KHẢO SÁT PHÁT SIÊU LIÊN TỤC TRONG SỢI QUANG TỬ

Nguyễn Văn Hảo[1], Đinh Văn Hoàng[1], Bùi Xuân Kiên[2*]

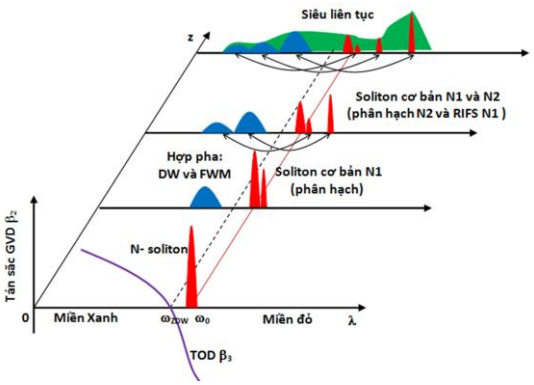
***Tóm tắt**: Sự hình thành siêu liên tục xảy ra khi những xung tới dải hẹp lan truyền qua một môi trường phi tuyến, tạo thành một phổ đầu ra liên tục được mở rộng trong dải tần số vượt quá 100 THz (thường là ánh sáng trắng). Sự phát siêu liên tục có rất nhiều ứng dụng trong các lĩnh vực khác nhau như là quang phổ học, nén xung và thiết kế các nguồn laser femto – giây. Trong công trình này quá trình hình thành siêu liên tục trên cơ sở các hiệu ứng quang phi tuyến như tán sắc vận tốc nhóm, chuyển dịch cảm ứng Raman, tương tác bốn sóng và tách soliton cơ bản được phân tích trên từng chiều dài tương tác cụ thể. Ảnh hưởng của độ rộng xung, năng lượng xung và bước sóng tán sắc không lên phổ siêu liên tục cũng được khảo sát và thảo luận, đối với quá trình phát trong sợi quang tử silica lỗ khí.*

Từ khóa: Sợi quang tử; Tán sắc; Soliton; Siêu liên tục.

1. MỞ ĐẦU

Công nghệ sợi quang tinh thể (PCF) đã phát triển nhanh chóng trong những năm gần đây và thu hút nhiều quan tâm của các nhà nghiên cứu [1-3]. Nói chung, chúng được làm từ một vật liệu như silica với các lỗ khí cực nhỏ chạy dọc theo chiều dài của sợi. Sửa đổi một số thông số như bố trí lỗ khí, đường kính, hình dạng lỗ khí, tham số mạng lỗ khí, chỉ số khúc xạ của vật liệu sợi, cho phép thu được các đặc tính quang học mong muốn như hoạt động chế độ đơn liên tục [4-10] có thể thay đổi được độ tán sắc, độ phi tuyến quang học lớn [11, 12], độ lưỡng chiết cao [13-19], vùng tán sắc phẳng lớn [13],... Quá trình đặc biệt được biết đến như là sự hình thành siêu liên tục xảy ra khi những xung tới dải hẹp lan truyền qua một môi trường phi tuyến, tạo thành một phổ đầu ra liên tục được mở rộng trong dải tần số vượt quá 100 THz . Các nghiên cứu chi tiết về động lực học phi tuyến trong sợi quang đã dẫn đến một số đột phá trong việc mở rộng và cải thiện chất lượng của nguồn sáng siêu liên tục (supercontinium). Vai trò trung tâm của tán sắc vận tốc nhóm (GVD) trong việc kiểm soát các động lực này có nghĩa là sợi tinh thể quang tử silica-không khí lõi rắn, đặc tính tán sắc có thể thay đổi bằng cách thay đổi cấu trúc vi mô, đã trở thành môi trường không chỉ cho phát siêu liên tục mà còn là sợi quang phi tuyến nói chung.

Quá trình phát siêu liên tục có thể tóm lược trong sơ đồ tiến triển theo chiều dài PCF như hình 1. Một xung laser có cường độ đủ lớn, vạch phổ trung tâm lân cận bước sóng tán sắc không của sợi quang tử được vào lõi sợi quang. Do tính phi tuyến cao trong lõi sợi quang, xung laser này sẽ tạo nên hiện tượng tách soliton cơ bản sau một quang đường mà tại đó hiệu ứng tự biến điệu pha và hiệu ứng mở rộng tán sắc cân bằng nhau. Sotiton cơ bản này sẽ chịu tác động của hiệu ứng tán xạ cảm ứng và dịch về phía sóng dài. Đồng thời nhờ hiệu ứng tương tác bốn sóng, các sóng tán sắc xuất hiện và một xung ứng với soliton cơ bản ở phía sóng dài xuất hiện. Quá trình tách soliton cơ bản thứ hai, thứ ba sẽ diễn ra trên chiều dài sợi quang và song hành với chúng là các xung ở phía sóng dài. Qua quang chiều dài sợi quang nhất định, các soliton thứ cấp bậc cao sẽ tiếp tục sinh ra ở phía sóng dài và các xung tương ứng ở phía sóng ngắn. Đồng thời với quá trình mở rộng xung tán sắc, chúng ta sẽ nhận được một phổ rộng và cường độ phổ tương đối phẳng. Tuy nhiên, cho đến nay, bức tranh

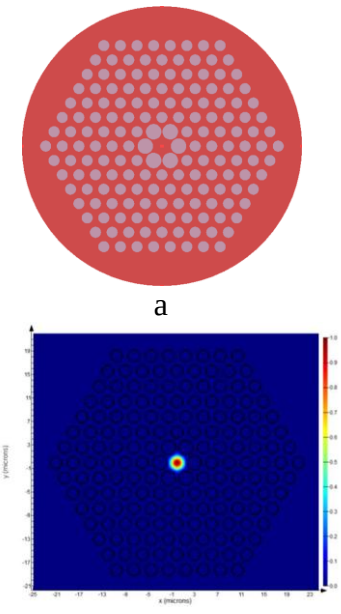


***Hình 1.** Sơ đồ tiến triển phát siêu liên tục trong PCF và các hiệu ứng liên quan.*

mô tả các quá trình phi tuyến trong hình 1 chưa được nghiên cứu và trình bày rõ ràng cụ thể. Đây là vấn đề mà chúng tôi quan tâm, không những với mục đích làm tường minh các quá trình phi tuyến trong sợi quang tử mà còn là khẳng định lại những nhận định về ảnh hưởng chiều dài sợi quang, độ rộng xung bơm, năng lượng xung bơm và bước sóng tán sắc không (vạch phổ trung tâm của bức xạ bơm) lên phổ siêu liên tục. Bài báo này sẽ trình bày một số kết quả khảo sát quá trình phát siêu liên tục trong sợi quang PCF- silica lỗ khí phân bố lục giác.

2. MÔ HÌNH SỢI QUANG TINH THỂ

Mô hình sợi PCF mà chúng tôi đề xuất được biểu diễn trên hình 2. Sợi tinh thể quang tử được làm bằng thủy tinh có chiết suất và hệ số phi tuyến cao có cấu trúc lục giác đều. Trong đó, đường kính của các lỗ thuộc vòng thứ nhất là d và các lỗ còn lại là d', hằng số mạng Λ, các lỗ được lấp đầy bởi không khí. Trong các nghiên cứu sau đây, chúng tôi sẽ xem xét ảnh hưởng của đường kính vòng trong cùng d lên đặc tính tán sắc cũng như phi tuyến của sợi PCF bằng cách thay đổi d trong khoảng (0,8 ÷ 2,8) μm. Với các giá trị cố định d' = 2 μm, Λ = 3 μm. Từ đó, xác định cấu trúc tối ưu đối với quá trình phát siêu liên tục ứng với bước sóng 1570 nm của xung.



a

B

Hình 2. *(a) Mặt cắt của sợi PCF đề xuất; (b) Phân bố hai chiều của mode cơ bản tại bước sóng 1,560 μm.*

Như chúng ta biết, tán sắc tổng bao gồm tán sắc vật liệu và tán sắc ống dẫn sóng được xác định theo biểu thức [19]:

$$D_m(\lambda) = -\frac{\lambda}{c}\frac{d^2 n}{d\lambda^2} \quad (1)$$

$$D(\lambda) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2}\beta_2 = -\frac{\lambda}{c}\frac{d^2\,\mathrm{Re}[n_{\mathrm{eff}}]}{d\lambda^2} \quad (2)$$

Trong đó: $\mathrm{Re}[n_{\mathrm{eff}}]$ là phần thực của chiết suất hiệu dụng, c là vận tốc của ánh sáng và $\beta_2$là tán sắc vận tốc nhóm bậc 2. Tán sắc bậc cao được cho bởi công thức:

$$\beta_m = \left.\frac{d^m \beta}{d\omega^m}\right|_{\omega=\omega_0} \quad (3)$$

Trước hết chúng ta xem xét việc điều khiển các đặc trưng tán sắc của sợi PCF có cấu tạo theo mô hình 2 dựa trên sự thay đổi các thông số của cấu trúc hình học của sợi. Chiết suất hiệu dụng của sợi quang sẽ phụ thuộc vào các thông số cấu trúc xác định theo phương trình Sellmeier [20, 21]:

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3\lambda^2}{\lambda^2 - C_3} \quad (4)$$

Đối với sợi thủy tinh B_1= 0.6961663, B_2=0.4079426, B_3=0.8974794, C_1 = 0.0684043 μm, C_2 = 0.1162414 μm and C_3 = 9.896161 μm, ở đây, $C_j = \frac{2\pi c}{\omega_j}$ được xem là tần số cộng hưởng.

3. PHƯƠNG PHÁP SỐ

Bây giờ, chúng ta sẽ đi khảo sát quá trình phát siêu liên tục trong sợi quang được thiết kế với các tính chất quang học được xác định theo các tham số trên. Lan truyền của xung quang học trong sợi quang có thể được mô tả bởi phương trình Schrodinger [22].

$$\frac{\partial}{\partial z}A(z,T) = -\frac{\alpha(\omega)}{2}A(z,T) + \sum_{n\geq 2}\beta_n \frac{i^{n+1}}{n!}\frac{\partial^n}{\partial t^n}A(z,T) + i\gamma\left(1+\frac{i}{\omega_0}\frac{\partial}{\partial T}\right)\int_{-\infty}^{\infty} R(T')\left|A(z,T-T')\right|^2 dT' \quad (5)$$

ở đây, A(z,t) là hàm bao biến thiên chậm của điện trường trong xung quang học, α là tần số phụ thuộc vào độ mất mát và β_n là tán sắc bậc thứ n tại tần số trung tâm ω_0; R(T) là hàm hồi ứng Raman và được định nghĩa R(T) = (1-f_r)δ(T)+$f_r h_r$(T). Đối với sợi thủy tinh thì f_r =0,18; $h_r = \frac{\tau_1^2+\tau_2^2}{\tau_1^2.\tau_2^2}\exp(\frac{-\tau}{\tau_2})\sin(\frac{-\tau}{\tau_1})$ và $\tau_1 = 12,2\,fs$ và $\tau_2 = 32\,fs.$

Phương trình Schrodinger phi tuyến được giải bằng phương pháp *split-step Fourier*. Chúng ta có thể giải phương trình này bằng cách viết phương trình Schrodinger phi tuyến dưới dạng sau:

$$\frac{\partial A}{\partial Z} = \left(\hat{D}+\hat{N}\right)A \quad (6)$$

trong đó, $\hat{D}$ là toán tử của các số hạng tuyến tính và biểu thị sự mất mát và $\hat{N}$ là toán tử ứng với các hiệu ứng phi tuyến, đóng vai trò xung lan truyền:

$$\hat{D} = -\frac{\alpha}{2} + \sum_{n\geq 2}\beta_n \frac{i^{n+1}}{n!}\frac{\partial^n}{\partial t^n} \quad (7)$$

$$\hat{N} = i\gamma\left(1+\frac{i}{\omega_0}\frac{\partial}{\partial T}\right)\int_{-\infty}^{\infty} R(T')\left|A(z,T-T')\right|^2 dT' \quad (8)$$

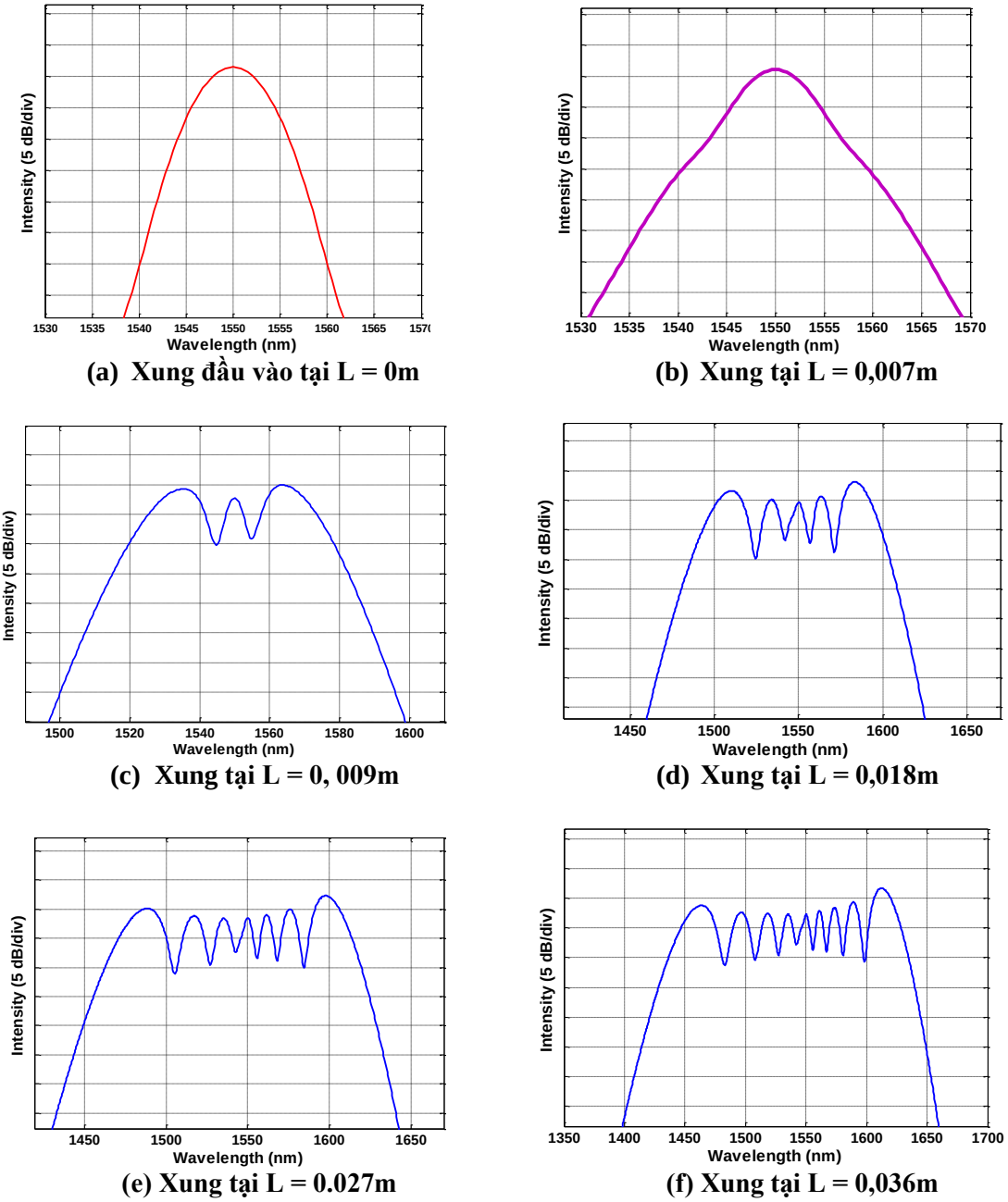
Khi các xung quang học lan truyền trong sợi PCF thì tán sắc và các hiệu ứng phi tuyến tác động đồng thời trong quá trình lan truyền ở sợi quang. Tuy nhiên, phương pháp split step Fourie với giả thiết rằng, khoảng cách bước h là bé, do đó, ta có thể coi hiệu ứng tán sắc và hiệu ứng phi tuyến đóng vai trò độc lập nhau. Điều này làm cho toàn bộ vấn đề rất đơn giản trong khi gặp một lỗi không đáng kể. Trong phương pháp này, sự lan truyền từ z đến z+Δz là được thực hiện trong hai bước, bước đầu tiên chỉ xem xét các hiệu ứng tuyến tính trong khi bước thứ hai là các hiệu ứng phi tuyến. Phần tuyến tính được giải bằng cách sử dụng biến đổi Fourier nhanh (FFT).

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ BÌNH LUẬN

Để khảo sát quá trình phát siêu liên tục trên sợi được đề xuất, với các tham số cấu tạo của sợi PCF như sau: Λ = 0.7 μm, d_1= Λ ,d_a= 6 × Λ , d_b= 0.5 × Λ , d = 0.7 × Λ. Với các giá trị của tham số tán sắc bậc cao khác nhau tại bước sóng 1570nm là β2= -7.1756 × 10-4ps^2/km, β3= -2.8744 10-5ps^3/km, β4= 7.5205 ×10-8ps^4/km, β5= 7.0575 × 10-11ps^5/km [1, 19]. Trong kết quả của việc mô phỏng số, chúng tôi đã sử dụng xung dưới dạng hàm Gauss xung 350 femto giây và năng lượng xung cỡ 1nJ.

Kết quả khảo sát quá trình hình thành xung siêu liên tục trong sợi quang được thể hiện trên hình 3. Một phổ xung ban đầu có độ rộng 20nm (hình 3a) tại đầu vào sợi quang (L=0m) đã được mở rộng phổ do tán sắc vận tốc nhóm tại chiều dài L=0,007m (hình 3b). Song song với hiệu ứng tán sắc vận tốc nhóm là hiệu ứng tư biến điệu pha, do đó, quá trình cạnh tranh giữa hai hiệu ứng đã tạo nên sự tách soliton. Tại chiều dài L=0,009m, soliton cơ bản thứ nhất xuất hiện ở phía sóng dài (hình 3c). Sự xuất hiện soliton cơ bản thứ nhất sẽ kéo theo quá trình tương tác bốn sóng hay hiệu ứng sóng tán sắc làm xuất hiện thành phần phổ về phía sóng ngắn. Tới chiều dài 0,018m, soliton cơ bản thứ hai tách ra, đồng thời, soliton cơ bản thứ nhất dịch về phía sóng dài do hiệu

ứng dịch chuyển Raman cảm ứng (hình 3d). Đồng thời, xuất hiện hai đỉnh phổ ở phía sóng ngắn do hiệu ứng sóng tán sắc. Truyền lan càng xa, các soliton bậc cao sẽ xuất hiện, bậc ba tại L=0,027m (hình 3e), bậc bốn tại L=0,036m (hình 3f). Song song với các soliton về phía sóng dài là các đỉnh phổ ở phía sóng ngắn. Quá trình này tiếp tục cho đến khi chúng ta nhận được một phổ liên tục mở rộng về hai phía của bước sóng đầu vào. Quá trình thay cường độ và độ rộng phổ liên tục được tổng hợp trong hình 4.



(a) Xung đầu vào tại L = 0m

(b) Xung tại L = 0,007m

(c) Xung tại L = 0, 009m

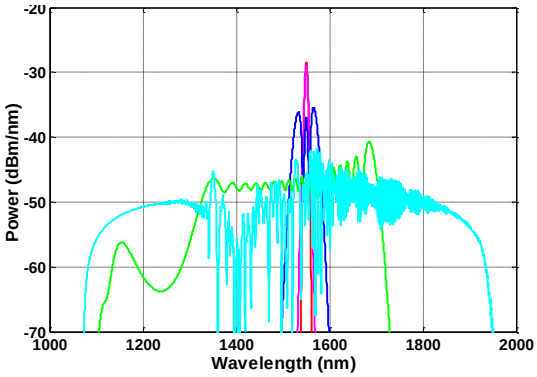
(d) Xung tại L = 0,018m

(e) Xung tại L = 0.027m

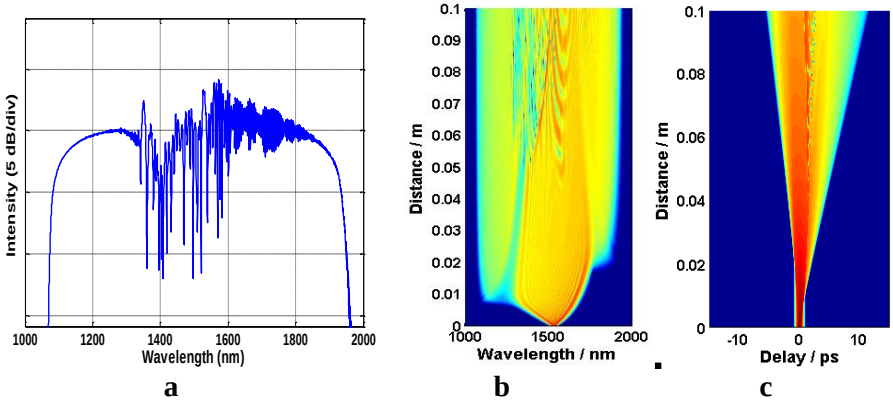
(f) Xung tại L = 0,036m

Hình 3. *Quá trình mở rộng phổ trên đường truyền.*

Từ hình 4, chúng ta thấy khi truyền lan càng xa thì phổ càng mở rộng, đồng thời cường độ phổ giảm và phân bố đều. Khi này, chúng ta nói đã nhận được phổ siêu liên tục, tức là nhận được ánh sáng có cường độ phổ "phẳng liên tục" trong vùng phổ rộng.



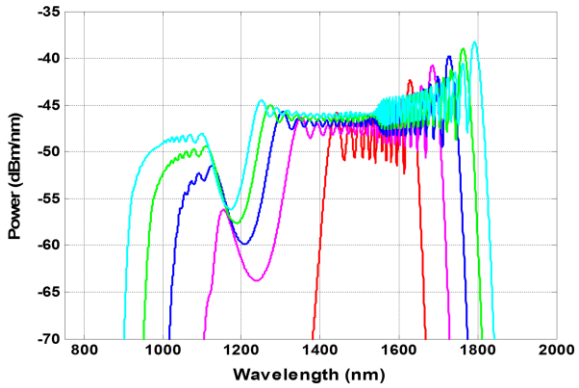
Hình 4. *Phổ siêu liên tục tại các chiều dài khác nhau của sợi: L=0m (đỏ), 0.0001m (cam), 0.001m (xanh nước biển), 0.01m (xanh lá), 0.1m (xanh da trời). T=350fs, Δλ=20nm, E=1nJ.*



Hình 5. *Quá trình thay đổi phổ liên tục và độ trễ.*

Sự mở rộng phổ và phân bố cường độ phổ và độ trễ thời gian lan truyền được mô tả trên hình 5. Để nhận được phổ liên tục tại đầu ra L=0,1m (hình 5a), phổ ánh sáng truyền trong sợi quang tử liên tục được mở rộng, cường độ được phân bố ngày càng đều hơn (mức độ đồng mầu trên hình 5b). Rõ ràng, phổ càng mở rộng thì sự chênh lệch vận tốc nhóm càng lớn, do đó, độ trễ của thời gian truyền lan càng ngày lớn (hình 5c). Độ trễ lên đến hàng chục ps, lớn hơn nhiều so với độ rộng xung đầu vào T=350fs.

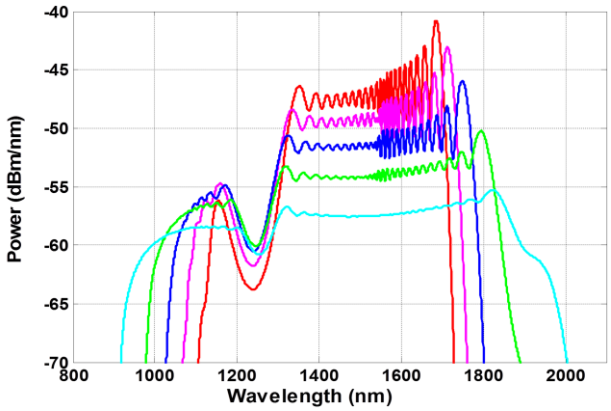
Những kết quả khảo trên được thực hiện cho một mẫu sợi quang tử xác định, do đó, các tham số như chiết suất hiệu dụng, tiết diện mốt hiệu dụng, hệ số phi tuyến không thể thay đổi. Tuy nhiên, sẽ không làm thay đổi bản chất lan truyền, nếu chúng ta thay đổi các tham số ảnh hưởng đến cường độ đầu vào của xung như độ rộng xung và năng lượng xung. Điều này hoàn toàn tương tự với giữ nguyên cường độ xung và thay đổi tham số tương ứng của sợi quang tử. Như chúng ta đã biết khi năng lượng của xung thay đổi thì hiệu ứng phi tuyến trong quá trình lan truyền cũng thay đổi, do vậy, bằng cách thay đổi năng lượng, độ rộng



Hình 6. *Phổ siêu liên tục tại L= 0.01m với năng lượng khác nhau: T=350fs, Δλ=20nm, E=0.5nJ (đỏ), 1nJ (cam), 1.5nJ (xanh nước biển), 2nJ (xanh lá), 2.5nJ (xanh da trời).*

xung, ta có thể khảo sát được đặc tính phi tuyến của sợi quang. Từ hình 6, chúng ta nhận thấy, khi năng lượng xung đầu vào tăng lên thì phổ liên tục sẽ rộng hơn và cường độ cũng tăng lên. Tuy nhiên, sự tăng của cường độ phổ là không đáng kể so với mức độ mở rộng phổ. Điều này cho thấy, năng lượng xung vào tăng sẽ làm tăng cường độ xung là yếu tố ảnh hưởng chính đến quá trình phi tuyến như dịch chuyển Raman cảm ứng và tương tác bốn sóng. Tương tự như vậy, khi giữa nguyên năng lượng mà giảm độ rộng xung (tăng cường độ xung) (hình 7). Rõ ràng, việc tăng năng lượng xung hay giảm độ rộng xung sẽ dẫn đến tăng cường độ xung, và do đó, tăng hiệu ứng phi tuyến yếu như dịch chuyển cảm ứng Raman và tương tác bốn sóng. Việc tăng năng lượng xung hay giảm độ rộng xung tương đương với việc thay thế các sợi quang tử có hệ số phi tuyến cao hơn.

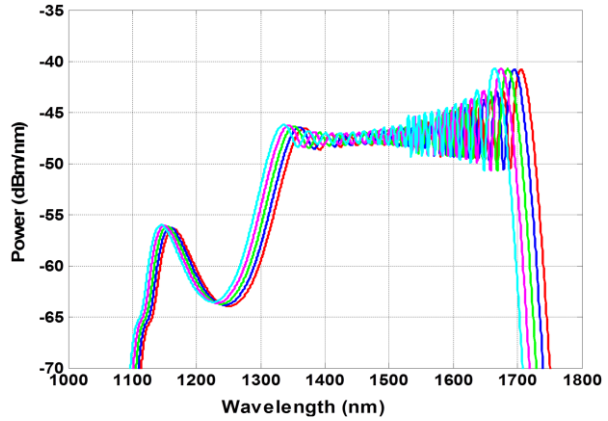
Kết quả khảo sát ảnh hưởng của bước sóng tán sắc không lên quá trình phát liên tục được thể hiện trên hình 8. Có thể thấy rằng, khi dịch chuyển bước sóng tán sắc không về sóng ngắn sẽ kéo theo phổ liên tục dịch về sóng ngắn. Tuy nhiên, không có sự ảnh hưởng nào đến cường độ cũng như độ rộng phổ. Điều này cho chúng ta một kết luận, sự lựa chọn bước sóng trung tâm của xung đầu vào không ảnh hưởng lớn đến phổ liên tục. Hay nói cách khác, xung đầu vào có bước sóng trung tâm trong vùng lân cận bước sóng tán sắc không của sợi quang tử sẽ không làm thay đổi đến phổ liên tục.



Hình 7. *Phổ siêu liên tục tại L= 0.01m thay đổi độ rộng xung: Δλ=20nm, E= 1nJ .T=350fs (đỏ), 300fs (cam), 250fs (Xanh nước biển) 200fs (xanh lá), 150fs (xanh da trời).*

5. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, chúng tôi đã khảo sát quá trình hình thành phổ liên tục trong sợi quang tử silica- lõi khí có cấu trúc xác định. Sự biến đổi phổ do các hiệu ứng khác nhau xảy ra trong chiều dài nhất định của sợi quang tử đã được khảo sát và thảo luận rõ ràng. Ảnh hưởng của năng lượng, độ rộng xung đầu vào lên phổ liên tục cho ta khẳng định, có thể thay thế việc lựa chọn các sợi quang tử có hệ số phi tuyến cao bằng việc chọn xung đầu vào có cường độ cao. Hơn nữa, sự dịch giữa bước sóng trung tâm phổ đầu vào so với bước sóng tán sắc không của sợi quang không làm ảnh hưởng lớn đến độ dịch phổ siêu liên tục. Kết quả này có thể làm rõ hơn cơ chế hình thành phổ siêu liên tục trong sợi quang tử, cũng như là một gợi ý cho việc lựa chọn sợi quang tử phát siêu liên tục, thay vì lựa chọn các sợi quang có thể lựa chọn độ rộng và năng lượng xung thích hợp.



Hình 8. *Phổ siêu liên tục tại L= 0.01m.*

Δλ=20nm, E= 1nJ .T=350fs, λ_{ZDW}=1570 (đỏ), 1560 (Xanh nước biển), 1550 (xanh lá), 1540 (cam), 1530 (xanh da trời).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, and D. M. Atkin, *"All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding"*, Opt. Lett, Vol. 21, 1996, pp. 1547–1549.

[2]. Tomasz Stefaniuka, Hieu Le Van, Jacek Pniewskia, Van Cao Long, Aleksandr Ramaniuka, Karol Grajewskid, Lanh Chu Van, Mirosław Karpierzd, Marek Trippenbacha, and Ryszard Buczyńskia, *"Dispersion engineering in soft glass photonic crystal fibers infiltrated with liquids"*, Proc. SPIE 9816, Optical Fibers and Their Applications 2015, 98160N.

[3]. Khoa Dinh Xuan, Lanh Chu Van, Van Cao Long, Quang Ho Dinh, Luu Van Mai, Marek Trippenbach, Ryszard Buczynski, *"Influence of temperature on dispersion properties of photonic crystal fibers infiltrated with water"*, Optical and Quantum Electronics, v.49, no.2, 2017 Feb, p.1(12) (ISSN: 0306-8919).

[4]. M. Ebnali-Heidari, F. Dehghan, H. Saghaei, F. Koohi-Kamali & M.K. Moravvej-Farshi, *"Dispersion engineering of photonic crystal fibers by means of fluidic infiltration"*, Journal of Modern Optics, 59:16, 2012, 1384-1390.

[5]. Chupao Lin, Ying Wang, Yijian Huang, Changrui Liao, Zhiyong Bai, Maoxiang Hou, Zhengyong Li, and Yiping Wang, *"Liquid modified photonic crystal fiber for simultaneous temperature and strain measurement"*, Photonics Research, Vol. 5, No. 2, 2017, pp. 129-133.

[6]. P. Hosseini, M.K.Mridha, D. Novoa, A. Abdolvand, P. St.J. Russel, *"Universary of coherant Raman gain expression in gas-filled broadband-guiding photonic crystal fibers"*, Phys.Rev. Appl. 7 , 2017, 034021.

[7]. M. N. Thang, T. D. Thanh, *"A train of backward Raman soliton pulses in hollow-core photonic crystal fibres filled with hydrogen gas"*, Optik 127 (21), 2016, 19259-10265.

[8]. T. D. Thanh, H. Q. Quy, N. M. Thang, *"Coherent Raman scattering interaction in hydrogen gas-filled hollow core photonic crystal fibres"*, Optik 161, 2018, 156-160.

[9]. Harikesavan Thenmozhi, MuruganSenthil Mani Rajan, Veluchamy Devika, Dhasarathan Vigneswaran, Natesan Ayyanar, *"D-glucose sensor using photonic crystal fiber"*, Optik, Volume 145, 2017, pp. 489 - 494.

[10]. Naoki Karasawa, *"Dispersion properties of liquid crystal core photonic crystal fibers calculated by a multipole method modified for anisotropic inclusions"*, Optics Communications, Volume 338, 2015, pp. 123-127.

[11]. Naoki Karasawa, *"Dispersion properties of transverse anisotropic liquid crystal core photonic crystal fibers"*, Optics Communications, Volume 364, 2016, pp. 1-8.

[12]. M.M.Sala-Tefalska, S.Ertman, T.R.Woliński, P.Mergo, *"Influence of the core size on light propagation in photonic liquid crystal fibers"*, Opto-Electronics Review, Volume 25, Issue 3, 2017, pp. 198-204.

[13]. Ran Wang. Jianquan Yao, Yinping Miao, Ying Lu. Degang Xu, Nannan Luan, Mayilamu Musideke, Liang cheng Duan and Congjing Hao, *"A Reflective Photonic Crystal Fiber Temperature Sensor Probe Based on Infiltration with Liquid Mixtures"*, *Sensors*, *13*, 2013, pp. 7916-7925. https://doi.org/10.3390/s130607916.

[14]. Yongqin Yu, Xuejin Li, Xueming Hong, Yuanlong Deng, Kuiyan Song, Youfu Geng, Huifeng Wei, and Weijun Tong, *"Some features of the photonic crystal fiber temperature sensor with liquid ethanol filling"*, Optics Express, Vol. 18, Issue 15, 2010, 15383-15388.

[15]. WeiLin, Yinping Miao, Binbin Song, Hao Zhang BoLiun, YangeLiu, DonglinYan, *"Multimodal transmissionpropertyina liquid-filled photonic crystal fiber"*, Optics Communications, Vol.336, 2015, 14-19.

[16]. Quang Ho Dinh, Jacek Pniewski, Hieu Le Van, Aleksandr Ramaniuk, Van Cao Long, Krzysztof Borzycki, Khoa Dinh Xuan, Mariusz Klimczak, and Ryszard Buczyński, *"Optimization of optical properties of photonic crystal fibers infiltrated with carbon tetrachloride for supercontinuum generation with subnanojoule femtosecond pulses"*, Applied Optics, Vol. 57, Issue 14, 2018, 3738-3746.

[17]. Lanh Chu Van, Alicja Anuszkiewicz, AliaksandrRamaniuk, RafalKasztelanic, Khoa Xuan Dinh, M Trippenbach, Ryszard R Buczynski, *"Supercontinuum generation in photonic crystal fibres with core filled with toluene"*, Journal of Optics, Volume 19, Issue 12, 2017, article id. 125604.

[18]. G. Fanjoux, S. Margueron, J-C. Beugnot, and T. Sylvestre, *"Supercontinuum genearation by stimulated Raman-Kerr scattering in a liquid-core optical fiber,"* J. Opt. Soc. Am.B 34 (2017).
[19]. R. Buczyński, "Photonic crystal fibers", Acta Physica Polonica Series, Vol. 106, No. 2, 2004, 141–168.
[20]. K. Moutzouris, M. Papamichael, S. C. Betsis, I. Stavrakas, G. Hloupis, D. Triantis, *"Refractive, dispersive and thermo-optic properties of twelve organic solvents in the visible and near-infrared,"* Appl. Phys. B 116, 617–622 (2014).
[21]. I. H. Malitson, *"Interspecimen Comparison of the Refractive Index of Fused Silica"*, J. Opt. Soc. Am. 55, 1205-1209 (1965).
[22]. G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 5th ed (Academic Press, Oxford, 2013).

ABSTRACT

NUMERICAL OBSERVATION OF SUPERCONTINUUM
IN PHOTONIC CRYSTAL FIBER

Supercontinuum will generate if a short pulse propagates through the nonlinear medium. The spectra will broaden more and more, and at the end of the medium, spectral width is larger than 100 THz (white light). Supercontinuum is used for various applications such as spectroscopy, pulse compress, femtosecond laser source. In this paper, the prosess of supercontinuum generation is based on the nonlinear effects as group velocity dispersion, induced Raman shift, four-wave interastion, and fundamental soliton fission is analysed through distance of photonic crystal fiber. The influence of pulse energy, duration of input pulse and the zero-dispersion wavelength on the shape of supercontinuum spectra is numerically observed and discussed for the case that the input pulse propagates through a photonic crystal of silica with air-holes.

Keywords: Photonic crystal fiber; Dispersion; Soliton; Supercontinuum generation.

Nhận bài ngày 19 tháng 10 năm 2020
Hoàn thiện ngày 17 tháng 11 năm 2020
Chấp nhận đăng ngày 14 tháng 12 năm 2020

Địa chỉ: [1]Đại học Khoa học – Đại học Thái Nguyên;
[2]Trường đại học Điện lực.
[*]Email: kienbx.epu2011@gmail.com.