

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

Nguyễn Văn Điệp¹, Nguyễn Xuân Tú¹, Phạm Văn Dương¹, Nguyễn Thị Khánh Vân¹,
Nguyễn Văn Minh¹, Vũ Văn Thú², Phạm Hồng Minh^{1*}

¹Viện Vật lý, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 10 Đào Tấn, phường Cống Vị, quận Ba Đình, Hà Nội, Việt Nam

²Trường Đại học Công đoàn, 169 Tây Sơn, phường Quang Trung, quận Đống Đa, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 28/2/2023; ngày chuyển phản biện 3/3/2023; ngày nhận phản biện 23/3/2023; ngày chấp nhận đăng 27/3/2023

Tóm tắt:

Trong bài báo này, các kết quả nghiên cứu cho cả hệ phát và hệ khuếch đại laser tử ngoại (UV) đơn sắc, có khả năng điều chỉnh liên tục bước sóng sử dụng tinh thể Lithium calcium aluminum fluoride pha tạp ion Cerium (Ce:LiCAF) được trình bày. Cấu hình buồng cộng hưởng (BCH) Littrow sử dụng cách tử làm gương cuối phát bức xạ laser có thể được điều chỉnh trong khoảng 285-296 nm với công suất lớn nhất là 8 mW ở bước sóng 288,5 nm. Hệ khuếch đại 4 lần truyền qua cho UV Ce:LiCAF cũng đã được nghiên cứu và phát triển. Laser tín hiệu với công suất 7 mW, độ rộng xung 3,6 ns ở bước sóng 288,5 nm, sau 4 lần khuếch đại công suất laser đạt được là 49,0 mW, tương ứng với hệ số khuếch đại là 7. Động học khuếch đại sử dụng phương trình Franz-Nodvik mở rộng khảo sát sự phụ thuộc của năng lượng laser lối ra vào số lần khuếch đại cũng đã được thực hiện. Hơn nữa, UV Ce:LiCAF công suất cao, điều chỉnh bước sóng bước đầu đã được ứng dụng cho việc đánh giá cường độ tán xạ theo góc của một số hạt sol khí phổ biến như carbon đen, carbon nâu và nước ô nhiễm.

Từ khóa: kỹ thuật LiDAR, laser băng hẹp, laser công suất cao, sol khí, tinh thể Ce:LiCAF.

Chỉ số phân loại: 1.3

1. Đặt vấn đề

Laser nói chung và UV nói riêng đóng vai trò quan trọng trong khoa học, công nghệ và đời sống, nhờ được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực như: gia công vật liệu, vi cơ khí, kỹ thuật viễn thám, y học, sinh học, quang phổ và nghiên cứu môi trường. Theo các nghiên cứu gần đây tại một số thành phố lớn ở châu Á, các hạt có kích thước nhỏ hơn 2,5 μm ($\text{PM}_{2.5}$) chiếm tỷ lệ hơn 98% tổng số hạt sol khí [1-3]. Trong đó, các hạt carbon đen, carbon nâu, nước ô nhiễm đóng góp lớn vào thành phần sol khí $\text{PM}_{2.5}$. Nguồn gốc của nước ô nhiễm là từ quá trình bay hơi của sông, hồ..., trong khi đó nguồn gốc của carbon đen là từ quá trình đốt cháy nhiệt độ cao (động cơ diesel, khu công nghiệp...), carbon nâu có nguồn gốc từ quá trình đốt cháy chất hữu cơ. Hơn nữa, do một số chất khí có phổ hấp thụ nằm trong vùng bước sóng tử ngoại như O_3 (300÷330 nm), SO_2 (320÷340 nm), CS_2 (320÷340 nm), Cl_2 (260÷300 nm) [4] nên việc phát triển các nguồn UV đơn sắc có khả năng điều chỉnh bước sóng cho các ứng dụng môi trường là cần thiết. Đến nay, việc tích hợp laser vào các trang thiết bị và kỹ thuật nghiên cứu khí quyển đã trở nên phổ biến với máy đếm và đo kích thước hạt, máy phân tích sol khí, máy quang phổ Raman và các kỹ thuật viễn thám tiên tiến như Laser doppler velocimetry (LDV) và Light detection and ranging (LIDAR) [5, 6]. Các nguồn UV thông thường thu được bằng việc nhân tần số từ các laser phát bước sóng dài hơn hoặc phát trực tiếp từ các laser khí excimer như KrF (248 nm), XeCl (308 nm)... Tuy nhiên, nhược điểm chính của các laser nhân tần số là hiệu suất chuyển đổi laser

thấp và phụ thuộc vào tinh thể nhân tần, trong khi đó các nguồn laser excimer không có khả năng điều chỉnh bước sóng [7, 8].

Môi trường tinh thể Ce:LiCAF đã được chứng minh là môi trường vật liệu ưu việt cho việc phát triển các nguồn laser rắn tử ngoại. Phát xạ của môi trường dựa trên dịch chuyển 5d - 4f của ion Cerium trong nền tinh thể có độ rộng vùng cấm lớn [9, 10]. Mặt khác, do sự tương tác mạnh giữa lớp điện tử 5d và cấu trúc mạng dẫn đến sự mở rộng phổ huỳnh quang, cho phép môi trường laser này có khả năng phát trực tiếp bức xạ UV và điều chỉnh trên một dải phổ rộng 280-320 nm [11]. Môi trường này có đỉnh phổ hấp thụ tại bước sóng 266 nm phù hợp với bơm quang bằng họa ba bậc bốn của laser Neodymium, tiết diện phát xạ laser lớn ($7,5 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$), mật độ năng lượng bơm bão hòa cao (115 mJ/cm^2), ngưỡng phá hủy lớn (5 J/cm^2) [12, 13]. Tất cả các ưu điểm này thuận lợi cho việc phát triển các UV toàn rắn, băng hẹp, điều chỉnh bước sóng và công suất cao.

Các nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng, tinh thể Ce:LiCAF có hiệu suất chuyển đổi lên đến 46% khi được bơm bằng họa ba bậc bốn của laser Nd:YAG (266 nm) hoặc laser Nd:YLF (262 nm) [14]. Bằng việc sử dụng các tấm etalon, hệ UV Ce:LiCAF phát các bức xạ băng hẹp xuống tới 14 pm và có thể điều chỉnh trên dải phổ rộng 14 nm, từ 284 đến 298 nm [15].

Tại Việt Nam, việc phát triển UV ứng dụng cho nghiên cứu môi trường đã được thực hiện. Bằng việc biến đổi tần số từ laser màu kết hợp với bộ khuếch đại nhiều lần truyền qua, bức xạ UV ở bước sóng 287,5 nm với năng lượng laser cỡ vài chục micro Jun đã được phát triển. Tuy nhiên, năng lượng laser này

*Tác giả liên hệ: Email: phminh@iop.vast.vn

Development of a tunable, narrow, and ultraviolet Ce:LiCAF crystal multipass laser amplifier for environmental application

Van Diep Nguyen¹, Xuan Tu Nguyen¹, Van Duong Pham¹,
Thi Khanh Van Nguyen¹, Van Minh Nguyen¹,
Van Thu Vu², Hong Minh Pham^{1*}

¹Institute of Physics, Vietnam Academy of Science and Technology,
10 Dao Tan Street, Cong Vi Ward, Ba Dinh District, Hanoi, Vietnam

²Trade Union University,

169 Tay Son Street, Quang Trung Ward, Dong Da District, Hanoi, Vietnam

Received 28 February 2023; revised 23 March 2023; accepted 27 March 2023

Abstract:

In this paper, the authors present results on the development of both an oscillator and a 4-pass amplifier of ultraviolet and narrow linewidth pulses using a Ce:LiCAF crystal. By using a grating at one end of the laser cavity, the output laser wavelength of the laser can be tuned from 285 nm to 296 nm with a maximum output power of 8 mW at 288.5 nm. Moreover, amplification in a 4-pass amplifier of the Ce:LiCAF laser was investigated theoretically and experimentally. From the results, 49.0 mW amplified pulses can be obtained using a 4-pass amplifier with 7.0 mW power and 3.6 ns pulse duration at 288.5 nm injection, corresponding to an amplifier gain of 7. Furthermore, the angular scattering intensity of some common single-particle aerosols such as black carbon, brown carbon, and polluted water has been studied using the Ce:LiCAF laser. This result can serve as the basis for the multipass laser amplifier's environmental application, particularly in identifying atmospheric particles.

Keywords: aerosol, Ce:LiCAF crystals, high power laser, LiDAR technique, narrowband laser.

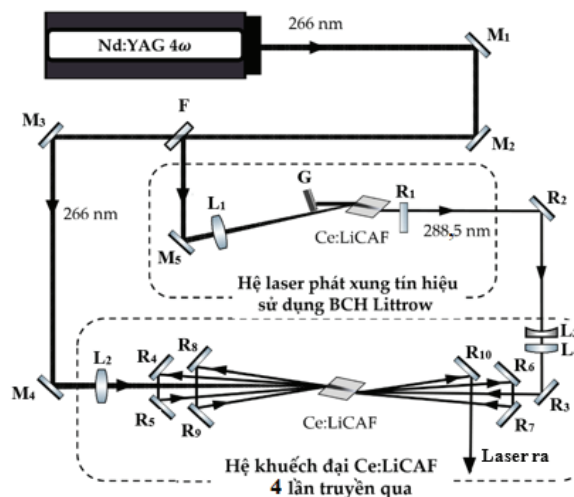
Classification number: 1.3

còn dưới ngưỡng của nhiều ứng dụng [16]. Việc nghiên cứu và phát triển các nguồn laser phát tiếp bức xạ từ ngoại sử dụng tinh thể Ce:LiCAF cũng đã được báo cáo. Với cấu hình BCH gồm 2 gương phẳng phát bức xạ laser băng rộng, hiệu suất laser đạt được lên đến 33% và năng lượng laser lồi ra lớn nhất ghi nhận được là 3,4 mJ. Hơn nữa bằng cấu hình BCH Littrow, bức xạ laser có độ rộng phổ 0,2 nm, điều chỉnh được trên một dải phổ từ 281 đến 299 nm với năng lượng lớn nhất là 0,8 mJ đã được ghi nhận [17]. Mặc dù hệ UV phát băng hẹp, điều chỉnh bước sóng Ce:LiCAF đã được phát triển thành công, tuy nhiên năng lượng laser lồi ra còn thấp. Để mở rộng ứng dụng của nguồn laser này thì việc khuếch đại năng lượng là cần thiết.

Trong bài báo này, chúng tôi trình bày việc phát triển một hệ khuếch đại 4 lần truyền qua cho các xung UV, bằng hợp sử dụng tinh thể Ce:LiCAF. Bằng việc sử dụng phương trình Franz-Nodvik mở rộng, động học khuếch đại các xung laser này cũng đã được nghiên cứu tường minh. Kết quả nghiên cứu cho thấy sự phù hợp tốt giữa lý thuyết và thực nghiệm. Hơn nữa, việc đánh giá cường độ tán xạ góc của một số đơn hạt phổ biến trong khí quyển bằng UV Ce:LiCAF cũng đã được thực hiện, làm cơ sở cho việc nhận biết các chất khí này trong khí quyển.

2. Cấu hình hệ thực nghiệm

Cấu hình hệ phát và hệ khuếch đại UV sử dụng tinh thể Ce:LiCAF được chỉ ra ở hình 1. Trong cấu hình này, hợp ba bậc bốn của laser Nd:YAG (Lotis II) tại bước sóng 266 nm, độ ổn định $\pm 2\%$, độ rộng xung 7 ns với năng lượng cực đại 120 mJ được sử dụng làm nguồn laser bơm. Sử dụng tấm chia chùm F, laser bơm được chia thành hai phần, một phần năng lượng cho hệ phát và phần còn lại cho hệ khuếch đại. Các gương từ M_1 đến M_5 là điện môi, có hệ số phản xạ cao ở bước sóng 266 nm được sử dụng làm gương dẫn chùm laser bơm.



Hình 1. Hệ khuếch đại các xung UV bằng hợp 4 lần truyền qua sử dụng tinh thể Ce:LiCAF.

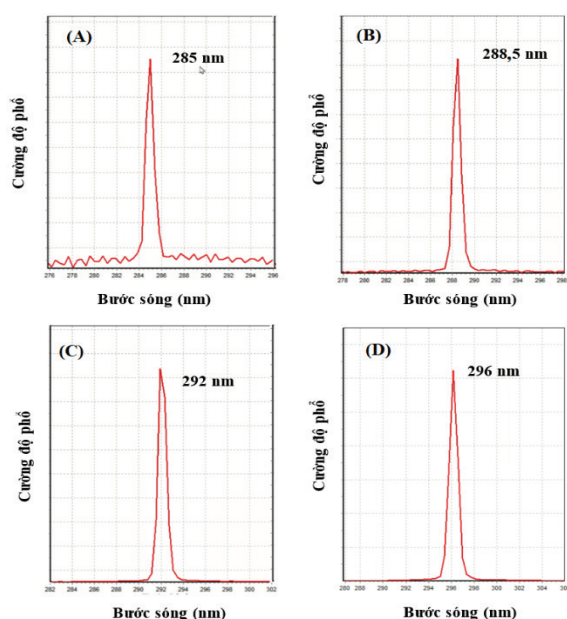
Với hệ laser phát, tinh thể Ce:LiCAF được cắt góc Brewster với kích thước 20x10x10 mm, nồng độ pha tạp 1% mol được sử dụng làm môi trường hoạt chất. Thấu kính hội tụ L_1 ($f=30$ cm) được sử dụng để hội tụ chùm laser bơm, sao cho đường kính chùm laser bơm trên mặt tinh thể là 2 mm. Góc giữa chùm laser bơm và trục BCH được hiệu chỉnh nhỏ nhất nhằm tăng hiệu suất chuyển đổi laser. BCH laser có chiều dài 7 cm, gồm một cách tử G (2.400 vạch/mm) của Hãng Thorlab được đặt trên giá vi chỉnh góc và gương ra R_1 có hệ số phản xạ 30% tại bước sóng laser. Với việc quay góc cách tử so với trục BCH ta có thể thay đổi được bước sóng của laser lồi ra. Chùm laser sau khi ra khỏi BCH, được chuẩn trực bằng 2 thấu kính L_3 (-10 cm) và L_4 (10 cm) trước khi đưa vào bộ khuếch đại (chùm laser tín hiệu).

Hệ khuếch đại các xung UV bằng hợp 4 lần truyền qua được cấu tạo từ 8 gương phẳng (R_3 đến R_{10}) có hệ số phản xạ trên 90%, trong vùng bước sóng 280 đến 300 nm ở góc 45° của Hãng Thorlab (Hoa Kỳ). Tinh thể Ce:LiCAF cắt góc Brewster, với kích thước 5x5x8 mm, nồng độ pha tạp 1% mol được sử dụng làm môi trường khuếch đại. Một phần chùm laser bơm (266 nm) sau khi phản xạ trên các gương dẫn M_3 và M_4 được hội tụ vào tinh thể khuếch đại Ce:LiCAF nhờ thấu kính L_2 ($f=40$ cm). Hiệu suất khuếch đại phụ thuộc vào sự chồng chập giữa chùm laser bơm và chùm laser tín hiệu. Do đó, góc lệch giữa chùm laser bơm và chùm laser tín hiệu được hiệu chỉnh nhỏ nhất ở mỗi lần khuếch đại.

Để khảo sát công suất laser, chúng tôi sử dụng đầu đo năng lượng Coherent với dải công suất đo 1 đến 30 W, độ phân giải 1 mW, ngưỡng phá hủy 6 KW/cm² (1,75 J/cm²). Photodiode Hamamatsu S9055 có thời gian đáp ứng 250 ps kết hợp với dao động ký số 5 GHz (Lecrosy) được sử dụng để đánh giá độ rộng xung laser. Các đặc trưng về phổ laser được khảo sát bằng máy quang phổ Avaspec với dải phổ hoạt động từ 200 đến 1160 nm, độ phân giải 0,6 nm.

3. Kết quả và bàn luận

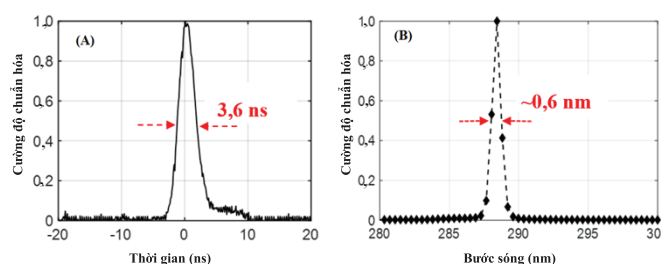
Để khảo sát khả năng điều chỉnh bước sóng của hệ laser Ce:LiCAF cấu hình BCH Littrow, góc giữa cách tử và trục BCH được thay đổi từ 19° đến 23° , công suất laser bơm được điều chỉnh dưới ngưỡng phá hủy tinh thể. Kết quả khảo sát được ở hình 2 cho thấy, vùng điều chỉnh bước sóng laser thu được trong khoảng 285-296 nm với độ rộng phổ 0,6 nm (bằng giới hạn của thiết bị đo). Hiệu suất laser thu được là 8,5% tại



Hình 2. Bước xạ thu được trong vùng điều chỉnh bước sóng của cấu hình BCH Littrow. (A) Bước sóng ngắn nhất trong dải điều chỉnh 285 nm; (B) Bước sóng tại đỉnh phát xạ 288,5 nm; (C) Bước sóng 292 nm; (D) Bước sóng dài nhất trong dải điều chỉnh 296 nm.

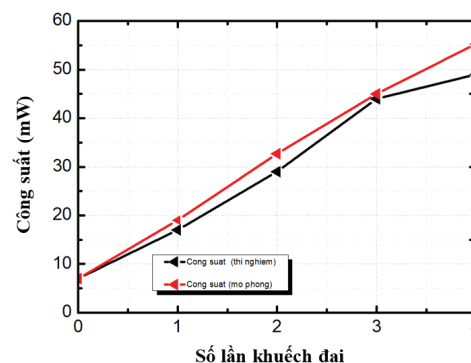
bước sóng 288,5 nm, với công suất lớn nhất là 8 mW ở công suất laser bơm 120 mW.

Để đánh giá hiệu suất của bộ khuếch đại 4 lần qua sử dụng tinh thể Ce:LiCAF, chùm laser tín hiệu ở bước sóng 288,5 nm với công suất 7 mW, độ rộng xung 3,6 ns và độ rộng phổ 0,6 nm được đưa vào bộ khuếch đại (hình 3). Sau khi chuẩn trực, đường kính chùm laser tín hiệu là 1 mm, tương ứng với mật độ năng lượng là 20 mJ/cm², nhỏ hơn nhiều so với mật độ năng lượng bão hòa.



Hình 3. Độ rộng xung (A) và độ rộng phổ laser tín hiệu (B).

Công suất laser bơm (266 nm) cho hệ khuếch đại là 190 mW, tương ứng mật độ năng lượng là 0,6 J/cm², nhỏ hơn nhiều so với ngưỡng phá hủy tinh thể. Trong trường hợp này, hệ khuếch đại hoạt động ở chế độ tuyến tính. Với cấu hình khuếch đại này, công suất laser lối ra sau mỗi lần khuếch đại lần lượt là 17, 29, 44 và 49 mW, tương ứng với hệ số khuếch đại lần lượt là 2,3, 1,7, 1,3 và 1,2. Như vậy, với công suất laser tín hiệu trước khi vào bộ khuếch đại là 7 mW, công suất laser thu được sau 4 lần khuếch đại là 49 mW, tương ứng với hệ số khuếch đại là 7 (hình 4). Thông số chi tiết của xung laser tín hiệu và xung laser sau khuếch đại được thể hiện ở bảng 1.



Hình 4. Công suất laser lối ra sau mỗi lần khuếch đại.

Bảng 1. Thông số xung laser tín hiệu và xung laser sau khuếch đại (hệ khuếch đại các xung UV bằng hợp).

Thông tin	Laser tín hiệu	Laser sau khuếch đại
Công suất (mW)	7	49
Bước sóng (nm)	288,5	288,5
Độ rộng phổ (nm)	0,6	0,6
Độ rộng xung (ns)	3,6	3,6

Bằng việc sử dụng phương trình Franz-Nodvik mở rộng [18], sự phụ thuộc của công suất laser sau khuếch đại vào công suất laser tín hiệu cũng đã được thực hiện:

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

trong đó: J_i là thông lượng xung laser ra; λ là bước sóng laser kích thích; J_{sat} là thông lượng bão hòa; J_{i-1} là thông lượng ban đầu; T là hệ số truyền qua của chùm laser tín hiệu; G_{i-1} là hệ số khuếch đại ban đầu.

Bằng việc sử dụng phần mềm Matlab để giải phương trình 1, sự phụ thuộc của công suất laser lối ra vào công suất laser tín hiệu sau mỗi lần khuếch đại cũng được chỉ ra ở hình 4. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng cho thấy sự phù hợp tốt trong 3 lần khuếch đại đầu tiên. Tuy nhiên, công suất laser theo mô phỏng tại lần khuếch đại thứ tư là 57 mW, cao hơn 15% so với các kết quả thực nghiệm. Nguyên nhân trong thực nghiệm sự chênh lệch giữa chùm laser bơm và laser tín hiệu trong tinh thể laser Ce:LiCAF chưa cao.

Để đánh giá đặc trưng tán xạ của các hạt sol khí, chúng tôi sử dụng chương trình mô phỏng dựa trên lý thuyết tán xạ Mie [19, 20]. 2 bức xạ laser kích thích tại bước sóng 532 và 288,5 nm, bước sóng 532 nm là phát họa ba bậc hai của laser Neodymium, trong khi đó bước sóng 288,5 nm thu được từ hệ laser Ce:LiCAF đã được phát triển. Trong bảng 2 là chiết suất phức của nước ô nhiễm, carbon nâu và carbon đen đối với hai bức xạ laser kích thích [21, 22].

Bảng 2. Chiết suất phức của nước ô nhiễm, carbon nâu và carbon đen đối với 2 bức xạ laser kích thích 532 và 288,5 nm [21, 22].

Đối tượng nghiên cứu	Chiết suất tại các bước sóng laser	
	532 nm	288,5 nm
Nước lẫn tạp chất	1,54+0,015i	1,54+0,015i
Carbon đen	1,77+0,631i	1,70+0,641i
Carbon nâu	1,52+0,182i	1,57+0,031i

Với đường kính trung bình khi phát tán trong khí quyển từ 0,1 đến 1,2 μm , hệ số kích thước (x) của các hạt sol khí carbon nâu, nước ô nhiễm và carbon đen được tính theo công thức (2) và được chỉ ra trong bảng 2.

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (2)$$

trong đó: r là bán kính hạt sol khí; λ là bước sóng laser kích thích.

Lý thuyết tán xạ Mie được sử dụng cho các hạt có hệ số kích thước nằm trong khoảng 0,2÷2000. Như vậy, với hệ số kích thước hạt nằm trong khoảng từ 1,2 đến 14,2 μm khi kích thích bằng bước sóng 532 nm; nằm trong khoảng từ 2,2 đến 26,1 μm khi kích thích bằng bước sóng 288,5 nm (bảng 3) là phù hợp với lý thuyết tán xạ Mie [21, 22].

Bảng 3. Hệ số kích thước hạt được xác định theo bước sóng.

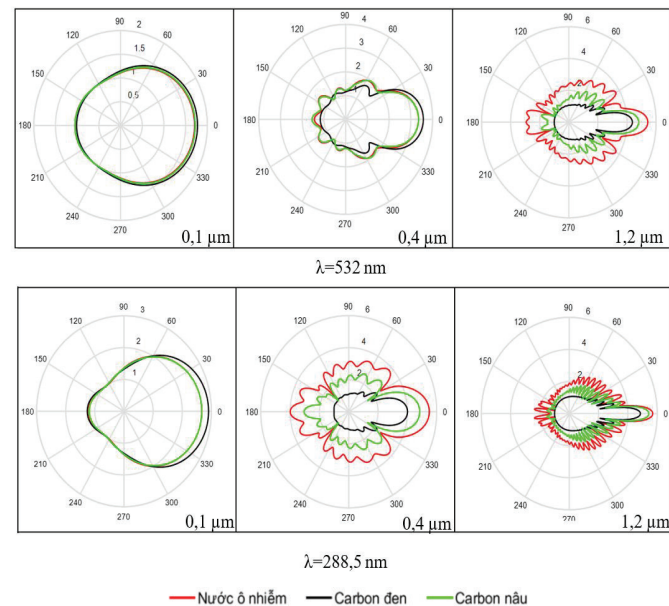
r (μm) \ λ (nm)	532 nm	288,5 nm
0,1	1,2	2,2
0,4	4,7	8,7
1,2	14,2	26,1

Để đánh giá ảnh hưởng của bước sóng kích thích đến tán xạ góc của các hạt, 2 bức xạ laser tại bước sóng 532 và 288,5 nm lần lượt kích thích vào hỗn hợp được trộn các hạt sol khí carbon đen, carbon nâu và nước ô nhiễm có bán kính lần lượt là 0,1, 0,4 và 1,2 μm . Kết quả mô phỏng được chỉ ra ở hình 5 cho thấy:

Hạt có bán kính 0,1 μm : Cường độ tán xạ theo phương thuận (góc 0°) lớn hơn so với cường độ tán xạ ngược (góc 180°). Tuy nhiên, cường độ tán xạ góc của 3 loại hạt này không có nhiều sự khác biệt, dẫn tới không thể nhận biết được các hạt này bằng tán xạ góc với bước sóng kích thích là 288,5 và 532 nm. Nguyên nhân do bán kính hạt nhỏ hơn bước sóng kích thích dẫn tới tán xạ góc thể hiện không rõ rệt.

Hạt có bán kính 0,4 μm : Cường độ tán xạ của mỗi hạt đã thể hiện rõ sự thay đổi theo góc khi kích thích bằng bước sóng 532 nm. Tuy nhiên, việc phân biệt 3 loại hạt sol khí này khó đạt được do cường độ tán xạ theo góc của 3 loại hạt này khá tương đồng. Trong khi đó, cường độ tán xạ theo góc của các hạt này thể hiện sự khác biệt lớn khi được kích thích bằng bước sóng 288,5 nm. Do vậy, việc nhận biết 3 loại hạt carbon nâu, nước ô nhiễm và carbon đen trong một hỗn hợp các hạt cùng kích thước là có thể thực hiện được.

Hạt có bán kính 1,2 μm : Cường độ tán xạ thay đổi nhanh theo góc khi được kích thích bằng bước sóng 532 hoặc



Hình 5. Cường độ tán xạ theo góc của các hạt carbon đen, carbon nâu và nước ô nhiễm.

288,5 nm. Do đó, việc phân biệt các loại hạt này có thể thực hiện được. Tuy nhiên, để xác định được đặc trưng tán xạ theo góc của các hạt đòi hỏi phải sử dụng nhiều cảm biến đặt trên mặt phẳng tán xạ.

4. Kết luận

Hệ khuếch đại các xung UV bằng hợp 4 lần truyền qua sử dụng tinh thể Ce:LiCAF đã được phát triển. Xung laser tín hiệu bằng hợp tại bước sóng 288,5 nm có công suất 7 mW, độ rộng phổ 0,6 nm sau 4 lần khuếch đại có công suất là 49 mW, tương ứng với hệ số khuếch đại 7. Các kết quả nghiên cứu lý thuyết cho thấy sự phù hợp cao với các kết quả thực nghiệm.

Bằng việc sử dụng lý thuyết tán xạ Mie, đặc trưng tán xạ theo góc của một số hạt sol khí phổ biến trong khí quyển là carbon đen, carbon nâu và nước ô nhiễm đã được nghiên cứu. Kết quả cho thấy, hiệu quả của việc sử dụng bước sóng 288,5 nm so với bước sóng dài hơn 532 nm trong nghiên cứu tán xạ của các hạt. Các kết quả đạt được có thể mở rộng cho ứng dụng xác định các hạt sol khí, cũng như xác định kích thước hạt trong thực nghiệm.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu được hỗ trợ bởi đề tài Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia, mã số 103.03-2019.365. Các tác giả xin chân thành cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Y. Yu, S.P. Zhao, D.S. Xia, et al. (2011), "Characteristics of aerosol particle size distributions in urban Lanzhou, north-western China", *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, **147**, pp.307-318, DOI: 10.2495/AIR110291.
- [2] Y. Zhang, J. Lang, S. Cheng, et al. (2018), "Chemical composition and sources of PM₁ and PM_{2.5} in Beijing in autumn", *Science of The Total Environment*, **630**, pp.72-82, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.151.
- [3] J. Lang, Y. Zhang, Y. Zhou, et al. (2017), "Trends of PM_{2.5} and chemical composition in Beijing, 2000-2015", *Aerosol Air Qual. Res.*, **17**(2), pp.412-425, DOI: 10.4209/aaqr.2016.07.0307.
- [4] P. Dong, Q. Chen (2018), *LiDAR Remote Sensing and Applications*, CRC Press, 1st Edition, 200pp.
- [5] F. Beyrau, J. Bood, P. Hsu, et al. (2021), "Laser applications to chemical, security, and environmental analysis: Introduction to the feature issue", *Applied Optics*, **60**(15), pp.LAC1-LAC3, DOI: 10.1364/AO.431506.
- [6] R.D. Young, W.A. Carrion, R. Ganoe, et al. (2017), "Langley mobile ozone LiDAR: Ozone and aerosol atmospheric profiling for air quality research", *Applied Optics*, **56**(3), pp.721-730, DOI: 10.1364/AO.56.000721.
- [7] K.F. Renk (2017), *Basics of Laser Physics for Students of Science and Engineering*, Springer, 622pp.
- [8] W. Koechner (2006), *Solid-State Laser Engineering*, Springer, 750pp.
- [9] M.H. Pham, M. Cadatal-Raduban, M.V. Luong, et al. (2014), "Numerical simulation of ultraviolet picosecond Ce:LiCAF laser emission by optimized resonator transients", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **53**(6), DOI: 10.7567/JJAP.53.062701.
- [10] M. Cadatal-Raduban, M.H. Pham, D.V. Pham, et al. (2018), "Total internal reflection-based side-pumping configuration for terawatt ultraviolet amplifier and laser oscillator development", *Appl. Phys. B*, **124**, DOI: 10.1007/s00340-018-6995-9.
- [11] C.D. Marshall, J.A. Speth, S.A. Payne, et al. (1994), "Ultraviolet laser emission properties of Ce³⁺-doped LiSrAlF₆ and LiCaAlF₆", *Journal of The Optical Society of America B*, **11**(10), pp.2054-2065, DOI: 10.1364/JOSAB.11.002054.
- [12] M.V. Luong, M.J.F. Empizo, M. Cadatal-Raduban, et al. (2017), "First-principles calculations of electronic and optical properties of LiCaAlF₆ and LiSrAlF₆ crystals as VUV to UV solid-state laser materials", *Optical Materials*, **65**, pp.15-20, DOI: 10.1016/j.optmat.2016.09.062.
- [13] A. Sharp, O. Kitzler, A. Fuerbach, et al. (2021), "Generation of sub-100fs ultraviolet pulses from a Kerr-lens mode-locked Ce:LiCAF laser", *Applied Optics*, **60**(27), pp.8316-8320, DOI: 10.1364/AO.434823.
- [14] E. Granados, D.W. Coutts, D.J. Spence (2009), "Mode-locked deep ultraviolet Ce:LiCAF laser", *Optics Letters*, **34**(11), pp.1660-1662, DOI: 10.1364/OL.34.001660.
- [15] B. Wellmann, O. Kitzler, D.J. Spence, et al. (2015), "Linewidth narrowing of a tunable mode-locked pumped continuous-wave Ce:LiCAF laser", *Optics Letters*, **40**(13), pp.3065-3068, DOI: 10.1364/OL.40.003065.
- [16] T.P. Minh, H.B. Van, T.D. Tien, et al. (2017), "Development of UV laser source based on distributed feedback dye lasers for use in measurement of ozone in the lower atmosphere", *Communications in Physics*, **27**(4), pp.345-355, DOI: 10.15625/0868-3166/27/4/10798.
- [17] M.H. Pham, M. Cadatal-Raduban, D.V. Pham, et al. (2018), "Tunable narrow linewidth picosecond pulses from a single grating gain-switched Ce:LiCAF laser", *Laser Phys.*, **28**(8), DOI: 10.1088/1555-6611/aac369.
- [18] P. Kroetz, A. Ruehl, G. Chatterjee, et al. (2016), "High energetic and highly stable pulses from a Ho:YLF regenerative amplifier", *Proc. SPIE 9726, Solid State Lasers XXV: Technology and Devices*, DOI: 10.1117/12.2212236.
- [19] C. Mobley (2021), *Mie Theory Overview*, Level 2, Ocean Optics Web Book, 11pp.
- [20] C. Mätzler (2002), *MATLAB Functions for Mie Scattering and Absorption*, Institute for Applied Physics, Research Report No. 2002-08, Switzerland, 19pp.
- [21] L.V. Mui, T.N. Hung, K. Shinohara, et al. (2023), "Elastic scattering time-gated multi-static LiDAR scheme for mapping and identifying contaminated atmospheric droplets", *Appl. Sci.*, **13**(1), DOI: 10.3390/app13010172.
- [22] Y.W. Heinson, B.J. Sumlin, N. Shetty, et al. (2018), "UV-Vis-IR spectral complex refractive indices and optical properties of brown carbon aerosol from biomass burning", *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **206**, pp.392-39, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.12.009.