

*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 thiết kế và phát triển bộ khuếch đại xung laser cực ngắn

Phạm Hồng Minh, Phạm Huy Thông, Phạm Văn Dương, 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 nghiên cứu, thiết kế và phát triển bộ khuếch đại xung laser femto-giây trên cấu hình khuếch đại CPA (khuếch đại sau khi đã giãn và xung được nén trở lại sau khi khuếch đại). Với việc chọn các thông số của các yếu tố quang học thích hợp cũng thiết kế cấu hình của khuếch đại tối ưu không những chúng ta có thể thu được các xung laser femto giây với năng lượng lên đến hàng mJ mà còn giảm chi phí cho hệ khuếch đại laser này rất nhiều.

Từ khóa: Laser xung ngắn, khuếch đại laser, giãn và nén xung laser cực ngắn

1. Mở đầu

Các laser xung cực ngắn có nhu cầu sử dụng rất nhiều trong nghiên cứu khoa học và công nghệ, đặc biệt trong các nghiên cứu quang phổ phân giải thời gian, nghiên cứu các quá trình vật lý cực nhanh và các quá trình phi tuyến. 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 [1, 2]. Do độ rộng xung nhỏ nên công suất đỉnh của laser lớn hơn rất nhiều so với laser liên tục hay laser xung dài với cùng một công suất trung bình. Công suất đỉnh lớn cho phép nghiên cứu các hiệu ứng phi tuyến và mở rộng các ứng dụng của vật lý quang phổ. Sự ra đời của laser xung cực ngắn đã mở ra sự phát triển của ngành quang phổ cực nhanh (ultrafast spectroscopy) với các kỹ thuật đo phân giải thời gian có độ chính xác đến femto giây. Những kỹ thuật tiên tiến trong quang phổ cực nhanh như kỹ thuật quang phổ 2 hay 3 chiều (2D, 3D spectroscopy), phổ hấp thụ quá độ dựa trên bơm-dò (pump/probe transient absorption), tần số tổng (sum frequency), photon echo, fluorescence upconversion... cho phép khảo sát một cách chi tiết các mức năng lượng của trạng thái cơ bản hoặc kích thích cũng như thời gian sống của các trạng thái trung gian và các hợp chất trung chuyển [3-5]. Ngoài ra tùy vào hệ nghiên cứu ta có thể xác định được tần số dao động cũng như cấu trúc của phân tử. Do công suất đỉnh cao laser femto giây được dùng để tạo ra các cấu trúc cỡ micro mét (micro machining). Nó cũng được ứng dụng trong y tế như để phẫu thuật mắt (femtoLASIK) sửa các tật của mắt như cận thị. Laser femto giây còn được dùng để tạo tia X có độ rộng xung cỡ femto giây dùng trong các nghiên cứu cấu trúc và động học của phân tử [6]. Thông thường laser femto giây phát ra từ bộ dao động (oscillator) có năng lượng khá thấp (vài nJ) và tần số lặp lại rất cao (vài chục MHz) [7, 8].

Trung tâm Điện tử học Lượng tử, Viện Vật lý, Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam được đầu tư một hệ laser 100 femto giây Ti-Sapphire, Tsunami, từ dự án Phòng thí nghiệm trọng điểm cấp Viện Khoa học và công nghệ Việt Nam. Tuy nhiên năng lượng của các hệ thống laser này là rất nhỏ cỡ nJ. Vì vậy để ứng dụng được hệ laser này vào trong các nghiên cứu cho quang phổ cực nhanh, kích thích đa photon, quang phổ phi tuyến thì việc khuếch đại năng lượng xung laser này lên cỡ mJ là cần thiết.

Trong số các kỹ thuật khuếch đại laser xung cực ngắn thì kỹ thuật khuếch đại kéo dẫn xung (chirped-pulse amplifier, CPA) [9] là phổ biến và hiệu quả nhất. Trong kỹ thuật này laser xung cần khuếch đại ban đầu từ oscillator trước khi đưa vào bộ khuếch đại sẽ được kéo dẫn về mặt thời gian bởi bộ dẫn xung (pulse stretcher). Sau khi được khuếch đại nhiều lần trong buồng cộng hưởng và đạt được năng lượng rất lớn, nó sẽ được cho qua bộ nén xung (pulse compressor) trước khi được đưa ra ngoài.

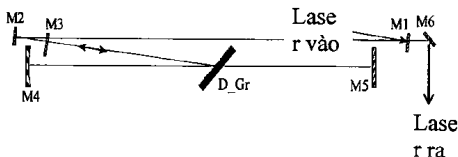


Hình 1. Sơ đồ nguyên tắc của bộ khuếch đại laser sử dụng kỹ thuật Chirp-Pulse Amplification [9].

2. Nghiên cứu và thiết kế bộ giãn và bộ nén xung laser cực ngắn

Để nâng cao hiệu suất khuếch đại đặc biệt là tránh phá hỏng các linh kiện quang học, tự biến điệu pha (self-phase modulation) và tự hội tụ (self focusing) thì việc dẫn xung laser femto trước khi đưa vào bộ khuếch đại là rất quan trọng. Xung laser có độ rộng 100 fs cần được kéo dẫn đến khoảng hàng trăm ps. Xung laser cực ngắn thường có độ rộng phổ lớn hơn so với laser liên tục (khoảng 10 nm cho laser có độ rộng xung 80 fs). Trong môi trường tán sắc dương ánh sáng có bước sóng dài hơn thường có vận tốc lớn hơn do có chiết suất nhỏ hơn so với ánh sáng có bước sóng ngắn hơn. Nguyên tắc của bộ dẫn xung dùng tán sắc dương là làm cho ánh sáng có bước sóng dài hơn có quãng đường đi ngắn hơn trong hệ quang học, trong khi nén xung thì ngược lại. Để dẫn hay nén xung ta có thể dùng lăng kính hoặc cách tử. Thông thường cách tử hiệu quả hơn lăng kính do khả năng tán sắc cao hơn. Tùy vào cấu hình quang học và các thông số của cách tử một xung vào ban đầu có thể được kéo dẫn ra hàng nghìn lần. Cấu hình giãn xung của chúng tôi dựa trên dựa trên cấu hình của Oeffner [10, 11] được trình bày trên Hình 2. Trong cấu hình này chúng tôi chỉ sử dụng một cách tử 1200 vạch, gương điện môi M_1 , M_2 , M_3 và M_4 có độ phản xạ cao ở vùng bước sóng 740÷840 nm. Gương cầu điện môi M_4 với $R=100$ mm và phản xạ cao ở vùng bước sóng 740÷840 nm được dùng để hứng chùm tia nhiều xạ sau cách tử.

Laser 100 femto giây, với năng lượng cỡ nJ phát ra từ bộ dao động được đưa vào bộ giãn xung bởi gương M_1 và M_2 . Chùm laser sau khi đến cách tử sẽ bị nhiễu xạ và đến gương M_3 . Sau khi đến gương M_3 , chùm laser sẽ bị phản xạ ngược trở lại cách tử và đến gương cầu M_4 . Gương cầu M_4 có tác dụng giảm đường kính chùm laser. Sau khi đến gương phẳng M_5 chùm laser sẽ bị phản xạ ngược trở lại cách tử và đến gương M_3 . Sau hai chu trình như vậy, chùm laser sẽ được lấy ra ngoài.

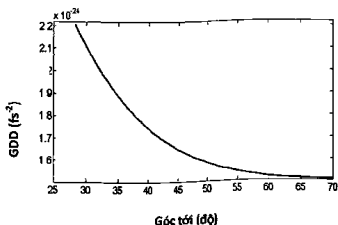


Hình 2. Hệ giãn xung laser femto-giây.

Hệ số tán sắc của cả hệ nén xung được đưa ra bởi công thức 1 [10-13]:

$$GDD = \frac{2z\lambda^2}{\pi c^2 d^2 \cos(\theta)^3} \quad (1)$$

trong đó GDD - độ số tán sắc của cả hệ của cả hệ; z - khoảng cách từ cách từ đến gương cầu M_4 ; λ - bước sóng của laser; c - vận tốc ánh sáng trong chân không; d - hằng số cách tử; θ - góc nhiễu xạ. Với cách tử 1200 vạch thì góc Littrow là 28° . Sự phụ thuộc của độ tán sắc GDD vào góc tới cách tử được trình bày trên Hình 3, ta thấy rằng góc giữa chùm tia laser tới và pháp tuyến của cách tử càng gần với góc Littrow thì độ tán sắc càng lớn.

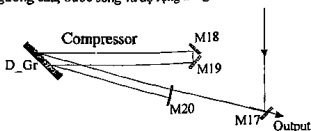


Hình 3. Sự phụ thuộc của độ tán sắc GDD vào góc tới cách tử.

Độ rộng rộng của laser trước và sau khi đi qua bộ giãn xung liên hệ với nhau bằng công thức 2 [10-13]:

$$\tau_{out} = \sqrt{1 + \left(4 \ln 2 \frac{GDD}{\tau_{in}^2}\right)^2} \quad (2)$$

trong đó τ_{out} là độ rộng xung laser sau khi đã được giãn; τ_{in} là độ rộng xung trước khi vào hệ giãn xung. Từ công thức (1) và (2) ta thấy độ rộng xung của laser ra phụ thuộc vào hằng số cách tử, khoảng cách giữa cách tử và gương cầu, bước sóng và độ rộng xung laser vào.



Hình 4. Hệ nén xung laser femto-giây.

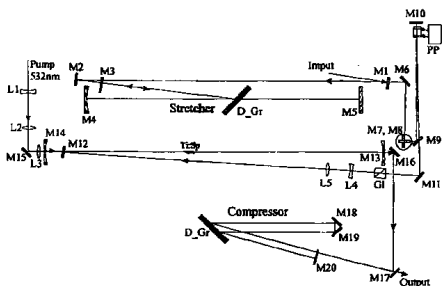
Trong hệ thí nghiệm này, chúng tôi chọn chọn góc laser tới cách tử là 34° với góc tới này chúng ta có thể dễ dàng bố trí các yếu tố quang học cũng như tận dụng được khả năng tán sắc của cách tử. Để có thể giãn được xung laser 100 femto giây lên thành 100 pico giây thì bằng tính toán lý thuyết, khoảng cách giữa cách tử và gương cầu là 0.4 m. Vị trí của gương M_5 và M_3 được đặt sao cho sau khi chùm tia

ra khỏi hệ giãn xung là chùm song song. Sau khi xung laser đã được khuếch đại thì chúng ta phải nén các xung laser về độ rộng ban đầu. Do vậy, chúng tôi cũng đã nghiên cứu và thiết kế bộ nén xung laser trên cơ sở hệ nén xung của Oeffner [10, 11], tuy nhiên thay vì sử dụng hai cách tử chúng tôi chỉ sử dụng một cách tử Hình 4.

Trong cấu hình bộ nén xung chúng tôi cũng sử dụng cách từ 1200 vạch, gương M_{18} và M_{19} có độ phản xạ cao trong vùng bước sóng 740÷840 nm ở góc 45°, gương M_{20} có độ phản xạ cao trong vùng bước sóng 740÷840 nm ở góc 0°. Mục tiêu là làm sao có thể nén được các xung này về ngắn nhất có thể thì gương M_{18} và M_{19} được đặt trên một bộ dịch chuyển để có thể thay đổi được khoảng cách giữa cách từ và hai gương này. Xung laser được đưa vào bộ nén xung bởi gương M_{17} ; sau khi nhiễu xạ trên cách từ chùm tia laser sẽ đến gương M_{18} và M_{19} rồi lại bị phản xạ ngược trở lại cách từ, sau khi chùm tia laser nhiễu xạ trên mặt cách từ lần thứ hai sẽ đến gương M_{20} . Gương M_{20} được đặt vuông góc với chùm laser tới do vậy chùm tia laser sẽ bị phản xạ ngược trở lại cách từ. Như vậy sau khi nhiễu xạ trên mặt cách từ lần thứ bốn chùm tia laser sẽ được đưa ra ngoài. Độ rộng của xung laser ra phụ thuộc vào góc tới của chùm tia tới, khoảng cách giữa gương M_{18} và M_{19} tới mặt cách từ. Hơn nữa, do chùm tia laser đi lại nhiều lần trong bộ khuếch đại nên chúng cũng bị mở rộng ra (về mặt thời gian), tuy nhiên do xung laser trước khi đi vào bộ khuếch đại có độ rộng hàng trăm pico-giây nên sự mở rộng do ảnh hưởng của tính thể laser này là không đáng kể. Bằng tính toán lý thuyết chúng tôi thấy rằng để nén xung laser sau khi khuếch đại từ 100 ps về với độ rộng xung ban đầu thì góc tới của chùm tia laser đến cách từ là 34° và khoảng cách từ hai gương M_{18} và M_{19} tới cách từ là khoảng 0.4 m.

3. Nghiên cứu và thiết kế bộ khuếch đại cho xung laser cực ngắn

Sau khi đã nghiên cứu được bộ giãn và nén xung laser cực ngắn, chúng tôi tiếp tục nghiên cứu thiết kế bộ khuếch đại công suất cho hệ laser này. Hình 5. Sau khi xung laser cần khuếch đại được giãn ra 100 ps bằng bộ giãn xung. Để bộ khuếch đại hoạt động hiệu quả, sự đồng bộ điện từ là rất quan trọng. Xung đồng bộ chủ phát ra từ oscillator thường có tần số vài chục MHz được cho qua bộ chọn xung là tế bào Pockels. Sau khi laser cần khuếch đại có tần số bằng tần số của laser bơm sẽ được đưa vào bộ khuếch đại bằng gương M₁₂. Môi trường khuếch đại laser là tinh thể Ti:Sapphire 7x3x6 mm, hấp thụ 90-96% ở bước sóng 532 nm và được bơm bằng hòa ba bậc hai của laser Nd:YAG tại bước sóng 532 nm, độ rộng xung 8 ns, năng lượng cực đại 200 mJ.



Hình 5. Hệ khuếch đại xung laser femto-giây.

Xung laser sẽ bị khóa trong bộ khuếch đại bằng hai gương cầu M_{13} và M_{14} có $R=1000\text{mm}$, và phản xạ cao trong vùng bước sóng $740\div 840\text{ nm}$. Sau khi xung laser đi lại 8 lần trong bộ khuếch đại lúc này năng lượng của xung đã đạt tới mJ thì sẽ được đưa ra ngoài bằng gương M_{16} và đưa vào bộ nén xung để nén các xung này lại. Sau khi ra khỏi bộ nén xung thì độ rộng của xung laser có độ rộng xung laser ban đầu (100 fs). Như vậy với việc sử dụng cấu hình khuếch đại này chúng ta có thể khuếch đại năng lượng các xung laser femto-giây này lên vài mJ.

4. Kết luận

Chúng tôi nghiên cứu, thiết kế thành công bộ khuếch đại xung laser femto-giây trên cấu hình khuếch đại CPA (khuếch đại sau khi đã giãn và xung được nén trở lại sau khi khuếch đại). Các kết quả nghiên cứu này là cơ sở cho việc phát triển thực nghiệm một hệ khuếch đại xung laser femto-giây công suất cao trong thời gian tới tại Viện Vật lý, Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam.

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

Tài liệu tham khảo:

- [1] M. A. El-Sayed, I. Tanaka and Y. Molin "Ultrafast Processes in Chemistry and Photobiology", *Blackwell Science* 1995, pp 306, ISBN 0-86542-893-X.
- [2] S. Pedersen, J.L. Herek and A.H. Zewail "The Validity of the Diradical Hypothesis: Direct Femtosecond Studies of the Transition-State Structures", *Science*, 266, 1359-1364 (1994).
- [3] Wojciech Gawelda, Andrea Cannizzo, Van-Thai Pham et al. "Ultrafast Nonadiabatic Dynamics of $[\text{Fe}(\text{bpy})_3]^{2+}$ in Solution", *J. Am. Chem. Soc.* 129, 8199 -8206 (2007).
- [4] Erik R. Barthel, et al. "How Does the Solvent Control Electron Transfer? Experimental and Theoretical Studies of the Simplest Charge Transfer Reaction", *J. Phys. Chem. B*, 105, 12230 (2001).
- [5] C. Consani, G. Auboeck, F. Van Mourik and M. Chergui "Ultrafast Tryptophan-to-Heme Electron Transfer in Myoglobins Revealed by UV 2D Spectroscopy", *Science*, 339, 1586 (2013).
- [6] Ravasio A, et al. "Single-shot diffractive imaging with a table-top femtosecond soft x-ray laser-harmonics source", *Phys. Rev. Lett.* 103, 028104 (2009).
- [7] Claude Rullière, *Femtosecond laser pulses: principles and experiments. Second Edition*, Springer, pp 60-67 (2005).
- [8] A. Lagatsky et al, Femtosecond pulse operation of a Tm,Ho-codoped crystalline laser near $2\text{ }\mu\text{m}$, *Opt. Lett.* , 35, 172 (2010).
- [9] S. Backus et al., "High power ultrafast lasers", *Rev. Sci. Instrum.* 69, 1207 (1998)
- [10] G. Cheriaux, et al, "Aberration-free stretcher design for ultrashort-pulse amplification", *Opt. Lett.* 21, 414 (1996)
- [11] A. Oeffner, U.S. patent 3,748,015 (1971)
- [12] A. Ruiz-de-la-Cruz and R. Rangel-Rojó., Multi-pass confocal ultra-short pulse amplifier, *Revista Mexicana De Física* 51 (5) 488-493
- [13] Gavin D. Reid and Klaas Wynne, Ultrafast Laser Technology and Spectroscopy, *Analytical Chemistry R.A. Meyers* (Ed.) pp. 13644-13670, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2000.