

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



NGUYỄN VĂN DIỆP

**NGHIÊN CỨU ĐỘNG HỌC KHUẾCH ĐẠI XUNG LASER TỬ NGOẠI
280-320 NM VÀ ĐỊNH HƯỚNG
DỤNG TRONG QUAN TRẮC MÔI TRƯỜNG**

Chuyên ngành: Quang học

Mã số: 944 01 10

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ VẬT LÝ

Hà Nội – Năm 2023

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
GS. TS. Nguyễn Đại Hưng

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

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 2023.

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

Khí quyển của Trái đất là một hỗn hợp gồm hai loại khí chiếm tỉ lệ lớn là Nitơ (~78 %), Oxy (~21%). Mặc dù chỉ chiếm một lượng nhỏ trong khí quyển nhưng các hạt aerosol và một số khí phát thải từ quá trình hoạt động của con người như: Ozone (O_3), Carbon dioxide (CO_2), Sulfur dioxide (SO_2), ... có ảnh hưởng lớn đến quá trình phát triển của động thực vật trên Trái đất. Một số chất khí có phổ hấp thụ nằm trong vùng bước sóng tử ngoại. Do vậy, việc phát triển các nguồn laser tử ngoại có khả năng điều chỉnh bước sóng và có độ đơn sắc cao định hướng nghiên cứu môi trường là cần thiết.

Môi trường tinh thể laser tử ngoại Lithium Calcium Aluminum Fluoride (Ce:LiCAF) có nhiều ưu điểm được ứng dụng phổ biến cho phát xung ngắn, băng hẹp, điều chỉnh bước sóng và công suất cao. Mặc dù hệ thực nghiệm laser tử ngoại Ce:LiCAF đã được phát triển thành công, việc ứng dụng các nguồn laser này bị hạn chế do năng lượng laser lồi ra dưới ngưỡng của nhiều ứng dụng. Do vậy, việc khuếch đại các xung laser tử ngoại Ce:LiCAF có ý nghĩa quan trọng trong thực tiễn.

Bằng thực nghiệm, tinh thể Ce:LiCAF cũng đã được chứng minh là môi trường khuếch đại hiệu quả các bức xạ nằm trong vùng tử ngoại với nhiều cấu hình khuếch đại khác nhau. Tuy nhiên, các nghiên cứu trước đây chỉ tập trung vào nghiên cứu thực nghiệm. Nhằm hiểu hơn về các quá trình động học trong khuếch đại laser, việc nghiên cứu đồng thời cả thực nghiệm và lý thuyết có ý nghĩa quan trọng. Xuất phát từ các yêu cầu đó, tôi chọn đề tài “**Nghiên cứu động học khuếch đại xung laser tử ngoại 280-320 nm và định hướng ứng dụng trong kĩ thuật Lidar**” làm hướng nghiên cứu chính của mình.

2. Mục tiêu chính của luận án bao gồm:

- Nghiên cứu động học phổ khuếch đại các xung laser UV sử dụng tinh thể Ce:LiCAF.
- Phát triển hệ khuếch đại các xung laser UV sử dụng tinh thể

Ce:LiCAF.

- Bước đầu ứng dụng các nguồn laser UV Ce:LiCAF đã phát triển vào nghiên cứu, quan trắc môi trường.

3. Các nội dung nghiên cứu chính của luận án

Sử dụng phương trình Frantz-Nodvik mở rộng, nghiên cứu động học phổ khuếch đại các xung laser UV sử dụng tinh thể Ce:LiCAF.

Phát triển hệ thực nghiệm laser phát xung tín hiệu và hệ khuếch đại các xung laser UV sử dụng tinh thể Ce:LiCAF. Đánh giá đặc trưng của xung laser tín hiệu và xung laser sau khuếch đại.

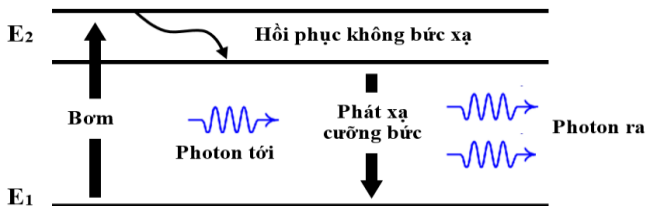
Ứng dụng laser UV Ce:LiCAF vào hệ quang phổ hấp thụ vi sai nghiên cứu nồng độ khí ô nhiễm SO₂ và đánh giá đặc trưng tán xạ của một số hạt sol khí phổ biến.

CHƯƠNG 1: VẬT LÝ VÀ CÔNG NGHỆ TRONG KHUẾCH ĐẠI LASER

1.1. Tổng quan về khuếch đại laser

1.1.1. Nguyên lý khuếch đại laser

Nguyên lý khuếch đại laser dựa trên hiện tượng phát xạ cưỡng bức được chỉ ra trên Hình 1.1.



Hình 1.1. Nguyên lý khuếch đại laser

1.1.2. Một số vấn đề vật lý trong khuếch đại laser

Trong khuếch đại laser cần chú ý đến một số vấn đề như: Lựa chọn môi trường khuếch đại; Nguồn bơm và cấu hình bơm; Khuếch đại phát xạ tự

phát (ASE); Phân bố năng lượng của chùm laser sau khuếch đại; Hiệu ứng quang học phi tuyến

1.1.3. Cấu hình khuếch đại laser

Việc lựa chọn cấu hình cũng như các thành phần của bộ khuếch đại laser là quan trọng, phụ thuộc vào yêu cầu công suất laser sau khuếch đại, đặc trưng của xung laser tín hiệu và đặc trưng của môi trường khuếch đại.

1.1.4. Phương trình Franz-Nodvik cổ điển

Năng lượng laser sau khuếch đại có thể được tính toán theo phương trình Frantz – Nodvik cổ điển:

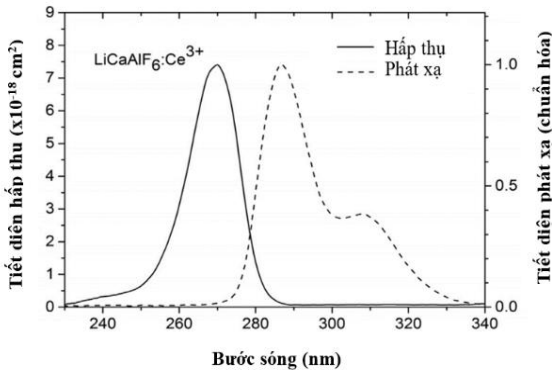
$$E_{out} = E_s \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{E_{in}}{E_s} \right) - 1 \right] \exp(g_0 l) \right\}$$

1.2. Tổng quan về môi trường laser Ce:LiCAF

1.2.1. Môi trường fluoride pha tạp ion Cerium

Đến nay, người ta đã phát triển thành công sáu môi trường tinh thể Ce:Fluoride phát trực tiếp bức xạ tử ngoại trên một dải phổ rộng.

1.2.2. Các đặc trưng của môi trường Ce:LiCAF



Hình 1.13. 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. Môi trường hấp thụ mạnh tại bước sóng 266 nm (Hình 1.13). Tiết diện

phát xạ lớn, phổ phát xạ của Ce:LiCAF rộng từ 275 nm đến 325 nm. Thời gian sống huỳnh quang của ion Ce^{3+} ở trạng thái kích thích là $25 \text{ ns} \div 30 \text{ ns}$, mật độ năng lượng bão hòa cao cỡ 115 mJ/cm^2 , ngưỡng phá hủy cao 5 J/cm^2 .

1.2.3. Hệ laser tử ngoại dựa trên tinh thể Ce:LiCAF

Với những ưu điểm vượt trội như trên, môi trường Ce:LiCAF đã được nhiều nhóm nghiên cứu lựa chọn cho việc phát triển các nguồn laser UV băng hẹp, laser UV xung ngắn và laser UV công suất cao.

1.3. Ứng dụng laser tử ngoại

Trải qua sáu thập kỷ phát triển, laser nói chung và laser UV nói riêng gắn liền với nhiều thành tựu khoa học mang tính đột phá ở nhiều lĩnh vực khác nhau như gia công vật liệu, vi cơ khí, y học và nghiên cứu môi trường.

Kết luận chương 1: Trong chương 1, tổng quan về vấn đề khuếch đại laser cũng như phương trình khuếch đại Franz-Nodvik cổ điển đã được trình bày. Phương trình Franz-Nodvik cổ điển không cho phép khảo sát quá trình khuếch đại của các xung laser tín hiệu băng rộng. Do vậy phương trình Franz-Nodvik mở rộng cho phép khảo sát sự khuếch đại trên toàn miền phổ laser tín hiệu sẽ được trình bày trong chương 2.

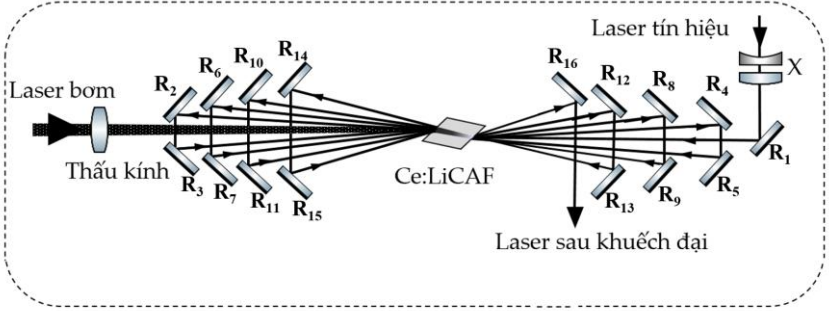
Đến nay, việc nghiên cứu tường minh các quá trình động học trong khuếch đại các xung laser băng rộng sử dụng tinh thể Ce:LiCAF vẫn chưa được thực hiện. Do vậy, việc nghiên cứu đồng thời động học và phát triển thực nghiệm hệ khuếch đại các xung laser UV sử dụng tinh thể Ce:LiCAF sẽ được nghiên cứu lần lượt trong chương 2 và chương 3.

CHƯƠNG 2

ĐỘNG HỌC PHỔ KHUẾCH ĐẠI CÁC XUNG LASER TỬ NGOẠI SỬ DỤNG TINH THỂ Ce:LiCAF

2.1. Cấu hình hệ khuếch đại nhiều lần truyền qua sử dụng tinh thể Ce:LiCAF

Hệ khuếch đại laser UV Ce:LiCAF tám lần truyền qua đã được thiết kế, cấu hình của hệ được chỉ ra trên Hình 2.1.



Hình 2.1. Cấu hình hệ khuếch đại các xung laser UV nhiều lần truyền qua sử dụng tinh thể Ce:LiCAF.

2.2. Mô hình lý thuyết cho khuếch đại laser

Để khảo sát quá trình khuếch đại xung laser băng rộng, Peter Kroetz và cộng sự đã đề xuất phương trình Frantz-Nodvik mở rộng, phương trình này định nghĩa một đại lượng mới là hệ số nghịch đảo độ tích lũy β :

$$\beta = \frac{n_e}{N}. \quad (2.1)$$

Tiết diện khuếch đại có thể được xác định theo công thức:

$$\sigma_{g,i-1}(\lambda) = \beta_i (\sigma_{em}(\lambda) + \sigma_{abs}(\lambda)) - \sigma_{abs}(\lambda). \quad (2.2)$$

Hệ số khuếch đại một lần truyền qua được xác định bằng công thức:

$$G_{i-1}(\lambda) = \exp(\sigma_{g,i-1}(\lambda)NL). \quad (2.3)$$

Thông lượng laser lồi ra J_i được liên hệ với thông lượng đầu vào:

$$J_i(\lambda) = J_{sat}(\lambda)T(\lambda) \ln \left[1 + G_{i-1} \left(\exp\left(\frac{J_{i-1}(\lambda)}{J_{sat}(\lambda)} - 1\right) \right) \right]. \quad (2.4)$$

Thông lượng bão hòa được xác định bằng:

$$J_{sat}(\lambda) = \frac{hc}{\lambda(\sigma_{em}(\lambda) + \sigma_{abs}(\lambda))}. \quad (2.5)$$

Hệ số nghịch đảo độ tích lũy được cập nhật sau mỗi lần khuếch đại:

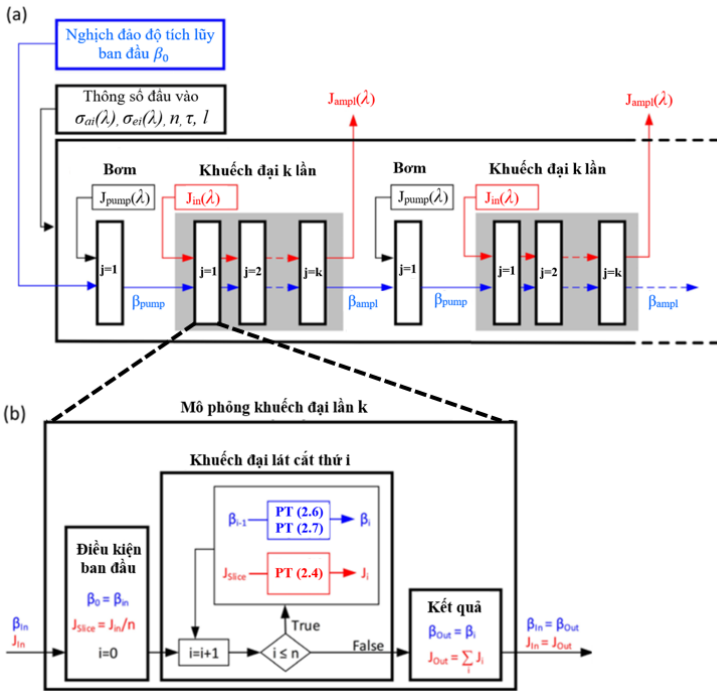
$$\beta_i = \beta_{i-1} - \frac{\int \lambda \left[\frac{J_i(\lambda)}{T(\lambda)} - J_{i-1}(\lambda) \right] d\lambda}{hc l N}. \quad (2.6)$$

Khi tính đến cả mất mát do phát xạ tự phát:

$$\beta_i^* = \beta_i \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right). \quad (2.7)$$

Quá trình mô phỏng khuếch đại được chia thành ba bước:

- (1) Thông lượng laser tín hiệu đầu vào được chia thành những lát cắt theo những khoảng thời gian bằng nhau Δt .
- (2) Các lát cắt này liên tục đi qua môi trường khuếch đại, hệ số β được cập nhật sau mỗi lát cắt đi qua.
- (3) Thông lượng laser ló ra là tổng của các thông lượng thành phần sau quá trình khuếch đại



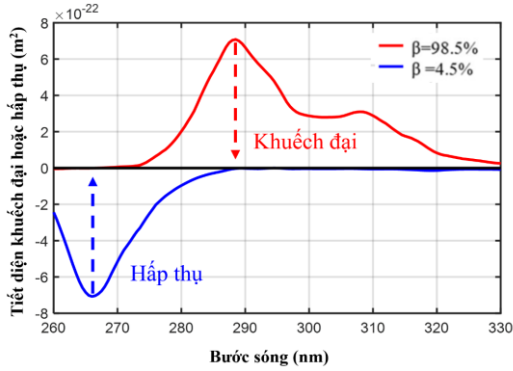
Hình 2.4. Sơ đồ khối cho quá trình mô phỏng khuếch đại xung laser.

2.3. Thông số sử dụng trong mô phỏng

2.3.1. Thông số của linh kiện và thiết bị quang

Các thông số sử dụng trong mô phỏng được lấy từ các linh kiện, thiết bị hiện có tại phòng thí nghiệm Quang tử - Viện Vật lý.

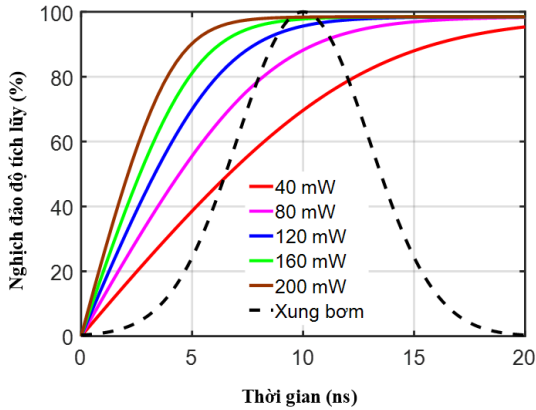
2.3.2. Tiết diện khuếch đại và hấp thụ của môi trường Ce:LiCAF



Hình 2.5. Tiết diện khuếch đại hoặc hấp thụ của môi trường Ce:LiCAF ở các giá trị β khác nhau.

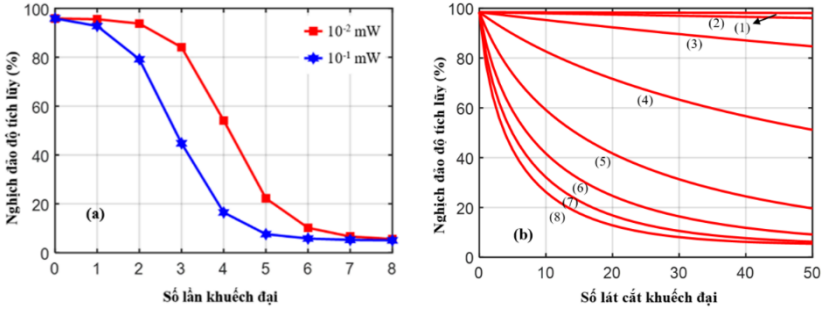
2.4. Động học khuếch đại xung laser UV sử dụng tinh thể Ce:LiCAF

2.4.1. Sự thay đổi của nghịch đảo độ tích lũy trong quá trình bơm và khuếch đại



Hình 2.6. Ảnh hưởng của công suất laser bơm lên hệ số nghịch đảo độ tích lũy

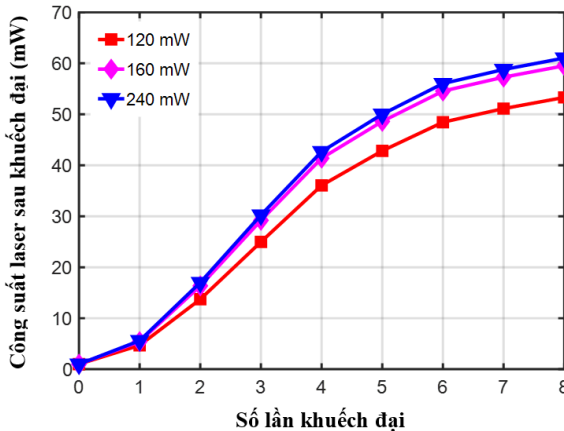
Công suất bơm càng lớn thì hệ số nghịch đảo độ tích lũy càng nhanh đạt đến trạng thái bão hòa. Trong khi đó, sự suy giảm nghịch đảo độ tích lũy khi laser tín hiệu đi vào môi trường khuếch đại được thể hiện trên Hình 2.7.



Hình 2.7. a) Nghịch đảo độ tích lũy sau mỗi lần khuếch đại.
b). Hệ số nghịch đảo độ tích lũy trong từng lần khuếch đại.

2.4.2. Ảnh hưởng của công suất laser bơm lên công suất laser sau khuếch đại

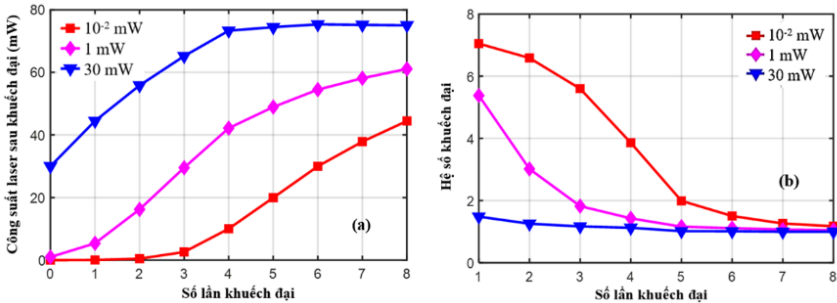
Kết quả khảo sát ảnh hưởng của laser bơm lên công suất laser lõi ra được chỉ ra trên Hình 2.8. Với cùng công suất laser tín hiệu 1 mW, công suất laser sau tám lần khuếch đại là 54 mW, 60 mW, 62 mW tương ứng với công suất laser bơm lần lượt là 120 mW, 160 mW và 240 mW. Như vậy, công suất laser sau tám lần khuếch đại sẽ tăng khi công suất laser bơm tăng, nguyên nhân do công suất laser bơm tăng thì độ khuếch đại của môi trường cũng tăng dẫn tới công suất laser sau khuếch đại tăng.



Hình 2.8. Ảnh hưởng của công suất bơm lên công suất laser sau khuếch đại $P_{in}=1$ mW, $P_{pump}= 120, 160, 200$ mW.

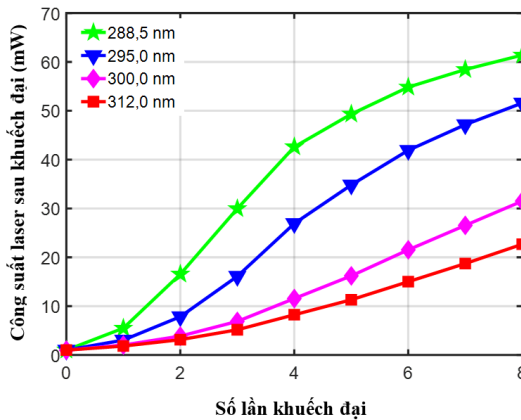
2.4.3. Ảnh hưởng của công suất laser tín hiệu lên công suất laser sau khuếch đại

Kết quả mô phỏng được chỉ ra trên Hình 2.9, hệ số khuếch đại có xu hướng giảm khi công suất chùm laser tín hiệu tăng và khuếch đại laser chỉ hiệu quả trong một vài lần khuếch đại đầu khi công suất chùm laser chưa đạt đến trạng thái bão hòa.



Hình 2.9. Ảnh hưởng của công suất laser tín hiệu lên a). Công suất laser sau khuếch đại và b). Hệ số khuếch đại. $P_{in}=10^{-2}$ mW, 1 mW, 30 mW.

2.4.4. Ảnh hưởng của bước sóng laser tín hiệu lên công suất laser sau khuếch đại



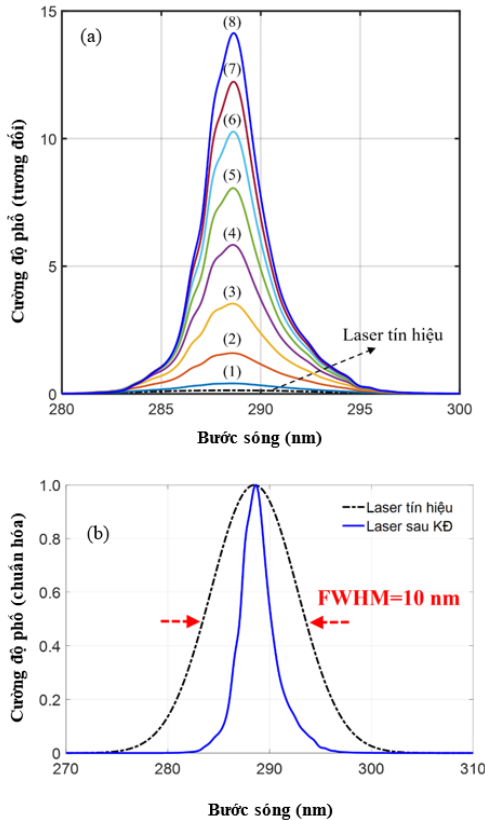
Hình 2.10. Ảnh hưởng của bước sóng laser tín hiệu lên công suất laser sau khuếch đại, $P_{in}=1$ mW, $\lambda=288,5, 295, 300$ và 312 nm.

Kết quả khảo sát được chỉ ra trên Hình 2.10 cho thấy, bước sóng laser tín hiệu càng gần đỉnh phát xạ của môi trường Ce:LiCAF thì công suất

laser sau khuếch đại càng lớn. Nguyên nhân do bước sóng laser tín hiệu càng gần đỉnh phát xạ của môi trường Ce:LiCAF thì tiết diện khuếch đại càng lớn.

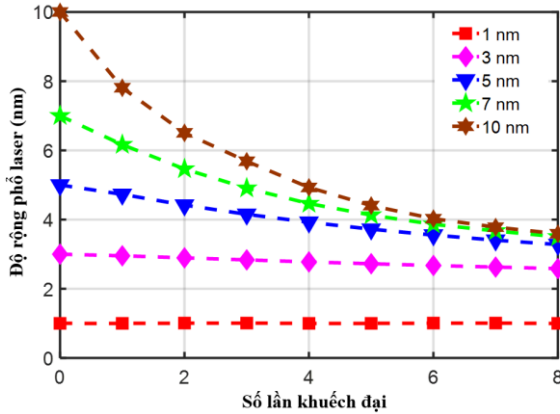
2.4.5. Ảnh hưởng của độ rộng phổ laser tín hiệu lên phổ laser sau khuếch đại

Kết quả khảo sát được chỉ ra trên Hình 2.11.(a) cho thấy, laser sau mỗi lần khuếch đại có cường độ phổ tăng lên nhưng đỉnh phổ vẫn giữ không đổi tại bước sóng 288,5 nm. Độ rộng phổ laser sau mỗi lần khuếch đại đã bị thu hẹp lại, Hình 2.11.(b). Điều này được giải thích do tiết diện khuếch đại tại đỉnh phổ lớn hơn so với hai bên sườn phổ do đó phần năng lượng khuếch đại được thêm vào đỉnh phổ là lớn hơn so với hai bên sườn phổ.



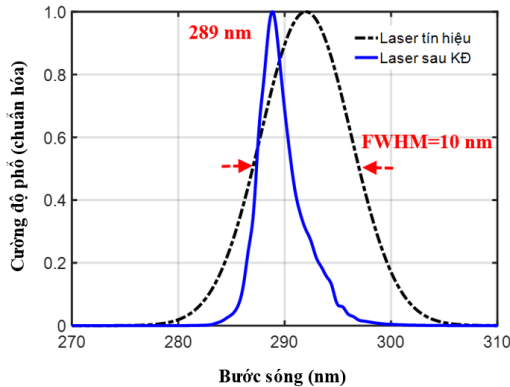
Hình 2.11.a). Phổ laser tín hiệu và phổ laser sau từng lần khuếch đại.
b). Phổ laser tín hiệu và laser sau 8 lần khuếch đại.

Phổ laser tín hiệu càng rộng thì hiệu ứng thu hẹp phổ trong quá trình khuếch đại càng thể hiện rõ. Tuy nhiên, với độ rộng phổ laser tín hiệu nhỏ hơn 3 nm thì hiệu ứng thu hẹp vạch phổ gần như không đáng kể (Hình 2.12).



Hình 2.12. Phổ laser sau từng lần khuếch đại, $\lambda=288,5$ nm, FWHM=1 nm, 3 nm, 5 nm, 7 nm, 10 nm.

2.4.6. Dịch đỉnh phổ laser tín hiệu trong quá trình khuếch đại



Hình 2.13. Hiệu tượng thu hẹp phổ trong quá trình khuếch đại $P_{in}=1$ mW, $\lambda=292$ nm, FWHM=10 nm.

Kết quả khảo sát trên hình 2.13 cho thấy, đỉnh phổ laser lồi ra đã dịch 3 nm về bước sóng 289 nm so với laser tín hiệu, đồng thời độ rộng phổ laser cũng bị thu hẹp lại. Nguyên nhân do môi trường Ce:LiCAF có tiết diện

khuếch đại lớn nhất tại bước sóng 288,5 nm và giảm dần về hai bên sườn phổ, do đó sau mỗi lần khuếch đại phổ laser có xu hướng dịch về phía đỉnh phát xạ. Điều này cũng dẫn tới phổ laser sau khuếch đại có xu hướng ưu tiên sườn trước và phổ laser sau khuếch đại không còn có dạng Gauss.

Kết luận chương 2: Trong chương 2 bằng việc giải phương trình khuếch đại Frantz-Nodvik mở rộng, động học phổ cho bộ khuếch đại Ce:LiCAF tám lần truyền qua đã được nghiên cứu tường minh, ảnh hưởng của công suất laser bơm, cũng như công suất và bước sóng laser tín hiệu lên công suất laser sau từng lần khuếch đại đã được đánh giá.

Hiện tượng thu hẹp phổ trong quá trình khuếch đại đã được chứng minh. Chùm laser tín hiệu có đỉnh phổ ở bước sóng 288,5 nm và độ rộng phổ 10 nm sau tám lần khuếch đại đã bị thu hẹp về 3,5 nm. Laser tín hiệu có độ rộng phổ lớn thì hiện tượng thu hẹp phổ càng thể hiện rõ rệt. Trong khi đó, hiện tượng thu hẹp phổ trong quá trình khuếch đại gần như không đáng kể với laser tín hiệu có độ rộng phổ dưới 3 nm.

Hiện tượng dịch đỉnh phổ trong quá trình khuếch đại cũng đã được khảo sát, laser tín hiệu có độ rộng phổ 10 nm và đỉnh phổ tại bước sóng 292 nm sau tám lần khuếch đại đã dịch 3 nm về phía gần đỉnh phát xạ của môi trường Ce:LiCAF.

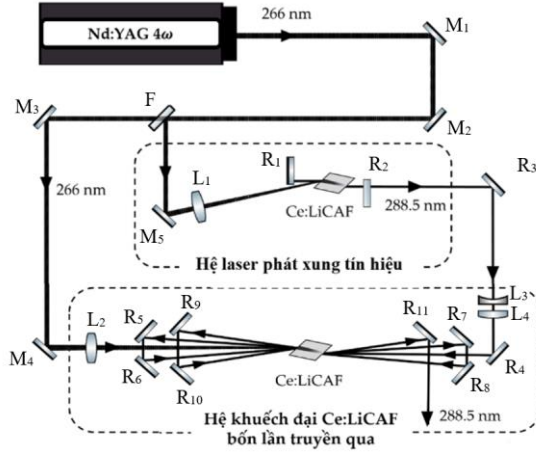
CHƯƠNG 3

KHUẾCH ĐẠI XUNG LASER TỪ NGOẠI SỬ DỤNG TINH THỂ Ce:LiCAF

3.1. Phát triển hệ khuếch đại xung laser từ ngoại bằng rộng sử dụng tinh thể Ce:LiCAF

3.1.1. Cấu hình hệ khuếch đại

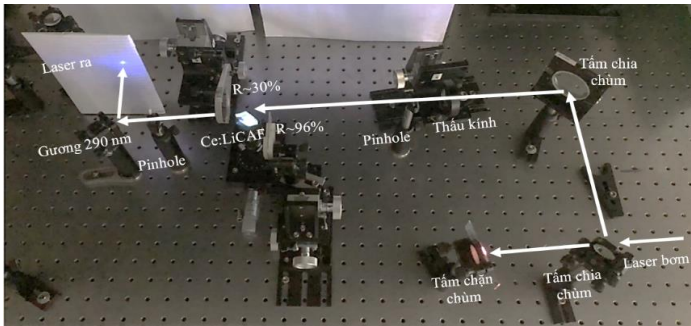
Sơ đồ hệ phát và hệ khuếch đại các xung laser UV sử dụng tinh thể Ce:LiCAF được chỉ ra trên Hình 3.1.



Hình 3.1. Sơ đồ hệ phát và khuếch đại các xung laser tử ngoại, băng rộng, bốn lần truyền qua sử dụng tinh thể Ce:LiCAF.

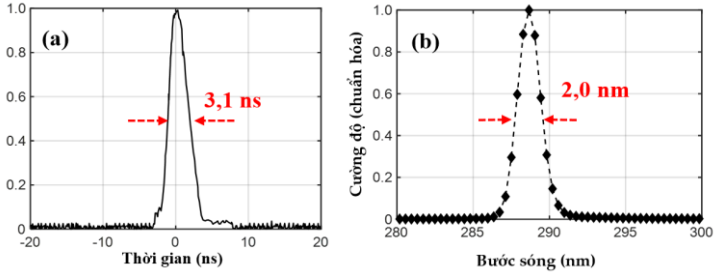
3.1.2. Đặc trưng phát xạ của hệ laser tín hiệu Ce:LiCAF sử dụng cấu hình buồng cộng hưởng Fabry-Perot

Hệ laser tử ngoại Ce:LiCAF sử dụng BCH Fabry-Perot phát các xung laser băng rộng được chỉ ra trên Hình 2.10. Ngưỡng phát laser được xác định tại công suất bơm 25 mW. Hiệu suất đạt được là 19,5 %, năng lượng lớn nhất thu được là 18 mW tại năng lượng bơm là 120 mW.



Hình 3.2. Hệ thực nghiệm laser UV Ce:LiCAF cấu hình BCH Fabry-Perot.

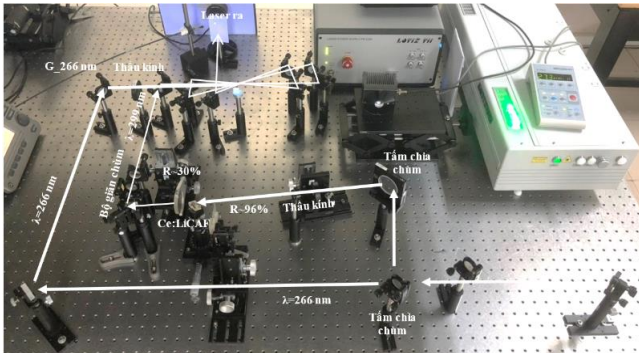
Tại năng lượng bơm 55 mW (lớn hơn ~2 lần trên ngưỡng) laser hoạt động ổn định, năng lượng laser lồi ra là 7 mW, độ rộng xung 3,13 ns, phổ laser lồi ra rộng 2,0 nm được chỉ ra trên Hình 2.12.



Hình 2.12. (a) Độ rộng xung và (b) độ rộng phổ laser lõi ra.

3.1.3. Khuếch đại xung laser tử ngoại băng rộng sử dụng tinh thể Ce:LiCAF

Hệ thực nghiệm khuếch đại các xung laser tử ngoại băng rộng sử dụng tinh thể Ce:LiCAF được chỉ ra trên Hình 3.5. Thông số xung laser tín hiệu và xung laser sau khuếch đại chỉ ra trên Bảng 3.2.

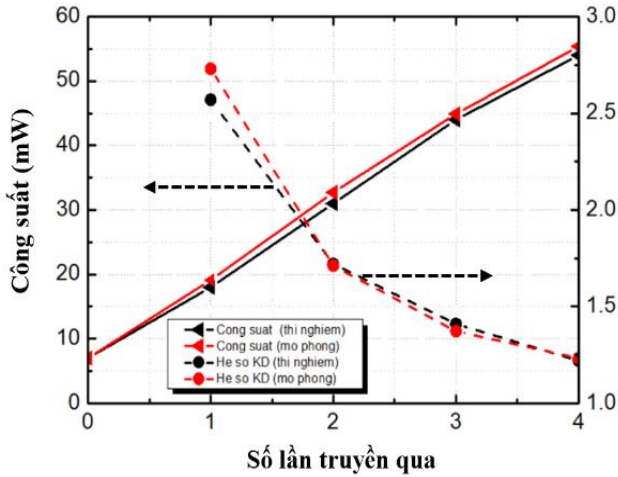


Hình 3.5. Hệ thực nghiệm khuếch đại các xung laser tử ngoại băng rộng bốn lần truyền qua sử dụng tinh thể Ce:LiCAF.

Bảng 3.2. Thông số xung laser tín hiệu và xung laser sau khuếch đại (hệ khuếch đại các xung laser băng rộng).

Thông tin	Xung tín hiệu	Xung sau khuếch đại
Công suất (mW)	7,0	54
Bước sóng (nm)	288,5	288,5
FWHM (nm)	2,0	2,0
Độ rộng xung (ns)	3,0	3,0

Các kết quả thực nghiệm và mô phỏng chi tiết về công suất cũng như hệ số khuếch đại trong mỗi lần truyền qua được chỉ ra trên Hình 3.7.



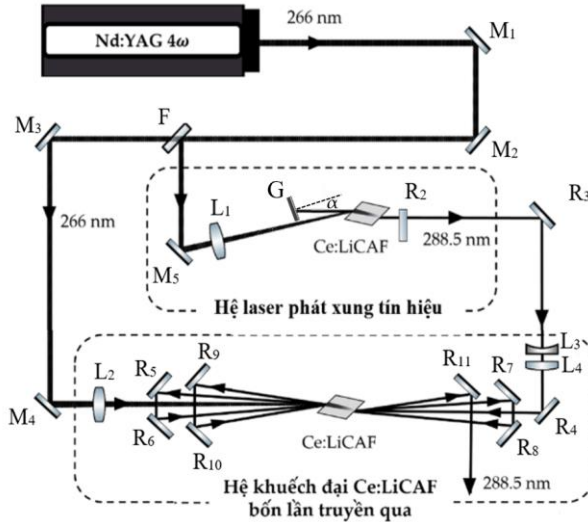
Hình 3.7. Công suất và hệ số khuếch đại sau mỗi lần truyền qua (hệ khuếch đại các xung laser băng rộng).

Kết quả thực nghiệm (đường màu đen) cho thấy, công suất laser lồi ra sau mỗi lần khuếch đại lần lượt là 18 mW, 31 mW, 44 mW, 54 mW tương ứng với hệ số khuếch đại lần lượt là 2,5; 1,7, 1,4; 1,3. Hơn thế nữa, các kết quả mô phỏng công suất sau khuếch đại và hệ số khuếch đại (đường màu đỏ trên Hình 3.7) cho thấy sự phù hợp tốt giữa thực nghiệm và lý thuyết.

3.2. Phát triển hệ khuếch đại xung laser tử ngoại bằng hợp sử dụng tinh thể Ce:LiCAF

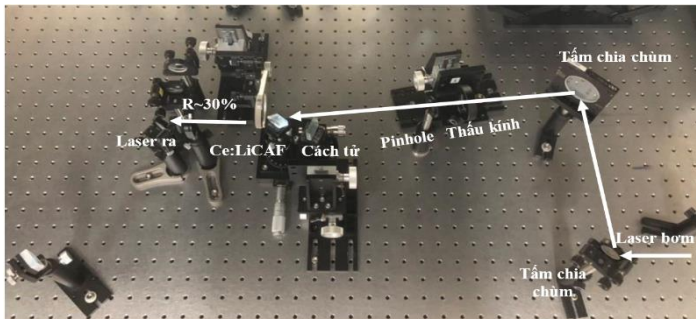
3.2.1. Cấu hình hệ khuếch đại

Hệ khuếch đại các xung laser UV băng hẹp sử dụng tinh thể Ce:LiCAF được chỉ ra trên Hình 3.8.



Hình 3.8. Sơ đồ hệ khuếch đại các xung laser tử ngoại, băng hẹp, bốn lần truyền qua sử dụng tinh thể Ce:LiCAF

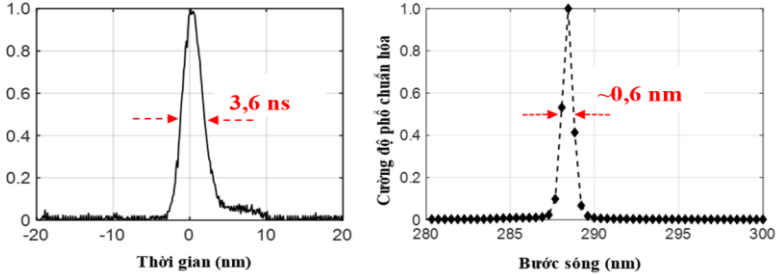
3.2.2. Laser tín hiệu băng hẹp sử dụng cấu hình BCH Littrow



Hình 2.13. Hệ thực nghiệm laser UV Ce:LiCAF phát bức xạ băng hẹp sử dụng cấu hình BCH Littrow.

Hệ laser tử ngoại Ce:LiCAF sử dụng BCH Littrow phát các xung laser tử ngoại băng hẹp được chỉ ra trên Hình 2.13. Khi góc quay của cách tử so với trục của BCH được giữ không đổi là $20,3^\circ$, tăng dần công suất laser bơm, ngưỡng phát laser được xác định tại công suất bơm 40 mW và bức xạ laser lồi ra được xác định tại bước sóng 288.5 nm. Tiếp tục tăng công suất laser bơm, năng lượng laser lồi ra tăng dần và hiệu suất đạt 8,5 %.

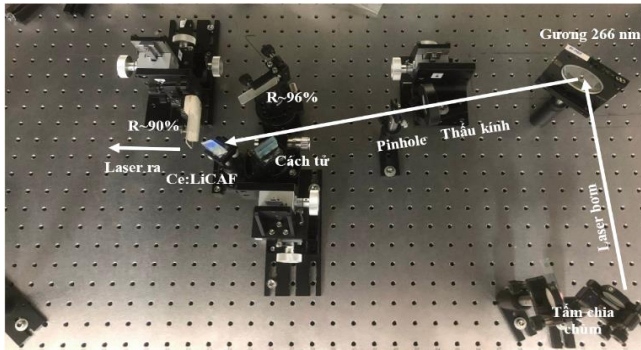
Tại năng lượng laser bơm được tăng lên 120 mW (~3 lần trên ngưỡng), góc quay của cách tử so với trục BCH thay đổi từ 19° - 23° , vùng điều chỉnh bước sóng đạt được là 11 nm liên tục từ 285 nm đến 296 nm. Tại góc quay của cách tử là $20,3^{\circ}$, năng lượng 120 mW, độ rộng xung là 3,6 ns và độ rộng phổ là 0,6 nm được chỉ ra trên Hình 3.12.



Hình 2.12. (a) Độ rộng xung và (b) độ rộng phổ laser lồi ra với cấu hình BCH Littrow.

3.2.3. Laser tín hiệu băng hẹp sử dụng cấu hình BCH Littman

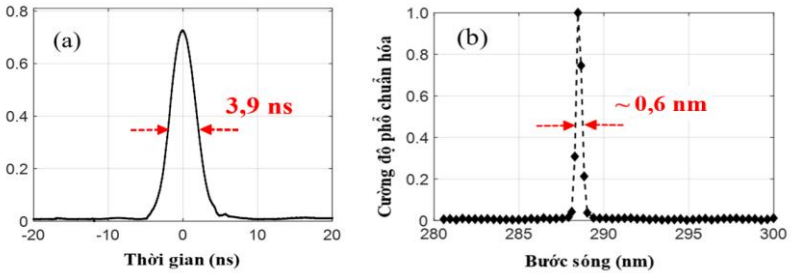
Cấu hình hệ laser Ce:LiCAF sử dụng BCH Littman phát các xung laser tử ngoại băng hẹp được chỉ ra trên Hình 2.15.



Hình 3.15. Hệ thực nghiệm laser UV Ce:LiCAF phát băng hẹp sử dụng cấu hình BCH Littman.

Ngưỡng phát của hệ laser là 120 mW, tiếp tục tăng năng lượng laser bơm lên 160 mW, năng lượng laser lồi ra thu được là 1,5 mW (hiệu suất ~

1%). Độ rộng xung laser là 3,9 ns được chỉ ra trên Hình 2.16.a và độ rộng phổ laser ló ra là 0,6 nm, đạt đến giới hạn của thiết bị đo (Hình 2.16.b).

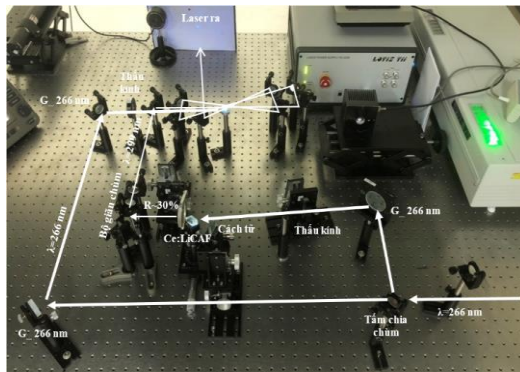


Hình 2.16. (a) Độ rộng xung và (b) độ rộng phổ laser ló ra với cấu hình BCH Littman.

Để khảo sát khả năng điều chỉnh bước sóng của hệ laser UV Ce:LiCAF phát băng hẹp sử dụng cấu hình BCH Littman, gương cuối của BCH được xoay góc từ $12,50^{\circ}$ - $19,50^{\circ}$, vùng điều chỉnh bước sóng đạt được rộng 4,5 nm từ 286 nm đến 290,5 nm.

3.2.4. Khuếch đại xung laser tử ngoại băng hẹp sử dụng tinh thể Ce:LiCAF

Hệ thực nghiệm khuếch đại các xung laser tử ngoại băng hẹp sử dụng tinh thể Ce:LiCAF được chỉ ra trên Hình 3.20.

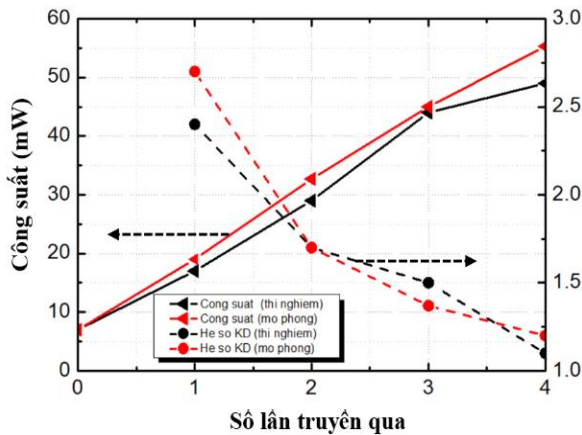


Hình 3.20. Hệ thực nghiệm khuếch đại các xung laser tử ngoại băng hẹp bốn lần truyền qua sử dụng tinh thể Ce:LiCAF.

Bảng 3.3. Thông số xung laser tín hiệu và xung laser sau khuếch đại
(Hệ khuếch đại các xung laser tử ngoại băng hẹp)

Thông tin	Xung tín hiệu	Xung sau khuếch đại
Công suất (mW)	7	49
Bước sóng (nm)	288,5	288,5
FWHM (nm)	0,7	0,7
Độ rộng xung (ns)	3,5	3,5

Các kết quả thực nghiệm về công suất cũng như hệ số khuếch đại trong mỗi lần truyền qua được chỉ ra trên Hình 3.22 (đường màu đen). Công suất laser ló ra sau mỗi lần khuếch đại lần lượt là 17 mW, 29 mW, 44 mW, 49 mW tương ứng với hệ số khuếch đại lần lượt là 2,3; 1,7; 1,3; 1,2.



Hình 3.22. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm công suất bức xạ laser sau mỗi lần truyền qua.

Kết luận chương 3: Chương 3 trình bày các kết quả thực nghiệm phát triển hệ khuếch đại xung laser UV sử dụng tinh thể Ce:LiCAF tại phòng thí nghiệm của Trung tâm Điện tử học Lượng tử, Viện Vật lý, bao gồm:

Phát triển hệ khuếch đại các xung laser UV băng rộng bốn lần truyền qua sử dụng tinh thể Ce:LiCAF. Hệ khuếch đại được bơm bằng họa ba bậc bốn của laser Nd:YAG tại bước sóng 266 nm, công suất bơm là 160 mW.

Xung laser sau bốn lần khuếch đại có công suất đạt được là 54 mW tương ứng với hệ số khuếch đại ~8 lần, kết quả thực nghiệm này cho thấy sự phù hợp tốt (sai số khoảng 5 %) với kết quả mô phỏng bằng phương trình Frantz-Nodvik mở rộng.

Hệ khuếch đại các xung laser UV bằng hợp bốn lần truyền qua sử dụng tinh thể Ce:LiCAF cũng đã được phát triển. Xung laser tín hiệu bằng hợp có công suất 7 mW, độ rộng phổ 0,6 nm tại bước sóng 288,5 nm sau bốn lần khuếch đại các đặc trưng về phổ của laser sau khuếch đại không thay đổi so với laser tín hiệu. Trong khi đó, công suất laser sau khuếch đại là 49 mW tương ứng với hệ số khuếch đại 7.

CHƯƠNG 4

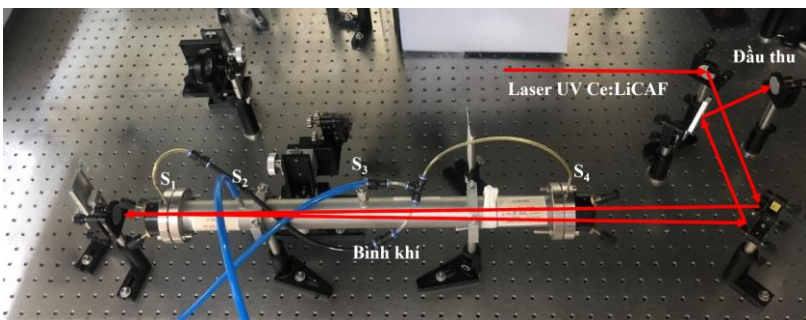
ỨNG DỤNG LASER TỬ NGOẠI Ce:LiCAF TRONG QUAN TRẮC MÔI TRƯỜNG

4.1. Phát triển hệ quang phổ hấp thụ vi sai xác định mật độ khí SO_2

4.1.1. Hệ quang phổ hấp thụ vi sai ứng dụng laser tử ngoại Ce:LiCAF

Hệ DOAS ứng dụng laser UV Ce:LiCAF đã được xây dựng trong phòng thí nghiệm cho việc xác định nồng độ chất khí chuẩn SO_2 . Cấu tạo của hệ có thể được chia thành ba bộ phận gồm: Hệ laser; Bình chứa khí; Hệ thu tín hiệu và xử lý số liệu.

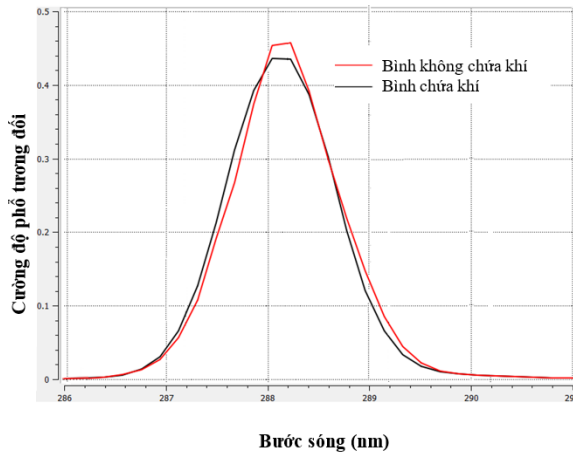
4.1.2. Đo mật độ khí SO_2 bằng hệ quang phổ hấp thụ vi sai



Hình 4.2. Hệ thí nghiệm khảo sát nồng độ khí SO_2 bằng kỹ thuật quang phổ hấp thụ vi sai.

Dựa trên sơ đồ hệ thí nghiệm đã được thiết kế, hệ DOAS khảo sát nồng độ khí đã được phát triển trong điều kiện phòng thí nghiệm (Hình 4.2).

Các đặc trưng phổ của laser Ce:LiCAF sau khi đi qua bình trong trường hợp bình không chứa khí SO_2 và có chứa khí SO_2 đã được ghi nhận và chỉ ra trên Hình 4.3. Sau khi dữ liệu phổ được xử lý bằng phần mềm Q-DOAS, kết quả cho thấy nồng độ khí SO_2 đo được là 100 ppm với sai số phép đo là nhỏ cỡ 6%. Như vậy, ứng dụng laser tử ngoại Ce:LiCAF vào kỹ thuật DOAS cho phép xác định được chính xác nồng độ khí SO_2 với sai số thấp.



Hình 4.3. Phổ laser thu được trong hai trường hợp bình chứa khí và không chứa khí SO_2 .

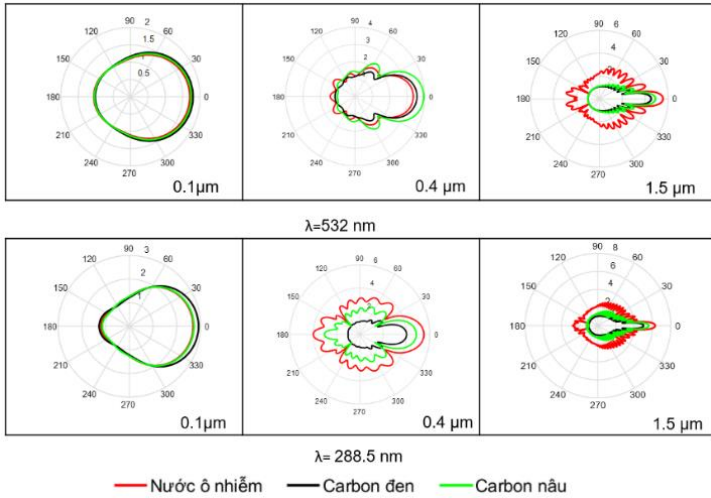
4.2. Nghiên cứu đặc trưng tán xạ của một số hạt sol khí bằng laser tử ngoại điều chỉnh bước sóng Ce:LiCAF

4.2.1. Thông số sử dụng trong mô phỏng tán xạ

Các thông số sử dụng trong mô phỏng được lấy từ số liệu thực nghiệm.

4.2.2. Ảnh hưởng của bước sóng kích thích đến tán xạ góc của các hạt

Kết quả khảo sát ảnh hưởng của bước sóng laser kích thích đến tán xạ góc của các hạt được chỉ ra trên Hình 4.4. Kết quả cho thấy so với vùng bước sóng nhìn thấy, vùng bước sóng UV phù hợp hơn cho khảo sát tán xạ của các hạt sol khí có kích thước nhỏ.



Hình 4.4. Cường độ tán xạ theo góc của các hạt carbon đen, carbon nâu và nước ô nhiễm với kích thước khác nhau.

Kết quả nghiên cứu còn chỉ ra bước sóng phù hợp nhất trong dải điều chỉnh để khảo sát tán xạ ngược của các hạt sol khí là từ 280 đến 290 nm hoặc từ 305 đến 320 nm.

Kết luận chương 4: Chương 4 trình bày việc phát triển một hệ quang phổ hấp thụ vi sai ứng laser UV Ce:LiCAF cho việc xác định mật độ khí SO_2 . Trong điều kiện phòng thí nghiệm, hệ quang phổ hấp thụ vi sai cho kết quả khảo sát với độ chính xác cao, sai số phép đo khoảng 6%. Bên cạnh đó, cường độ tán xạ theo góc của một số hạt sol khí phổ biến trong khí quyển là carbon đen, carbon nâu và nước ô nhiễm bằng lý thuyết tán xạ Mie.

KẾT LUẬN CHUNG

Luận án đã đạt được một số kết quả chính như sau:

Động học phổ cho bộ khuếch đại Ce:LiCAF tám lần truyền qua đã được nghiên cứu tường minh, ảnh hưởng của công suất laser bơm, cũng như công suất và bước sóng laser tín hiệu lên công suất laser sau từng lần khuếch đại đã được nghiên cứu. Hiện tượng thu hẹp phổ, dịch đỉnh phổ trong quá trình khuếch đại cũng đã được khảo sát.

Hệ khuếch đại các xung laser UV băng rộng bốn lần truyền qua sử dụng tinh thể Ce:LiCAF đã được phát triển thành công, xung laser tín hiệu từ BCH Fabry-Perot với công suất 7 mW ở bước sóng đỉnh phổ 288,5 nm và độ rộng phổ 2 nm sau khi đi qua bộ khuếch đại, công suất laser thu được là 54 mW tương ứng với hệ số khuếch đại là 8.

Hệ khuếch đại các xung laser UV băng hẹp cũng đã được phát triển, xung laser UV băng hẹp từ BCH Littrow với công suất 7 mW ở bước sóng 288,5 nm sau bốn lần khuếch đại công suất laser thu được là 49 mW tương ứng với hệ số khuếch đại 7. Hơn nữa, các kết quả mô phỏng bằng phương trình Frantz-Nodvik mở rộng và thí nghiệm cho thấy sự phù hợp cao.

Bước đầu ứng dụng laser UV Ce:LiCAF trong hệ quang phổ hấp thụ vi sai cho việc xác định mật độ khí SO₂. Kết quả khảo sát cho thấy độ chính xác cao với sai số phép đo 6%.

Các kết quả nghiên cứu của luận án không chỉ có ý nghĩa khoa học mà còn cho thấy tính ứng dụng thực tiễn cao. Các hệ laser tử ngoại Ce:LiCAF có khuếch đại đã phát triển thành công cho thấy triển vọng ứng dụng của chúng trong nhiều lĩnh vực như y học, sinh học, và đặc biệt trong nghiên cứu về môi trường.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN LUẬN ÁN

Công bố trong tạp chí thuộc danh mục ISI

1. *Tunable dual wavelength and narrow linewidth laser using a single solid-state gain medium in a double Littman resonator*, Optics Communications 496 (2021) 127131
2. *Studying the Nonlinear Optical Properties of Fluoride Laser Host Materials in the Ultraviolet Wavelength Region*, Appl. Sci. (2022), 12, 372.
3. *Theoretical and experimental study of ultraviolet broadband laser amplification using Ce:LiCAF crystal*, Optics Communications Volume 530, (2022), 129165

Công bố trong tạp chí Quốc gia

4. *Phát triển bộ khuếch đại laser tử ngoại, băng hẹp điều chỉnh bước sóng sử dụng tinh thể Ce:LiCAF định hướng nghiên cứu môi trường*, Tạp chí KH & CN VN-Bản B, (2022), DOI: 10.31276/VJST.65(8).29-34

Công bố trong kỷ yếu hội nghị Quốc gia

5. *Phát đồng thời hai bức xạ laser tử ngoại đơn sắc điều chỉnh liên tục trên một dải phổ rộng với tinh thể Ce:LiCAF*, Tuyển tập báo cáo Hội nghị 45 năm Viện Hàn Lâm KH & CN VN 1975-2020, (2020), ISBN 978-604-9985-06-5.
6. *Nghiên cứu động học phát xạ băng hẹp điều chỉnh bước sóng của laser tử ngoại Ce:LiCAF bằng cách tử*, Kỷ yếu hội nghị Vật lý Thừa Thiên Huế 2021, 2021, ISBN 978-604-974-605-4.
7. *Nghiên cứu các đặc tính phi tuyến của vật liệu Ce:LiCAF trong vùng bước sóng tử ngoại*, Advances in Optics, Photonics, Spectroscopy & Applications XII, (2022), ISBN: 978-604-357-120-2.