

*Hội nghị Khoa học kỷ niệm 40 năm ngày thành lập Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam
Tiểu ban Công nghệ thông tin, Điện tử, Tự động hóa và Công nghệ vũ trụ
Hà Nội, 7/10/2015*

Nghiên cứu và phát triển các hệ laser toàn rắn định hướng phát triển công nghệ laser

Phạm Hồng Minh, Phạm Văn Dương, Đỗ Quốc Khánh, Nguyễn Văn Hào, Nguyễn Đại Hưng

*Trung tâm Điện tử học Lượng tử, Viện Vật lý,
Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam*

Email liên lạc: phminh@iop.vast.ac.vn

Tóm tắt:

Chúng tôi trình bày các kết quả gần đây trong việc nghiên cứu và phát triển các hệ laser toàn rắn phát xung cực ngắn được bơm bằng laser bán dẫn, laser toàn rắn phát xung ngắn trực tiếp trong vùng tử ngoại, laser Raman hiện đại dựa trên hiệu ứng tự chuyển đổi Raman trong buồng cộng hưởng và các kết quả ban đầu trong việc nghiên cứu phát triển hệ khuếch đại công suất cao cho các laser xung femto-giây. Các kết quả nghiên cứu này đã và đang được ứng dụng trong các nghiên cứu khoa học và sẵn sàng trong việc chuyển giao và phát triển công nghệ.

Từ khóa: Laser toàn rắn, Bơm bằng laser diode, Vật liệu laser.

1. Mở đầu

Nhờ những phát triển nhanh chóng trong vật lý, công nghệ và ứng dụng các nguồn sáng kết hợp - laser nói chung, đặc biệt là các laser phát xung ngắn nói riêng, nhiều lĩnh vực khoa học-công nghệ đã thu được những kết quả quan trọng, mang tính cách mạng trong vật lý, hoá học, sinh học và khoa học vật liệu... Nghiên cứu Vật lý và công nghệ laser toàn rắn phát xung ngắn là hướng KH &CN thời sự, đang được phát triển rất mạnh tại các trung tâm KHCN quốc tế, vì nó không chỉ mang ý nghĩa khoa học cơ bản và phát triển công nghệ mà còn có ý nghĩa thực tiễn và ứng dụng cấp thiết. Các laser là những thiết bị khoa học quan trọng, đang tác động cách mạng đến rất nhiều lĩnh vực nghiên cứu KH&CN và ứng dụng [1-5]. Đặc biệt trong các nghiên cứu khoa học, laser cho phép nghiên cứu tường minh các quá trình vật lý vi mô xảy ra mà trước đây các phương pháp khác không thể ghi nhận và quan sát được. Nhờ các kết quả nghiên cứu này chúng ta có thể tạo ra hay sử dụng những hiệu ứng vật lý độc đáo, mới, cũng như mở ra những lĩnh vực nghiên cứu và ứng dụng hoàn toàn mới [1-5]. Do vậy, có thể coi vật lý và công nghệ laser như là công nghệ nền - có tác động cách mạng tới các lĩnh vực KH&CN khác. Hầu hết các nước đều có các phòng thí nghiệm quốc gia về nghiên cứu, phát triển KH&CN laser và ứng dụng laser. Các trung tâm và phòng thí nghiệm khoa học quốc tế về vật lý và công nghệ laser xung cực ngắn đang được phát triển mạnh mẽ. Các nghiên cứu tập trung vào hai hướng chính: phát triển vật lý và công nghệ laser; phát triển các ứng dụng laser đặc biệt đối với các laser xung ngắn và cực mạnh trong các lĩnh vực KH-CN khác nhau. Ở nước ta hiện nay, nhiều cơ sở nghiên cứu khoa học-công nghệ và đào tạo (vật lý, KH vật liệu, hoá lý, Y-Sinh học...) đang có yêu cầu cấp thiết và khách quan sử dụng các laser nhằm nâng cao khả năng, chất lượng và trình độ của các nghiên cứu, ứng dụng và đào tạo, đáp ứng các đòi hỏi của sự hội nhập về trình độ KH-CN với khu vực và quốc tế. Tuy nhiên, các hệ thống laser phát xung cực ngắn hiện nay chủ yếu là sản phẩm của các nước G7+1, ví dụ các hệ laser phát xung ngắn (10^{-12} - 10^{-15} giây) này còn khá đắt (~100 000 USD), phức tạp và kích thước lớn. Do vậy cho đến nay, còn rất ít cơ sở nghiên cứu, ứng dụng và đào tạo ở

Việt Nam được trang bị laser cho nên việc nghiên cứu và phát triển các nguồn laser đặc biệt là các laser toàn rắn phát xung ngắn trong vùng tử ngoại và hồng ngoại là vô cùng quan trọng đối với chúng ta.

Trong báo cáo này, chúng tôi trình bày các kết quả gần đây trong việc nghiên cứu và phát triển các hệ laser toàn rắn phát xung cực ngắn được bơm bằng laser bán dẫn, laser toàn rắn phát xung ngắn trực tiếp trong vùng tử ngoại, laser Raman hiện đại dựa trên hiệu ứng tự chuyển đổi Raman trong buồng cộng hưởng và các kết quả ban đầu trong việc nghiên cứu phát triển hệ khuếch đại công suất cao cho các laser xung femto-giây tại Viện Vật lý, Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam.

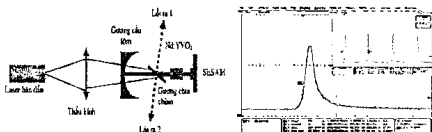
2. Phát triển các laser toàn rắn được bơm bằng laser bán dẫn

2.1. Laser toàn rắn Nd:YVO₄ được bơm bằng laser bán dẫn

Trên cơ sở vật liệu laser Nd:YVO₄, chúng tôi đã nghiên cứu phát triển thành công các hệ laser phát xung ngắn nano-giây bằng kỹ thuật điều biến độ phẩm chất buồng cộng hưởng; các hệ laser phát xung cực ngắn cỡ pico-giây bằng kỹ thuật khóa mode với nhiều cấu hình buồng cộng hưởng khác nhau [6-10].

a. Nghiên cứu phát triển laser Nd:YVO₄ hoạt động ở chế độ Q-switching [6-8]

Cấu hình BCH như trên Hình 1 với bộ điều biến là gương bán dẫn hấp thụ bão hòa SESAM, nguồn bơm laser diode ở bước sóng 808 nm công suất cực đại 2,2 W chúng tôi đã thu được chuỗi xung ngắn 22 ns, tần số lặp lại 2,2 MHz và công suất cực đại thu được 460 mW.



Hình 1. (a). Cấu hình BCH Q-switching, (b). Xung và chuỗi xung laser Nd:YVO₄ Q-switching bằng SESAM.

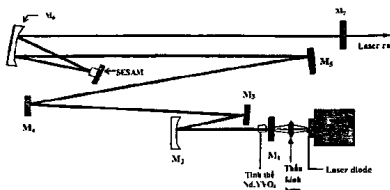
Ngoài ra các hệ laser sử dụng tinh thể Nd:YVO₄ hoạt động trong các chế độ liên tục và xung sử dụng laser diode công suất cao làm nguồn bơm quang học đã được nghiên và thực hiện. Trong chế độ hoạt động liên tục, công suất trung bình cực đại là 2150 mW đã thu được, với hiệu suất chuyển đổi quang là 21.5 %. Trong chế độ Q-switching thụ động bằng tinh thể Cr⁴⁺:YAG, laser Nd:YVO₄ phát xung có độ rộng 62 ns ở tần số lặp lại cao ~ 710 kHz và công suất trung bình 434 mW.

b. Laser Nd:YVO₄ mode-locking thụ động bằng gương SESAM [9, 10]

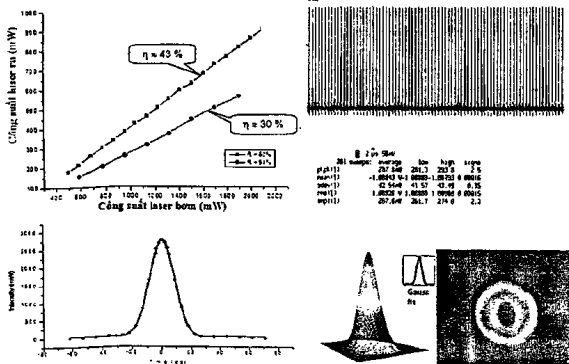
Trên cơ sở vật liệu Nd:YVO₄, chúng tôi đã phát triển thành công laser toàn rắn phát xung cực ngắn pico-giây bằng kỹ thuật khóa mode sử dụng gương bán dẫn hấp thụ bão hòa SESAM với các cấu hình BCH khác nhau.

Với cấu hình BCH như trên Hình 2, sử dụng nguồn bơm laser bán dẫn 808 nm, công suất bơm cực đại 2,2 W chúng tôi đã thu được xung laser cực ngắn 12 ps, tần số lặp lại 40 MHz, công suất trung bình cực đại tại bước sóng 1064 nm cỡ 940 mW tương ứng với hiệu suất chuyển đổi năng lượng laser

cỡ 43%. Đặc trưng công suất, chuỗi xung, độ rộng xung, phân bố năng lượng chùm laser được mô tả trên Hình 2.

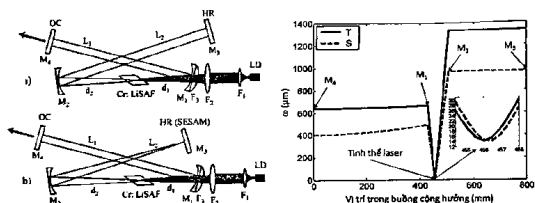


Hình 2. Cấu hình BCH laser Nd:YVO₄ mode-locking thụ động bằng gương SESAM được bơm bằng laser bán dẫn [9, 10].



Hình 3. Các đặc trưng về năng lượng của laser mode-locking. (a) – Đặc trưng công suất. (b) Chuỗi xung laser pico-giây. (c) Vết tương quan cường độ. (d) Phân bố năng lượng của chùm laser.

Với mục đích phát triển đa dạng các ứng dụng với hệ laser Nd:YVO₄ khóa mode, chúng tôi tiếp tục phát triển hệ laser Nd:YVO₄ khóa mode với BCH siêu dài mục đích là để giảm tần số lặp lại của laser. Giải pháp được sử dụng là đưa vào BCH laser một cấu hình phản xạ nhiều lần trên hai cặp gương cầu bán kính cong $f = 1$ m được đặt theo cấu hình đồng tiêu (cấu hình Herriot). Với cặp gương cầu này, chúng ta có thể kéo dài BCH tới hàng trăm mét (nếu sử dụng các yếu tố gương đặc biệt) mà vẫn cho hoạt động laser mode-locking ổn định.



Hình 6. (a) Cấu hình BCH laser rắn Cr:LiSAF 4 gương gấp theo hình chữ X. (b) (a) Cấu hình BCH laser rắn Cr:LiSAF khóa mode sử dụng gương SESAM. (c) Chùm Gauss đi trong BCH laser Cr:LiSAF 4 gương gấp dạng chữ X trong cả hai mặt phẳng T và

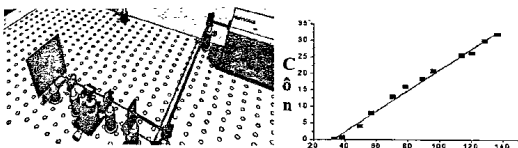
Với cấu hình BCH (Hình 6a) cũng cho phép dễ dàng kéo dài BCH trong chế độ phát xung cực ngắn nhờ kỹ thuật mode-locking thụ động bằng chất hấp thụ bão hòa (Hình 6b). Các hiệu ứng quang sai do tinh thể cắt theo góc Brewster và hai gương cầu khi chùm tia tới ở một góc nghiêng cũng đã được xem xét (Hình 6b và 6c). Đây là những tiền đề quan trọng cho việc phát triển laser Cr:LiSAF phát xung cực ngắn fs bằng kỹ thuật khóa mode với gương bán dẫn hấp thụ bão hòa sẽ được thực hiện tại Viện Vật lý trong tương lai gần tới đây.

3. Nghiên cứu và phát triển laser từ ngoại toàn rắn Ce:LiCAF [14-16]

Ngày nay, các nguồn laser từ ngoại (UV) đã được ứng dụng nhiều trong các lĩnh vực khoa học và công nghệ như: cảm biến từ xa (diễn hình là LIDAR), chuẩn đoán sự đốt cháy của động cơ, gia công bán dẫn, vi cơ khí, truyền thông quang học, và các ứng dụng trong sinh học, y học và đặc biệt trong nghiên cứu quang phổ... Tuy nhiên, các nguồn laser UV trong thương mại chủ yếu có được nhờ sử dụng tinh thể phi tuyến để biến đổi tần số từ những laser có vùng bước sóng dài hơn (hồng ngoại hoặc vùng nhìn thấy). Do vậy, việc nghiên cứu và phát triển những nguồn laser toàn rắn phát trực tiếp ở vùng bước sóng tử ngoại ở Việt nam là cần thiết và mang nhiều ý nghĩa thực tiễn.

Trong các vật liệu cho laser từ ngoại Ce-Fluoride thì Ce:LiCAF được ứng dụng rộng rãi hơn cả. Đặc điểm của môi trường này là hấp thụ mạnh tại bước sóng 266 nm (rất phù hợp với việc bơm quang học bằng hòa ba bậc bốn của laser Nd:YAG), vùng điều chỉnh bước sóng rộng (280-320 nm), tiết diện phát xạ laser lớn ($\sigma_e = 6 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$), mật độ năng lượng bão hòa cao ($\sim 15 \text{ mJ/cm}^2$). Tất cả những đặc điểm này thuận lợi cho việc phát triển nguồn laser từ ngoại điều chỉnh bước sóng, công suất cao.

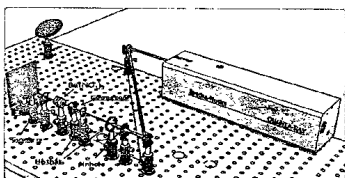
Với việc sử dụng tinh thể laser Ce:LiCAF (pha tạp 1%) chúng tôi đã phát triển thành công hệ laser từ ngoại toàn rắn phát trực tiếp trong dải bước sóng từ 280 nm đến 300 nm. Với cấu hình BCH như Hình 7a, sử dụng tinh thể Ce:LiCAF chiều dài 1 cm; chiều dài BCH là 8 cm; gương cuối và gương ra của BCH có hệ số phản xạ 96% và 30% ở bước sóng laser tương ứng, chúng tôi đã thu được hiệu suất chuyển đổi năng lượng laser là 33%, năng lượng cỡ mJ Hình 7b. Hơn nữa, bằng nghiên cứu lý thuyết chúng tôi đã nghiên cứu tương minh động học của loại laser này. Các kết quả nghiên cứu cho thấy với việc sử dụng BCH ngắn, chất lượng thấp, bơm gần ngưỡng có thể phát được những xung laser từ ngoại từ vài trăm pico-giây đến vài chục pico-giây [14,15].



Hình 7. (a) Hệ thực nghiệm laser từ ngoại toàn rắn Ce:LiCAF

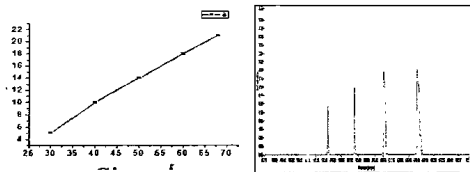
(b) Đặc trưng công suất của laser UV Ce:LiCAF ra.

4. Nghiên cứu và phát triển laser raman toàn rắn



Hình 8. Cấu hình hệ laser Raman.

Tiếp cận với xu hướng phát triển của thế giới trong việc nghiên cứu phát triển các nguồn laser hiện đại - tự chuyển đổi Raman trong BCH, qua đó cho phép chúng ta có thể lựa chọn bước sóng phát laser phù hợp trải dài từ vùng bước sóng tử ngoại đến hồng ngoại khi sử dụng các môi trường Raman với dịch chuyển Raman phù hợp. Trên cơ sở lựa chọn phù hợp với các điều kiện sẵn có tại Phòng thí nghiệm, lần đầu tiên tại Việt Nam chúng tôi đã phát triển thành công hệ laser Raman tự chuyển đổi tần số trong BCH sử dụng tinh thể $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$. Cấu hình hệ laser được thiết kế và chế tạo như trên Hình 8.



Hình 9. Đặc trưng của hệ laser Raman. (a) Đặc trưng công suất của laser ở bước sóng 638nm,

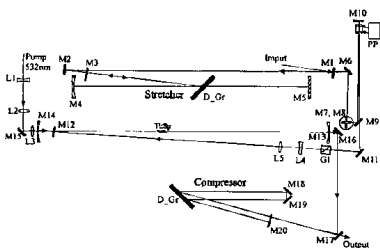
(b) đặc trưng phổ của laser Raman 3 bước sóng 563 nm, 598 nm và 638 nm

trong đó, laser bơm Nd:YAG bước sóng 532 nm, năng lượng cực đại tại 532 nm là 400 mJ, tinh thể $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ - kích thước 7x7x40 mm, Gương cuối laser: Phản xạ cao tại bước sóng 563 nm (1st stock),

598 nm (2^{nd} stock) và 638 nm (3^{rd} stock), truyền qua bước sóng bơm 532 nm; Gương ra: Phản xạ cao tại bước sóng 563 nm (1^{st} stock), 598 nm (2^{nd} stock) và truyền qua tại 638 nm (3^{rd} stock). Với cấu hình BCH Hình 8, kết quả thu được laser phát xạ ở 3 bước sóng 563 nm, 598 nm và 638 nm, tương ứng với các dịch chuyển Stock bậc 1, bậc 2 và bậc 3. Hiệu suất chuyển đổi năng lượng laser cực đại tại bước sóng 638 nm lên tới 25%.

5. Nghiên cứu và phát triển bộ khuếch đại công suất cao cho laser xung cực ngắn

Laser xung cực ngắn đã tạo ra những thay đổi mang tính đột phá cả trong khoa học và công nghệ. Độ rộng xung cỡ femto giây (10^{-15} s) cho phép con người tiếp cận được với những quá trình cực nhanh xảy ra trong nguyên tử, phân tử mang lại những kiến thức mới về động học phân tử. Trung tâm Điện tử học Lượng tử, Viện Vật lý, Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam đã được trang bị một hệ laser Ti:Sapphire phát xung cực ngắn 100 fs. Tuy nhiên, năng lượng của hệ thống laser này là rất nhỏ cỡ nJ,



Hình 10. Hệ khuếch đại xung laser femto-giây.

Do vậy, việc khai thác và sử dụng hệ laser cho các nghiên cứu và ứng dụng còn khá hạn chế. Để nâng cao hiệu suất sử dụng laser này thì việc nghiên cứu và phát triển bộ khuếch đại cho hệ laser Ti:Sapphire là thực sự cần thiết. Trước yêu cầu cần thiết đó, chúng tôi đã và đang tiến hành nghiên cứu, phát triển bộ khuếch đại cho hệ laser này. Các kết quả bước đầu thu được đó là: tính toán, thiết kế các bộ nén, dẫn xung laser cực ngắn; thiết kế bộ chọn lọc xung; xác định được các tham số ảnh hưởng đến quá trình khuếch đại; tính toán và thiết kế bộ khuếch đại hoàn chỉnh phù hợp với điều kiện sẵn có tại Viện Vật lý và các tham số của laser Ti:Sapphire được trang bị. Cấu hình bộ khuếch đại được thiết kế như trên Hình 10, các xung laser femto-giây sẽ được giãn ra hàng trăm pico-giây trước khi đưa vào bộ khuếch đại, xung laser pico-giây sau khi đã được giãn sẽ được đưa qua bộ chọn xung sao cho tần số lặp lại của xung laser cần khuếch đại bằng với tần số lặp lại của xung laser bơm (10 Hz). Xung laser sau khi đã đi qua bộ chọn xung được đưa vào bộ khuếch đại 8 lần truyền qua, tinh thể Ti:Sapphire ($7 \times 3 \times 6$ mm) hấp thụ 90-96% tại bước sóng 532 nm được sử dụng làm môi trường khuếch đại và được bơm bằng hòa ba bậc hai của laser Nd:YAG. Xung laser pico-giây sau khi đã được khuếch đại sẽ được đưa qua bộ nén xung xuống độ rộng xung ban đầu. Với cấu hình khuếch đại này, năng lượng của xung laser femto-giây có thể lên đến hàng mJ sau khi đã được khuếch đại. Quá trình chế tạo hệ khuếch đại đã và đang được liên tục phát triển và dự kiến hoàn thành vào 12/2015.

6. Kết luận

Các hệ laser toàn rắn phát xung cực ngắn được bơm bằng laser bán dẫn, laser toàn rắn phát xung ngắn trực tiếp trong vùng tử ngoại, laser Raman hiện đại dựa trên hiệu ứng tự chuyển đổi Raman trong buồng cộng hưởng đã được nghiên cứu và phát triển thành công tại Trung tâm Điện tử học Lượng tử Viện Vật lý, Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam. Ngoài ra, các nguồn laser femto-giây với năng lượng lên đến hàng mJ cũng đang được nghiên cứu và phát triển. Các kết quả nghiên cứu và các laser được phát triển này đã và đang được ứng dụng trong các nghiên cứu khoa học cũng như chuyển giao công nghệ.

Lời cảm ơn: Các tác giả xin cảm ơn sự hỗ trợ tài chính từ đề tài Mã số: VAST01.05/14-15 cấp Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam.

Tài liệu tham khảo:

- [1] W. Demtröder, *Laser Spectroscopy*, 3rd Ed. (Springer, 2009)
- [2] F. J. Duarte (Ed.), *Tunable Laser Applications*, 2nd Ed. (CRC, 2009) Chapter 9". *Opticsjournal.com*. Retrieved 2011-09-25.
- [3] F. J. Duarte (Ed.), *Tunable Laser Applications*, 2nd Ed. (CRC, 2009) Chapter 12.
- [4] "Light Warfare"; by Matthew Swibel; 04.23.07;". *Forbes.com*. Retrieved 2011-09-25.
- [5] Joint High Power Solid-State Laser, Northrop Grumman Corporation, 2012.
- [6] Nguyen T. Nghia, Nguyen V. Hao, Valentin A. Orlovich and Nguyen D. Hung (2011), "Generation of nanosecond laser pulses at a 2.2-MHz repetition rate by a cw diode-pumped passively Q-switched Nd³⁺:YVO₄ laser", *Quantum Electronics*, 41 (9), pp. 790-793.
- [7] Nguyen Van Hao, Nguyen Trong Nghia, Vương Văn Cường, Nguyễn Đại Hùng, " Laser rắn Nd³⁺:YAG biến điệu thụ động được bơm dọc bằng các xung laser diode" *Advances in Optics Photonics Spectroscopy & Application*, ISSN 1859 – 4271(210), pp 759-763
- [8] Nguyễn Văn Hào, Lê Thị Kim Cương, Liamorkamar Keryang, A.Grabtchikov, Phạm Long và Nguyễn Đại Hùng, "Một số đặc trưng của laser rắn Nd:YVO₄ được bơm bằng laser diode công suất cao", *Advances in Optics Photonics Spectroscopy & Application*, ISSN 1859 – 4271(212), pp 523.
- [9] Do Quoc Khanh, Nguyen Trong Nghia, Galieno Denardo, Vu Thi Bich, Phạm Long, and Nguyen Dai Hung, "Generation of Pico-second Laser Pulses at 1064 nm From All Solid-state Passively Mode-locked Lasers", *Communication in Physics*, Vol. 19, Special Issue (2009), pp125 – 136.
- [10] Nguyen Trong Nghia, Do Quoc Khanh, Nguyen Dai Hung, and Philippe Brechignac, "Research and Development of Diode-pumped Solid-state Nd³⁺: Doped Lasers", *Communication in Physics*, Volume 19, Special Issue (2009), pp145 – 155.
- [11] Nguyen Van Hao, Phạm Hồng Minh, Phạm Văn Dương, Nguyễn Thế Bình và Nguyễn Đại Hùng, "Numerical investigations of laser diode end pumped solid state Cr³⁺:LiSAF lasers passively Q-switched with Cr⁴⁺:YSO crystal " *Communications in Physics* 24, (2014), 71-84.
- [12] Nguyen Van Hao, Phạm Văn Dương, Phạm Hồng Minh, Do Quoc Khanh, and Antonio Agnesi, "Design and development of the folded 4 mirror resonators for diode end pumped solid state Cr:LiSAF lasers" *Communications in Physics* 24, (2014), 109-120.
- [13] Nguyen Van Hao, Phạm Hồng Minh, Phạm Văn Dương, Do Hoàng Tung , Nguyễn Đại Hùng, et al., "Diode-Pumped Tunable Solid-State Cr³⁺:LiSAF Lasers Passively Q-Switched With Cr⁴⁺:YSO Crystal", *Advances in Optics Photonics Spectroscopy & Application*, ISSN 1859 – 4271(2014), pp 362
- [14] Phạm Hồng Minh, Nguyễn Phan Nhật, Do Quoc Khanh, Nguyễn Đại Hùng et al., ""Investigation of the Spectral And Temporal Processes Of All Solid-State Ultraviolet Ce:LiCAF laser emission", *Advances in Optics Photonics Spectroscopy & Application*, ISSN 1859 – 4271 (212), pp 419.

- [15] Minh Hong Pham, et al Numerical simulation of ultraviolet picosecond Ce:LiCAF laser emission by optimized resonator transients, *Jpn. J. Appl. Phys.* **53** (2014) 062701
- [16] Pham Hong Minh, Pham Van Duong, Pham Huy Thong, Do Quoc Khanh, Nobuhiko Sarukura, Nguyen Dai Hung, "Possibility of Generation and Amplification to High Power of Ultraviolet Ce:LiCAF Laser Short Pulses", *Communications in Physics*, **24**, 2014, 91-102.