

Nghiên cứu chế tạo bộ quét chùm tia cho thiết bị laser điều trị thẩm mỹ vi điểm

Phan Thị Cảnh, Nguyễn Tuấn Anh*, Thái Quang Tùng, Hà Hoài Nam

Trung tâm Công nghệ Laser, Viện Ứng dụng Công nghệ

Ngày nhận bài 24/3/2023; ngày gửi phản biện 27/3/2023; ngày nhận phản biện 18/4/2023; ngày chấp nhận đăng 21/4/2023

Tóm tắt:

Bài báo trình bày các kết quả nghiên cứu chế tạo bộ quét chùm tia laser được sử dụng trong thiết bị laser điều trị thẩm mỹ vi điểm dựa trên công nghệ fractional để phân đoạn chùm tia laser điều trị. Quá trình quét chùm tia được thực hiện thông qua điều khiển góc quay của 2 galvo mô tơ theo các trục X và Y. Chế độ quét với các vùng điều trị có biên dạng khác nhau (vùng điều trị hình vuông - chữ nhật, hình tròn - elip, hình tam giác cân, hình thang cân và hình thoi) đã được thiết lập, khảo sát, đánh giá để từ đó xác lập bộ thông số điều khiển tối ưu cho các vùng điều trị. Việc chế tạo thành công bộ quét chùm tia laser cho phép chủ động phát triển các phần mềm điều khiển đặc thù với việc thay đổi các thông số theo yêu cầu điều trị khác nhau, qua đó giúp cho quá trình điều trị được linh hoạt và hiệu quả hơn.

Từ khóa: fractional, galvo mô tơ, laser điều trị thẩm mỹ.

Chỉ số phân loại: 2.2

Research and development of a laser beam scanner for a fractional therapy laser

Thi Canh Phan, Tuan Anh Nguyen*, Quang Tung Thai, Hoai Nam Ha

Laser Technology Center, National Center for Technological Progress

Received 24 March 2023; revised 18 April 2023; accepted 21 April 2023

Abstract:

This paper presents the results of research and fabrication of a laser beam scanner used in a fractional therapy laser system based on fractional technology to segment the laser beam for treatment. The beam scanning process is performed by controlling the rotation angle of two galvo motors along the X and Y axes. Scanning modes with different treatment areas including square-rectangle, circle-ellipse, isosceles triangle, isosceles trapezoid, and rhombus, have been developed, surveyed, and evaluated to establish a set of optimal control parameters for the treatment areas. The successful manufacture of the laser beam scanner allows to actively develop specific control software with changing parameters according to different treatment requirements, thereby making the treatment process more flexible and more effective.

Keywords: fractional, galvo motor, therapy laser.

Classification number: 2.2

Đặt vấn đề

Ngày nay, laser đã được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khoa học và công nghệ như hóa học, vật lý, thông tin liên lạc, quân sự, công nghiệp, y tế, môi trường... [1-4]. Trong lĩnh vực y tế, laser chủ yếu được sử dụng trong phẫu thuật cầm máu, phẫu thuật nội soi, chẩn đoán, trị liệu, thẩm mỹ (điều trị mụn trứng cá, triệt lông, xóa hình xăm, điều trị bớt sắc tố...), nha khoa, nhãn khoa [5-8].

Trong điều trị thẩm mỹ, ưu điểm nổi bật của việc sử dụng laser là khả năng tập trung năng lượng trên một khu vực có giới hạn, nhờ đó, chỉ tác động lên các tổ chức tế bào được chỉ định. Hơn nữa, thông qua việc điều khiển thông số quang của chùm tia laser, các thiết bị laser cho phép kiểm soát chính xác sự phân bố năng lượng chùm tia theo không gian và thời gian, nhờ đó, kích hoạt có hiệu quả các quá trình nhiệt, cơ học hoặc quang hóa trong các mô, tế bào [9].

Hiện nay, có 2 phương pháp sử dụng laser trong điều trị thẩm mỹ gồm phương pháp xâm lấn (ablative) và không xâm lấn (non-ablative) [10, 11]. Với phương pháp không xâm lấn, yêu cầu đặt ra là phải đảm bảo không phá hủy cấu trúc cơ học của mô mặc dù bề mặt da bị tác động nhiệt [12].

Phương pháp xâm lấn liên quan đến việc loại bỏ các mô sống tiếp xúc trực tiếp với bức xạ laser. Cơ chế và phác đồ điều trị được xác định bởi tính chất của mô, đặc tính của bức xạ laser (bước sóng, chế độ hoạt động: phát xạ liên tục hoặc xung, công suất laser, năng lượng xung...) và hệ số hấp thụ bức xạ của tế bào. Laser thường được sử dụng là laser CO₂ (bước sóng 10600 nm) và laser Erbium (bước sóng 2940 nm), trong đó laser CO₂ cho kết quả điều trị xâm lấn tốt hơn, trong khi điều trị bằng laser Erbium cho thời gian phục hồi nhanh hơn [13-15]. Bên cạnh đó, để nâng cao hiệu quả và giảm

*Tác giả liên hệ: Email: cfocantuanh@yahoo.com

thiểu thời gian điều trị, người ta sử dụng công nghệ quang nhiệt phân đoạn chùm tia FP (Fractional photothermolysis) trong các thiết bị laser điều trị thẩm mỹ [16, 17]. Công nghệ FP đã được Cục quản lý Thực phẩm và Dược phẩm Mỹ (FDA) đánh giá là phương pháp an toàn, hiệu quả trong điều trị bằng chùm tia laser có điều khiển. Bản chất của công nghệ FP là chia vùng điều trị thành ma trận các điểm điều trị nhiệt MTZs (Microtreatment zones of thermolysis) [18]. Có nghĩa là, thay vì chiếu chùm tia laser lên toàn bộ vùng điều trị, chùm tia sẽ chỉ được chiếu vào tổ chức tế bào tại các điểm xác định. Tập hợp các điểm điều trị này sẽ hình thành một ma trận các điểm điều trị trong vùng điều trị, có nghĩa là, chùm laser quét trong vùng điều trị theo ma trận các điểm điều trị. Những thiết bị laser điều trị theo công nghệ FP được gọi là laser điều trị vi điểm.

Tại Việt Nam, các nghiên cứu về quá trình điều khiển quét chùm tia laser theo ma trận các điểm điều trị còn hạn chế. Các bộ quét chùm tia chủ yếu là nhập khẩu, dẫn đến hạn chế trong các ứng dụng, khó khăn trong việc làm chủ công nghệ chế tạo, cũng như công việc bảo hành, bảo dưỡng thiết bị laser điều trị vi điểm. Do vậy, việc thiết kế, chế tạo bộ quét chùm tia theo các vùng điều trị có biên dạng khác nhau là cần thiết.

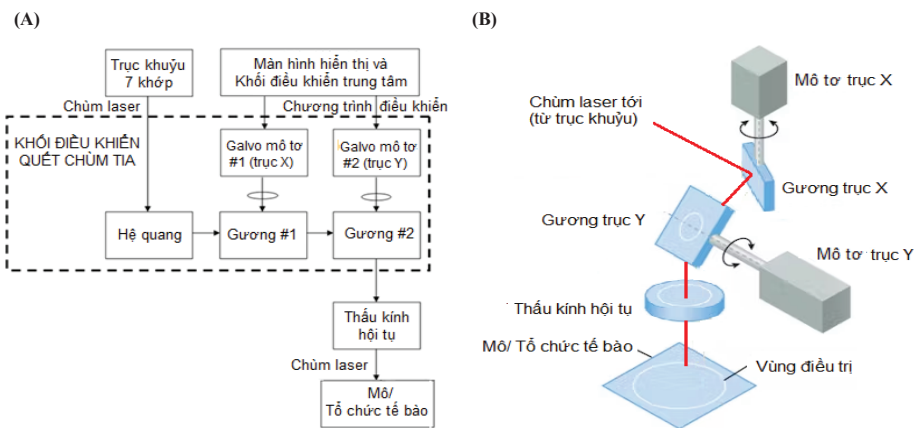
Bài báo trình bày một số kết quả nghiên cứu chế tạo bộ quét chùm tia laser sử dụng 2 galvo mô tơ, được điều khiển quét theo trục X và Y. Các vùng điều trị có biên dạng khác nhau gồm: biên dạng hình vuông - chữ nhật, hình tròn - e líp, hình tam giác cân, hình thang cân, hình thoi. Các thông số quét cơ bản điều chỉnh được gồm: tín hiệu điều khiển quét chùm tia, thời gian dịch chuyển và khoảng cách giữa 2 điểm điều trị liền kề, diện tích vùng điều trị.

Chế tạo thiết bị

Xây dựng cấu hình điều khiển quét chùm tia

Điểm khác biệt cơ bản và quan trọng nhất giữa thiết bị laser điều trị vi điểm với các hệ laser khác là tạo được ma trận các điểm điều trị. Khi đó, chùm tia laser không chiếu lên toàn bộ khu vực điều trị mà chỉ được chiếu vào các điểm chỉ định được sắp xếp theo ma trận các điểm trên bề mặt vùng điều trị.

Thông thường, trong các thiết bị laser điều trị vi điểm, chùm tia laser được quét bằng 2 galvo mô tơ chuyển động theo hai trục X và Y (hình 1). Mỗi trục của mô tơ được gắn 1 gương phản xạ toàn phần. Nhờ đó, gương sẽ quay một góc tương ứng mỗi khi mô tơ dịch chuyển. Quá trình quét được mô tả tóm tắt như sau: chùm laser đi ra từ trục khuỷu 7 khớp, tới gương phản xạ #1 (gắn vào mô tơ trục X). Chùm phản xạ từ gương #1 được truyền tới gương #2 (gắn vào mô tơ trục Y). Tiếp



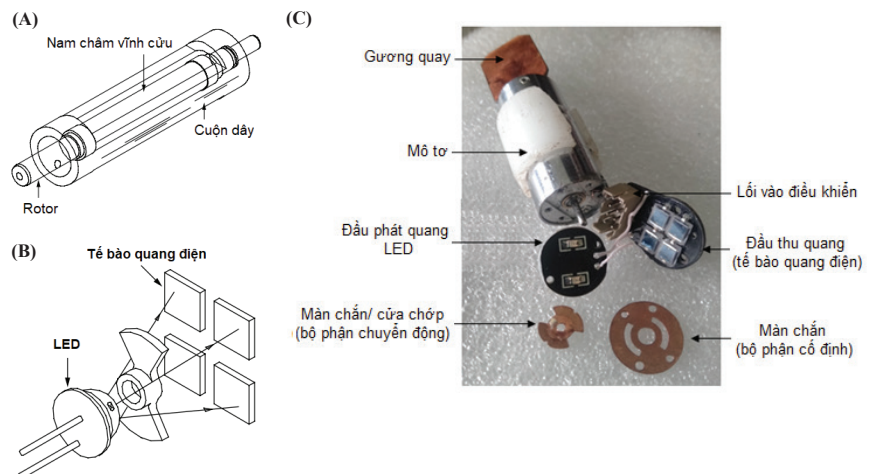
Hình 1. Cấu hình điều khiển quét chùm tia. (A) Sơ đồ khối chức năng; **(B)** Hình ảnh mô tả quá trình điều khiển quét chùm tia.

đến, chùm phản xạ từ gương #2 được hội tụ bởi thấu kính và hướng tới tổ chức điều trị. Như vậy, chùm tia laser sẽ được điều khiển trên bề mặt tổ chức tế bào theo hai trục X và Y thông qua các chuyển dịch góc của 2 galvo mô tơ.

Lựa chọn mô tơ điều khiển quét chùm tia

Cơ cấu chấp hành của galvo mô tơ gồm rotor, stator và cuộn dây có dòng điện chạy qua để tương tác với từ trường của nam châm vĩnh cửu, tạo ra lực làm quay rotor. Hiện nay, có 2 loại galvo mô tơ là loại có nam châm chuyển động và loại cuộn dây chuyển động. Ngoài ra, để xác định vị trí của rotor, người ta sử dụng 2 phương pháp cơ bản gồm: (1) Xác định vị trí dựa trên sự thay đổi điện dung giữa điện cực cố định và điện cực chuyển động; (2) Xác định vị trí dựa trên sự điều biến ánh sáng bằng cửa chớp gắn vào rotor [19].

Để thiết kế bộ quét chùm tia nhỏ gọn, chắc chắn, tốc độ dịch chuyển cao và chính xác, giá thành hạ, mô tơ được lựa chọn sử dụng là galvo mô tơ JS1105 của Hãng SINO, Trung Quốc. Đây là loại galvo mô tơ có nam châm chuyển động và việc xác định vị trí của rotor dựa trên điều biến ánh sáng bằng cửa chớp (hình 2).



Hình 2. Cấu trúc của galvo mô tơ quét chùm tia. (A) Mô tả galvo mô tơ nam châm chuyển động; **(B)** Mô tả galvo mô tơ xác định vị trí rotor dựa trên điều biến ánh sáng bằng cửa chớp; **(C)** Galvo mô tơ JS1105 của Hãng SINO [20].

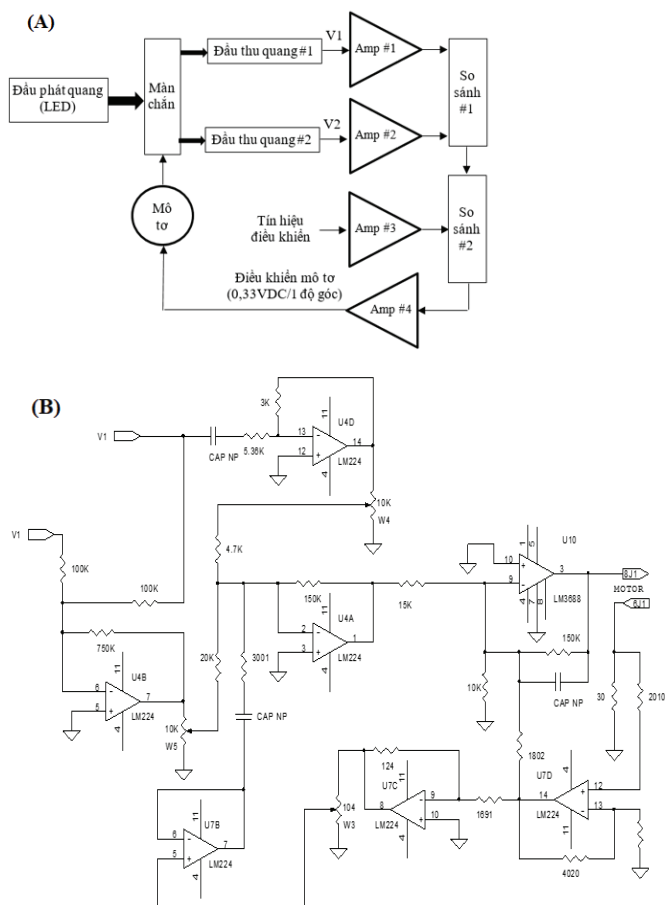
Thông số kỹ thuật của galvo mô tơ JS1105 được mô tả ở bảng 1.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật cơ bản của mô tơ JS1105.

Thông số kỹ thuật	Giá trị
Nhiệt độ làm việc	0-45°C
Độ tuyến tính	99,9%
Thời gian thiết lập	≤0,35 ms
Độ trôi sau 8 giờ	<0,5 mRad
Dòng RMS	2,0 A
Dòng đỉnh tối đa	10 A
Góc quét tối đa	±15°
Độ phân giải	12 μrad
Độ lặp lại	8 μrad
Khẩu độ đầu vào	5,0-7,0 mm
Thông số điều khiển mô tơ	
Tín hiệu điều khiển (tương tự)	±5 V
Điện trở tải vào tín hiệu điều khiển	200 KΩ±1%
Tỷ lệ giữa góc quay và tín hiệu điều khiển	0,33 V/°

Thiết kế, chế tạo bộ điều khiển mô tơ quét chùm tia

Quá trình điều khiển mô tơ được mô tả ở hình 3:

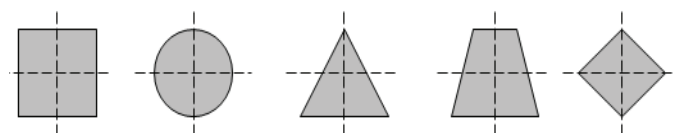


Hình 3. Điều khiển galvo mô tơ. (A) Sơ đồ khối bộ điều khiển galvo mô tơ; (B) Sơ đồ nguyên lý bộ điều khiển galvo mô tơ.

Ánh sáng từ đầu phát quang (LED) được điều biến bởi màn chắn gắn với trục mô tơ (màn chắn chuyển động kết hợp với màn chắn cố định tạo thành các khe sáng - hình 2). Cường độ ánh sáng sau điều biến được nhận biết bởi các đầu thu quang #1 và #2. Tùy theo chiều quay, góc quay của mô tơ, cường độ ánh sáng sẽ thay đổi một cách đồng bộ. Sau khi được chuyển đổi thành các điện áp V_1, V_2 , các tín hiệu này được khuếch đại bởi Amp #1 và Amp #2, sau đó được đưa tới bộ so sánh #1. Điện áp lỗi ra của bộ so sánh #1 tương ứng với chênh lệch cường độ ánh sáng chiếu vào các đầu thu quang. Điện áp này được phản hồi điều khiển mô tơ, nhờ đó, sự dịch chuyển góc quay của mô tơ luôn được giữ ổn định.

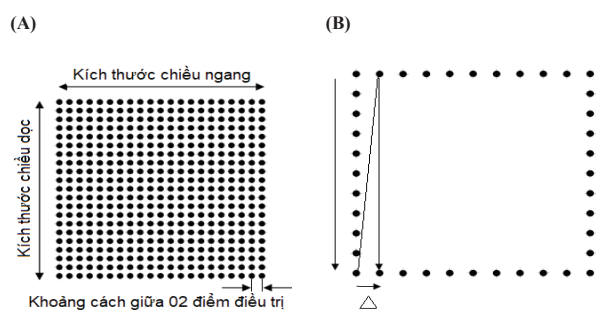
Đo tín hiệu điều khiển quét các vùng có biên dạng khác nhau

Giống như các thiết bị laser điều trị thẩm mỹ vi điểm, biên dạng các vùng quét trong thiết bị chế tạo được xây dựng cho các hình gồm: vuông - chữ nhật, tròn - elip, tam giác cân, thang cân và thoi (hình 4).



Hình 4. Biên dạng các vùng quét của thiết bị laser điều trị vi điểm.

Để điều khiển góc quay của 2 galvo mô tơ quét đồng bộ trên mặt phẳng (X, Y) theo ma trận các điểm, quy trình điều khiển quét được thiết lập gồm các bước sau: (1) Chọn hình quét (vùng điều trị); (2) Đánh dấu biên dạng hình quét; (3) Điều chỉnh (tăng/giảm) thông số về: kích thước vùng quét theo hai trục X, Y và khoảng cách Δ giữa 2 điểm quét liền kề (hình 5).



Hình 5. Hình ảnh mô tả quét chùm tia theo ma trận các điểm. (A) Hình ảnh các điểm quét; (B) Vị trí các điểm quét đường bao.

Tín hiệu điều khiển quét từ vi xử lý được chuyển đổi thành tín hiệu tương tự nhờ bộ chuyển đổi DAC, sau đó được đưa tới các mạch khuếch đại và hiệu chỉnh tạo thành điện áp điều khiển. Khi kết hợp đồng bộ giữa điều khiển góc quay của 2 mô tơ này với quá trình phát chùm tia laser, tại mỗi điểm quét, chùm laser sẽ được hội tụ vào điểm điều trị nằm trong biên dạng của vùng điều trị đã chọn.

Quá trình quét được thực hiện quét tuần tự từ trên xuống dưới (theo trục Y), từ trái qua phải (theo trục X). Các tham số quét bao gồm: kích thước chiều ngang lớn nhất x, kích thước chiều dọc lớn nhất y và khoảng cách Δ giữa hai điểm quét.

Để điều khiển các mô tơ chuyển động phù hợp với kích thước của các đầu điều trị thẩm mỹ vi điểm hiện nay (thường có cấu trúc hình trụ với đường kính tiết diện ngang ~2,5 cm), khoảng di chuyển trên 2 trục X, Y lớn nhất (chiều ngang x và chiều dọc y) phải không vượt quá 2,5 cm.

Các thông số điều khiển đã được thiết lập với chiều ngang lớn nhất x và chiều dọc lớn nhất y (2 cm). Kích thước này hoàn toàn phù hợp với thông số kỹ thuật của mô tơ JS1105 (bảng 1). Thật vậy, qua kiểm nghiệm thực tế chúng tôi thấy, để dịch chuyển trên 2 trục X, Y một khoảng 2 cm, tín hiệu điều khiển mô tơ JS1105 phải nằm trong khoảng ±2 V. Khi đó, góc quay tương ứng là:

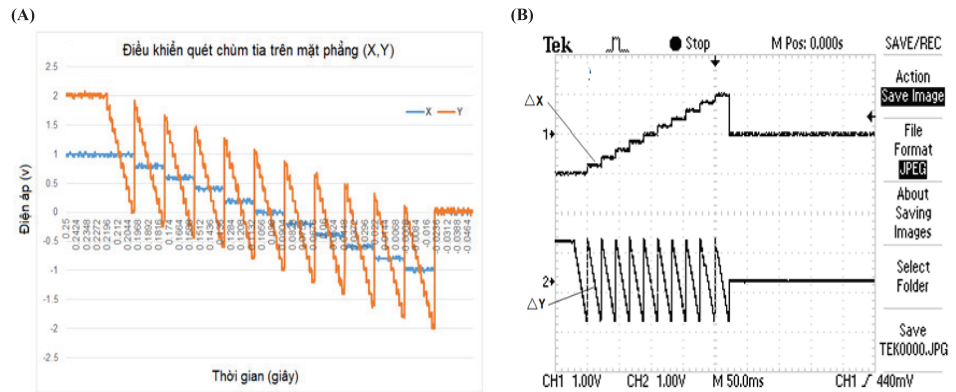
$$\frac{\pm 2 V}{0,33 V/^\circ} = \pm 6^\circ$$

Góc quay này nhỏ hơn góc quét tối đa ±15°. Hay nói cách khác, mô tơ sẽ quay một cách tuyến tính với tín hiệu điều khiển nằm trong khoảng ±2 V. Khi đó, khoảng cách di chuyển tối đa trên hai trục X, Y là ±1 cm.

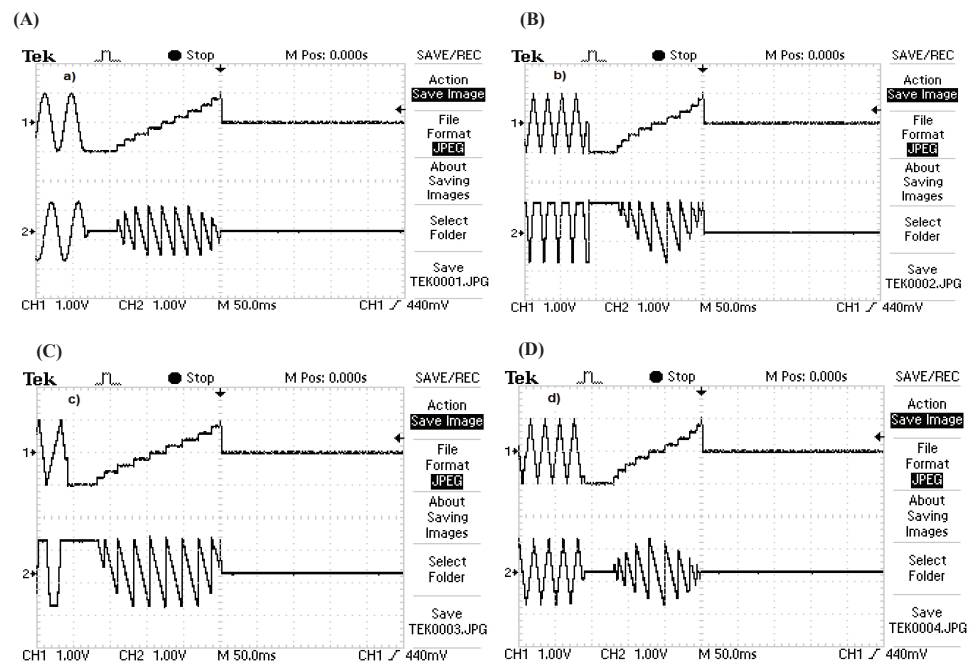
Sau khi xác định được độ lớn dịch chuyển tối đa trên 2 trục X, Y, các thông số điều khiển quét được thiết lập cho các vùng quét có biên dạng khác nhau.

Kết quả đo tín hiệu điều khiển quét hình vuông - chữ nhật được mô tả ở hình 6.

Hình 6A hiển thị tín hiệu điều khiển mô tơ theo hai trục X và Y. Điện áp điều khiển mô tơ thay đổi trong phạm vi ±2 V. Tại mỗi giá trị điện áp điều khiển mô tơ trục X (đoạn nằm ngang), giá trị điện áp điều khiển mô tơ trục Y sẽ thay đổi theo 10 bậc (10 giá trị trên mỗi đoạn chéo). Như vậy, mỗi lần mô tơ trục X được điều khiển dịch chuyển một góc, mô tơ trục Y sẽ được điều khiển dịch chuyển 10 góc, hình thành nên 10 điểm quét. Quá trình này được lặp lại cho đến khi đầu laser quét hết



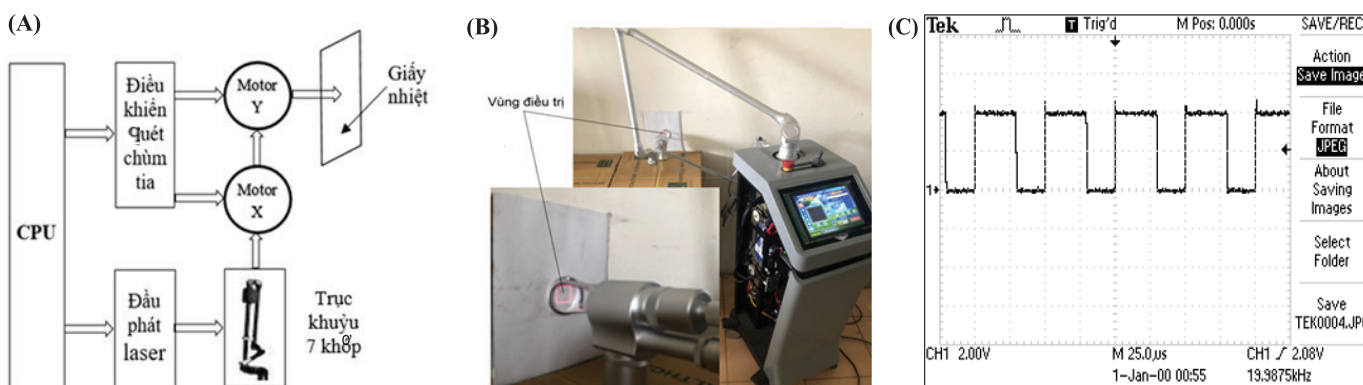
Hình 6. Tín hiệu điều khiển quét hình vuông - chữ nhật. (A) Điện áp từ vi xử lý điều khiển quay mô tơ theo hai trục X và Y; (B) Tín hiệu điều khiển quét theo hai trục được đo bằng oscilloscope.



Hình 7. Tín hiệu điều khiển quét các vùng. (A) Hình tròn - elip; (B) Hình tam giác cân; (C) Hình thang cân; (D) Hình thoi.

vùng điều trị. Tín hiệu điều khiển quét được xác định bằng oscilloscope (hình 6B): đường trên là tín hiệu điều khiển quét theo trục X, đường dưới là tín hiệu điều khiển quét theo trục Y. Thời gian dịch chuyển mỗi bước trên trục X (1 đoạn ngang trong hình 6A) là 0,02 giây. Trong khoảng thời gian này, trên trục Y sẽ dịch chuyển được 10 bước, mỗi bước 0,002 giây. Hay nói cách khác, bước dịch chuyển giữa hai điểm quét là 2 ms. Sau quá trình điều khiển quét theo hai trục X và Y như trên, một ma trận các điểm quét trong biên dạng của vùng điều trị sẽ được hình thành.

Tương tự, hình 7 mô tả kết quả đo bằng oscilloscope tín hiệu điều khiển quét các vùng có biên dạng khác nhau gồm: vùng quét hình tròn - elip, hình tam giác cân, hình thang cân và hình thoi.



Hình 8. Sơ đồ kiểm tra vùng quét bằng giấy nhiệt. (A) Sơ đồ khối cấu hình kiểm tra; **(B)** Hình ảnh kiểm tra biên dạng vùng quét; **(C)** Tín hiệu điều khiển phát laser, hoạt động trong chế độ phát liên tục, công suất 20 W, thời gian xung 30 µs, độ điều biến PWM 60%.

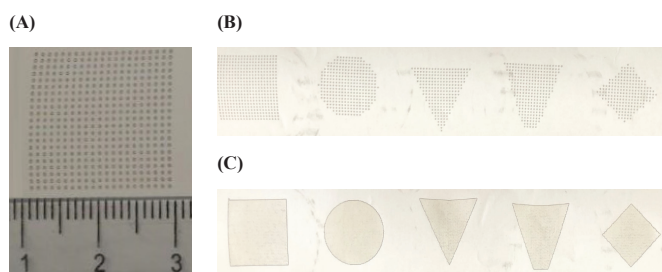
Kiểm tra biên dạng và ma trận các điểm quét

Để kiểm tra, đánh giá biên dạng và ma trận các điểm quét, đầu laser CO₂ Model D35L của Hãng DAVI, Trung Quốc (công suất laser lớn nhất: 35 W, độ ổn định công suất ±5%, bước sóng 10,6 µm, góc phân kỳ chùm tia: 7,5±0,5 mRad) đã được sử dụng. Công suất laser có thể điều chỉnh được nhờ sử dụng phương pháp điều chế độ rộng xung PWM (Pulse width modulation). Trong nghiên cứu này, laser hoạt động ở chế độ phát liên tục, công suất 20 W, thời gian phát xung 30 µs, độ điều biến PWM 60% (hình 8).

Tín hiệu điều khiển quét được gửi tới từ vi xử lý gồm có: (1) Tín hiệu điều khiển quay mô tơ trục X, Y; (2) Tín hiệu điều khiển phát laser. Chùm tia laser, sau khi qua trục khuỷu 7 khớp, được chiếu vào gương gắn liền với trục của mô tơ X, tiếp đến là mô tơ Y. Tia laser điều trị ló ra (phản xạ từ gương gắn với trục Y) được nhận biết bởi giấy nhiệt.

Hình 9 mô tả vị trí các điểm quét và biên dạng vùng quét, được nhận biết bằng vết chùm tia hiển thị trên giấy nhiệt.

Hình 9A cho thấy, hình ảnh vết chùm tia trên giấy nhiệt trong trường hợp khoảng cách giữa hai điểm quét liền kề Δ=1 mm, trên diện tích vùng quét 4 cm². Hình 9B và 9C lần lượt mô tả vết chùm tia trên giấy nhiệt của các vùng quét có biên dạng khác nhau trong hai trường hợp khoảng cách giữa hai



Hình 9. Vết chùm tia các vùng quét có biên dạng khác nhau hiển thị trên giấy nhiệt. (A) Vết chùm tia có biên dạng hình vuông; **(B)** Khoảng cách giữa hai điểm quét liền kề Δ=1 mm; **(C)** Khoảng cách Δ=0,1 mm.

điểm quét liền kề Δ=1 mm và Δ=0,1 mm. Các hình ảnh thu được cho thấy, các điểm quét được phân bố khá đều trên toàn bộ vùng quét. Điều này có thể được giải thích như sau: 2 mô tơ (JS1105) trục X và Y được điều khiển quay theo từng bước với mức điện áp của một bước không đổi. Theo bảng thông số kỹ thuật của mô tơ này (bảng 1), độ tuyến tính là 99,9% trong phạm vi góc quay ±15°. Có nghĩa là, nếu mức điện áp của bước điều khiển quay mô tơ được giữ không đổi thì sai lệch về vị trí góc quay của mô tơ tại các điểm điều trị là 0,1%.

Bảng 2. Thông số kỹ thuật của bộ quét chùm tia laser điều trị thẩm mỹ vi điểm.

Thông số kỹ thuật	Giá trị
Điện áp nguồn nuôi	±15 VDC
Tín hiệu điều khiển quét chùm tia	±2 V
Tỷ lệ giữa tín hiệu điều khiển và góc quay	0,33 V/°
Thời gian dịch chuyển giữa 2 điểm quét	2 ms
Khoảng cách giữa 2 điểm quét (Δ) lớn nhất	1 mm
Khoảng cách giữa 2 điểm quét (Δ) nhỏ nhất	0,1 mm
Diện tích vùng quét tối đa	4 cm ²
Diện tích vùng quét tối thiểu	1 mm ²
Biên dạng các vùng quét	- Hình vuông - chữ nhật - Hình tròn - elip - Hình tam giác cân - Hình thang cân - Hình thoi

Như vậy, bộ lái chùm tia cho thiết bị laser điều trị thẩm mỹ vi điểm đã được đo lường thông số kỹ thuật và kiểm nghiệm chế độ quét theo ma trận các điểm điều trị với nhiều vùng có biên dạng khác nhau. Thiết bị hoạt động ổn định trong thời gian dài với các thông số kỹ thuật được trình bày ở bảng 2. Các kết quả đạt được này sẽ giúp cho việc chủ động thiết kế chế tạo trong nước các thiết bị laser điều trị thẩm mỹ vi điểm.

Kết luận

Bộ quét chùm tia laser sử dụng trong các thiết bị laser điều trị thẩm mỹ vi điểm đã bước đầu được chế tạo thành công. Các thông số của hệ đã được ghi nhận: Tín hiệu điều khiển galvo mô tơ dạng tương tự ± 2 V, tỷ lệ giữa tín hiệu điều khiển mô tơ và góc quay $0,33$ V/°, thời gian dịch chuyển giữa hai điểm điều trị liền kề 2 ms, diện tích vùng quét tối đa 4 cm², khoảng cách giữa 2 điểm quét liền kề nhỏ nhất $0,1$ mm. Việc chế tạo thành công bộ quét chùm tia laser cho phép chủ động phát triển các phần mềm điều khiển đặc thù với việc thay đổi các thông số theo yêu cầu điều trị khác nhau, qua đó giúp cho quá trình điều trị được linh hoạt và hiệu quả hơn. Ngoài ra, việc chế tạo trong nước thiết bị cũng sẽ giúp giảm giá thành thiết bị so với nhập ngoại và chủ động trong công tác bảo trì, bảo dưỡng thiết bị.

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, Y. Li, X. Gu, et al. (2014), “Laser-induced breakdown spectroscopy application in environmental monitoring of water quality: A review”, *Environ. Monit. Assess.*, **186**(12), pp.8969-8980, DOI: 10.1007/s10661-014-4058-1.
- [2] G. Padmanabham, R. Bathe (2018), “Laser materials processing for industrial applications”, *Proceedings of The National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, **88**, pp.359-374, DOI: 10.1007/s40010-018-0523-5.
- [3] S.A. Ahmed, M. Mohsin, S.M.Z. Ali (2021), “Survey and technological analysis of laser and its defense applications”, *Defence Technology*, **17**(2), pp.583-592, DOI: 10.1016/j.dt.2020.02.012.
- [4] J.P. Dudeja (2018), “Laser application in apparel industry”, *International Journal of Advanced Scientific Technologies in Engineering and Management Sciences*, **4**(9), DOI: 10.13140/RG.2.2.15620.58243.
- [5] Q. Peng, A. Juzeniene, J. Chen, et al. (2008), “Lasers in medicine”, *Rep. Prog. Phys.*, **71**, DOI: 10.1088/0034-4885/71/5/056701.
- [6] J.T. Lin (2016), “Progress of medical lasers: Fundamentals and applications”, *Med. Devices Diagn. Eng.*, **2**(1), pp.36-41, DOI: 10.15761/MDDE.1000111.
- [7] A. Barbora, O. Bohar, A.A. Sivan, et al. (2021), “Higher pulse frequency of near-infrared laser irradiation increases penetration depth for novel biomedical applications”, *PLOS ONE*, **16**(1), DOI: 10.1371/journal.pone.0245350.
- [8] N.S. Haider, S. Thomas (2016), “Medical applications of laser instruments”, *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, **4**(6), pp.154-160.
- [9] D. Shah, N. Desai, R. Dhanak (2014), “Lasers in facial aesthetics - A review”, *Adv. Hum. Biol.*, **4**(3), pp.1-6.
- [10] M.M. Karabut, N.D. Gladkova, F.I. Feldstein, et al. (2010), “Use of a fractional laser photothermolysis in clinical practice”, *Sovremennyye Tehnologii Medicine*, **4**, pp.115-121 (in Russian).
- [11] J.U. Jang, S.Y. Kim, E.S. Yoon, et al. (2016), “Comparison of the effectiveness of ablative and non-ablative fractional laser treatments for early stage thyroidectomy scars”, *Archives of Plastic Surgery*, **43**(6), pp.575-581, DOI: 10.5999/aps.2016.43.6.575.
- [12] M.P. Goldman, R.A. Weiss, M.A. Weiss (2005), “Intense pulsed light as a nonablative approach to photoaging”, *Dermatol. Surg.*, **31**(9 Pt 2), pp.1179-1187, DOI: 10.1111/j.1524-4725.2005.31924.
- [13] W. Manuskiatti, R.E. Fitzpatrick, M.P. Goldman (1999), “Long-term effectiveness and side effects of carbon dioxide laser resurfacing for photoaged facial skin”, *J. Am. Acad. Dermatol.*, **40**(3), pp.401-411, DOI: 10.1016/s0190-9622(99)70489-5.
- [14] R.J. Schwartz, A.J. Burns, R.J. Rohrich, et al. (1999), “Long-term assessment of CO₂ facial laser resurfacing: Aesthetic results and complications”, *Plast. Reconstr. Surg.*, **103**(2), pp.592-601, DOI: 10.1097/00006534-199902000-00037.
- [15] M.P. Goldman, N. Marchell, R.E. Fitzpatrick (2000), “Laser skin resurfacing of the face with a combined CO₂/Er:YAG laser”, *Dermatol. Surg.*, **26**(2), pp.102-104, DOI: 10.1046/j.1524-4725.2000.98208.x.
- [16] D. Manstein, G.S. Herron, R.K. Sink, et al. (2004), “Fractional photothermolysis: A new concept for cutaneous remodeling using microscopic patterns of thermal injury”, *Lasers Surg. Med.*, **34**(5), pp.426-438, DOI: 10.1002/lsm.20048.
- [17] S.T. Alster, E.L. Tanzi, M. Lazarus (2007), “The use of fractional laser photothermolysis for the treatment of atrophic scars”, *Dermatol. Surg.*, **33**(3), pp.295-299, DOI: 10.1111/j.1524-4725.2007.33059.x.
- [18] M. Wanner, E.L. Tanzi, T.S. Alster (2007), “Fractional photothermolysis: Treatment of facial and nonfacial cutaneous photodamage with a 1,550-nm erbium-doped fiber laser”, *Dermatol. Surg.*, **33**(3), pp.23-28, DOI: 10.1111/j.1524-4725.2007.33003.x.
- [19] J. Rietdorf, E.H.K. Stelzer (2006), *Handbook of Biological Confocal Microscopy*, 3rd Edition, Springer Science and Business Media, New York, 985pp.