

NHỮNG NGHIÊN CỨU VÀ PHÁT TRIỂN CÁC THIẾT BỊ ĐO ĐỘ DÀI THỜI GIAN CỦA XUNG ÁNH SÁNG LASER CỰC NGẮN

Đỗ Quốc Khánh, Nguyễn Trọng Nghĩa, Nguyễn Văn Hảo, Vương Văn Cường

Viện Vật lý, Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam

10 Đào Tấn, Ba Đình, Hà Nội

Email: dqkhanh@iop.vast.ac.vn

Tóm tắt:

Hai hệ thiết bị quang điện tử đặc biệt, dựa trên nguyên tắc của sự biến đổi thời gian- không gian và hàm tự tương quan, đã được nghiên cứu và phát triển ở Viện Vật lý để đo độ dài thời gian của các xung ánh sáng laser cực ngắn. Các thiết bị được chế tạo đã cho phép đo được các xung ánh sáng laser có độ dài picô-giây (10^{-12} giây) ở trong các chế độ hoạt động laser có tần số xung lặp lại thấp hoặc tần số xung lặp lại cao.

Abstract:

Basing on the time-space transformation and the autocorrelation function, two different auto-correlators as specific opto-electronic devices are investigated and successfully developed at the IOP in order to determine temporal duration of ultra-short laser pulses. These auto-correlators were well used to measure low and high -pulse repetition rate, picosecond laser pulses.

I. Mở đầu

Các laser phát xung ánh sáng cực ngắn (10^{-12} - 10^{-15} giây) đang đóng vai trò quan trọng trong nghiên cứu các quá trình động học xảy ra rất nhanh, đòi hỏi phân giải về thời gian rất cao ở trong các lĩnh vực vật lý, sinh học, hoá học [1-3]. Đối với các xung laser cực ngắn, ngoài các đặc trưng về năng lượng và phổ phát xạ laser thì các đặc trưng thời gian của xung (độ dài xung, dạng xung...) là các thông số quan trọng, chúng là cơ sở để ứng dụng laser hoặc đánh giá và tối ưu hóa trong công nghệ laser. Trong khi đó, các thiết bị điện tử hiện đại do giới hạn của băng thông, không thể đo được trực tiếp các xung laser cực ngắn này.

Trong báo cáo này, chúng tôi trình bày các nghiên cứu và phát triển hai thiết bị đo độ rộng thời gian của các xung laser cực ngắn. Các thiết bị đo này dựa trên nguyên tắc: sự biến đổi thời gian – không gian của ánh sáng laser và hàm tương quan (correlation function). Đây là phương pháp đo gián tiếp, sử dụng xung laser cực ngắn để đo lường chính nó.

II. Nguyên tắc của phương pháp

Giả sử có hai tín hiệu được mô tả bởi hai hàm phụ thuộc vào thời gian $F(t)$ và $F'(t)$. Nếu ta đã biết một trong hai hàm đó, chẳng hạn hàm $F'(t)$ - hàm thử, thông qua việc xác định hàm tương quan (correlation function) $G(\tau)$, được biểu diễn bởi [1]

$$G(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} F'(t)F(t + \tau)dt \quad (1)$$

chúng ta sẽ xác định được hàm $F(t)$ còn lại. Ở đây, $G(\tau)$ là hàm tương quan bậc nhất.

Để đo các xung laser cực ngắn, chúng ta không có “hàm thử” cực ngắn, nhưng có thể dùng chính xung laser để đo chính nó, vì vậy phương pháp này dựa trên việc xác định hàm tự tương quan. Hàm tương quan và tự tương quan được chia thành nhiều nhóm khác nhau. Tuy nhiên, trong phạm vi ứng dụng cho các đo lường xung laser ngắn ở đây ta chỉ đề cập tới các hàm tự tương quan không nền. Hàm tự tương quan không có nền bậc n được xác định theo biểu thức [1]:

$$G^{(n)}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \{E(t)E(t+\tau_1)\dots E(t+\tau_{n-1})\}^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} E^{2n}(t) dt} \quad (2)$$

Một cách tổng quát, để xác định đầy đủ các đặc trưng của xung laser (dạng xung, độ rộng xung, cường độ, pha) cần phải xác định các hàm tương quan có bậc khác nhau. Về mặt thực nghiệm, các hàm tự tương quan có thể đo được nhờ các quá trình đa photon. Chẳng hạn, hàm tự tương quan bậc 2 có thể xác định nhờ sự hấp thụ 2 photon hoặc sự phát hòa ba bậc hai; hàm bậc 3 có thể xác định bằng sự hấp thụ 3 photon hoặc sự phát hòa ba bậc ba... Tuy nhiên, Việc sử dụng hàm tự tương quan bậc 2 và 3 là đủ để mô tả một số đặc trưng thời gian của xung laser [1].

Trong thực tế, để đo độ rộng xung laser cực ngắn người ta chủ yếu sử dụng hàm tự tương quan bậc 2 có dạng sau [1]:

$$G^{(2)}(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} E^2(t)E^2(t+\tau)dt}{\int_{-\infty}^{\infty} E^4(t)dt} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} I(t)I(t+\tau)dt}{\int_{-\infty}^{\infty} I^2(t)dt} = \frac{\langle I(t)I(t+\tau) \rangle}{\langle I^2(t) \rangle} \quad (3)$$

Một đặc điểm quan trọng đó là dạng của hàm tự tương quan phụ thuộc vào dạng xung laser $I(t)$, do vậy mối liên hệ giữa độ rộng của hàm tự tương quan $\Delta\tau$ (FWHM) với độ rộng của xung laser Δt (FWHM) cũng phụ thuộc vào dạng xung. Trong khi đó hàm tự tương quan bậc 2 là hàm đối xứng không phản ánh thông tin gì về dạng xung, vì vậy không cho ta biết chính xác dạng xung laser được đo. Để xác định dạng xung và động học phổ (chẳng hạn sự tán sắc - chirp, sự điều biến pha...) ta cần phải sử dụng các kỹ thuật khác nhau như phương pháp cách tử quang học phân giải tần số FROG [4].

Để dùng hàm tự tương quan trong đo lường độ rộng xung laser cực ngắn, ta cần phải chọn một dạng xung phù hợp để từ hàm tự tương quan đo được có thể rút ra những đặc trưng của xung laser. Trên thực tế, người ta thường chọn xung laser ban đầu có dạng $sech^2(t)$ hay có dạng *Gaussian*, tùy vào kết quả đo độ rộng xung với dạng xung nào cho kết quả gần đúng nhất giá trị thực nghiệm. Bảng 1 trình bày quan hệ giữa $\Delta\tau$ và Δt đối với một số dạng xung.

Trên cơ sở nguyên tắc trên, chúng tôi đã phát triển hai hệ đo độ rộng xung laser cực ngắn: hệ thứ nhất dựa trên nguyên lý đo tự tương quan cường độ, sử dụng bộ dịch chuyển tịnh tiến làm thay đổi thời gian trễ giữa hai xung (Hình 1) để đo xung laser có tần số thấp; hệ thứ hai dựa trên nguyên lý đo tự tương quan (cường độ hoặc giao thoa) sử dụng cặp gương quay làm thay đổi nhanh thời gian trễ giữa hai xung (Hình 3) để đo xung laser có tần số lặp lại cao.

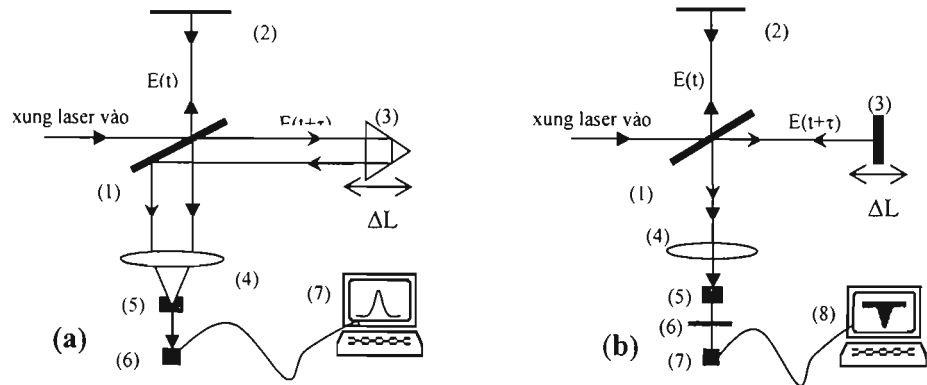
Bảng 1: Quan hệ giữa $\Delta\tau$ và Δt đối với một số dạng xung [1].

$I(t)$	$I(\omega)$	$\Delta\omega\Delta t$	$G^{(2)}(\tau)$	$\Delta\tau/\Delta t$
$\exp(-t^2)$	$\exp(-\omega^2)$	2.772	$\exp(-\tau^2/2)$	1.414
$\text{sech}^2(t)$	$\text{sech}^2\left(\frac{\pi}{2}\omega\right)$	1.978	$\frac{3}{\sinh^2(\tau)}[\tau \coth(\tau) - 1]$	1.543
$\frac{1}{e^{t/(t-A)} + e^{-t/(t-A)}}$ $A = 1/4$	$\frac{1 + 1/\sqrt{2}}{\cosh\left(\frac{15\pi}{16}\omega\right) + 1/\sqrt{2}}$	1.925	$\frac{1}{\cosh^3\left(\frac{8}{15}\tau\right)}$	1.544
$A = 1/2$	$\text{sech}\left(\frac{3\pi}{4}\omega\right)$	1.749	$\frac{3 \sinh\left(\frac{8}{3}\tau\right) - 8\tau}{4 \sinh^3\left(\frac{4}{3}\tau\right)}$	1.549
$A = 3/4$	$\frac{1 - 1/\sqrt{2}}{\cosh\left(\frac{7\pi}{16}\omega\right) - 1/\sqrt{2}}$	1.391	$\frac{2 \cosh\left(\frac{16}{7}\tau\right) + 3}{5 \cosh^3\left(\frac{8}{7}\tau\right)}$	1.570

III. Nghiên cứu và phát triển các hệ đo độ rộng xung laser cực ngắn

III.1. Hệ đo độ rộng xung laser cực ngắn có tần số lặp lại thấp

Hệ đo độ rộng xung laser cực ngắn được thiết kế theo cấu hình giao thoa kế Michelson (Hình 1). Với cấu hình hệ đo tự tương quan cường độ (Hình 1a), xung laser tới gương chia chùm (1) được chia thành hai chùm với tỉ lệ 50%. Chùm thứ nhất, tới gương phản xạ (2) được đặt cố định, phản xạ quay về và truyền tới thấu kính (4) – đây gọi là nhánh cố định của giao thoa kế có chiều dài l . Chùm thứ hai, truyền tới lăng kính (3) (được đặt trên một bộ vi dịch chuyển tịnh tiến) và truyền ngược lại tới gương chia chùm rồi tới thấu kính – nhánh này có thể thay đổi chiều dài trong khoảng $l \pm \Delta l$ (gọi là nhánh trễ). Sau đó hai chùm tia (không đồng trục) được hội tụ vào tinh thể quang học phi tuyến KDP (5), tín hiệu hòa ba bậc hai phát ra sau tinh thể được thu trên photodiode (6) và xử lý trên máy tính (7).

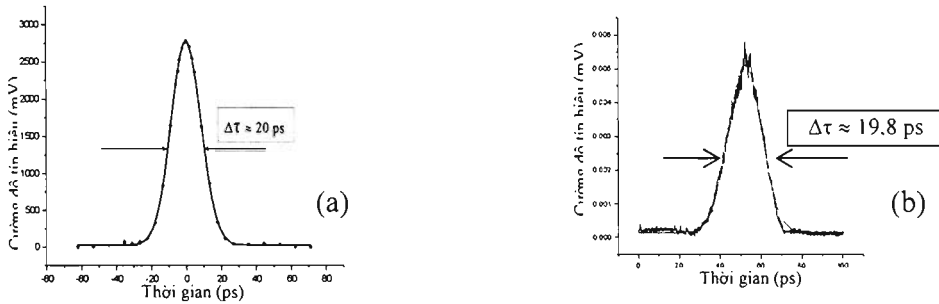


Hình 1: Cấu hình các bộ tự tương quan trên cơ sở giao thoa kế Michelson để đo độ rộng xung laser: a) Đo tự tương quan quang cường độ và b) Đo tự tương quan giao thoa.

Hệ đo độ rộng xung laser này đã được phát triển tại Viện Vật lý để đo xung laser màu 500 fs, tần số lặp lại xung là 10 Hz [5]. Hệ này đã sử dụng các bộ khuếch đại tích phân và bộ ghép nối máy tính PCL-711S (PC-Labcard). Hiện nay, hệ đo này sử dụng card âm thanh của

máy tính như là bộ chuyển đổi tương tự - số và hiển thị kết quả trên máy tính. Do vậy, việc phát triển hệ đo được đơn giản và kinh tế hơn, hoạt động của hệ đo được điều khiển bởi chương trình trên máy tính.

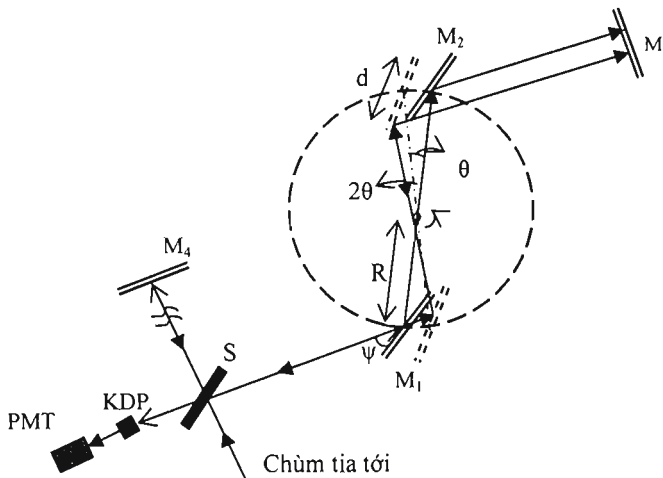
Chúng tôi đã sử dụng hệ tự tương quan trên để đo độ rộng xung laser cực ngắn được phát từ laser Nd:YVO₄ khóa mode do Viện Vật lý phát triển [9-11]. Các kết quả đo hàm tự tương quan cường độ của các xung laser này được biểu diễn trên Hình 2, độ rộng vết tự tương quan cường độ là $\Delta\tau \approx 20$ ps, giả thiết xung laser có dạng $\text{sech}^2(t)$ thì độ rộng xung $\Delta t \approx 12$ ps.



Hình 2: Vết tự tương quan cường độ của xung laser rắn Nd: YVO₄ khóa mode.

III.2. Phát triển hệ đo độ rộng xung laser cực ngắn có tần số lặp lại cao

Với hệ đo độ rộng xung laser sử dụng bộ dịch chuyển tịnh tiến (Hình 1), do đặc điểm của phép đo lấy trung bình tín hiệu theo thời gian nên khi đo với các xung laser cực ngắn có tần số lặp lại thấp (Hz) thì thời gian thực hiện một phép đo khá dài (cỡ vài phút). Do vậy, điều này gây khó khăn cho việc quan sát và việc đánh giá nhanh độ rộng xung laser trong quá trình điều chỉnh quang học và tối ưu hóa quá trình hoạt động của laser.



Hình 3: Sơ đồ nguyên lý hệ đo nhanh độ rộng xung laser cực ngắn [5].

Với các laser khóa mode, tần số lặp lại xung laser thường rất cao (vài chục MHz) [9-11]. Số xung laser trong một đơn vị thời gian được tăng lên rất nhiều (hàng chục triệu lần), vì vậy về nguyên tắc chúng ta có thể giảm thời gian của phép đo xuống rất nhiều - tức là gần như đo “tức thời”. Để thực hiện điều này, ta phải biến đổi rất nhanh độ trễ Δl của nhánh trễ. Giải pháp đó là thay bộ dịch chuyển tuyến tính bằng hệ gương quay [6-8]. Cấu hình hệ đo nhanh độ rộng xung laser theo nguyên lý này được mô tả trên Hình 3. Về cơ bản, hệ đo nhanh độ rộng xung laser được thiết kế dựa trên cấu hình giao thoa kế Michelson: nhánh thứ nhất có

định, với chiều dài không đổi l ; nhánh thứ hai có chiều dài thay đổi bằng cách sử dụng cặp gương phẳng được đặt song song và cách nhau một khoảng $2R$ trên một trục quay cố định, khi hệ gương quay thì chiều dài nhánh thứ hai thay đổi trong khoảng $l \pm \Delta l$. Như vậy, sau mỗi vòng quay chúng ta có thể quan sát được vết tự tương quan (được thể hiện trên màn hình dao động ký). Độ lệch quang trình cực đại giữa hai nhánh của hệ đo sau một chu trình quay của gương phụ thuộc vào bán kính R , tốc độ quay và vị trí tương hỗ cũng như diện tích của hai gương. Độ lệch quang trình cực đại quyết định dải thời gian của xung laser mà hệ có thể đo được. Các tính toán lý thuyết cho kết quả, độ lệch quang trình sau một chu trình quay được xác định theo biểu thức sau [6]:

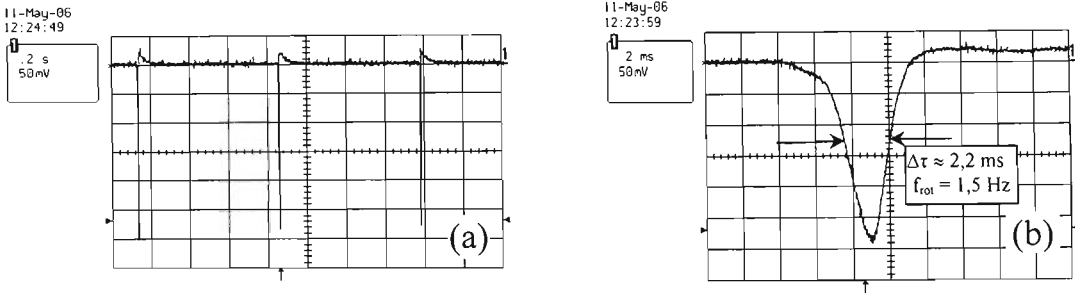
$$\Delta l \approx \frac{4d \cdot \sin 2\psi \cdot \sin \psi}{(2 - \cos 2\psi)} \quad (4)$$

trong đó: ψ là góc tới tạo bởi chùm tia laser với mặt gương quay thứ nhất M_1 ; d - là đường kính của gương quay. Khi $\psi = \pi/4$ thì độ lệch quang trình cực đại: $\Delta l = \sqrt{2}d$

Khi hệ gương quay với tần số f (chu kỳ quay T) thì mối liên hệ giữa độ rộng vết tự tương quan Δt thu được với độ rộng xung laser thực Δt được biểu diễn theo công thức (3) với giả thiết xung laser có dạng $\text{sech}^2(t)$ và góc tới ban đầu $\psi = \pi/4$:

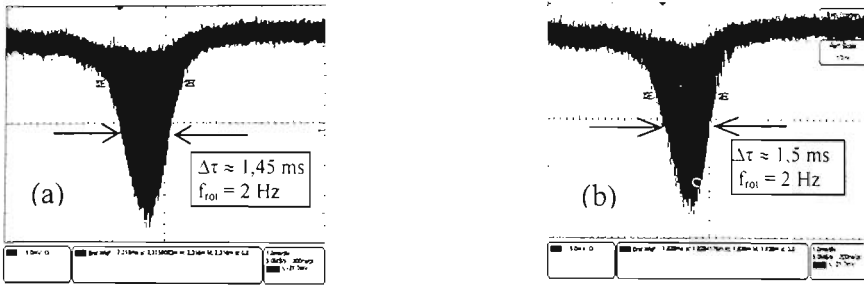
$$\Rightarrow \Delta t = \frac{8 \cdot \pi \cdot R \cdot \Delta \tau}{1,54 \cdot c \cdot T} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta \tau}{1,54 \cdot T} 10^{-9} \text{ (s)} \quad (5)$$

Với hệ đo gương quay (Hình 3), chúng tôi đã sử dụng $R = 7,5 \text{ cm}$ và cặp gương quay có đường kính $d = 3 \text{ cm}$, như vậy phạm vi độ rộng xung laser mà hệ có thể đo được trong dải từ hàng trăm femtô-giây (10^{-15} giây) đến 50 picô-giây. Chú ý rằng cấu hình hệ này cho phép đo theo cả nguyên tắc hàm tự tương quan cường độ hoặc hàm tự tương quan giao thoa với một sự thay đổi đơn giản. Chúng tôi cũng đã đo độ rộng xung laser được phát ra từ một laser Nd:YVO₄ khóa mode [9-11] vết tự tương quan cường độ đo được biểu diễn trên Hình 4.



Hình 4: (a) Tần số quay cặp gương 1,5 Hz.
(b) Vết tự tương quan cường độ quan sát trên dao động ký.

Với hệ laser Nd:YVO₄ khóa mode có tần số xung lặp lại $f = 40 \text{ MHz}$, kết quả đo độ dài xung laser của nó được trình bày trên Hình 4. Với tần số quay của hệ gương $f_{\text{rot}} = 1,5 \text{ Hz}$ (Hình 4a). Hình 4b thể hiện vết tự tương quan cường độ đo được trên dao động ký, tương ứng với độ rộng xung là $\Delta t \approx 12,2 \pm 0,2 \text{ ps}$.



Hình 5: Vết tự tương quan giao thoa quan sát được trên dao động ký.

Tương tự khi sử dụng hệ đo tự tương quan giao thoa (Hình 1b), kết quả đo các vết tự tương quan giao thoa được biểu diễn trên Hình 5. Với hệ laser Nd:YVO₄ khóa mode có tần số xung lặp lại $f = 40$ MHz, tần số quay của hệ gương $f_{rot} = 2$ Hz, kết quả đo độ rộng xung laser thu được là: $\Delta\tau \approx 11,8 \pm 0,2$ ps (Hình 5a). Hình 5b là kết quả đo với laser khóa mode có tần số lặp lại $f = 8,8$ MHz, tần số quay gương $f_{rot} = 2$ Hz, độ rộng xung thu được là $\Delta\tau \approx 12,2 \pm 0,2$ ps.

Qua các kết quả đo độ rộng xung laser rắn Nd:YVO₄ khóa mode cho thấy, độ rộng xung laser thu được cỡ 12 ps (cho cả hai phương pháp đo tự tương quan cường độ và tự tương quan giao thoa và cho cả trường hợp tần số xung lặp lại 40 MHz và 8,8 MHz). Kết hợp với kết quả đo độ rộng phổ của bức xạ laser Nd:YVO₄ khóa mode, giá trị tích của độ dài xung và độ rộng phổ của laser khóa mode là cỡ 0,7 ($\Delta\tau \times \Delta\nu \sim 0,7$). Giá trị này xấp xỉ giới hạn Fourier với xung có dạng $sech^2(t)$ ($\Delta\tau \times \Delta\nu \sim 0,315$). Điều này chứng tỏ rằng các laser Nd:YVO₄ khóa mode đã phát được các xung laser cực ngắn xấp xỉ giới hạn cho phép.

IV. Kết luận

Chúng tôi đã nghiên cứu và phát triển thành công 02 hệ đo độ rộng xung laser cực ngắn theo nguyên lý tự tương quan. Hệ thứ nhất có nhánh trễ sử dụng bộ dịch chuyển tuyến tính, được sử dụng đo cho các xung laser cực ngắn tần số xung lặp lại thấp. Hệ đo thứ hai có nhánh trễ sử dụng cặp gương quay, hệ đo này chỉ áp dụng đối với các xung laser cực ngắn có tần số xung lặp lại cao (trên KHz) và cho phép đo “tức thời” độ rộng xung laser cực ngắn. Các hệ này đã được sử dụng để đo độ rộng của các xung laser picô-giây phát ra từ hệ laser rắn Nd:YVO₄ khóa mode.

V. Lời cảm ơn

Các tác giả cảm ơn sự hỗ trợ tài chính từ Đề tài KH&CN về Laser của Viện Khoa học và Công Nghệ Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Claude Rulliere, *Femtosecond Laser Pulses*, Springer. Chap. 7, p.195 (2005).
2. U. Keller, “Recent developments in compact ultrafast lasers”, *Nature*, vol. 424, p. 831 (2003).
3. P. Eckle et al, “Attosecond ionization and tunneling delay time measurements”, *Science*, Vol. 322. Nr. 5907, pp. 1525-1529 (2008). Eckle, M. Smolarski et al, “Attosecond angular streaking”, *Nature Physics*, vol 4, pp. 565 (2008).
4. Trebino. R., *Frequency-resolved optical gating: the measurement of ultrashort laser pulses*. Boston, Kluwer Academic Publishers (2002).
5. Lê Hoàng Hải, *Luận án Tiến sỹ Vật lý*, Viện Vật lý (2004).
6. Zafer A. Yasa, Nabil M. Amer, *Optics Communications*, Vol 36, p. 406 (1981)
7. A. Watanabe, H. Saito et al. *Optics Communications*, Vol 69, p. 405 (1989).
8. D.T. Reid, M. Padgett, C. McGowan et al., *Optic Letters*, Vol 22, p. 233 (1997).
9. Do Q. Khanh, N. T. Nghia et al. *Proc. VI-th Nation. Confer. Phys.*, p.406 (2005)
10. Do Q. Khanh, Nguyen T. Nghia, Le TT. Nga, Pham Long et al, *Asean Journal on Sciences and Technology for Development*, Vol. 24, pp. 59-65 (2007).
11. Do Q Khanh, N. T. Nghia, Galieno Denardo et al. *Communications in Physics*, Vol. 19, Special Issue, p. 125-136 (2009).