

Chế tạo laser quang sợi công suất cao - Báo cáo số 1: Nghiên cứu phát triển mạch điều khiển bơm laser diode công suất cao

Ngô Hải Long, Lưu Hoàng Đạt, Đỗ Việt Hoàng, Lê Văn Bình, Cao Khắc Thiện, Hoàng Ngọc Nhân, Bành Quốc Tuấn*

Phòng Thí nghiệm Nghiên cứu Phát triển Ứng dụng Fiber Laser, Viện Ứng dụng Công nghệ,
25 Lê Thánh Tông, phường Phan Chu Trinh, quận Hoàn Kiếm, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 25/7/2024; ngày chuyển phản biện 29/7/2024; ngày nhận phản biện 6/8/2024; ngày chấp nhận đăng 15/8/2024

Tóm tắt:

Nguồn laser quang sợi công suất cao đang được sử dụng rất phổ biến trong công nghiệp gia công kim loại. Việc chế tạo nguồn laser quang sợi công suất cao cần nghiên cứu, chế tạo, tích hợp nhiều thành phần quan trọng cấu thành nên nguồn như: 1) Hệ bơm laser diode công suất cao và bộ cộng hưởng laser; 2) Hệ làm mát tản nhiệt cho bơm laser diode và nguồn điện cao áp; 3) Hệ điều khiển bơm laser diode và cảm biến; 4) Phần mềm điều khiển, theo dõi, giám sát hoạt động nguồn laser... Để điều khiển nguồn laser quang sợi có thể hoạt động được ở các mức công suất khác nhau, các chế độ khác nhau thì mạch điều khiển bơm laser diode đóng vai trò quan trọng. Nằm trong lộ trình chế tạo nguồn laser quang sợi công suất cao tại Việt Nam, trong báo cáo thứ nhất này, chúng tôi trình bày nghiên cứu, thiết kế, chế tạo bo mạch điều khiển bơm laser diode công suất cao để có thể điều khiển công suất laser đầu ra trong các chế độ hoạt động liên tục và chế độ xung. Kết quả thực nghiệm cho thấy, bo mạch hoạt động hiệu quả, ổn định, điều khiển được các bơm laser diode khác nhau của một số nhà cung cấp chính trên thị trường như: Max Photonics, Raycus, BWT...

Từ khóa: diode bơm, điều khiển laser, laser, laser công suất cao.

Chỉ số phân loại: 2.2, 2.3

High-power fibre laser fabrication - 1st report: Research and develop a driver board for high-power laser diode pump

Hai Long Ngo, Hoang Dat Luu, Viet Hoang Do, Van Binh Le, Khắc Thiện Cao, Ngọc Nhân Hoàng, Quốc Tuấn Bành*

Fiber Laser Lab., National Center for Technological Progress, 25 Le Thanh Tong Street, Phan Chu Trinh Ward, Hoan Kiem District, Hanoi, Vietnam

Received 25 July 2024; revised 6 August 2024; accepted 15 August 2024

Abstract:

High-power fibre lasers are widely used in the metal processing industry. The fabrication of a high-power fibre laser source requires the research, development, and integration of several key parts, such as: 1) High-power laser diode pumps and laser resonators; 2) Cooling for laser diode pumps and high voltage direct current (DC) power supply; 3) Control systems for laser diode pumps and sensors; 4) Software for controlling, monitoring, and supervising the laser source, etc. To control the fibre laser to operate at various power levels and modes, the control board for the laser diode pumps plays an essential role. As part of the roadmap to develop a high-power fibre laser in Vietnam, in this first report, we present the research, design, and fabrication of a high-power laser diode pump control board that can control the laser output power in both continuous and pulse-operating modes. Experimental results show that the board operates efficiently and stably, controlling different diode laser pumps from major suppliers on the market, such as Max Photonics, Raycus, BWT, etc.

Keywords: high-power laser, laser, laser diode pump, laser driver.

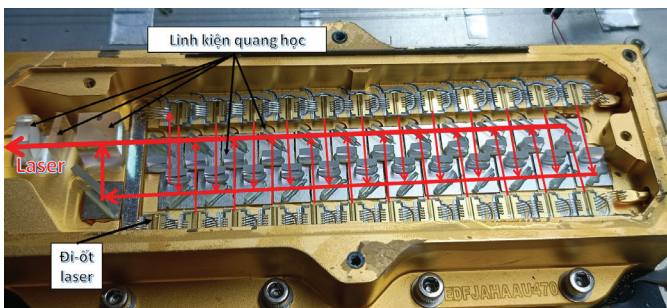
Classification numbers: 2.2, 2.3

*Tác giả liên hệ: Email: bqquan@most.gov.vn

1. Tổng quan

Công nghệ laser quang sợi đã có những bước phát triển vượt bậc trong thập kỷ qua. Hiện nay, các nguồn laser quang sợi thương mại ở mức công suất cao (kilowatts) đã và đang trở thành một công cụ rất hữu ích trong các cơ sở sản xuất, nhà máy, ở nhiều lĩnh vực khác nhau từ công nghiệp, quốc phòng... [1-2]. Chế tạo nguồn laser quang sợi công suất cao là rất cần thiết trong việc tạo ra các máy công cụ gia công kim loại bằng laser cũng như chủ động trong việc bảo trì, sửa chữa và giám sát máy. Việc chế tạo nguồn laser quang sợi công suất cao cần nghiên cứu, chế tạo, tích hợp nhiều thành phần quan trọng cấu thành nên nguồn như: 1) Hệ bơm laser diode công suất cao và bộ cộng hưởng laser; 2) Hệ làm mát tản nhiệt cho bơm laser diode và nguồn điện cao áp; 3) Hệ điều khiển bơm laser diode và cảm biến; 4) Phần mềm điều khiển, theo dõi, giám sát hoạt động nguồn laser. Trong đó, hệ điều khiển bơm laser diode và cảm biến là một phần quan trọng để điều khiển nguồn laser quang sợi có thể hoạt động được ở các mức công suất khác nhau, các chế độ khác nhau như: chế độ xung, chế độ liên tục. Khi chế tạo nguồn laser quang sợi công suất cao thì nhất thiết phải chế tạo được bộ điều khiển bơm laser diode. Do đó, việc nghiên cứu, chế tạo hệ điều khiển bơm laser diode, tiến tới làm chủ công nghệ sản xuất nguồn laser là rất cần thiết trong định hướng phát triển nền công nghiệp sản xuất và dịch vụ tại Việt Nam.

Để đạt được mức công suất cao, các nguồn laser quang sợi thường sử dụng các bơm laser diode để làm nguồn phát kích hoạt buồng cộng hưởng laser để đạt mức công suất lớn theo yêu cầu. Hình 1 mô tả cấu tạo của một bơm laser diode thương mại thông dụng. Trong đó, các khối diode bán dẫn được sử dụng để chuyển đổi điện sang quang ở một số bước sóng thông dụng, thường là 915 nm hoặc 976 nm [3-5]. Thông qua các linh kiện quang bao gồm gương, thấu kính, tấm phân cực, tia laser sẽ được đưa ra ngoài thông qua việc dẫn tia laser bằng sợi quang, thông thường là sợi quang đa mode để có thể dễ dàng đưa vào bộ cộng hưởng laser trong nguồn laser quang sợi.



Hình 1. Mô hình cấu tạo bơm laser diode thương mại.

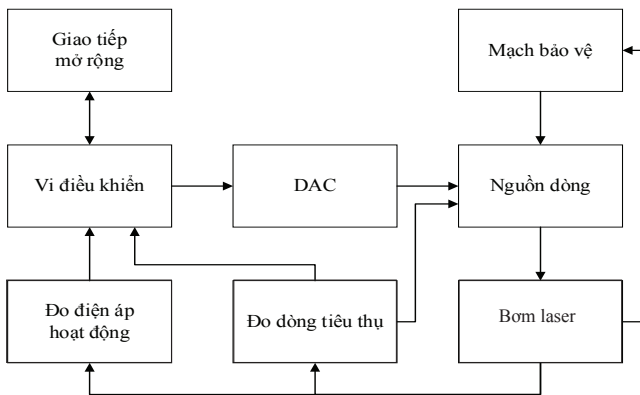
Nằm trong lộ trình chế tạo nguồn laser quang sợi công suất cao tại Việt Nam, trong báo cáo thứ nhất này, chúng tôi trình bày nghiên cứu, thiết kế, chế tạo hệ thống mạch

điều khiển bơm laser diode công suất cao, được đặt tên là *VLS-001*, để có thể điều khiển công suất laser đầu ra trong các chế độ hoạt động liên tục và chế độ xung. Kết quả thực nghiệm cho thấy, hệ thống mạch điều khiển hoạt động hiệu quả, ổn định, điều khiển được các bơm laser diode khác nhau của một số nhà cung cấp chính trên thị trường như: Raycus, BWT, và có những ưu điểm vượt trội hơn khi so sánh với mạch điều khiển thương mại tương đương của hãng CellSystems (Nhật Bản). Kết quả của nghiên cứu mở ra việc phát triển mạch điều khiển cho toàn bộ nguồn laser quang sợi, từ đó làm cơ sở xây dựng phần mềm giám sát, điều khiển laser quang sợi công suất cao. Bên cạnh đó, việc phát triển mạch điều khiển bơm laser diode cho phép việc chủ động kiểm soát các nguồn laser quang sợi thương mại công suất cao hiện có trên thị trường, giảm sự phụ thuộc vào các hãng sản xuất cũng như mở ra các ứng dụng, dịch vụ khác.

2. Thiết kế, chế tạo bảng mạch điều khiển bơm laser diode

Cấu tạo bên trong của bơm laser bao gồm các diode laser được mắc nối tiếp với nhau (hình 1). Khi được cung cấp năng lượng điện đủ ngưỡng, các diode này sẽ phát ra tia laser, sau đó tia laser này được hệ thấu kính đưa tới đầu ra chung của bơm laser. Các diode laser này có ngưỡng kích hoạt từ vài miliampe đến vài ampe tùy theo công suất. Một bơm laser công suất cao sẽ cần một nguồn năng lượng điện đủ lớn để kích hoạt được toàn bộ các laser diode. Bộ điều khiển laser (laser driver) cần hoạt động ở chế độ dòng điện lớn và điều chỉnh được các thông số với độ chính xác cao, giúp bơm laser hoạt động chính xác và hiệu quả. Để chế tạo một mạch điều khiển bơm laser công suất cao hoạt động ổn định, các chỉ tiêu kỹ thuật sau đây được đặt ra: dòng điện định mức chảy qua bơm laser diode: tối đa 20A; Không chế dòng bơm với độ ổn định: 200 mA (1% toàn dải); chế độ hoạt động: liên tục hoặc xung; tần số hoạt động ở chế độ xung: 200-5000 Hz; độ rộng xung: 10-100%; có bảo vệ ngắn mạch, quá dòng cho bơm laser diode.

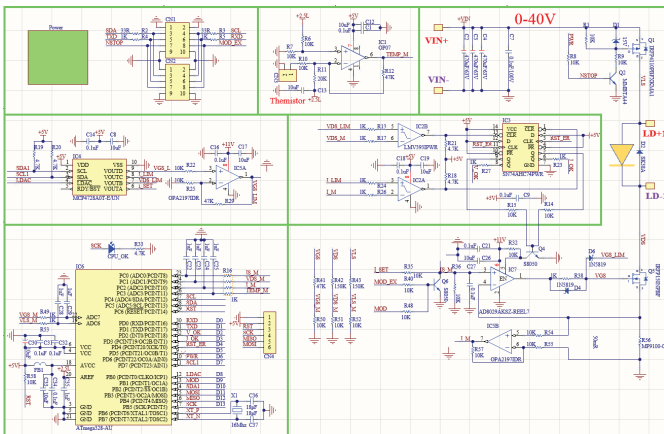
Dựa trên các chỉ tiêu kỹ thuật đã được xác định, hình 2 trình bày sơ đồ khối của board mạch điều khiển bơm laser công suất cao. Khối nguồn cung cấp điện áp một chiều phù hợp cho bơm laser và chuyển đổi để tạo ra các nguồn thứ cấp cho các thành phần khác trong hệ thống. Khối vi điều khiển chịu trách nhiệm điều khiển quá trình giao tiếp với các thiết bị bên ngoài và điều phối hoạt động của hệ thống, thu thập thông tin về dòng điện và điện áp của laser để đưa ra các đánh giá và điều chỉnh chế độ hoạt động. Các mạch bảo vệ trong hệ thống là rất quan trọng, bảo vệ bơm laser khỏi các sự cố quá dòng hoặc quá áp, đảm bảo hoạt động an toàn và ổn định. Khối giao tiếp mở rộng cho phép kết nối với các thiết bị khác hoặc các module điều khiển để thực hiện trao đổi dữ liệu và điều khiển đồng bộ. Khối DAC chuyển đổi tín hiệu số thành tín hiệu điện áp tương tự để điều khiển khối nguồn dòng điện.



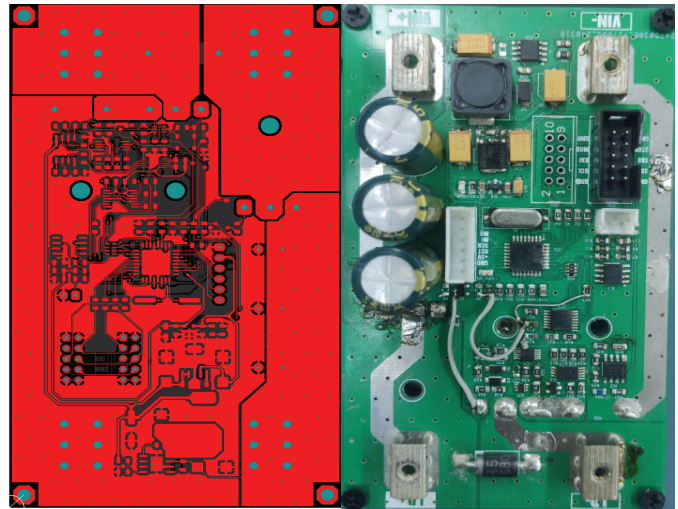
Hình 2. Sơ đồ khối của bo mạch VLS-001.

Để đo lường chính xác dòng điện tiêu thụ, khối đo dòng sẽ chuyển đổi mức biến thiên của dòng điện trong bơm laser thành tín hiệu điện áp tương tự. Khối đo điện áp chuyển đổi các giá trị điện áp ở các điểm cần đo về dải điện áp phù hợp với ADC của vi điều khiển. Cuối cùng, khối nguồn dòng điện tạo ra và điều khiển nguồn dòng với độ chính xác 1% (200 mA), đảm bảo dòng điện cung cấp cho bơm laser ổn định và chính xác.

Hình 3 trình bày sơ đồ nguyên lý của mạch điều khiển board mạch VLS-001. Khối vi điều khiển sử dụng Atmega328 để điều khiển toàn bộ các quá trình của hệ thống. Bên cạnh đó, các linh kiện thụ động như mạch ổn định dao động thạch anh ngoài, mạch reset và mạch cung cấp ổn định nguồn cũng được tích hợp. Nguồn điện cấp cho bơm laser được điều chỉnh thông qua IC khuếch đại thuật toán, cụ thể là điều chỉnh độ mở của MOSFET Q5. Tín hiệu sụt áp trên R56 được truyền trực tiếp vào IC khuếch đại thuật toán để thực hiện một vòng điều khiển kín với tốc độ cao. Tín hiệu cài đặt giá trị dòng điện cũng được đưa vào IC này để điều khiển chính xác. Do MOSFET Q5 hoạt động với dòng điện và điện áp lớn, đồng thời đóng cắt ở tần số cao, nó sinh nhiệt nhanh chóng và cần được làm mát hiệu quả để duy trì hoạt động chính xác. Hình 4 thể hiện Layout PCB và mạch đã được gia công linh kiện.



Hình 3. Sơ đồ nguyên lý mạch điều khiển bo mạch VLS-001.



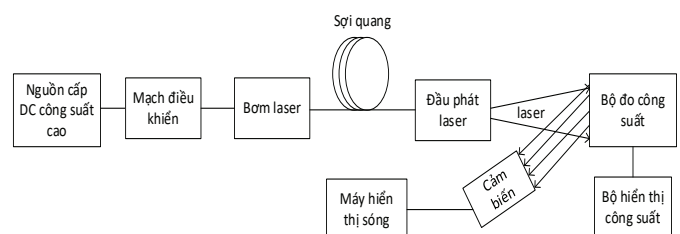
Hình 4. Layout PCB và gia công linh kiện.

3. Kết quả

3.1. Phương pháp và sơ đồ đo

Để đảm bảo hoạt động ở công suất lớn và nguồn cấp ổn định, mạch điều khiển VLS-001 được cấp nguồn từ nguồn chuẩn DC công suất cao HP/Agilent 6012B 1000 W với điện áp có thể điều chỉnh trong khoảng 0-60V/0-50A [6]. Đầu ra mạch điều khiển sẽ điều khiển trực tiếp một bơm laser K915FA5RN - 70,00 W của BWT Beijing Ltd được gắn với đầu nối laser ra FFC-10522F30ENA-3 [7]. Laser phát ra sẽ được thu bằng bộ đo công suất Ophir 7Z02734 FL400A-BB-50 [8] và hiển thị với Ophir Nova II [9]. Chế độ xung đầu ra của bơm và giá trị điện áp cấp sẽ được kiểm tra bằng cảm biến Thorlabs DET08CFC/M [10] và máy hiện sóng (Oscilloscope) Moku:Go của Liquid Instruments [11].

Để so sánh khả năng hoạt động thực tế của mạch điều khiển VLS-001, một bộ điều khiển thương mại Cell Systems LCV-3020 [12] được sử dụng đồng thời và kiểm tra với các chế độ tương tự. Ngoài ra, để đảm bảo mạch điều khiển phát triển là phù hợp cho các thiết bị bơm laser trong các nguồn laser thương mại, mạch VLS-001 cũng được sử dụng để điều khiển một bơm laser 300 W tích hợp sẵn trong nguồn laser RFL-C1500X [13] của Công ty TNHH Công nghệ Laser sợi quang Wuhan Raycus, với hai chế độ CW và chế độ xung. Sơ đồ hệ thực nghiệm được mô tả như hình 5. Bảng 1 thể hiện các điều kiện thực nghiệm với các thí nghiệm nêu trên.



Hình 5. Sơ đồ hệ đo với bơm laser diode BWT K915FA5RN - 70.00W.

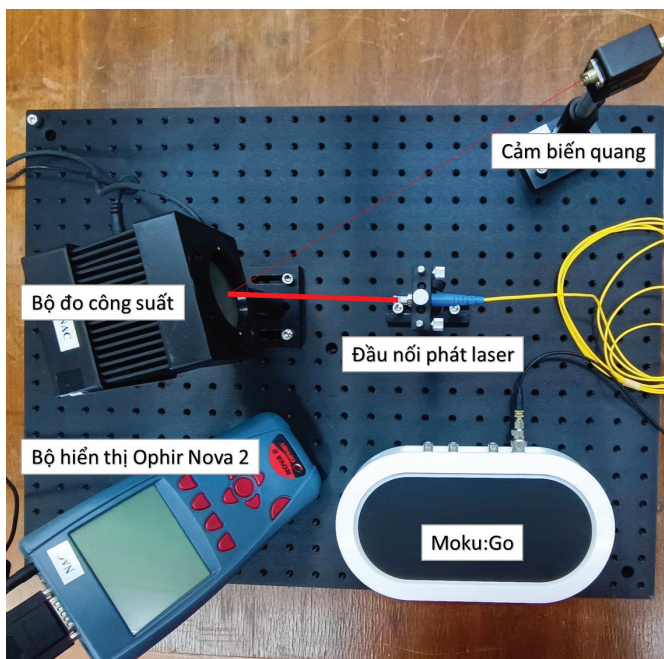
Bảng 1. Điều kiện thực nghiệm.

*Nguồn cấp	
Điện áp cấp	: 220 V/50-60 Hz
Điện áp ra DC	: 13 V-12,4 A/ 34 V-20 A
*Độ suy hao	
Suy hao mỗi hàn	: 0,00 dB*
Hiệu suất chuyển đổi điện - quang	: 42-48%
Hiệu suất chuyển đổi quang - quang	: ~ 60-70%
*Môi trường	
Nhiệt độ	: 29°C
Độ ẩm	: 41%
Áp suất	: 1017 hPa

* Kết quả suy hao được kiểm tra bằng máy hàn Fujikura FSM-100P+

3.2. Kết quả thực nghiệm

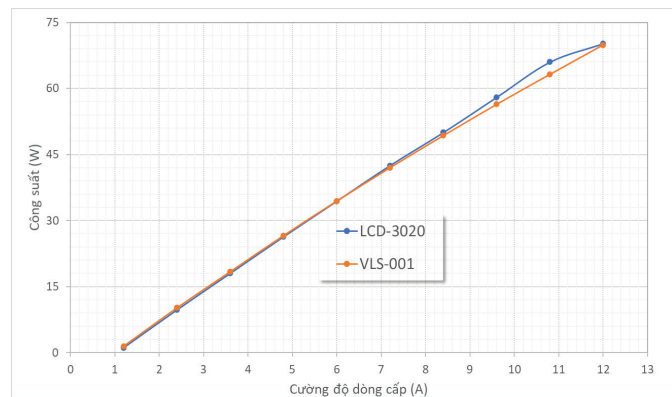
Thực nghiệm so sánh hoạt động của 2 bộ điều khiển tương đương: Để chứng minh khả năng hoạt động và so sánh kết quả với một bộ điều khiển đã được thương mại, các thực nghiệm điều khiển ở các mức công suất khác nhau: từ 10-100% tương ứng với dòng cấp từ 1,2 A tới 12 A với bơm laser diode *K915FA5RN - 70,00 W* của Hãng BWT Beijing đã được thực hiện. Hình 6 là hình ảnh hệ thống đo dữ liệu thực nghiệm. Để kiểm tra và so sánh độ ổn định giữa hai thiết bị, cả hai sẽ cùng điều khiển một bơm laser diode trong cùng một khoảng thời gian là 15 phút ở mức dòng 12 A (tương đương 100% công suất). Các điều kiện thực nghiệm và kết quả được thể hiện trong bảng 2, hình 7 và hình 8 dưới đây.



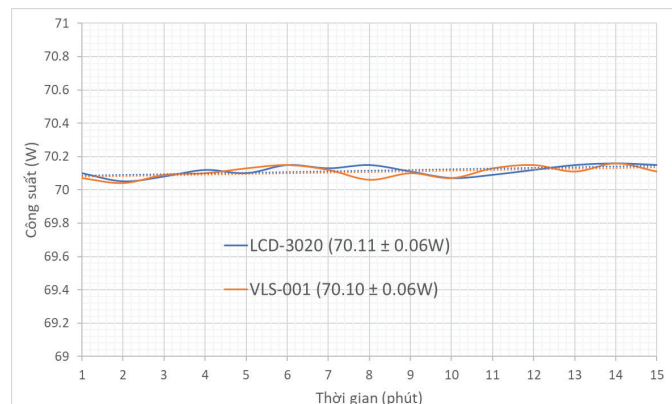
Hình 6. Sơ đồ thực nghiệm hệ thống điều khiển bơm laser của BWT.

Bảng 2. Thông số thực nghiệm.

*Nguồn cấp	
Điện áp cấp vào	: 220 V/50-60 Hz
Điện áp nguồn cấp	: 13 V-12,4 A
*Điều kiện thực nghiệm 1	
Công suất thay đổi	: 1,2 A-12 A (10-100%)
Hiệu suất chuyển đổi điện - quang	: 48%
*Điều kiện thực nghiệm 2	
Công suất	: 100%
Thời gian	: 15 phút



Hình 7. Kết quả đo công suất đầu ra theo dòng điện cấp từ hai bộ điều khiển LCV-3020 và VLS-001.



Hình 8. Kết quả đo ổn định công suất đầu ra theo thời gian từ hai bộ điều khiển LCV-3020 và VLS-001.

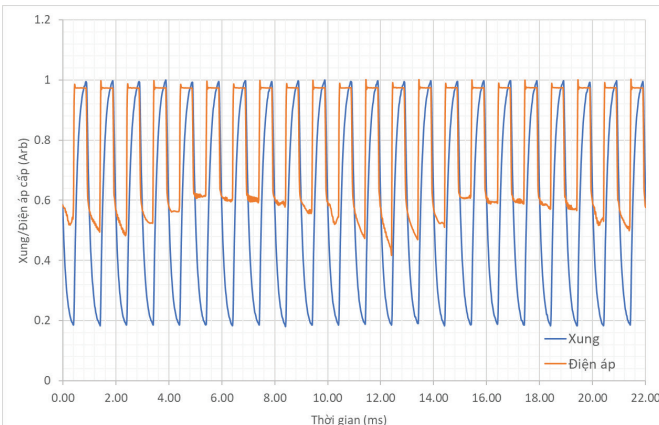
Theo các kết quả thu được, giá trị công suất đầu ra theo các mức thay đổi từ 1,2 đến 12 A (10-100% công suất bơm đi-ốt laser) của mạch *VLS-001* đạt kết quả tương đương với bộ điều khiển thương mại của CellSystems. Độ ổn định công suất của mạch *VLS-001* cũng ở mức tương đương 70,10±0,06 W (so với 70,11±0,06 W của *LCV-3020* CellSystems).

Với chế độ xung, các điều kiện thử nghiệm kiểm tra hai hệ thống được thể hiện như trong bảng 3. Các kết quả thu được thể hiện như trong hình 9 (điều khiển với *LCV-3020*)

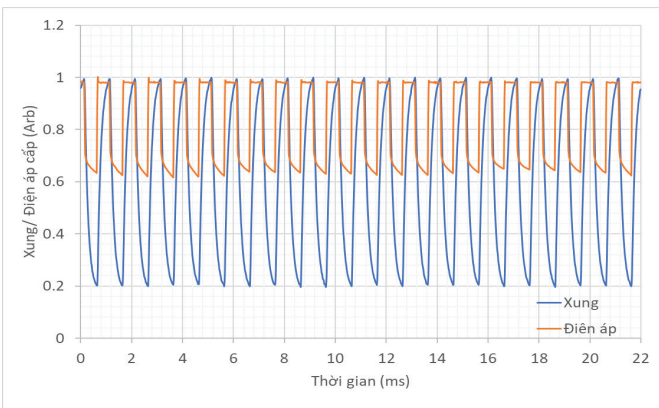
và hình 10 (điều khiển với *VLS-001*). Điện áp cấp từ mạch *VLS-001* cho độ ổn định tốt hơn so với hệ thống của CellSystems và đầu ra công suất laser đạt kết quả tương đương ở mức xung 1 kHz. Một ưu điểm nổi bật hơn là mạch *VLS-001* có thể điều khiển ở mức xung cao hơn (5 kHz - hình 11) với độ ổn định tương đương, trong khi đó với thiết bị CellSystems *LCV-3020* chỉ có thể đạt tới mức xung tối đa là 1 kHz. Giới hạn hiện tại của khả năng điều khiển xung là do thời gian đáp ứng của bơm laser.

Bảng 3. Thông số thực nghiệm.

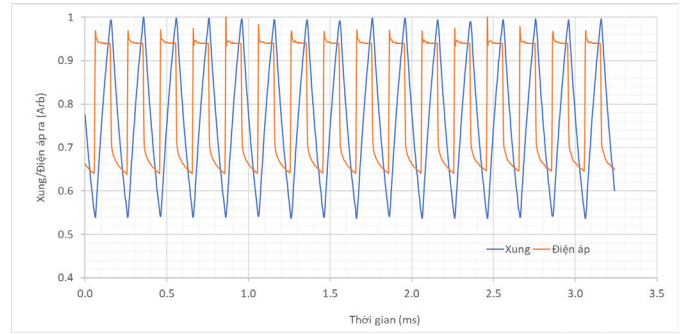
*Nguồn cấp	
Điện áp cấp vào	: 220 V/50-60 Hz
Điện áp nguồn cấp	: 13 V-12,4 A
*Điều kiện thực nghiệm 3	
Điện áp cấp	: 12 V-7 A
Hiệu suất chuyển đổi điện - quang	: 48%
Chế độ xung	: 1 kHz - Duty 50%
*Điều kiện thực nghiệm 2	
Điện áp cấp	: 12 V-7 A
Chế độ xung	: 5 kHz



Hình 9. Kết quả đo xung laser từ cảm biến và điện áp ra bộ điều khiển LCV-3020 ở tần số 1 kHz.

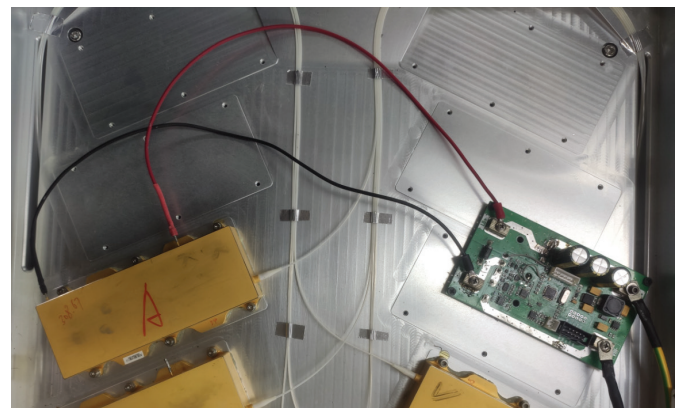


Hình 10. Kết quả đo xung laser từ cảm biến và điện áp ra bộ điều khiển VLS-001 ở tần số 1 kHz.

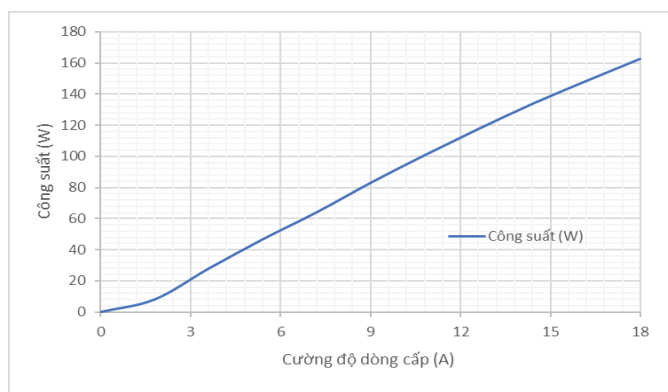


Hình 11. Kết quả đo xung laser từ cảm biến và điện áp ra bộ điều khiển VLS-001 ở tần số 5 kHz.

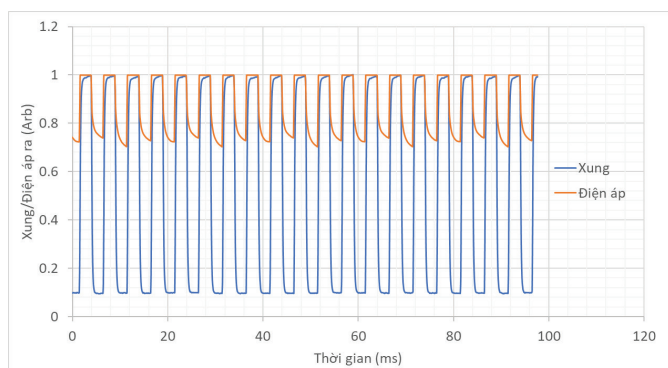
Thực nghiệm điều khiển nguồn laser thương mại: Hình 12 là hệ thống thực nghiệm điều khiển hoạt động của bơm laser diode của Công ty TNHH Công nghệ Laser sợi quang Wuhan Raycus trong nguồn laser RFL-C1500X. Kết quả thực nghiệm được thể hiện như trong biểu đồ hình 13 dưới đây. Điện áp cấp vào bơm laser diode ở mức 34 V-18 A, thay đổi từ 1,8 tới 18 A (10-100%) công suất trong chế độ liên tục (CW) và 34 V-7 A trong chế độ xung với tần số xung 200-5000 Hz. Theo đó, với công suất bơm laser diode tối đa là 300 W, công suất tối đa phát qua hệ quang học và ra tại đầu QBH đạt mức $161,83 \pm 1$ W (ở mức phát tối đa 100%) với hiệu suất chuyển đổi quang - quang ở mức $\sim 54,13\%$. Tại chế độ xung, mạch *VLS-001* có thể đảm bảo được phát xung ở tần số 200-5000 Hz như thể hiện tại hình 14, hình 15. Vấn đề hiệu suất chuyển đổi thấp là do sự suy hao khi ghép bơm laser diode với bộ cộng hưởng của nguồn laser, và do hiệu suất hấp thụ các photon bơm laser với sợi quang hoạt tính của bộ cộng hưởng laser. Hoạt động của mạch điều khiển không ảnh hưởng đến hiệu suất chuyển đổi quang-quang, mà chỉ ảnh hưởng đến sự phản hồi tia bức xạ laser so với sự hoạt động của bơm laser đầu vào.



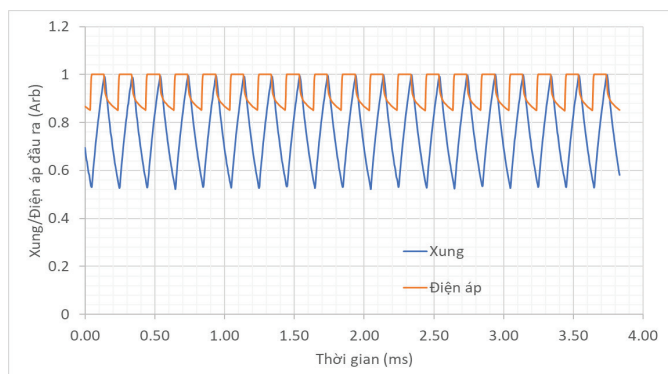
Hình 12. Sơ đồ thực nghiệm hệ thống điều khiển bơm laser của Công ty TNHH Công nghệ Laser sợi quang Wuhan Raycus.



Hình 13. Kết quả công suất đầu ra bơm laser diode của Công ty TNHH Công nghệ Laser sợi quang Wuhan Raycus với mạch điều khiển VLS-001.



Hình 14. Kết quả đo xung laser từ cảm biến và điện áp ra bơm laser diode của Công ty TNHH Công nghệ Laser sợi quang Wuhan Raycus với bộ điều khiển VLS-001 ở tần số 200 Hz.



Hình 15. Kết quả đo xung laser từ cảm biến và điện áp ra bơm laser diode của Công ty TNHH Công nghệ Laser sợi quang Wuhan Raycus với bộ điều khiển VLS-001 ở tần số 5 kHz.

4. Kết luận

Bài báo trình bày thiết kế của bảng mạch điều khiển bơm laser công suất cao *VLS-001* và quá trình thực nghiệm sử dụng mạch *VLS-001* để điều khiển bơm laser của BWT và bơm trong nguồn laser của Công ty TNHH Công nghệ Laser sợi quang Wuhan Raycus. Khi thử nghiệm với bơm laser của BWT, độ ổn định công suất của mạch *VLS-001* đạt mức $70,10 \pm 0,06$ W, tương đương với $70,11 \pm 0,06$ W của sản phẩm thương mại hóa

LCV-3020 của CellSystems. Ở chế độ xung, điện áp cấp từ mạch *VLS-001* cho độ ổn định tốt hơn so với hệ thống của CellSystems và đầu ra công suất laser đạt kết quả tương đương ở mức xung 1 kHz. Hơn nữa, *VLS-001* có khả năng điều khiển ở mức xung lên đến 5 kHz với độ ổn định tương đương, trong khi thiết bị CellSystems *LCV-3020* chỉ đạt mức xung tối đa 1 kHz. Khi thử nghiệm với bơm trong nguồn laser của Wuhan Raycus, *VLS-001* có khả năng điều khiển laser đầu ra ở các mức công suất từ nhỏ đến lớn và hoạt động ở chế độ xung với tần số từ 200-5000 Hz cũng như chế độ liên tục. Những kết quả này chứng minh rằng bảng mạch *VLS-001* hoạt động ổn định, hiệu quả và đáp ứng đầy đủ các yêu cầu kỹ thuật đề ra. Kết quả của nghiên cứu mở ra việc phát triển mạch điều khiển cho toàn bộ nguồn laser quang sợi và từ đó làm cơ sở xây dựng phần mềm giám sát, điều khiển laser quang sợi công suất cao, là tiền đề quan trọng trong quá trình chế tạo nguồn laser quang sợi công suất cao tại Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] E.K.A. Jr (2023), *Principles of Laser Materials Processing: Developments and Applications*, John Wiley & Sons, 819pp.
- [2] S. Yang, L. Zhang, Z. Zhu, et al. (2023), "Special issue on fiber laser and their applications", *Photonics*, **10**(10), DOI: 10.3390/photonics10101149.
- [3] Z. Li, R. Huang, S. Zheng, et al. (2024), "Dual-ended pumped high-power 915 nm Pr^{3+} : LiYF_4 laser and power scaling under energy levels cascade", *Infrared Physics & Technology*, **137**, DOI: 10.1016/j.infrared.2024.105166.
- [4] G. Yang, Y. Liu, Y. Zhao, et al. (2024), "Efficient power scaling of broad-area laser diodes from 915 to 1064 nm", *High-Power Diode Laser Technology XXII*, **12867**, pp.235-241, DOI: 10.1117/12.3002642.
- [5] D.A. Davydov, A.A. Rybaltovsky, S.S. Aleshkina, et al. (2023), "A ytterbium-doped narrow-bandwidth randomly distributed feedback laser emitting at a wavelength of 976 nm", *Photonics*, **10**(8), DOI: 10.3390/photonics10080951.
- [6] Keysight (2023), "User manual 6010A, 6011A, 6012B, 6015A, 6023A, 6028A User's Guide", <https://www.keysight.com/vn/en/assets/9018-01079/user-manuals/9018-01079.pdf>, accessed 4 June 2024.
- [7] BWT (2023), "915nm 70W high power fiber coupled diode laser", <https://www.bwt-laser.com/sale-2157341-915nm-70w-high-power-fiber-coupled-diode-laser.html>, accessed 4 June 2024.
- [8] Ophir (2023a), "Broadband 400 W fan-cooled thermopile sensor with 50 mm aperture", <https://www.ophiropt.com/en/f/f400a-bb-50-thermopile-sensor>, accessed 4 June 2024.
- [9] Ophir (2023b), "Nova II monochrome LCD laser power & energy meter", <https://www.ophiropt.com/en/f/nova-2-power-meter>, accessed 4 June 2024.
- [10] Thorlabs (2023), *DET08CFC/M - 5 GHz (Max) InGaAs FC/PC-Coupled Photodetector; 800 - 1700 nm, M4 Tap*, <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=DET08CFC/M#ad-image-0>, accessed 4 June 2024.
- [11] Liquid Instruments (2023), *Moku:Go*, <https://www.liquidinstruments.com/resources/supporting-material/product-documentation/>, accessed 4 June 2024.
- [12] L. Cellsystem Co. (2023), "Product/製品情報", https://www.cellsystem.co.jp/prod_en.html, accessed 4 June 2024.
- [13] Wuhan Raycus Fiber Laser Technologies Co., Ltd. (2023), "Data Download RFL-C1500X (CW laser) [user manual]", <https://en.raycuslaser.com/index/data/tid/381.html>, accessed 4 June 2024.