BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ

LÊ MINH QUÂN

NGHIÊN CỨU VÀ PHÁT TRIỂN HỆ LASER TỬ NGOẠI PHỔ SIÊU RỘNG SỬ DỤNG TINH THỂ Ce:LiCAF ỨNG DỤNG TRONG QUAN TRẮC KHÍ Ô NHIỄM

Ngành: Quang học
Mã số: 944 01 10

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT

Hà Nội – Năm 2026

Công trình được hoàn thành tại:

Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam

Người hướng dẫn khoa học: PGS.TS. Phạm Hồng Minh

PGS. TS. Đinh Văn Trung

Phản biện 1:

……...

Phản biện 2:

……...

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện, họp tại Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam vào hồi … giờ ..', ngày … tháng … năm 2026.

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
- Thư viện Quốc gia Việt Nam

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của luận án

Ra đời từ năm 1960, laser nhanh chóng phát triển cả về cấu hình buồng cộng hưởng, kỹ thuật bơm và môi trường hoạt chất, qua đó mở rộng đáng kể dải bước sóng, công suất cũng như các chế độ phát xạ. Nhờ các đặc trưng nổi bật như tính kết hợp, định hướng, đơn sắc và công suất cao mà bức xạ laser đã trở thành nguồn sáng quan trọng của quang học hiện đại. Laser được ứng dụng rộng rãi trong nghiên cứu khoa học và đời sống, trực tiếp thúc đẩy sự hình thành và phát triển của nhiều lĩnh vực khoa học, công nghệ hiện đại như đo lường, y sinh học và nghiên cứu môi trường.

Trong khí quyển tồn tại nhiều loại khí ô nhiễm có phổ hấp thụ đặc trưng nằm trong vùng bước sóng tử ngoại (UV) như O_3 (200 – 400 nm), SO_2 (280 – 300 nm), NO_2 (200 – 400 nm), HCHO (250 – 400 nm), C_6H_6 (220 – 260 nm),…. Có nhiều phương pháp phát hiện và định lượng chất khí ô nhiễm có độ chính xác cao đã được nghiên cứu và ứng dụng hiệu quả và trong số đó, DOAS có những ưu điểm nổi bật như: cấu hình hệ quang tương đối đơn giản, chi phí triển khai hợp lý, có khả năng đo đồng thời nhiều thành phần khí và đặc biệt phù hợp cho các phép đo từ xa. Nếu sử dụng laser UV phổ siêu rộng làm nguồn kích thích trong các hệ DOAS sẽ mở rộng được miền phổ khảo sát và tăng khả năng phát hiện đồng thời nhiều loại khí. Do vậy, việc phát triển các nguồn laser UV phổ siêu rộng ứng dụng làm nguồn kích thích trong các hệ DOAS nghiên cứu khí ô nhiễm có phổ hấp thụ trong vùng UV là cần thiết.

Từ các phân tích trên ta thấy, để mở rộng hơn nữa ứng dụng

của các nguồn laser UV vào trong nghiên cứu cũng như trong ứng dụng thực tế thì việc phát triển nguồn laser UV phổ siêu rộng, năng lượng cao là cần thiết. Xuất phát từ những yêu cầu khoa học và thực tiễn nêu trên, tôi lựa chọn đề tài ***"Nghiên cứu và phát triển hệ laser tử ngoại phổ siêu rộng sử dụng tinh thể Ce:LiCAF ứng dụng trong quan trắc khí ô nhiễm "*** làm hướng nghiên cứu chính cho luận án.

2. Mục nghiên cứu của luận án bao gồm:

Nghiên cứu động học phát và khuếch đại các xung laser UV không mode sử dụng tinh thể Ce:LiCAF. Dựa trên các kết quả nghiên cứu lý thuyết, phát triển hệ phát và khuếch đại các xung laser UV không mode sử dụng tinh thể Ce:LiCAF.

Ứng dụng các nguồn laser UV Ce:LiCAF không mode vào nghiên cứu khí ô nhiễm SO_2 và O_3.

3. Các nội dung nghiên cứu chính của luận án

Nghiên cứu lý thuyết và phát triển thực nghiệm hệ laser phát xung tín hiệu UV không mode phổ siêu rộng và hệ khuếch đại các xung laser UV không mode phổ siêu rộng sử dụng tinh thể Ce:LiCAF. Nghiên cứu ứng dụng các nguồn laser tử ngoại không mode có bước sóng 275 nm - 330 nm vào nghiên cứu khí ô nhiễm SO_2 và O_3.

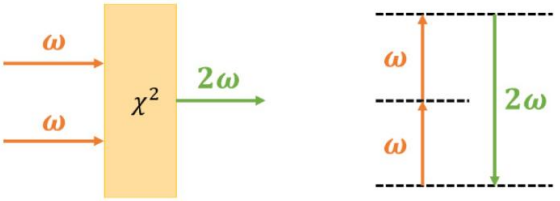
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ LASER TỬ NGOẠI PHỔ SIÊU RỘNG VÀ ỨNG DỤNG

1.1. Tổng quan về phát bức xạ laser tử ngoại phổ siêu rộng

1.1.1. Laser biến đổi tần số

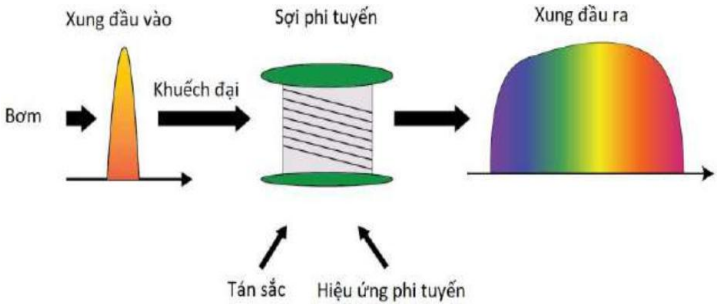
Việc tạo ra bức xạ UV có dải phổ rộng dựa trên các nguồn laser IR hoặc VIS là một quá trình khai thác tính phi tuyến bậc cao của vật liệu khi tương tác với trường điện từ cường độ mạnh thường là các

xung femto giây. Việc nhân tần số đòi hỏi sự kiểm soát về điều kiện hợp pha giữa sóng phi tuyến sinh ra và sóng phân cực phi tuyến tương ứng trong tinh thể và đặc tính của môi trường phi tuyến.



Hình 1.1. Sơ đồ biểu diễn quá trình biến đổi tần số

1.1.2. Laser phát siêu liên tục



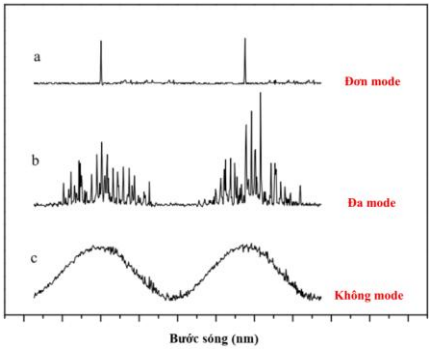
Hình 1.3. Sơ đồ biểu diễn quá trình phát siêu liên tục

Phát xạ siêu liên tục là một hiện tượng quang học phi tuyến phức tạp, sự hình thành phổ SC trong vùng UV là kết quả của chuỗi tương tác giữa laser xung công suất cao thường là các xung femto giây và môi trường phi tuyến bao gồm: Tự biến điệu pha; Tán sắc nhóm và các quá trình động lực học soliton và phân tách soliton, sơ đồ biểu diễn quá trình phát siêu liên tục được trình bày trong Hình 1.3.

1.1.3. Laser phát không mode

Laser không mode là loại laser được thiết kế để không hình

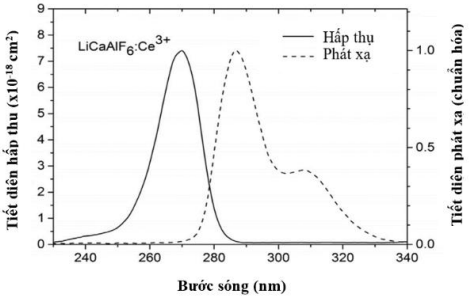
thành các mode cộng hưởng rõ ràng trong BCH hoặc làm suy giảm mạnh sự tồn tại của chúng. Laser không mode có phổ không bị phân tách thành các mode dọc rời rạc, các mode bị xóa mờ hoặc không ổn định dẫn đến phổ phát xạ liên tục và rất rộng, phổ laser không mode được trình bày trên Hình 1.5c.



Hình 1.5. a) Phổ đơn mode, b) Phổ đa mode, c) Phổ không mode

1.2. Tổng quan về laser tử ngoại toàn rắn Cerium Fluoride

1.2.1. Môi trường Cerium Fluoride



Hình 1.10. Phổ hấp thụ và phát xạ của môi trường Ce:LiCAF

Trong các môi trường Ce-Fluoride, môi trường Ce:LiCAF là môi trường phát và khuếch đại laser tử ngoại hiệu quả với nhiều ưu điểm vượt trội được biểu diễn trên Hình 1.10.

1.2.2. Laser Ce:LiCAF

Trong số các môi trường laser fluoride pha tạp ion Ce^{3+}, tinh thể Ce:LiCAF đã được chứng minh là một môi trường hoạt chất phát trực tiếp bức xạ UV hiệu quả. Tinh thể Ce:LiCAF đã được nhiều nhóm nghiên cứu trên thế giới lựa chọn để phát triển các nguồn laser UV băng hẹp điều chỉnh bước sóng, laser xung ngắn và laser công suất cao thông qua khuếch đại. Tuy nhiên, môi trường này cho thấy Ce:LiCAF còn có tiềm năng rất lớn để phát triển các nguồn laser UV phổ siêu rộng. Việc nghiên cứu phát triển các nguồn laser UV phổ siêu rộng sử dụng tinh thể Ce:LiCAF không chỉ có ý nghĩa khoa học, mà còn mở ra một hướng ứng dụng mới cho môi trường laser này trong quang phổ hấp thụ, lidar và quan trắc môi trường.

1.3. Khí ô nhiễm và các phương pháp nghiên cứu khí ô nhiễm

1.3.1. Tổng quan về khí ô nhiễm

Ô nhiễm không khí là một trong những vấn đề môi trường nghiêm trọng nhất hiện nay, mặc dù chỉ chiếm tỷ lệ rất nhỏ trong thành phần khí quyển nhưng chúng gây ảnh hưởng xấu đến sức khỏe con người, hệ sinh thái và khí hậu toàn cầu.

1.3.3.1. Lưu huỳnh dioxide (SO_2)

1.3.3.2. Ozone (O_3)

1.3.3.3. Một số khí ô nhiễm khác

1.3.2. Một số phương pháp nghiên cứu khí ô nhiễm

1.3.2.1. Phương pháp huỳnh quang cảm ứng laser

1.3.2.2 .Phương pháp quang phổ suy giảm vòng trong buồng cộng hưởng

1.3.2.3. Phương pháp quang phổ hấp thụ vi sai

1.4. Ứng dụng của laser tử ngoại trong nghiên cứu khí ô nhiễm

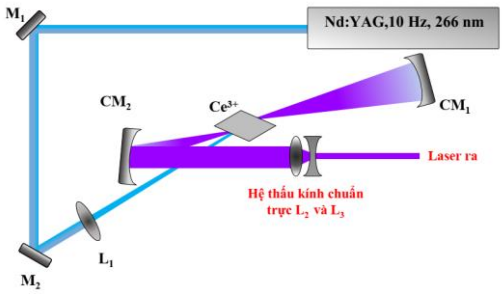
Năm 2019, Jan-Marcus Nasse và các cộng sự đã công bố một nghiên cứu về hệ quang phổ hấp thụ vi sai đường truyền dài (LP-DOAS) độ chính xác cao, ổn định và khả năng vận hành tự động dài hạn trong quan trắc khí quyển. Hệ đo khảo sát khí thải trong khí quyển trên quang trình từ vài trăm mét đến vài kilomet.

Kết luận chương 1: Trong Chương 1, thông qua việc phân tích các kết quả nghiên cứu trên thế giới về laser phát xạ không mode và phổ phát xạ siêu rộng, luận án đã ghi nhận các vấn đề chính như sau: Tổng quan về các hướng phát triển và ứng dụng của laser UV phổ siêu rộng đã được trình bày. Xu hướng phát triển laser không mode đã được phân tích cho thấy cấu hình laser không mode là một hướng tiếp cận phù hợp nhằm tạo ra bức xạ UV có phổ siêu rộng. Các đặc trưng quan trọng của tinh thể Ce:LiCAF cho thấy đây là môi trường hoạt chất phù hợp cho các phát triển hệ laser UV phổ siêu rộng.

CHƯƠNG 2: NGHIÊN CỨU VÀ PHÁT TRIỂN HỆ LASER TỬ NGOẠI KHÔNG MODE PHỔ SIÊU RỘNG SỬ DỤNG TINH THỂ Ce:LiCAF

2.1. Mô hình lý thuyết cho động học phổ laser tử ngoại không mode

2.1.1. Sơ đồ thiết kế hệ laser Ce:LiCAF không mode phổ siêu rộng



Hình 2.1. Sơ đồ thiết kế hệ laser không mode Ce:LiCAF phổ siêu rộng

2.1.2. Hệ phương trình tốc độ mô tả động học phát xạ laser không mode

$$\frac{dN_2(z,t)}{dt} = \eta_p\,\sigma_{ap}(\lambda_p)\,\Phi_p(z,t)\,N_1(z,t) - \frac{N_2(z,t)}{\tau_f}$$

$$-\Gamma_s \sum_i \frac{I_i(z,t)}{h\nu_i}[\sigma_e(\lambda_i)N_2(z,t) + \sigma_a(\lambda_i)N_1(z,t)]$$

$$\partial I_i(z,t)/\,\partial z = g_i(z)\,I_i(z,t) + S_{sp,i}(z,t) - \alpha(\lambda_i)\,I_i(z,t)$$

$$g_i(z) = \Gamma_s[\sigma_e(\lambda_i)\,N_2(z) - \sigma_a(\lambda_i)\,N_1(z)]$$

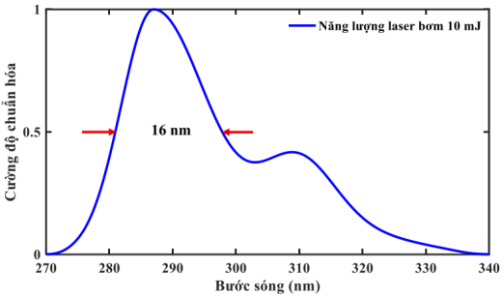
2.1.3. Thông số sử dụng trong mô phỏng động học phổ laser không mode

Để nghiên cứu động học phát xạ của laser tử ngoại Ce:LiCAF không mode, các thông số sử dụng trong mô phỏng được trình bày trong Bảng 2.1.

2.1.4. Động học phổ laser tử ngoại không mode sử dụng tinh thể Ce:LiCAF

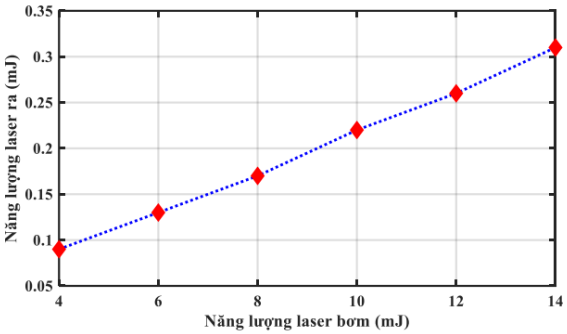
Động học phổ laser UV Ce:LiCAF không mode được nghiên cứu bằng việc giải hệ phương trình (2.1) - (2.3) bằng ngôn ngữ

MATLAB. Với năng laser bơm 10 mJ ở bước sóng 266 nm, độ rộng xung 7 ns phổ phát xạ của laser UV Ce:LiCAF như trong Hình 2.2.



Hình 2.2. Phổ phát xạ laser UV không mode Ce:LiCAF

Sự phụ thuộc của năng lượng laser lối ra vào năng lượng laser bơm đã được mô phỏng và trình bày chi tiết trong Hình 2.4.



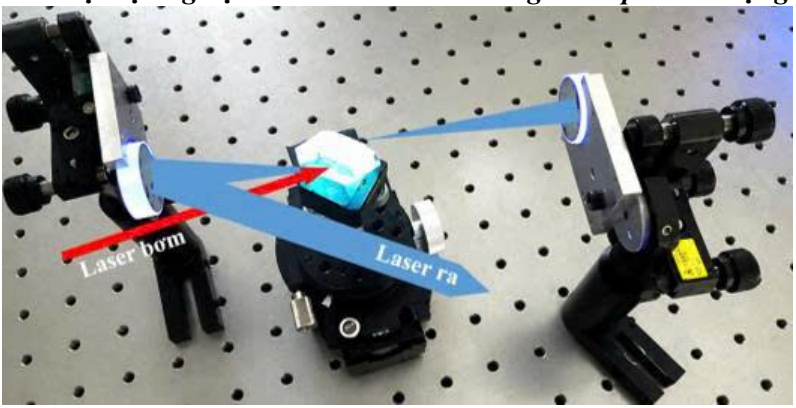
Hình 2.4. Ảnh hưởng của năng lượng laser bơm lên năng lượng laser ra

2.2. Phát triển hệ thực nghiệm laser Ce:LiCAF không mode phổ siêu rộng

2.2.1. Các linh kiện, thiết bị được sử dụng

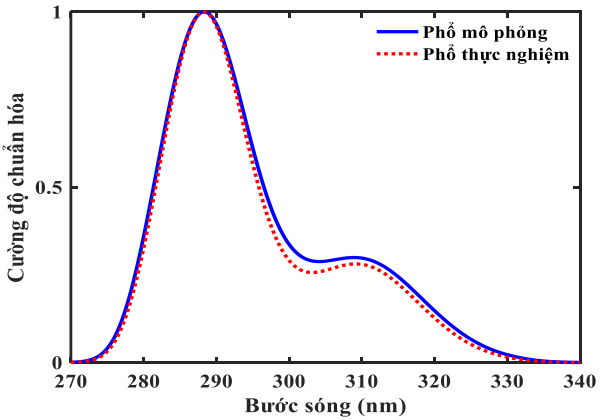
Để xây dựng hệ laser không mode Ce:LiCAF phổ siêu rộng, luận án có sử dụng các linh kiện và thiết bị.

2.2.2. Hệ thực nghiệm laser Ce:LiCAF không mode phổ siêu rộng



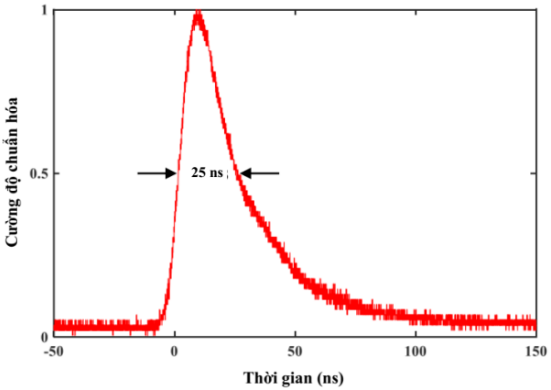
Hình 2.5. Hệ laser Ce:LiCAF không mode phổ siêu rộng

2.2.2.1. Đặc trưng phổ của laser tử ngoại Ce:LiCAF không mode



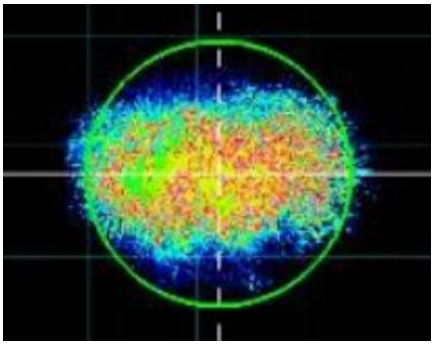
Hình 2.6. Phổ laser tử ngoại không mode Ce:LiCAF

2.2.2.2. Đặc trưng xung của laser tử ngoại Ce:LiCAF không mode



Hình 2.7. Xung laser ra tử ngoại Ce:LiCAF không mode

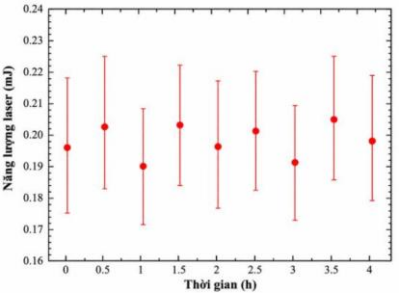
2.2.2.3. Độ phân kỳ của chùm laser tử ngoại Ce:LiCAF không mode



Hình 2.8. Hình ảnh mặt cắt chùm laser tại vị trí Z = 15 cm thu được từ CCD

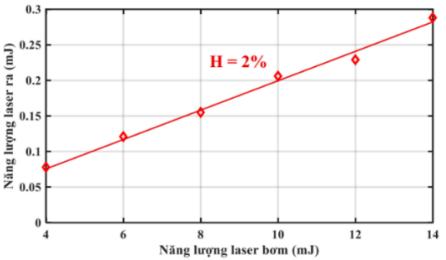
Kết quả đo cho thấy độ phân kỳ FWHM toàn phần trung bình của chùm laser tín hiệu theo trục X là 4,07 ± 0,30 mrad, theo trục Y là 2,50 ± 0,29 mrad. Như vậy, chùm laser đầu ra có dạng elip với độ phân kỳ theo trục X lớn hơn đáng kể so với trục Y.

2.2.2.4. Độ ổn định năng lượng của laser tử ngoại Ce:LiCAF không mode



Hình 2.9. Đánh giá độ ổn định của năng lượng laser không mode

2.2.2.5. Ảnh hưởng của năng lượng laser bơm lên năng lượng laser lối ra



Hình 2.10. Sự phụ thuộc của năng lượng laser ra vào năng lượng *của* laser bơm

Kết luận chương 2: Trong Chương 2, động học phát xạ cho laser tử ngoại Ce:LiCAF phổ siêu rộng sử dụng các cấu hình không mode đã được nghiên cứu khảo sát. Kết quả mô phỏng cho thấy phổ phát xạ của Ce:LiCAF có xu hướng duy trì độ rộng lớn trong điều kiện bơm thích hợp, trong khi hình dạng phổ phụ thuộc chủ yếu vào các tham số vật liệu như tiết diện phát xạ, thời gian sống mức kích thích

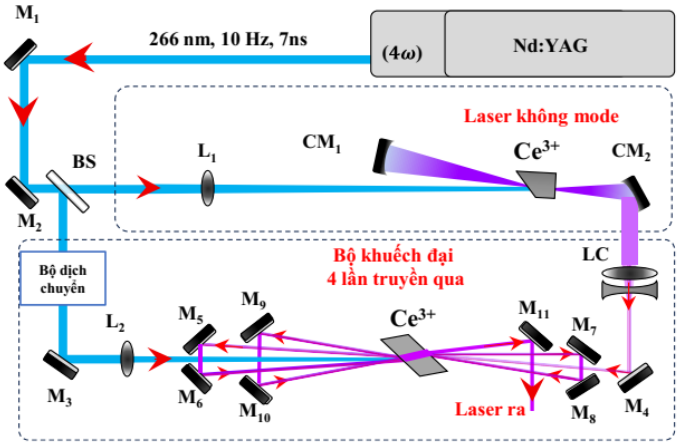
và nghịch đảo mật độ cư trú. Những kết quả này cung cấp cơ sở định hướng quan trọng cho thiết kế thực nghiệm và tối ưu cấu hình laser.

Phát triển thành công hệ laser tử ngoại Ce:LiCAF sử dụng cấu hình không mode, hệ có hiệu suất laser 2 %, năng lượng laser lớn nhất thu được 0,3 mJ tại năng lượng bơm 14 mJ.

CHƯƠNG 3: NGHIÊN CỨU VÀ PHÁT TRIỂN HỆ KHUẾCH ĐẠI LASER TỬ NGOẠI Ce:LiCAF KHÔNG MODE PHỔ SIÊU RỘNG

3.1. Động học khuếch đại các xung laser tử ngoại không mode phổ siêu rộng sử dụng tinh thể Ce:LiCAF

3.1.1. Sơ đồ thiết kế hệ khuếch đại xung laser tử ngoại không mode



Hình 3.1. Sơ đồ thiết kế hệ khuếch đại các xung laser tử ngoại, phổ siêu rộng, bốn lần truyền qua tinh thể Ce:LiCAF

3.1.2. Mô hình lý thuyết cho khuếch đại xung laser tử ngoại không mode

$$F_{\text{out}}^{(n)}(\lambda_i) = F_{\text{sat}}(\lambda_i)\ln\left[1+\exp\left(G_0(\lambda_i)\right)\left(\exp\left[F_{\text{in}}^{(n)}(\lambda_i)/F_{\text{sat}}(\lambda_i)\right]-1\right)\right]$$

$$G_0(\lambda_i) = \Gamma_s\sigma_e(\lambda_i)N_{2,0}^{(n)}l - \alpha(\lambda_i)l$$

$$F_{sat}(\lambda_i) = (hc/\lambda_i)/\sigma_e(\lambda_i)\,.$$

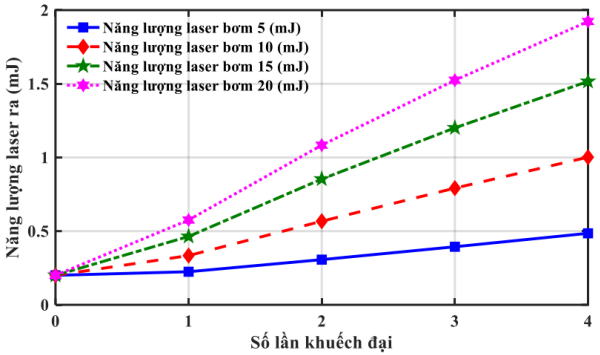
3.1.3. Thông số sử dụng trong mô phỏng

Các thông số sử dụng trong mô phỏng khuếch đại các xung laser UV sử dụng tinh thể Ce:LiCAF được lấy từ các linh kiện, thiết bị hiện có tại phòng thí nghiệm Quang tử - Viện Vật lý và được trình bày chi tiết trong Bảng 3.1.

3.1.4. Động học khuếch đại xung laser tử ngoại phổ siêu rộng

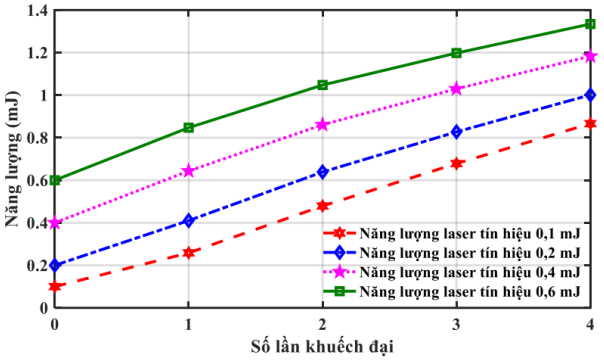
Động học khuếch đại xung laser UV Ce:LiCAF không mode phổ siêu rộng được nghiên cứu bằng việc giải phương trình Frantz-Nodvik bằng phần mềm Matlab với các thông số mô phỏng được chỉ ra trên Bảng 3.1.

3.1.4.1. Ảnh hưởng của năng lượng laser bơm lên năng lượng laser lối ra



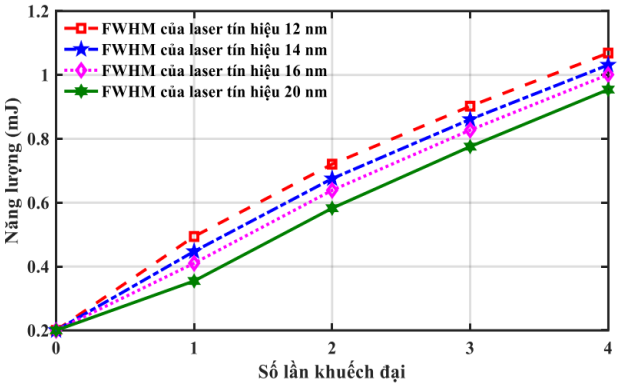
Hình 3.3. Ảnh hưởng của năng lượng bơm lên năng lượng laser sau khuếch đại

3.1.4.2. Ảnh hưởng của năng lượng laser tín hiệu lên năng lượng laser lối ra



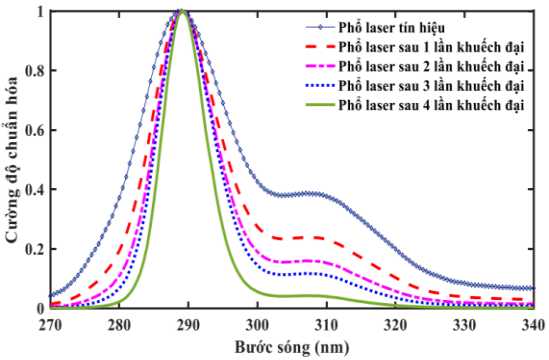
Hình 3.4. Ảnh hưởng của năng lượng laser tín hiệu lên năng lượng laser sau khuếch đại

3.1.4.3. Ảnh hưởng của độ rộng phổ laser tín hiệu lên năng lượng laser lối ra



Hình 3.5. Ảnh hưởng của độ rộng phổ laser tín hiệu lên năng lượng laser sau khuếch đại

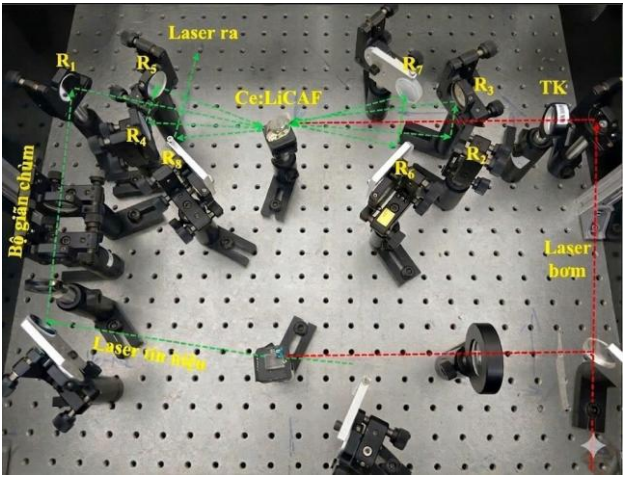
3.1.4.4. Phổ laser trong quá trình khuếch đại



Hình 3.6. Phổ laser sau từng lần khuếch đại

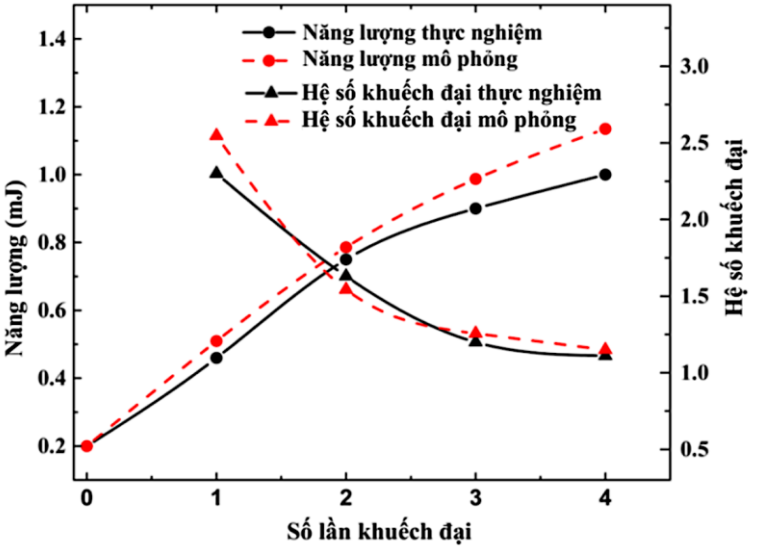
3.2. Hệ khuếch đại laser tử ngoại Ce:LiCAF không mode phổ siêu rộng bốn lần truyền qua

3.2.1. Hệ thực nghiệm khuếch đại laser tử ngoại Ce:LiCAF không mode

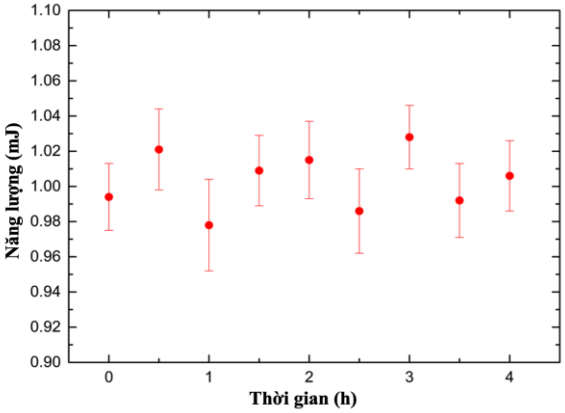


Hình 3.7. Hệ khuếch đại các xung laser UV băng rộng, bốn lần truyền qua sử dụng tinh thể Ce:LiCAF

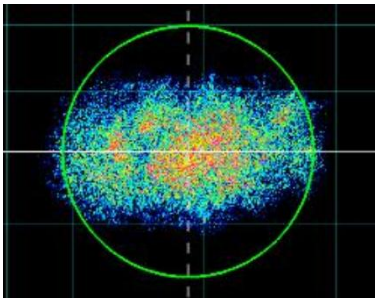
3.2.2. Đặc trưng về năng lượng trong quá trình khuếch đại



Hình 3.8. Sự thay đổi năng lượng và hệ số khuếch đại laser sau mỗi lần truyền qua

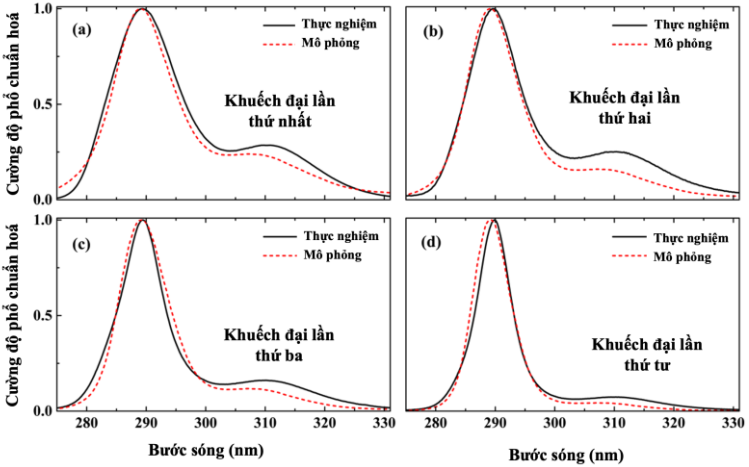


Hình 3.9. Độ ổn định của năng lượng laser sau khuếch đại



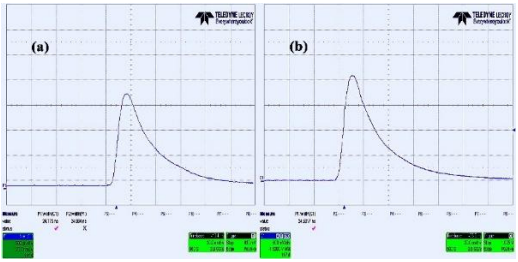
Hình 3.10. Hình ảnh mặt cắt chùm laser thu được từ CCD camera

3.2.3. Đặc trưng về phổ trong quá trình khuếch đại



Hình 3.11. Kết quả mô phỏng phổ (đường nét đứt màu đỏ) và thực nghiệm (đường liền màu đen) từ hệ khuếch đại các xung laser tử ngoại băng siêu rộng

3.2.4. Đặc trưng về thời gian của xung laser trong quá trình khuếch đại



Hình 3.12. (a) Xung laser tín hiệu và (b) Xung laser sau bốn lần khuếch đại

Kết luận chương 3: Trong Chương 3, các kết quả trong việc nghiên cứu phát triển hệ khuếch đại tín hiện cho laser UV Ce:LiCAF không mode, phổ phát xạ siêu rộng đã ghi nhận:

Dựa trên phương trình Frantz–Nodvik mở rộng, động học khuếch đại của laser UV không mode phổ siêu rộng trong tinh thể Ce:LiCAF đã được nghiên cứu. Thông qua mô phỏng, động học khuếch đại phổ của laser UV phổ siêu rộng đã được làm rõ một cách định lượng. Kết quả cho thấy năng lượng xung laser tăng đáng kể theo số lần truyền qua tinh thể Ce:LiCAF, từ khoảng 0,2 mJ lên gần 1 mJ sau bốn lần truyền qua.

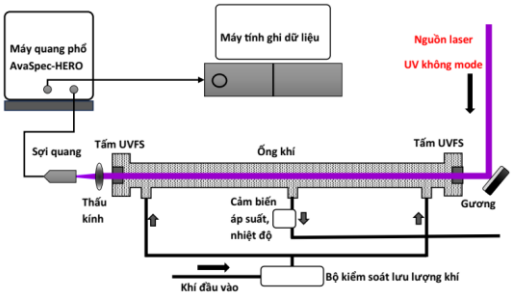
Hiện tượng thu hẹp phổ trong quá trình khuếch đại đã được khảo sát và phân tích. Kết quả mô phỏng cho thấy độ rộng phổ FWHM giảm từ khoảng 16 nm xuống còn khoảng 7 nm sau bốn lần truyền qua do các thành phần phổ gần đỉnh khuếch đại được khuếch đại mạnh hơn so với các thành phần ở rìa phổ.

Kết quả thực nghiệm cho thấy sự phù hợp tốt với mô phỏng. Năng lượng laser đầu ra đạt gần 1 mJ sau bốn lần truyền qua, phổ laser thể hiện xu hướng thu hẹp tương tự như kết quả tính toán, với đỉnh phổ được duy trì ổn định trong vùng khoảng 288–290 nm.

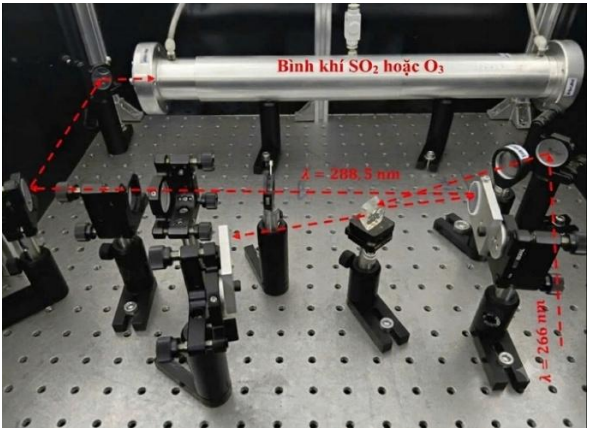
CHƯƠNG 4: ỨNG DỤNG NGUỒN LASER TỬ NGOẠI KHÔNG MODE PHỔ SIÊU RỘNG TRONG NGHIÊN CỨU KHÍ Ô NHIỄM

4.1. Hệ thực nghiệm và phương pháp xử lý dữ liệu DOAS

4.1.1. Hệ thực nghiệm đo nồng độ khí ô nhiễm



Hình 4.1. Sơ đồ hệ thực nghiệm đo khí hấp thụ sử dụng laser tử ngoại không mode phổ siêu rộng



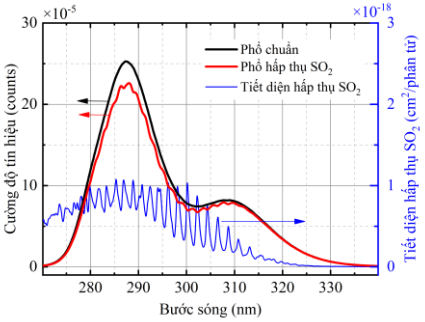
Hình 4.2. Hệ thực nghiệm đo khí ô nhiễm

4.1.2. Phương pháp DOAS và quy trình xử lý dữ liệu

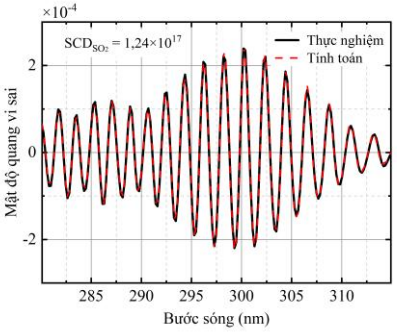
Về bản chất, phương pháp DOAS được xây dựng trên định luật Beer–Lambert mô tả sự suy giảm cường độ ánh sáng khi truyền qua môi trường hấp thụ. Quy trình phân tích và xử lý dữ liệu được xây dựng trên cơ sở lý thuyết của phương pháp DOAS và phần mềm QDOAS do BIRA-IASB phát triển.

4.2. Kiểm chuẩn hệ đo bằng khí chuẩn SO_2

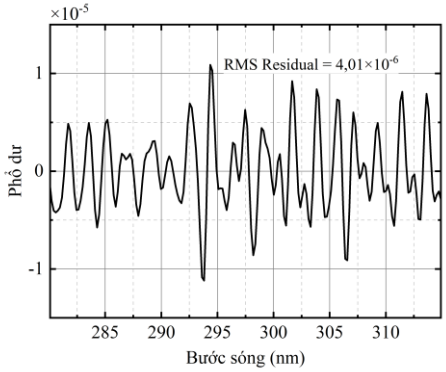
4.2.1. Phân tích dữ liệu đo khí chuẩn SO_2



Hình 4.6. Phổ chuẩn, phổ hấp thụ và phổ tiết diện hấp thụ chuẩn của SO_2 dùng trong phân tích

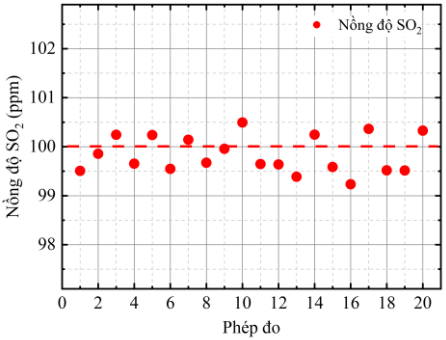


Hình 4.7. Khớp phổ vi sai khí chuẩn SO_2 bằng phần mềm QDOAS



Hình 4.8. Phổ dư sau khớp đối với khí chuẩn SO_2

4.2.2. Đánh giá độ chính xác và tin cậy của hệ đo

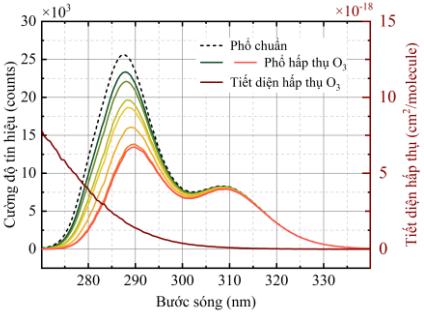


Hình 4.9. Kết quả thống kê đo nồng độ SO_2 truy hồi được từ 20 phép đo lặp lại với khí chuẩn 100 ppm

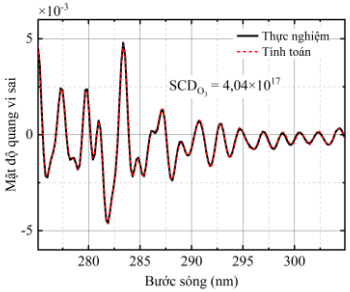
4.3. Khảo sát nồng độ khí O_3

Sau khi hệ đo đã được kiểm chuẩn bằng khí chuẩn SO_2 và cho kết quả truy hồi phù hợp với nồng độ danh định, bước tiếp theo là sử dụng hệ thực nghiệm đã phát triển để đo nồng độ khí O_3.

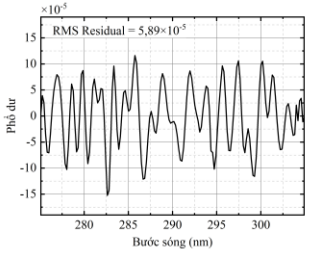
4.3.1. Phân tích dữ liệu đo khí O_3



Hình 4.10. Phổ chuẩn, phổ hấp thụ thu được khi đo khí O_3 và phổ tiết diện hấp thụ chuẩn của O_3 dùng trong phân tích



Hình 4.11. Kết quả khớp phổ vi sai đối với khí O_3 bằng phần mềm QDOAS



Hình 4.12. Phổ dư sau khớp đối với khí O_3

4.3.2. Kết quả khảo sát nồng độ khí O_3

TT	Thời điểm (phút)	Nồng độ C (ppm)	±Δc (ppm)	Chỉ số tín hiệu/nhiễu (SNR)	RMS
1	Bắt đầu	327,75	± 2,45	133,8	$5,89\times10^{-5}$
2	~5	306,99	± 2,64	116,3	$5,79\times10^{-5}$
3	~20	225,70	± 2,82	82,1	$5,57\times10^{-5}$
4	~35	149,42	± 2,92	51,2	$5,37\times10^{-5}$
5	~50	123,99	± 2,89	42,9	$5,33\times10^{-5}$
6	~65	68,04	± 2,85	23,9	$5,26\times10^{-5}$
7	~80	52,80	± 2,83	18,7	$5,22\times10^{-5}$
8	~90	36,68	± 2,79	13,1	$5,17\times10^{-5}$
9	~100	13,19	± 2,80	4,7	$5,13\times10^{-5}$

Giới hạn phát hiện là: $LOD \approx 3 \times 2{,}8 \approx 8{,}4$ ppm.

Giới hạn định lượng là: $LOQ \approx 10 \times 2{,}8 \approx 28$ ppm.

Kết luận chương 4: Trong chương này, nguồn laser UV không mode phổ siêu rộng đã được ứng dụng để xây dựng hệ thực nghiệm đo khí hấp thụ trong phòng thí nghiệm theo phương pháp DOAS. Kết quả kiểm chuẩn với khí chuẩn SO_2 cho thấy hệ đo được nồng độ khoảng 99,7 ± 1 ppm, phù hợp với nồng độ danh định 100 ± 2 ppm của khí chuẩn. Đối với khí O_3 từ bộ tạo khí, hệ đo không chỉ phát hiện và đo được nồng độ O_3 mà còn theo dõi được quá trình suy giảm nồng độ theo thời gian. Nồng độ O_3 giảm từ khoảng 327,75 ppm ở thời điểm bắt đầu xuống còn 13,19 ppm sau khoảng 100 phút.

KẾT LUẬN CHUNG:

Luận án đã thực hiện thành công việc nghiên cứu toàn diện từ cơ sở lý thuyết, mô phỏng, phát triển thực nghiệm nguồn laser UV Ce:LiCAF không mode phổ siêu rộng, nghiên cứu động học khuếch đại đến ứng dụng nguồn laser này đo nồng độ khí ô nhiễm SO_2 và O_3 bằng phương pháp DOAS. Các kết quả đạt được đã góp phần làm rõ các đặc trưng phát xạ và khuếch đại của laser UV phổ siêu rộng, đồng thời chứng minh tiềm năng ứng dụng của nguồn laser này trong lĩnh vực quan trắc môi trường. Kết quả nghiên cứu đạt được có thể khẳng định rằng nguồn laser UV Ce:LiCAF không mode phổ siêu rộng là một nguồn sáng có nhiều tiềm năng cho các hệ đo quang học trong vùng UV. Luận án không chỉ đóng góp các kết quả mới về nghiên cứu động học phát xạ và khuếch đại laser UV phổ siêu rộng dựa trên tinh thể Ce:LiCAF mà còn phát triển thành công một hệ nguồn laser và bước đầu chứng minh hiệu quả trong ứng dụng đo nồng độ khí ô nhiễm bằng phương pháp DOAS.

Kết quả của luận án tạo cơ sở khoa học và thực nghiệm cho việc tiếp tục phát triển các nguồn laser UV phổ siêu rộng có công suất và độ ổn định cao hơn, đồng thời mở ra triển vọng ứng dụng trong các hệ quan trắc môi trường quang học, đo từ xa khí ô nhiễm và các phương pháp quang phổ UV độ nhạy cao trong tương lai.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CỦA TÁC GIẢ

Công bố bài báo trên tạp chí quốc tế

1. **Quan Minh Le**, Tu Xuan Nguyen, Diep Van Nguyen, Kieu Anh Thi Doan, Bich Thi Vu, Anh Le Ngoc, Minh Hong Pham, Nobuhiko Sarukura, Hung Nguyen Dai, *Development of an ultrawide-band modeless Ce:LiCAF ultraviolet laser for SO_2 detection using differential optical absorption spectroscopy*. Vol. **594**, 2025, **Optics Communications**, pp. 132323.

Công bố bài báo trên tạp chí quốc gia

1. Nguyen Xuan Tu, Nguyen Van Diep, **Le Minh Quan**, D.T. Kieu Anh, Le Ngoc Anh, Nobuhiko Sarukura, and Pham Hong Minh, *Numerical and experimental study of an ultrabroadband modeless Ce:LiCAF ultraviolet laser: multiwavelength dynamics and power amplification.* Vol. **36**, 2026, **Communications in Physics**, pp. 205 - 218.

Hội nghị quốc gia và quốc tế

1. **Lê Minh Quân**, Nguyễn Văn Điệp, Nguyễn Xuân Tú, Phạm Đức Tú, Trần Đức Minh, Phạm Văn Dương, Phùng Việt Tiệp, Nguyễn Thị Nhung, Đặng Hồng Lưu, Nguyễn Thị Khánh Vân, Đoàn Hoài Sơn, Vũ Thị Bích, Phạm Hồng Minh, *Nghiên cứu động học laser tử ngoại phổ rộng Ce:LiCAF sử dụng buồng cộng hưởng có hệ số phản xạ gương thay đổi theo bước sóng*, **Những tiến bộ trong Quang học, Quang tử, Quang phổ và Ứng dụng XIII. ISBN: 978-604-357-381-7**, 2025, pp. 498-502.
2. **Lê Minh Quân**, Nguyễn Văn Điệp, Nguyễn Xuân Tú, Phạm Văn Dương, Lê Hồng Việt, Lê Ngọc Anh, Phạm Đức Tú, Vũ Dương, Vũ Thị Bích, Phạm Hồng Minh. *Nghiên cứu và phát triển hệ laser tử ngoại phổ siêu rộng cho ứng dụng trong nghiên cứu khí ô nhiễm*, **Tuyển tập báo cáo Hội nghị khoa học kỷ niệm 50 năm thành lập Viện Hàn lâm**. **ISBN: 978-604-357-359-6**, 2025, pp. 250 - 256**.**
3. **Le Minh Quan**, Nguyen Van Diep, Nguyen Xuan Tu, Tran Duc Minh, Doan Thi Kieu Anh, Pham Duc Tu, Pham Hong Minh., *Characterization of ultraviolet all-solid-state modeless Ce:LiCAF laser*, **CASEAN-9**. **ISBN: 978-604-357-473-9**, 2025, pp. 359 - 363**.**
4. Diep Van Nguyen, Tu Xuan Nguyen, **Le Minh Quan**, Hieu Minh Do, Kieu Anh Thi Doan, Nguyen Thi Nhung, Le Hong Viet, Dang Thi Vui & Minh Hong Pham. *Spectral dynamics of ultra-broadband laser generation and amplification using Ce:LiCAF crystal*, **CASEAN-9**. **ISBN: 978-604-357-473-9**, 2025, pp. 258 – 292.