cáo, chế tạo cơ khí, công nghiệp phụ trợ.



Hình 12. Thiết bị máy khắc laser

4. KẾT LUẬN

Chúng tôi đã thiết kế, chế tạo được một hệ laser sợi quang theo phương án sử dụng cấu hình buồng laser gồm 1 tầng phát và 1 tầng khuếch đại. Các kết quả đã thu được một hệ

laser với công suất lõi ra trên 20 W , tần số lặp lại xung từ $20 \div 80 \text{ KHz}$ tương ứng với độ rộng xung thay đổi từ $100 \div 150 \text{ ns}$. Bộ nguồn nuôi laser diode bơm có thể thay đổi dòng điện từ $0-20 \text{ A}$, điện áp 5 V DC , được điều khiển từ một

mạch tích hợp kết nối ngoại vi. Các kết quả đo kiểm trong phòng thí nghiệm cho thấy chùm tia laser lổ ra có đường kính 7,6 mm, hệ số độ phẩm chất chùm tia M^2 là 1,93. Hệ laser này đã được sử dụng để chế tạo tích hợp một thiết bị máy khắc laser trên bề mặt một số vật liệu kim loại.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được thực hiện trong khuôn khổ đề tài cấp Bộ Khoa học và Công nghệ năm 2022-2023: “Thiết kế, chế tạo laser sợi quang công suất 20W được điều biến bằng Q-switch âm-quang ứng dụng khắc trên bề mặt vật liệu”, do Trung tâm Công nghệ Laser - Viện Ứng dụng Công nghệ chủ trì. Các tác giả xin trân trọng cảm ơn.

TÀI LIỆU TRÍCH DẪN

- [1] Michalis N. Zervas, Christophe A. Codemard, "High Power Fiber Lasers: A Review," *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, vol. 20, September/October 2014.
- [2] Addanki, Satish, I. Sadegh Amiri, and P. Yupapin., "Review of optical fibers- introduction and applications in fiber lasers," *Results in Physics*, vol. 10, pp. 743-750, 2018.
- [3] Yong Liu, Lin Lin, Ji Wang, Kai Chen, Guozheng Wang, Yang Liu, "Acousto-optic Q-switched pulse fiber laser with the peak power of 9kW," *Advanced Materials Research*, Vols. 760-762, pp. 125-128, 2013.
- [4] Mostafa Peysokhan, Esmail Mobini, and Arash Mafi, "Analytical formulation of high-power Yb-doped double-cladding fiber laser," *OSA Continuum*, vol. 3, no. 7, pp. 1940-1951, 2020.
- [5] Texas Instruments, „TPS4005x Wide-Input Synchronous Buck Controller“.
- [6] VBsemi Electronics Co.,Ltd, „NCEP0178AK: N-Channel 100-V (D-S) MOSFET“.