

Khảo sát chế độ đơn mode laser sợi quang công suất cao dùng trong máy cắt kim loại công nghiệp

Đỗ Thanh Tùng*

Viện Vật lý kỹ thuật, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, 17 Hoàng Sâm, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam.

*Tác giả liên hệ: tungitmo@gmail.com

Nhận bài: 17/5/2024; Hoàn thiện: 10/11/2024; Chấp nhận đăng: 12/12/2024; Xuất bản: 25/12/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.100.2024.98-105>

TÓM TẮT

Laser sợi quang công suất cao đã chứng minh được tiềm năng lớn trong các lĩnh vực công nghiệp, y học, hàng không vũ trụ, quốc phòng và nhiều lĩnh vực khác. Sử dụng chế độ đơn mode sợi quang có các ưu thế như chất lượng chùm tia tốt, công suất cao, độ ổn định và hiệu quả cao. Do vậy, laser sợi quang công suất cao chế độ đơn mode đang được ứng dụng trong việc chế tạo và gia công các chi tiết tinh vi. Sợi quang hoạt tính pha tạp đất hiếm ytterbium (Yb^{3+}) được sử dụng làm môi trường khuếch đại chủ yếu và tạo ra những nguồn phát laser có công suất > 200 W hiện nay. Mục đích của bài báo này là mô phỏng phân bố cường độ mode LP sợi quang chế độ đơn mode, phân tích các thông số ảnh hưởng đến công suất đầu ra của laser sợi quang công suất cao như chiết suất, đường kính lõi, độ dài sợi quang, sơ đồ bơm, chất lượng chùm tia M2. Từ đó lựa chọn các đặc tính tối ưu cho sợi quang chế độ đơn mode trong ứng dụng máy laser cắt kim loại chuyên dụng.

Từ khóa: Laser sợi quang; Công suất cao; Đơn mode; Pha tạp đất hiếm; Pha tạp Yb^{3+} .

1. MỞ ĐẦU

Laser sợi quang từ lâu đã được biết đến và ứng dụng nhiều trong công nghiệp, nhất là các lĩnh vực cần sử dụng công suất cao như cắt, hàn, khắc [1, 2],... Điều này là do độ chính xác của tia laser so với các công nghệ khác. Các vật liệu cắt bằng tia laser sẽ ít gây ra hiệu ứng không mong muốn tại vị trí cắt như bavaria, cong, vênh hay sai số, từ đó mang lại sản phẩm chất lượng. Các ưu điểm khác có thể kể đến như chất lượng chùm tia tốt, độ ổn định cao, nhỏ gọn, giá thành hợp lý.

Sợi quang có thể được sử dụng như một buồng cộng hưởng quang học, để khuếch đại các photon cùng pha, tạo ra chùm tia laser kết hợp. Cấu trúc lõi của sợi quang dạng này được pha tạp các nguyên tố đất hiếm như Erbium (Er), Ytterbium (Yb), Thulium (Tm), tùy thuộc vào yêu cầu bước sóng đầu ra khác nhau [3-5]. Do mỗi nguyên tố đất hiếm sẽ có mức năng lượng kích thích và phát xạ năng lượng khác nhau. Sợi quang đơn mode mang lại những ưu điểm như hạn chế nhiễu xạ, định hướng cao. Dù chỉ có tiết diện nhỏ, nhưng laser sợi quang đơn mode vẫn đủ khả năng xử lý công suất cao, phù hợp cho các thiết bị cắt kim loại chuyên dụng [6]. Tuy nhiên, những nghiên cứu chuyên sâu về chế độ đơn mode, tối ưu các thông số sợi quang và công suất bơm, để có công suất đầu ra cũng như chất lượng chùm tia theo yêu cầu, là không có hoặc không đầy đủ.

Mục đích của bài báo này là khảo sát phân bố cường độ mode LP của sợi quang pha tạp Yb Yb^{3+} , dưới dạng mô phỏng 2D (mục 2, 3). Các yếu tố ảnh hưởng đến công suất laser và chất lượng chùm tia M2 như chiều dài sợi quang, chiết suất lõi sợi, lõi phủ, sơ đồ bơm công suất sẽ được phân tích và mô phỏng toán học (mục 4).

2. MÔ PHỎNG CHẾ ĐỘ ĐƠN CỦA LASER SỢI QUANG CÔNG SUẤT CAO

Chúng tôi nghiên cứu sự thay đổi trong phân bố cường độ của các chế độ phân cực tuyến tính đối với chỉ số khúc xạ của sợi quang. Như đã biết, các mode của sợi quang laser thể hiện sự phân bố của điện trường truyền dọc theo trục của sợi quang [5]. Chiết suất hiệu dụng n_{eff} luôn thỏa mãn điều kiện $n_2 < n_{eff} < n_1$, trong đó n_1 và n_2 lần lượt là chiết suất của lõi và lớp bọc của sợi quang. Hằng số lan truyền chuẩn hóa được mô tả bằng công thức [5].

$$\beta = \frac{n_{eff}^2 - n_2^2}{NA^2} \quad (1)$$

Chế độ truyền đặc trưng trong sợi quang được biểu thị bằng tham số tần số chuẩn hóa V , phụ thuộc vào bước sóng lan truyền bởi:

$$V = \frac{2\pi \cdot NA \cdot a}{\lambda} \quad (2)$$

với

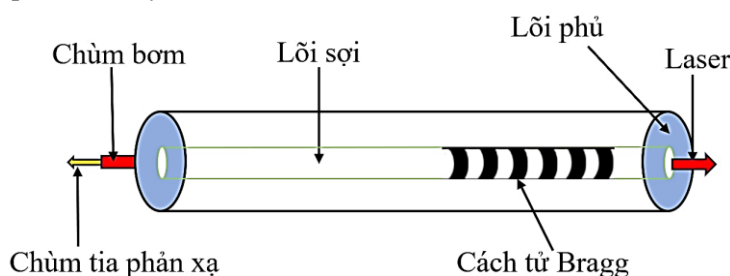
$$NA = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (3)$$

trong đó, a là bán kính lõi sợi quang, NA là khẩu độ số sợi quang.

Laser quang sợi pha tạp đất hiếm thường sử dụng các bước sóng 1064 nm trong các ứng dụng cắt kim loại trong công nghiệp [1, 2]. Khi hoạt động ở chế độ đơn mode của laser sợi quang pha tạp Yb^{3+} , đường kính lõi thường nằm trong khoảng từ 10 đến 30 μm với công suất có thể lên tới hàng kilowatt [7]. Người ta biết rằng với kích thước lõi của sợi quang, khi $V \leq 2.405$, sợi quang luôn hỗ trợ truyền sóng đơn mode và khi $V > 2.405$, sợi quang luôn hỗ trợ truyền sóng đa mode [5]. Từ phương trình (2), bán kính của sợi quang có thể được tính sao cho đủ nhỏ để hoạt động ở chế độ đơn mode tương ứng với các bước sóng truyền đi khác nhau. Cần lưu ý rằng trong bài báo này, sự thay đổi chiết suất của các thành phần sợi cũng như sự thay đổi chiết suất hiệu dụng trong quá trình truyền sóng điện từ đều bị bỏ qua.

Trong [8], các tác giả đã chỉ ra sự phân bố cường độ của các mode phân cực tuyến tính đối với chỉ số khúc xạ của sợi quang. Sợi quang hoạt động ở chế độ đơn mode luôn được ưu tiên để có chất lượng chùm tia tốt hơn nên các mô phỏng về chế độ này được tập trung khảo sát trong nghiên cứu này. Trong chế độ dẫn hướng điện trường gần đúng, các mode được coi là gần suy biến với các trạng thái phân cực tùy ý [5]. Giả sử rằng hai bộ chế độ độc lập - chế độ phân cực x và phân cực y , có cùng hằng số lan truyền. Các chế độ này được gọi là chế độ phân cực tuyến tính (mode LP).

Sợi quang cách tử Bragg (FBG) là một cấu trúc đơn giản được thiết kế để tạo ra những thay đổi định kỳ về chỉ số khúc xạ của lõi sợi trong laser sợi quang đơn mode công suất cao. Bơm từ một phía thường được sử dụng, vì nó phù hợp với sự tiện lợi và đơn giản của máy cắt laser sợi quang trong công nghiệp. Một FBG với nhiều bước cách tử khác nhau dẫn đến thay đổi sự phân bố cường độ của các chế độ phân cực tuyến tính. Sơ đồ cấu trúc của FBG được mô tả trong hình 1.



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc FBG trong laser sợi quang công suất cao.

Trong điều kiện Bragg [9]:

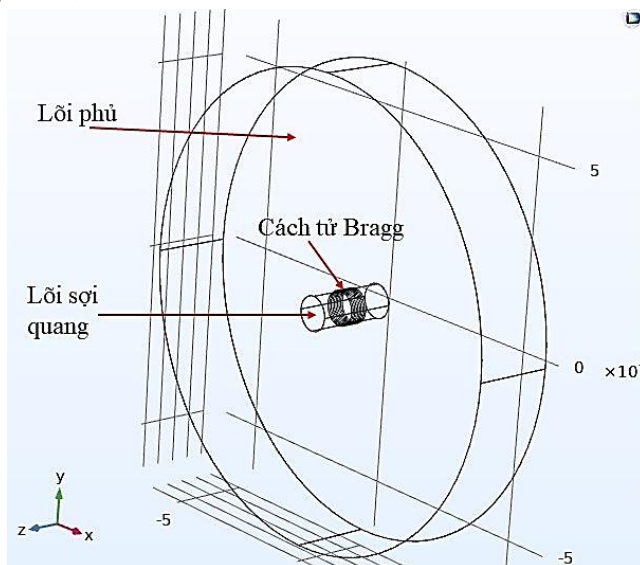
$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (4)$$

Trong đó: λ_B là bước sóng của nhiễu xạ Bragg phản xạ ngược, bước sóng lan truyền của ánh sáng trong khoảng cách tử Bragg; n_{eff} là chiết suất hiệu dụng của lõi sợi ở bước sóng nhiễu xạ Bragg; Λ là khoảng cách giữa các cách tử, thỏa mãn điều kiện liên quan đến bước sóng nhiễu xạ Bragg phản xạ ngược λ_B . Cấu trúc cách tử Bragg trong sợi quang là sự thay đổi theo trục (x) và tuần hoàn của chiết suất lõi với chiết suất hiệu dụng được đưa ra bởi công thức:

$$n_{eff}(x) = n_0 + \Delta n \cos(2\pi x/\Lambda) \tag{5}$$

Trong đó: n_0 là chiết suất trung bình của sợi quang; Δn là biên độ nhiễu loạn của chiết suất hiệu dụng lõi sợi; x là khoảng cách dọc theo chiều dài sợi.

Có sáu cấu trúc phổ biến cho FBG, bao gồm dạng cách tử đều đồng nhất, cách tử Gaussian, cách tử tăng cosine, kiểu đan xen, dịch pha rời rạc và siêu cấu trúc [10]. Trong bài báo này, chúng tôi xem xét dạng FBG đơn giản nhất, đó là cách tử đều đồng nhất với các tâm Bragg giống hệt nhau và cách đều nhau (hình 2).



Hình 2. Sơ đồ sợi quang cách tử Bragg.

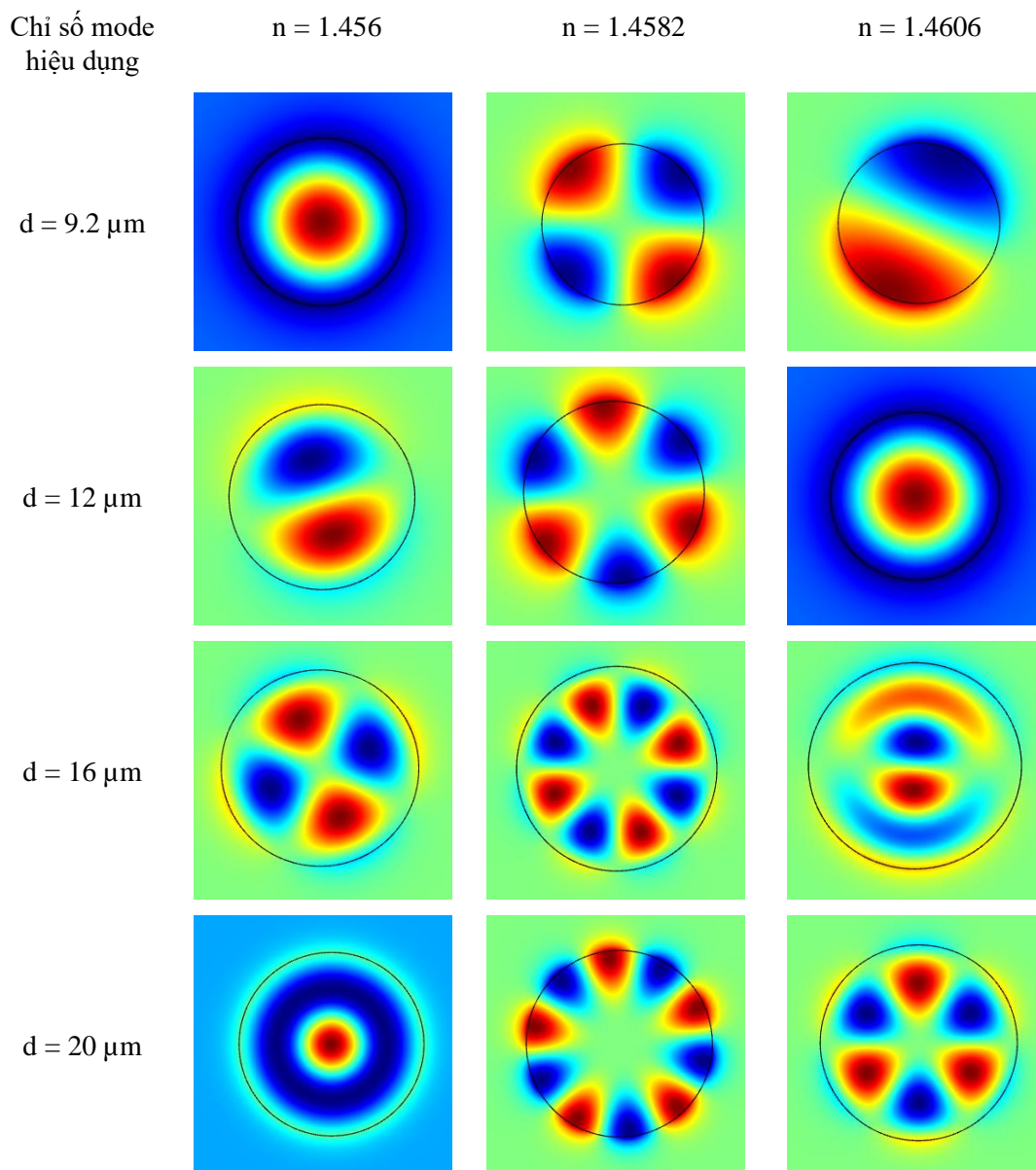
Gói mô phỏng chùm tia quang học của phần mềm Comsol Multiphysics 6.1 trên máy tính đã được thiết lập. Một mô hình 2D được chúng tôi xây dựng nhờ tính đối xứng trục của sợi quang. Các thông số của sợi quang, bước sóng lan truyền và công suất đầu vào được mô tả trong bảng 1. Chiết suất của lõi và lõi phủ sợi quang lần lượt là 1.4623 và 1.4512 [11]. Bán kính sợi quang được đặt theo giá trị sát với sợi quang đơn mode đang có mặt trên thị trường [12].

Bảng 1. Các giá trị tham số cho mô phỏng laser sợi quang công suất cao.

4.6 [μm]; 6 [μm]; 8 [μm]; 10[μm]	Bán kính lõi
62.5 [μm]	Bán kính lõi phủ
1.4623	Chiết suất lõi
1.4512	Chiết suất lõi phủ
1064 [nm]	Bước sóng lan truyền
600 [nm]	Khoảng cách cách tử Bragg
3; 5; 10	Số lượng cách tử Bragg
200 W	Công suất bức xạ laser

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

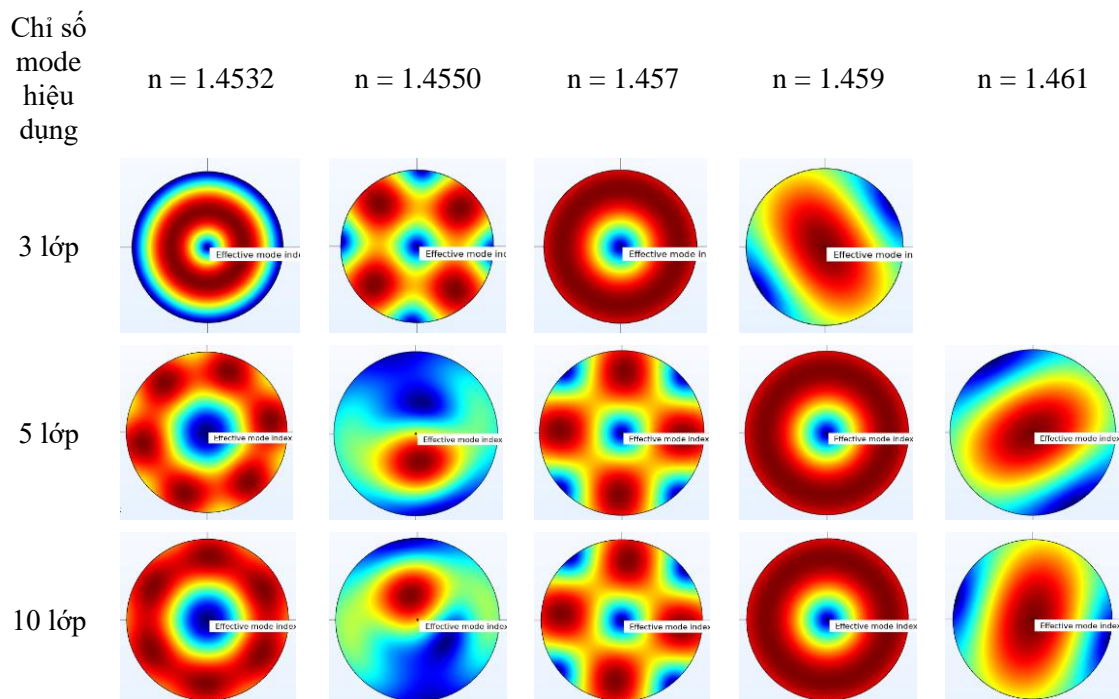
Trên thực tế, laser sợi quang pha tạp Yb^{3+} ở bước sóng 1064 nm được sử dụng rộng rãi trong nhiều ứng dụng công nghiệp liên quan đến xử lý vật liệu như cắt, hàn và khắc [1, 2]. Điều này là do những ưu điểm của laser sợi quang pha tạp Yb^{3+} , chẳng hạn như hiệu suất chuyển đổi rất cao và tỷ lệ bề mặt trên thể tích cao, tạo điều kiện cho việc tản nhiệt dễ dàng và tạo ra chùm tia laser với độ nhiễu tán xạ tối thiểu. Do đó, chúng tôi xem xét phân bố cường độ mode phân cực tuyến tính của laser sợi quang pha tạp Yb^{3+} ở bước sóng 1064 nm với các đường kính lõi sợi d khác nhau, như được mô tả trong hình 3.



Hình 3. Phân bố cường độ của các mode phân cực tuyến tính ở bước sóng 1064 nm đối với các đường kính lõi khác nhau.

Có thể quan sát thấy rằng, với đường kính lõi 9.2 μm hoặc 12 μm , có thể thu được phân bố cường độ của chế độ LP01 phân cực tuyến tính. Trong khi đó, chế độ phân cực tuyến tính LP02 có thể thu được khi sợi quang có đường kính lõi 20 μm ở bước sóng truyền quang 1064 nm. Khi đường kính lõi sợi quang tăng lên, sự phân bố cường độ của chế độ phân cực tuyến tính trở nên bị phân chia mạnh hơn, điều này có thể dẫn đến giảm chất lượng chùm tia. Do vậy, đường kính lõi 9.2 μm là thông số tốt nhất trong các trường hợp này.

Sau đó, chúng tôi nghiên cứu sự phân bố cường độ của chế độ phân cực tuyến tính trên các sợi chứa số cách tử Bragg khác nhau. Điều này được hỗ trợ bởi gói dò chùm tia quang học trong chương trình Comsol Multiphysics 6.1, với nguồn bơm là laser sóng liên tục, công suất 200 W, bước sóng $\lambda = 1064 \text{ nm}$, đường kính lõi sợi $d = 9.2 \mu\text{m}$. Kết quả được trình bày trong hình 4.



Hình 4. Phân bố cường độ của các mode phân cực tuyến tính khi số lượng lớp cách tử Bragg khác nhau trên sợi quang, đường kính lõi sợi $d = 9.2 \mu\text{m}$.

Có thể nhận thấy rằng, số lượng các mode phân cực tuyến tính tạo ra là ít nhất khi số lớp cách tử Bragg là 3. Trong trường hợp 5 và 10 tấm cách tử Bragg, có thêm sự xuất hiện của các chế độ phân cực không đối xứng, có thể làm giảm chất lượng chùm tia trong những trường hợp này. Chế độ phân cực tuyến tính mode LP01 chỉ nhận được khi số lớp cách tử Bragg là 3 lớp. Đây có thể xem là số lượng lớp cách tử Bragg tối ưu nhất trong các trường hợp này.

4. MÔ HÌNH TOÁN HỌC ĐÁNH GIÁ CÔNG SUẤT ĐẦU RA

Chúng tôi xem xét các yếu tố như độ dài sợi quang và cấu hình bơm ảnh hưởng đến công suất đầu ra. Trong thực tế, độ dài sợi quang ảnh hưởng đến công suất đầu ra của laser sợi quang công suất cao [13]. Để giải quyết vấn đề này, một tính toán mô phỏng sử dụng bộ giải bài toán giá trị biên (BVP) của Matlab đã được thực hiện đối với laser sợi quang pha tạp Yb^{3+} , với công suất đầu ra 200 W, chiều dài sợi 50 m và bước sóng 1064 nm. Các tác giả trong [13] đã chỉ ra rằng, bằng cách bỏ qua tổn thất bức xạ lan truyền hoặc bổ sung vào phát xạ tự phát, BVP tương đương với bài toán giá trị ban đầu (IVP) mà lời giải của nó, được tính toán bằng bộ giải IVP của Matlab, cung cấp một dự đoán phù hợp cho bài toán BVP. Điều này dẫn đến một bộ giải Matlab đơn giản để mô phỏng sự truyền ánh sáng trong laser sợi quang công suất cao.

Cấu hình phổ biến nhất của máy bơm laser sợi quang công suất cao được mô tả trong [14]. Trong các cấu hình này, nhiều gương quang học được thay thế bằng cách tử FBG trong lõi và các bộ phận bơm được kết hợp. Có ba cấu hình bơm phổ biến cho FBG, bao gồm bơm hỗn hợp, bơm toàn sợi và bơm bên trong sợi. Bơm từ cả hai đầu của sợi - cấu hình bơm toàn sợi sẽ tạo thêm áp lực lên FBG vì chúng phải chịu được cả lực bơm và tín hiệu mạnh, do đó cần được thiết lập đặc biệt để bảo vệ chúng. Đây là cấu hình bơm được giả định trong phần tiếp theo, vì nó là tối ưu nhất cho hiệu suất công suất bơm với công suất đầu ra. Cấu hình bơm bên trong sợi, với khả năng bắt đầu bơm bên trong khoang, giúp giảm bớt một số vấn đề về áp lực lên sợi quang FBG. Tuy nhiên, nó gây phức tạp cho việc chế tạo và vận hành. Do đó, tác giả đề xuất khả năng bơm hai đầu với công suất đầu vào là 240 W trong trường hợp này.

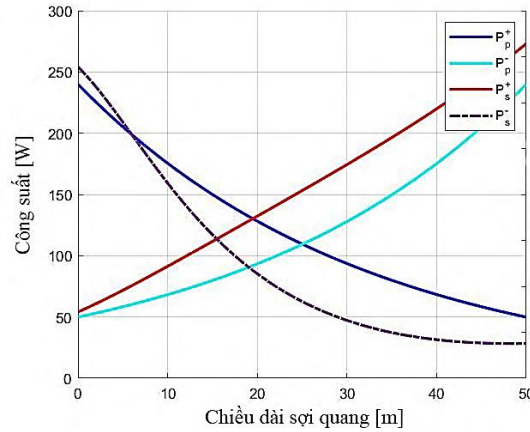
Sự lan truyền của sóng ánh sáng trong khoang tuyến tính được mô tả bởi lũy thừa tiến và lùi, được đặc trưng bởi phương trình rút gọn [13, 15]:

$$\pm \frac{dP_p^\pm}{dz}(z) = ((\sigma_p^{(e)} + \sigma_p^{(a)})N_2(z) - \sigma_p^{(a)}N)\Gamma_p P_p^\pm(z) - \alpha_p P_p^\pm(z) \quad (6)$$

$$\pm \frac{dP_s^\pm}{dz}(z) = (g_s(z) - \alpha_s(z))P_s^\pm(z) \quad (7)$$

Trong đó: P_p, P_s , lần lượt đại diện cho công suất bơm (ký hiệu p) và công suất laser tín hiệu (ký hiệu s) ở bước sóng laser khác nhau, ký hiệu + khi tính theo hướng trùng với hướng tia tới (trục z), ký hiệu - là ngược lại; $\sigma_p^{(e)}$ và $\sigma_p^{(a)}$ lần lượt biểu thị mặt cắt hấp thụ và phát xạ tại nguồn bơm; N và N_2 lần lượt biểu thị mật độ dân cư ở trạng thái cơ bản và trạng thái kích thích; Γ_p, Γ_s tương ứng là hệ số chồng chập giữa phân bố ion pha tạp và các mode của nguồn bơm (p) và laser tín hiệu (s); α_p và α_s được hiểu lần lượt là hệ số suy hao truyền quang tại nguồn bơm và tín hiệu laser; g_s là mức tăng tín hiệu tại $\lambda = \lambda_s$.

Hình 5 cho thấy công suất bơm và tín hiệu laser theo hướng trùng với hướng tia tới (+) và ngược lại (-), $P_p^+, P_p^-, P_s^+, P_s^-$ là các hàm của vị trí dọc theo sợi quang đối với laser sợi quang pha tạp Yb^{3+} .



Hình 5. Công suất bơm và tín hiệu theo hướng trùng với hướng tia tới (+) và ngược lại (-) $P_p^+, P_p^-, P_s^+, P_s^-$ là các hàm của vị trí dọc theo sợi quang đối với laser sợi quang pha tạp Yb^{3+} .

Mô hình tính toán cung cấp dự đoán hiệu quả về sự truyền sóng ánh sáng trong sợi quang. Kết quả cho thấy có thể đạt được công suất đầu ra $P_s^+ = 200 \text{ W}$ ở chiều dài sợi $L = 35.6 \text{ m}$. Độ dài điển hình của sợi quang ytterbium được sử dụng trong hệ thống thường từ 10 - 50 m [7], vì vậy, tính toán này cho thấy sự phù hợp với các nghiên cứu trước đây.

Thông số chất lượng chùm tia, hay thông số M2, là đại lượng quan trọng để đánh giá chất lượng của chùm tia laser, đặc biệt là ở laser sợi quang công suất cao. Nó cho biết khả năng hội tụ của chùm tia hoặc mức độ chùm tia laser so với chùm tia Gaussian lý tưởng.

M2 được xác định bằng tỷ lệ giữa diện tích chùm tia thực tế tại vị trí tiêu cự với diện tích chùm tia lý tưởng tại cùng một vị trí. Nói cách khác, nó có thể được định nghĩa là tỷ số của tích tham số chùm tia đang xét với chùm Gaussian có cùng kích thước điểm giới hạn nhiễu xạ [14]. Trong trường hợp này, khi tham số V trong (2) càng nhỏ thì chất lượng chùm tia M2 cũng càng nhỏ [16]. Nói cách khác, sợi đơn mode luôn tốt hơn sợi đa mode về chất lượng chùm tia.

5. KẾT LUẬN

Một mô hình mô phỏng laser sợi quang công suất cao pha tạp Yb^{3+} đã được xây dựng. Chế độ phân cực tuyến tính đơn mode LP01 có thể thu được khi sợi có đường kính lõi 9.2 μm hoặc 12 μm

ở bước sóng truyền quang 1064 nm. Mô phỏng COMSOL với số lượng cách tử Bragg khác nhau trên sợi quang đã được tiến hành. Chế độ phân cực tuyến tính LP01 có thể đạt được khi số lượng cách tử Bragg là 3 lớp. Trong trường hợp 5 và 10 tấm cách tử Bragg, có thêm sự xuất hiện của các chế độ phân cực không đối xứng, có thể làm giảm chất lượng chùm tia trong những trường hợp này. Phép tính sử dụng bộ giải bài toán giá trị biên (BVP) của Matlab đưa ra dự đoán về công suất bơm và công suất đầu ra tùy thuộc vào độ dài sợi. Công suất tín hiệu đầu ra $P_S^+ = 200$ W có thể đạt được ở chiều dài sợi $L = 35.6$ m.

Các thông số tối ưu cho sợi pha tạp Yb^{3+} trong thiết lập của chúng tôi cho phạm vi bước sóng 1060 - 1080 nm bao gồm chiều dài $L = 35.6$ m, đường kính lõi $d = 9.2$ μm , chỉ số khúc xạ lõi và vỏ lần lượt là 1.4623 và 1.4512, sợi quang Bragg có cấu trúc cách tử với 3 lớp, chu kỳ cách tử 600 nm và cấu hình bơm hai chiều đầu sợi quang có công suất 240 W. Dựa trên kết quả tính toán và đánh giá, cho phép thiết kế thiết bị cắt kim loại bằng laser sợi quang chuyên dụng trong công nghiệp cho độ chính xác cao.

Bài báo này đã được báo cáo tại Hội thảo khoa học Quốc gia “Ứng dụng Công nghệ cao vào thực tiễn” năm 2024.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. T. Muangpool, S. Pullteap, "Reviews on laser cutting technology for industrial applications," Proc. SPIE 10714, Third International Conference on Photonics Solutions (ICPS2017), 107140Q (2018); doi: 10.1117/12.2300955.
- [2]. Shi, Wei; Fang, Qiang; Zhu, Xiushan; Norwood, R. A.; Peyghambarian, N. "Fiber lasers and their applications". Applied Optics, 53(28), 6554, (2014). doi:10.1364/AO.53.006554.
- [3]. Atasi Pal, Anirban Dhar, Shyamal Das, Shu Ying Chen, Tong Sun, Ranjan Sen, and Kenneth T V Grattan, "Ytterbium-sensitized Thulium-doped fiber laser in the near-IR with 980 nm pumping," Opt. Express 18, 5068-5074, (2010).
- [4]. Mario Christian Falconi, Dario Laneve, Vincenza Portosi, Stefano Taccheo, and Francesco Prudenzano, "Design of a Multi-Wavelength Fiber Laser Based on Tm:Er:Yb:Ho Co-Doped Germanate Glass," J. Lightwave Technol. 38, 2406-2413, (2020).
- [5]. Dutta, Arpan. "Mode analysis of different step index optical fibers at 1064 nm for high power fiber laser and amplifier.", (2019).
- [6]. Shima, Kensuke, Shinya Ikoma, Keisuke Uchiyama, Yuya Takubo, Masahiro Kashiwagi, and Daiichiro Tanaka. "5-kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for materials processing." In Fiber Lasers XV: Technology and Systems, vol. 10512, pp. 45-50. SPIE, (2018).
- [7]. Glebov, Alexei L.; Leisher, Paul O.; Brochu, G.; Villeneuve, A.; Faucher, M.; Morin, M.; Trépanier, F.; Dionne, R. "Components and Packaging for Laser Systems III - SRS modeling in high power CW fiber lasers for component optimization", SPIE Proceedings, 10085, (2017), doi:10.1117/12.2248336.
- [8]. Gomez-Castellanos, Ivan, and Ramon M. Rodriguez-Dagnino. "Intensity distributions and cutoff frequencies of linearly polarized modes for a step-index elliptical optical fiber." Optical Engineering 46, no. 4: 045003-045003, (2007).
- [9]. Mohammed, Shaymaa R., Rong Z. Chen, Khalil I. Hajim, and Kevin P. Chen. "Writing of a Bragg Grating on a D-shaped Optical Fiber Using the KrF Excimer Laser." Iraqi Journal of Laser 13, no. A: 37-42, (2014).
- [10]. Erdogan, Turan. "Fiber grating spectra." Journal of lightwave technology 15, no. 8: 1277-1294, (1997).
- [11]. Kude, Vivek P., and R. S. Khairnar. "Fabrication and numerical evaluation of the tapered single mode optical fiber: Detection of change in refractive index." (2008).
- [12]. OS2 9/125 Single Mode. <https://www.fs.com/sg/c/os2-9-125-single-mode-897>
- [13]. Balac, Stéphane. "Simulation of rare-earth-doped high-power fiber-lasers using Matlab BVP solver." (2022).
- [14]. Zervas, Michalis N., and Christophe A. Codemard. "High power fiber lasers: a review." IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics 20, no. 5: 219-241, (2014).
- [15]. Kelson, Ido, and Amos A. Hardy. "Strongly pumped fiber lasers." IEEE Journal of Quantum Electronics 34, no. 9: 1570-1577, (1998).

- [16]. Y. Jeong, A. J. Boyland, J. K. Sahu, S. Chung, J. Nilsson, and D. N. Payne, "Multi-kilowatt single-mode Ytterbium-doped large core fiber laser," *J. Opt. Soc. Korea*, vol. 13, pp. 416–422, (2009).

ABSTRACT

Investigation of single mode high-power fiber laser used in industrial metal cutting machines

High-power fiber lasers have demonstrated great potential in various industries such as industrial, medical, aerospace, defense, and many others. Utilizing single-mode fiber configuration offers advantages such as good beam quality, high power, stability, and efficiency. Therefore, high-power single-mode fiber lasers are applied in the manufacturing and processing of fine details. Ytterbium-doped active fibers are primarily used as the amplification medium, generating laser sources with powers exceeding 200 W. The objective of this paper is to simulate the intensity distribution of single-mode fiber, analyze parameters affecting the output power of high-power fiber lasers, such as refractive index, core diameter, fiber length, pump scheme, and beam quality (M²). This aims to select optimal characteristics for single-mode fiber in specialized metal cutting laser machine applications.

Keywords: Fiber laser; High power; Single mode; Rare earth doped; Yb³⁺ doped.