

NGHIÊN CỨU PHÁT TRIỂN KỸ THUẬT QUENCHING-CAVITY VÀ ỨNG DỤNG VÀO PHÁT KHÔNG KHOÁ MODE CÁC XUNG LASER PICÔ-GIÂY

Đoàn Hoài Sơn, Vũ Dương, Phạm Hồng Minh, Trịnh Đình Huy,
Đinh Xuân Khoa, Đỗ Quang Hoà và Nguyễn Đại Hưng

*Trung tâm Điện tử học lượng tử, Viện Vật lý và Điện tử, Viện KHCN Việt Nam
10 Đào Tấn, Ba Đình, Hà Nội, Việt Nam
* Đại Học Vinh*

Tóm tắt: Báo cáo trình bày các kết quả nghiên cứu cả về lý thuyết và thực nghiệm về kỹ thuật laser màu quenching-cavity khi để ý đến môi trường hoạt chất mở rộng đồng nhất. Lần đầu tiên, động học phổ của phát xạ laser màu quenching-cavity và khả năng phát xung laser ngắn với khả năng thay đổi bước sóng của loại laser này đã được chứng tỏ. Hơn nữa, chúng tôi đã nghiên cứu và kết hợp thành công kỹ thuật quenching-cavity (QC) vào các laser màu phát xung picô-giây phản hồi phân bố (DFB) và chọn lọc thời gian phổ (STS) – tương ứng được gọi là laser QC-DFB và QC-STs. Các nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm đã được thực hiện với các loại laser này khi sử dụng những hoạt chất màu khác nhau ở dạng rắn và dung dịch. Những kết quả thu được đã chứng tỏ một số ưu việt trong các kỹ thuật laser hỗn hợp phát xung picô-giây và cho phép phát triển thành công các thiết bị laser phát xung picô-giây, trong miền phổ khả kiến, được bơm với một laser nanô-giây.

Từ khóa: Laser màu xung picô-giây, quenching-cavity, phản hồi phân bố, thời gian phổ

1. Mở đầu

Laser phát xung ngắn, điều chỉnh bước sóng trở thành thiết bị khoa học quan trọng cho nhiều nghiên cứu và ứng dụng ở các lĩnh vực khác nhau. Một số phương pháp phát xung laser ngắn đã được công bố, ví dụ như kỹ thuật laser mode-locking [1-3] chúng khá phức tạp và yêu cầu những điều kiện kỹ thuật đặc biệt và đắt. Trong báo cáo này, phần đầu tiên trình bày các kết quả nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm về laser màu quenching-cavity, tuy nhiên, việc sử dụng hệ phương trình tốc độ mở rộng đa bước sóng đã cho phép chúng tôi quan sát được động học phổ laser của phát xạ laser màu quenching-cavity trong môi trường hoạt chất mở rộng đồng nhất. Các kết quả thu được cho thấy việc phát xung laser đơn và ngắn từ một laser màu quenching-cavity phụ thuộc vào nhiều yếu tố như: thể tích dùng chung của hai buồng cộng hưởng (BCH), mức bơm, nồng độ chất màu và các thông số của BCH chất lượng cao. Đặc biệt, phát xạ xung ngắn từ laser quenching-cavity được phát hiện có một độ rộng phổ đáng kể ($\sim 100 \text{ \AA}^0$), điều này gợi ý cho việc phát xung laser ngắn, băng hẹp, có khả năng thay đổi liên tục bước sóng trên một vùng phổ

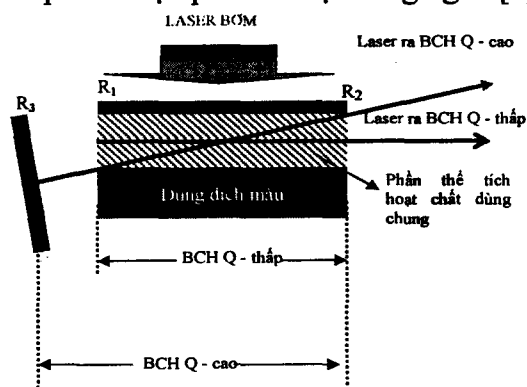
rộng ($\sim 100 \text{ Å}^0$ với mỗi chất màu). Trong phần hai, chúng tôi báo cáo các kết quả nghiên cứu trong việc kết hợp thành công kỹ thuật quenching-cavity (QC) với hai kỹ thuật phát xung laser ngắn (không khóa mode): laser phản hồi phân bố (DFB) và laser chọn lọc thời gian phổ (STS). Các loại laser này được gọi là laser QC-STS và laser QC-DFB. Các nghiên cứu thực nghiệm đã được thực hiện với một số môi trường laser màu rắn và lỏng khác nhau. Các kết quả thu được phù hợp tốt với các nghiên cứu lý thuyết và chứng tỏ một số ưu việt trong các kỹ thuật laser hỗn hợp phát xung picô-giây. Dựa trên các kỹ thuật này, các thiết bị laser phát xung picô-giây trong miền phổ khả kiến với một laser bơm nanô-giây đã được phát triển.

2. Laser màu quenching –cavity với môi trường hoạt chất mở rộng đồng nhất

Kỹ thuật Quenching cavity (QC) - để tạo ra xung laser màu ngắn với một laser bơm nanô-giây, dựa trên nguyên tắc cạnh tranh năng lượng tích trữ trong môi trường hoạt chất. Trong cấu hình của laser màu quenching-cavity được bơm ngang (Hình 1), hai buồng cộng hưởng (BCH) laser khác nhau cùng sử dụng chung một môi trường hoạt chất, do vậy, có sự cạnh tranh năng lượng tích trữ trong môi trường hoạt chất. Laser có BCH Q-cao chiếm hầu hết khả năng khuếch đại (gain) trong môi trường hoạt chất. Nhờ đó, laser có BCH Q-thấp chỉ được phát ra một xung ngắn [5].

Phương pháp phát xung ngắn bằng laser quenching-cavity là đơn giản, tuy nhiên hệ số nén xung (tỷ số giữa độ dài xung bơm và xung laser màu) trong thực tế là thấp (< 10).

Chúng tôi sử dụng hệ phương trình tốc độ - như trình bày ở dưới đây, mở rộng đến các bước sóng laser khác nhau để mô tả hoạt động loại laser này khi hoạt động với một môi trường hoạt chất mở rộng đồng nhất như chất màu [5]:



Hình 1. Cấu hình BCH quenching

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = \left[P + \sum_i I_i(t) \sigma_{ai} \right] N_0 - \left[\sum_i \sigma_{ei} (I_{li} + I_{hi}) + \frac{1}{\tau} \right] N_1 \quad (1)$$

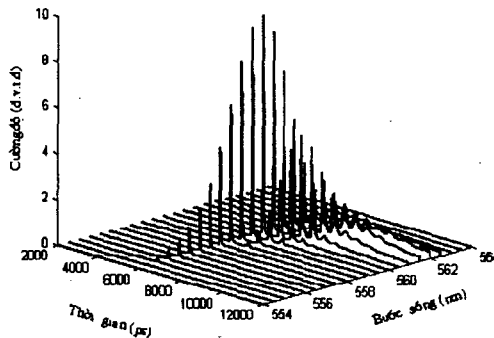
$$\frac{\partial I_{l,i}}{\partial t} = \left[2(\sigma_{e,i} N_1 - \sigma_{a,i} N_0) L_i - \alpha_{l,i} \right] \frac{I_{l,i}}{\tau_l} + A_i N_1 \quad (2)$$

$$\frac{\partial I_{h,i}}{\partial t} = \left[2(\sigma_{e,i} N_1 - \sigma_{a,i} N_0) L_h - \alpha_{h,i} \right] \frac{I_{h,i}}{\tau_h} + A_i N_1 \quad (3)$$

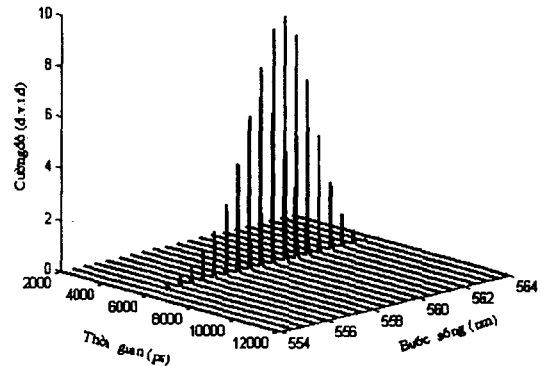
$$N = N_1 + N_0$$

Các tính toán trên mô hình lý thuyết này được áp dụng với chất màu rắn PM 567, nồng độ $1e-3 \text{ mol/l}$. Nguồn bơm là phát xạ hóa ba bậc hai của một laser Nd:YAG tại bước sóng 532 nm. Buồng cộng hưởng laser chất lượng cao (Q-cao) được tạo bởi một gương M_Q hệ số phản xạ 99 % và một mặt bên của chất màu rắn (hoặc cuvet đựng dung dịch màu) có hệ số phản xạ $R_4 \sim 4\%$. Quang trục của BCH

Q-cao tạo một góc lệch rất nhỏ α cỡ 5° , với BCH Q-thấp. Chiều dài hoạt chất là 1 cm, và chiều dài khoảng không khí của BCH Q-cao là 0.5 cm. Kết quả tính toán với chất màu PM 567 cho ta thấy: 1) Động học phổ của phát xạ laser từ laser màu chưa có hiệu ứng quenching-cavity (Hình 2); 2) Việc phát được bức xạ laser màu đơn xung và ngắn khi có hiệu ứng quenching-cavity, đặc biệt, độ rộng phổ của bức xạ này nằm trên dải phổ rộng khoảng $100 \text{ \AA}^0$ (554 nm-564 nm) (Hình 3).



Hình 2: Tiến trình phổ của bức xạ laser màu rắn PM567 khi chưa có hiệu ứng quenching



Hình 3: Tiến trình phổ của xung laser màu ngắn từ BCH Q-thấp khi có hiệu ứng quenching

Bố trí cấu hình thực nghiệm như (Hình 1), với chất màu PM 567 và các thông số cấu hình BCH-QC như trên. Các phổ và xung laser màu phát ra từ BCH-Q thấp được quan sát bằng một hệ thu: photodiode nhanh (200 ps), dao động kí số 1,5 GHz (Tektronix, 20 G mẫu/ giây) và máy đơn sắc (Jobin-Yvon) (Hình 4). Các xung laser màu ngắn do hiệu ứng quenching-cavity có miền phổ rộng $\sim 100 \text{ \AA}^0$. Chúng tôi đã sử dụng một sự chọn lọc phổ đơn giản với một cách từ Littrow để thu được bức xạ laser màu quenching-cavity picô-giây, có độ rộng phổ hẹp (khoảng $5 \text{ \AA}^0$) và điều chỉnh được liên tục bước sóng [5].

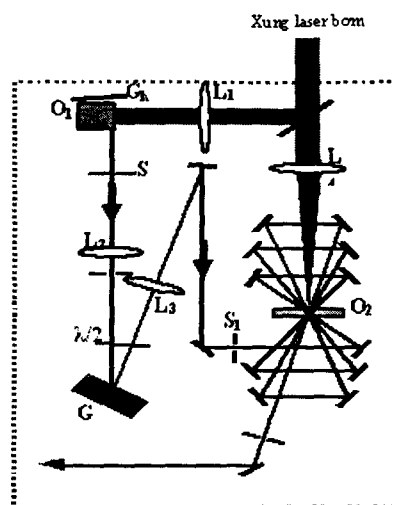
3. Laser màu picô-giây chọn lọc thời gian phổ (STS) sử dụng quenching-cavity

Phương pháp chọn lọc thời gian phổ (STS) dựa trên một tiến trình quét phổ rất nhanh của bức xạ laser màu băng rộng phát từ một buồng cộng hưởng laser ngắn và Q-thấp. Để thu được một xung laser ngắn, ta lọc lựa một băng phổ hẹp ở phía sóng ngắn của phổ laser màu băng rộng [3]. Khả năng phát xung laser STS picô-giây có thể thực hiện với tất cả các chất màu từ , hệ số nén xung của các laser màu STS là rất cao (~ 200). Người ta có thể điều chỉnh bước sóng của xung laser STS (trong một vùng phổ hẹp 1-3 nm) bằng quay cách tử. Tuy nhiên, điều này gây ra nhược điểm là sự tái điều chỉnh quang học cho toàn hệ laser. Để khắc phục điều này, chúng tôi đã nghiên cứu kết hợp kỹ thuật chọn lọc thời gian phổ (STS) với quenching-cavity.

Cấu hình laser màu STS kết hợp với quenching-cavity được đề xuất và thực hiện như chỉ trên hình 4. Trong đó G_h : gương phản xạ cao; O_1, O_2 : Các cuvette màu; L_1 : Thấu kính trụ; L, L_2, L_3 : thấu kính cầu; $\lambda/2$: Tấm nửa sóng; G : Cách tử; S, S_1 : Các khe hẹp.

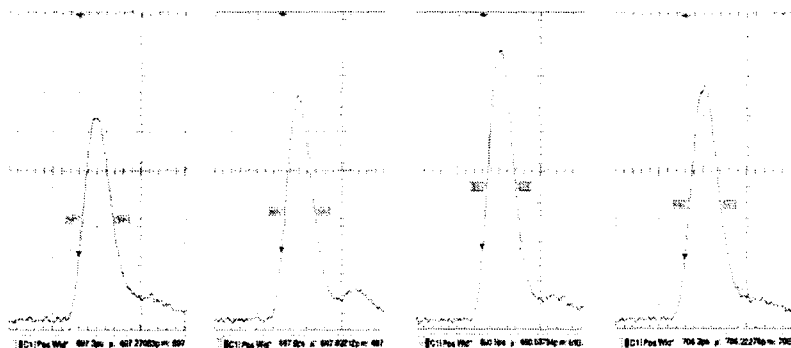
Chùm laser phát ra từ BCH 1-cm, Q thấp là xung laser băng rộng (Hình 3) và bị tác động của hiệu ứng quenching-cavity từ gương G_h .

Hệ phương trình tốc độ được mở rộng để mô tả hoạt động của laser QC-STs tương tự như hệ phương trình laser màu QC (1-3). Kết quả tính toán thu được chỉ rõ các xung laser picô-giây, băng hẹp và có khả năng điều chỉnh liên tục được bước sóng (Hình 3). Các thí nghiệm được tiến hành (Hình 4) với chất màu PM 567 đã phát những xung laser đơn, băng hẹp, độ rộng xung cỡ 80 - 95 ps, điều chỉnh liên tục bước sóng trên dải phổ rộng từ 558 nm đến 570 nm (Hình 5). Các kết quả thu được là phù hợp tốt với kết quả tính toán lý thuyết.

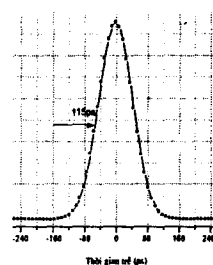


Hình 4: Cấu hình laser QC- STS

Các xung laser ngắn thu được từ laser màu QC-STs vẫn còn có độ rộng phổ lớn $\sim 4 \text{ \AA}^0$ (so với giới hạn biến đổi). Dưới đây, chúng tôi đã đề nghị một cấu hình laser có thể phát các xung ngắn picô-giây với độ rộng phổ tới hạn nhờ kết hợp kỹ thuật quenching-cavity cho laser phản hồi phân bố (DFB).



Hình 5: Các xung laser thu được tại các bước sóng 556 nm, 560 nm, 565 nm và 570 nm trong giới hạn thiết bị đo (dao động ký số Tektronix, 1,5 GHz, tần số 20 G mẫu/giây).



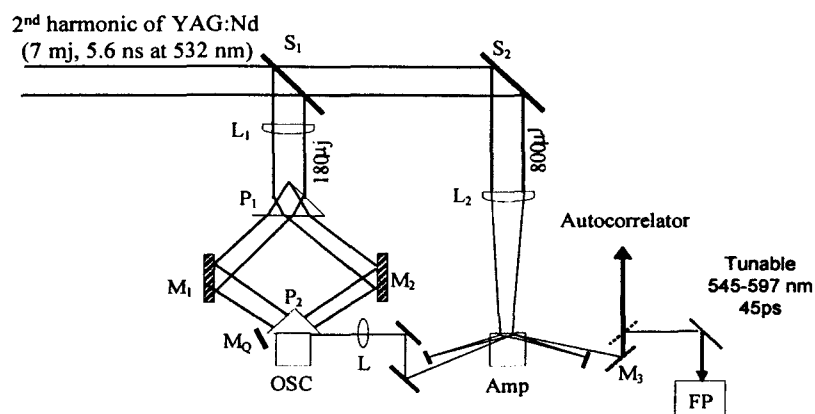
Hình 6: Vết autocorelator tại 560nm. Độ rộng xung laser QC-STs cỡ 78 ps

4. Laser màu phản hồi phân bố (DFB) sử dụng quenching-cavity

Bởi tính chọn lọc bước sóng của phản xạ Bragg, laser DFB có thể phát bức xạ có độ đơn sắc rất cao và điều chỉnh liên tục bước sóng [6], tuy nhiên, laser DFB chỉ có thể phát được các đơn xung ngắn picô-giây khi hoạt động laser sát ngưỡng, do vậy nó có nhược điểm là độ ổn định không cao.

Chúng tôi đã ứng dụng kỹ thuật QC cho laser màu DFB, gọi là laser màu QC-DFB (Hình 6). Trong cấu hình laser QC-DFB, gương M_Q có hệ số phản xạ 99 %, vị trí và góc của gương M_Q làm với quang trục của laser DFB một góc lệch nhỏ và có thể được điều chỉnh cho khảo sát hiệu ứng dập tắt. Với laser QC-DFB ta vừa có thể

thu được xung laser ngắn (nhờ hiệu ứng QC) ngay cả khi laser hoạt động cao trên ngưỡng, vừa đảm bảo độ đơn sắc cao và khả năng điều chỉnh liên tục bước sóng (hiệu ứng DFB). Chúng tôi sử dụng hệ phương trình tốc độ sau đây để mô tả hoạt động của laser QC-DFB [6]:



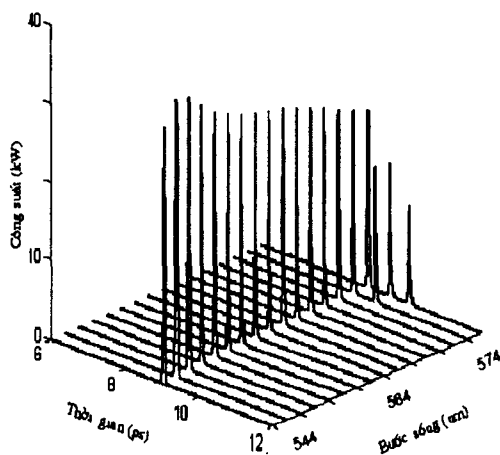
Hình 6: Cấu hình laser màu QC-DFB

$$\frac{dn(t)}{dt} = I_p(t)\sigma_p[N-n(t)] - \frac{\sigma_{ei}c}{\eta}n(t)[q_i(t) + q_{si}(t)] - \frac{n(t)}{\tau} \quad (4)$$

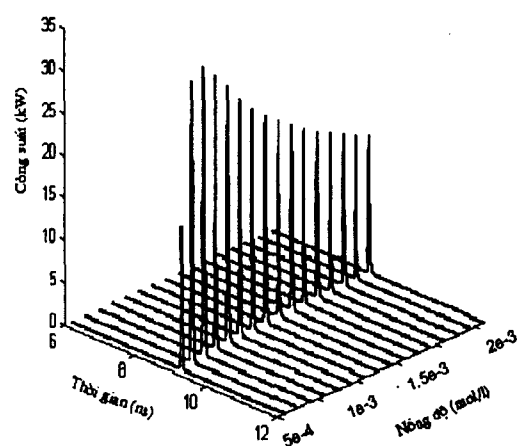
$$\frac{dq_i(t)}{dt} = \frac{(\sigma_{ei} - \sigma_{ai})c}{\eta} n(t) q_i(t) - \frac{q_i(t)}{\tau_c(t)} + \frac{\Omega n(t)}{\tau} \quad (5)$$

$$\frac{\partial q_{si}}{\partial t} = \left\{ 2 \left[\sigma_{ei} n(t) - \sigma_{ai} (N - n(t)) \right] L_h - \alpha_{si} \right\} \frac{q_{si}}{\tau_s} + A_i n(t) \quad (6)$$

Với chất màu PM 567, các kết quả tính đã được công bố chi tiết [6]. Động học phổ laser (Hình 7) và ảnh hưởng của nồng độ chất màu lên quá trình dập tắt (Hình 8).

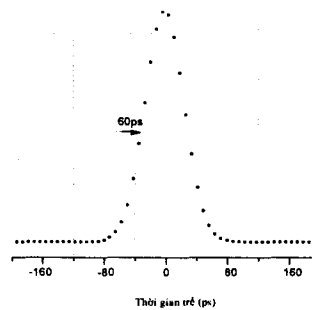


Hình 7. Động học laser màu rắn QC-DFB với PM 567



Hình 8. Xung laser màu rắn QC-DFB với các nồng độ hoạt chất khác nhau.

Hình 7 thể hiện sự dập tắt không hoàn toàn của laser QC-DFB ở vùng bước sóng dài (>570 nm). Điều này do tiết diện phát xạ lớn của chất màu PM567 tại vùng cực đại huỳnh quang. Các nghiên cứu thực nghiệm cho thấy, việc điều chỉnh gương dập tắt phù hợp cho phép ta thu được xung laser độ rộng xung 40 ps (Hình 9). Độ rộng phổ cỡ ~ 0.05 Å của bức xạ laser được đo bởi giao thoa kế Fabry- Perot (17 GHz, $F = 35$) nó hầu như không thay đổi khi điều chỉnh bước sóng [6].



Hình 9: Vết autocorrelator tại 559 nm, độ rộng xung laser QC-DFB cỡ 40 ps

5. Kết luận

Động học phổ laser và khả năng điều chỉnh liên tục bước sóng của laser màu quenching - cavity đã được nghiên cứu khi để ý đến môi trường hoạt chất mở rộng đồng nhất. Các kết quả thu được đã cho phép chúng tôi kết hợp thành công lần đầu tiên hiệu ứng quenching-cavity với các laser phản hồi phân bố (QC-DFB) và laser chọn lọc thời gian phổ (QC-STs) trong việc phát ổn định các xung laser picô-giây với khả năng điều chỉnh liên tục bước sóng. Các thiết bị laser picô-giây dựa trên kỹ thuật hỗn hợp QC-STs và QC-DFB, mà chúng tôi phát triển, đã hoạt động tốt với các chất màu laser hữu cơ khác nhau để cung cấp các xung laser picô-giây trên các bước sóng khác nhau trong vùng phổ nhìn thấy.

Lời cảm ơn

Các tác giả cảm ơn sự hỗ trợ tài chính từ Chương trình Nghiên cứu Khoa học Cơ bản (Vật lý, N.4 033 06), Chương trình Laser của Viện KH & CN Việt Nam.

Tài liệu tham khảo

1. Zeller, J.; Rudolph, W.; Sheik-Bahae, M. *Appl. Phys. B* 66, 295-303 (1998)
2. A. Anesi, E. Picinini, G.C. Reali, C. Spelcia: *Opt. Lett.* 22, 1415 (1997)
3. N. Dai Hung, H. H. Hoa, L. H. Hai, P. Brechignac: *Appl. Phys. B* 69, 467 (1999)
4. Zs, Bor, A. Muller, B. Racz, and F. P. Schafer, *Appl. Phys. B* 27, p.9 (1982)
5. P.H. Minh, D.H. Sơn, N. H. Trung, D Q. Hoa et al. "Advances in Photonics and Applications" (Eds. A. Besellini, G. Denardo et al. NUH Publishers) p.318 (2005)
6. Đoàn Hoài Sơn, Đ. Quang Hoà, Đinh Xuân Khoa, N. Đại Hưng. *Kỷ yếu Hội nghị Vật lý toàn quốc lần thứ VI*, tr. 429-432 (2005).