

**NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA HẰNG SỐ MẠNG LÊN ĐẶC TÍNH
TÁN SẮC VÀ MẤT MÁT GIAM GIỮ TRONG SỢI TINH THỂ QUANG
TỬ LỖI KÉP LÀM TỪ VẬT LIỆU PBG-08**

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF LATTICE CONSTANT ON THE
DISPERSION CHARACTERISTICS AND CONFINEMENT LOSS IN DUAL-CORE
PHOTONIC CRYSTAL FIBER MADE OF PBG-08 MATERIAL

Lê Văn Hiệu^{1*},
Trần Thị Hoàng²,
Lê Hồng Anh²

¹ Khoa Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Hồng Đức;
² Sinh viên lớp K26-DHSP KHTN, Khoa Khoa học Tự nhiên,
Trường Đại học Hồng Đức
*Tác giả liên hệ; Email: levanhieu@hdu.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.70117/hdujs.3030-4628.90.09.2026.1122>

Ngày nộp bài: 27/12/2025; Ngày gửi phản biện: 26/01/2026; Ngày duyệt đăng: 25/09/2026

Từ khóa:

*Quang phi tuyến, sợi
tinh thể quang tử lõi
kép, tán sắc, mất mát
giam giữ.*

TÓM TẮT

Sợi tinh thể quang tử lõi đơn làm từ thủy tinh silica còn tồn tại hạn chế về độ phi tuyến thấp và độ hấp thụ cao trong vùng hồng ngoại. Để khắc phục, sợi tinh thể quang tử lõi kép (DC-PCF) làm từ thủy tinh mềm PBG-08 được nghiên cứu để điều khiển linh hoạt đặc tính tán sắc và mất mát giam giữ. Nghiên cứu này sử dụng phương pháp mô phỏng số thông qua phần mềm Lumerical Mode Solutions để khảo sát ảnh hưởng của hằng số mạng lên các đặc tính quang học của sợi.

Nghiên cứu cho thấy khi hằng số mạng tăng, đường cong tán sắc dịch chuyển về phía bước sóng dài, trở nên phẳng hơn và bước sóng tán sắc không dịch chuyển lên giá trị cao hơn. Sự chênh lệch tán sắc giữa hai lõi giảm dần và trở nên rất nhỏ tại $\Lambda = 4.0 \mu\text{m}$ do sự tương tác giữa hai lõi suy yếu. Đồng thời, mất mát giam giữ giảm mạnh nhờ sự gia tăng độ tương phản chiết suất giữa lõi và vỏ.

Kết quả nghiên cứu khẳng định cấu trúc DC-PCF làm từ vật liệu PBG-08 cung cấp khả năng kiểm soát tán sắc linh hoạt và mất mát giam giữ thấp trên vùng bước sóng rộng, thể hiện tiềm năng ứng dụng cao trong việc tạo phổ siêu liên tục. Các hướng nghiên cứu tiếp theo có thể tập trung tối ưu hóa các tham số cấu trúc khác hoặc thực nghiệm chế tạo thực tế loại sợi này.

Keywords:

Nonlinear optics, dual-core photonic crystal fiber, dispersion, confinement loss.

ABSTRACT

A single-core photonic crystal fiber (SC-PCF) made of silica glass still suffers from limitations such as low nonlinearity and high absorption in the infrared region. To overcome these limitations, a dual-core photonic crystal fiber (DC-PCF) made of soft PBG-08 glass is investigated to provide flexible control over the dispersion characteristics and confinement loss. In this study, numerical simulations using Lumerical Mode Solutions are employed to investigate the influence of the lattice constant on the optical properties of the fiber.

The study shows that as the lattice constant increases, the dispersion curve shifts toward longer wavelengths, becomes flatter, and the zero-dispersion wavelength moves to higher values. The dispersion difference between the two cores decreases and becomes minimal at $\Lambda = 4.0 \mu\text{m}$ due to weakened inter-core interaction. Confinement loss also decreases significantly owing to the enhanced refractive index contrast between the core and cladding.

The findings confirm that the PBG-08-based DC-PCF structure provides flexible dispersion management and low confinement loss over a broad wavelength range, demonstrating high potential for supercontinuum generation. Future research directions could focus on optimizing other structural parameters or experimentally fabricating this fiber type.

1. MỞ ĐẦU

Hiện nay, sợi quang truyền thống được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như viễn thông, y sinh, quang phổ và cảm biến sợi quang [1]-[2]. Trong các sợi quang này, ánh sáng được dẫn truyền dựa trên cơ chế phản xạ toàn phần, đạt được nhờ sự chênh lệch chiết suất giữa vùng lõi và vùng vỏ. Tuy nhiên, sợi quang truyền thống thường được làm từ thủy tinh silica, vẫn tồn tại một số hạn chế như độ phi tuyến thấp và độ hấp thụ cao trong vùng gần hồng ngoại giữa [3]. Vì vậy, sợi loại này chỉ phù hợp để sử dụng trong vùng ánh sáng nhìn thấy và vùng gần hồng ngoại. Nhằm khắc phục những hạn chế này, sợi tinh thể quang tử (Photonic Crystal Fiber - PCF) đã được đề xuất và phát triển mạnh mẽ trong những năm gần đây [4]. Nhờ linh hoạt trong thiết kế và chế tạo, sợi PCF cho phép linh hoạt hơn trong việc điều chỉnh các đặc tính quang học của sợi [5]. Bên cạnh đó, PCF có thể đạt độ lưỡng chiết rất cao [6], hoạt động ở chế độ đơn mode

trong dải bước sóng dài, thu được đặc tính tán sắc cực phẳng [7] hay có thể thu được hệ số phi tuyến cao [8]. Đặc biệt, các tham số cấu trúc như đường kính lỗ khí và hằng số mạng (khoảng cách giữa hai lỗ khí gần nhau nhất) cung cấp các bậc tự do bổ sung trong thiết kế PCF, đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát các đặc tính quang học như hệ số phi tuyến, tán sắc và diện tích mode hiệu dụng của sợi [9].

Tán sắc là một hiện tượng cơ bản trong sợi quang, trong đó các thành phần bước sóng khác nhau của ánh sáng lan truyền với các vận tốc khác nhau, dẫn đến sự giãn rộng xung và suy giảm chất lượng tín hiệu. Hiệu ứng này đặc biệt quan trọng trong các hệ thống thông tin quang tốc độ cao, nơi việc duy trì hình dạng và cường độ tín hiệu trên khoảng cách dài là yêu cầu then chốt [10]. Do đó, việc kiểm soát tán sắc đóng vai trò quan trọng trong việc tối ưu hóa hiệu năng của sợi tinh thể quang tử. Trên thực tế, đặc tính tán sắc của PCF có thể được điều chỉnh thông qua việc lựa chọn vật liệu nhằm dịch chuyển bước sóng tán sắc không (Zero-Dispersion Wavelength - ZDW) cũng như thay đổi hình dạng của đường cong tán sắc [11]. Ngoài ra, tán sắc của PCF còn có thể được điều khiển hiệu quả bằng cách thay đổi các tham số cấu trúc như hằng số mạng và đường kính lỗ khí [12]. Nhờ đó, việc kết hợp giữa vật liệu phù hợp và các tham số cấu trúc cho phép đạt được các đặc tính tán sắc phù hợp với yêu cầu ứng dụng thực tế.

Gần đây, sợi tinh thể quang tử lõi kép (Dual-Core Photonic Crystal Fiber - DC-PCF) đã thu hút nhiều sự quan tâm nghiên cứu nhờ khả năng điều chỉnh tán sắc một cách linh hoạt và hiệu quả [13]-[14]. Sợi tinh thể quang tử loại này cung cấp một cách tiếp cận mới trong việc điều khiển các đặc tính của mode phân cực, vốn có mối liên hệ chặt chẽ với tán sắc. Trong cấu trúc DC-PCF, sự tương tác giữa hai lõi có thể được thiết kế nhằm đạt được các đặc tính tán sắc và phân cực mong muốn. Các yếu tố như khoảng cách giữa hai lõi, cấu trúc mạng và thành phần vật liệu có ảnh hưởng mạnh đến mức độ tương tác này. Hiện tượng ghép mode giữa các lõi cho phép khai thác đồng thời việc điều khiển tán sắc và phân cực, từ đó tạo ra các đặc tính tán sắc mà sợi lõi đơn không thể đạt được, khẳng định tiềm năng ứng dụng của DC-PCF trong các hệ quang tử tiên tiến [15].

Trong công trình này, chúng tôi nghiên cứu ảnh hưởng của hằng số mạng lên đặc tính quang học của sợi tinh thể quang tử lõi kép bằng phương pháp mô phỏng số. Sợi được làm từ thủy tinh mềm PBG-08 với tám vòng lỗ khí được xếp đều nhau theo mạng lục giác đều ở lớp vỏ. Chúng tôi lựa chọn thủy tinh chì-bismuth-gallium-silicat (PBG-08) làm vật liệu bởi vì đặc tính lưu biến tốt và đặc biệt là độ phi tuyến cao của nó (chiết suất phi tuyến $n_2 = 4.3 \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{W}$ [16] lớn hơn khoảng 20 lần so với silica). Đặc tính này cho phép tăng cường các hiệu ứng phi tuyến xảy ra trong quá trình xung lan truyền trong sợi. Các đặc tính quang học của sợi bao gồm tán sắc, mất mát do giam giữ được khảo sát đối với mode cơ bản trong dải bước sóng từ $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ đến $\lambda = 4.0 \mu\text{m}$ bằng phương pháp mô phỏng khi sử dụng phần mềm Lumerical Mode Solutions [17].

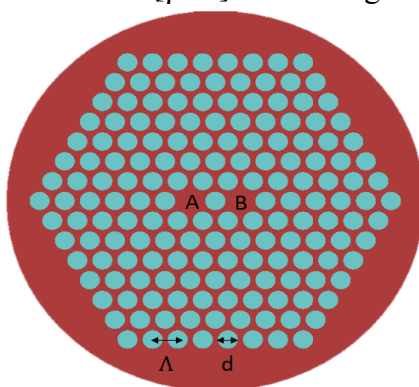
2. THIẾT KẾ SỢI QUANG TINH THỂ HAI LỖI, CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Sợi PCF hai lõi được thiết kế với vùng vỏ gồm tám vòng lỗ khí sắp xếp đều nhau theo mạng lục giác đều, được biểu diễn như Hình 1. Cấu trúc hình học của sợi được đặc trưng bởi hằng số mạng Λ và đường kính lỗ khí d . Hệ số lấp đầy tuyến tính của vùng vỏ được xác định bởi $f = d/\Lambda$. Trong trường hợp này, sợi lõi kép được làm từ thủy tinh mềm PBG-08.

Chiết suất của thủy tinh mềm PBG-08 được xác định từ phương trình Sellmeier [16]:

$$n(\lambda) = \sqrt{A_1 + \frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3\lambda^2}{\lambda^2 - C_3}} \quad (1)$$

Trong đó $A_1 = 1$, $B_1 = 2.211153$, $B_2 = 0.355174$, $B_3 = 1.16141$, $C_1 = 0.01834 [\mu\text{m}^2]$, $C_2 = 0.073012 [\mu\text{m}^2]$, và $C_3 = 127.3884 [\mu\text{m}^2]$ là các hằng số Sellmeier, λ là bước sóng.



Hình 1. Mô hình mặt cắt sợi quang tử lõi kép làm từ vật liệu PBG-08 với tám vòng lỗ khí xếp đều nhau theo hình lục giác đều ở lớp vỏ

Tán sắc của sợi còn được gọi là tán sắc vận tốc nhóm, đóng vai trò then chốt trong việc làm mở rộng phổ của xung đầu ra trong quá trình lan truyền. Nó quyết định mức độ mà các thành phần phổ khác nhau của xung cực ngắn lan truyền trong sợi với các vận tốc pha khác nhau. Tán sắc có thể được tính từ chiết suất hiệu dụng n_{eff} , được xác định bởi [18]:

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

Với c là vận tốc ánh sáng trong chân không. $\text{Re}[n_{eff}]$ là phần thực của chiết suất hiệu dụng của sợi.

Trong quá trình xung lan truyền trong sợi, một trong những yếu tố quan trọng quyết định đến chất lượng xung là suy hao. Thực tế, có nhiều nguyên nhân gây ra sự suy hao trong quá trình xung lan truyền, bao gồm suy hao vật liệu, suy hao uốn cong và suy hao giam giữ. Suy hao vật liệu xuất phát từ sự hấp thụ năng lượng quang bởi bản thân vật liệu lõi và vỏ, và nó cũng phụ thuộc rất nhiều vào khoảng cách lan truyền. Trong khi đó, suy hao uốn cong xuất hiện khi sợi bị cong làm phá vỡ điều kiện phản xạ toàn phần,

khiến một phần năng lượng mode dẫn rò ra ngoài. Loại suy hao này phụ thuộc vào bán kính cong tổng thể của sợi. Đối với sợi có chiều dài ngắn cỡ centimet, suy hao vật liệu và suy hao uốn cong có thể bỏ qua. Vì vậy, suy hao giam giữ L_c đóng vai trò quan trọng, là thước đo khả năng giam giữ ánh sáng trong vùng lõi. Thực tế, việc tăng số vòng lỗ khí giúp tăng cường sự giam giữ ánh sáng trong vùng lõi và dẫn đến suy hao thấp hơn so với các mô hình có ít vòng lỗ khí hơn. Ngoài ra, việc tăng bán kính lỗ khí làm tăng hệ số lấp đầy không khí và do đó làm giảm suy hao giam giữ tương ứng. Suy hao giam giữ có thể được xác định bằng cách sử dụng công thức [18]:

$$L_c = 8.686 k \operatorname{Im}[n_{eff}] \quad (3)$$

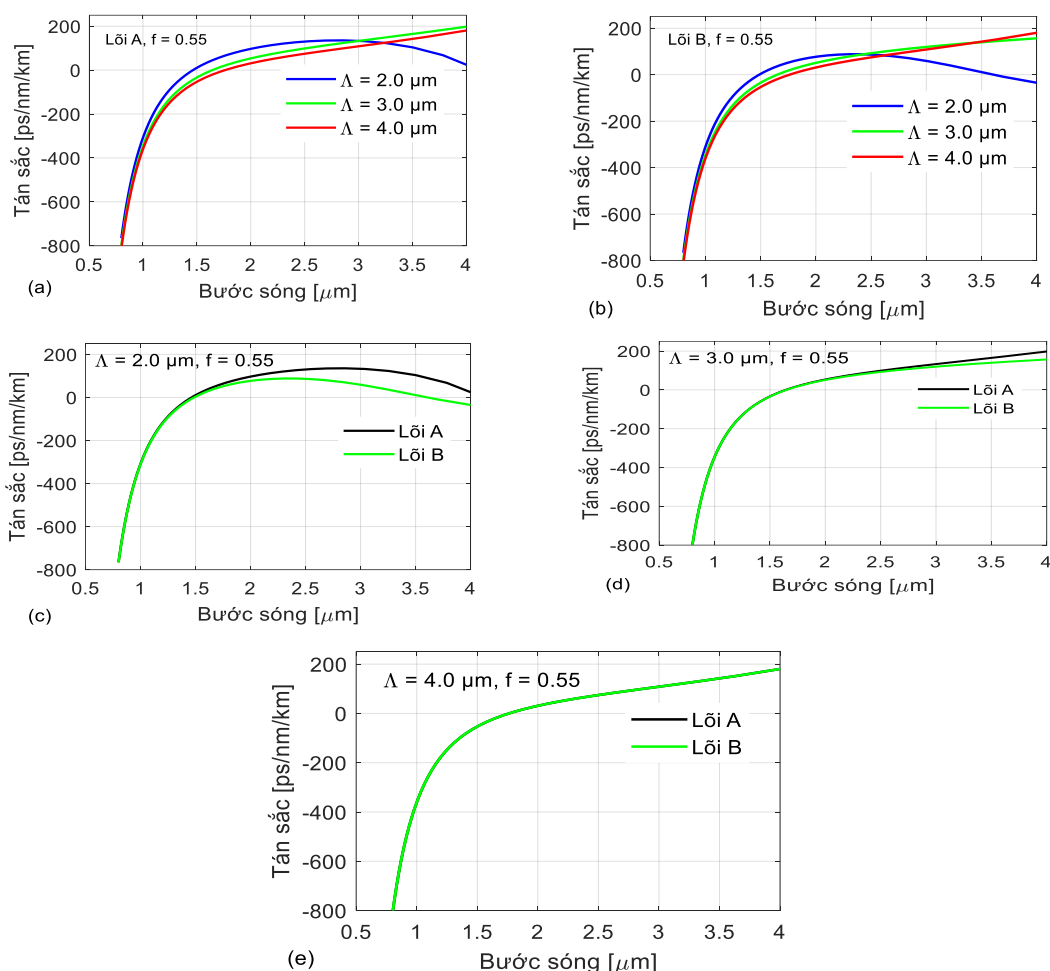
Trong đó, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ là hằng số lan truyền, $\operatorname{Im}[n_{eff}]$ là phần ảo của chiết suất hiệu dụng của vật liệu sợi.

Để nghiên cứu ảnh hưởng của hằng số mạng lên đặc tính tán sắc và mất mát giam giữ của sợi, chúng tôi xem xét hằng số mạng với các giá trị $2.0 \mu\text{m}$, $3.0 \mu\text{m}$ và $4.0 \mu\text{m}$ với hằng số lấp đầy $f = 0.55$. Do ảnh hưởng của số vòng lỗ khí là không đáng kể, nên tham số này không được thảo luận chi tiết trong nghiên cứu này. Trong tất cả các trường hợp mô phỏng, chúng tôi chỉ xem xét chế độ lan truyền cơ bản với bước sóng thay đổi trong vùng từ $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ đến $\lambda = 4.0 \mu\text{m}$.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Ảnh hưởng của hằng số mạng lên đặc tính tán sắc của sợi tinh thể quang tử lõi kép

Ảnh hưởng của hằng số mạng lên độ tán sắc trong sợi tinh thể quang tử lõi kép được thể hiện như Hình 2. Kết quả cho thấy sự gia tăng của hằng số mạng làm cho đường cong tán sắc trở nên phẳng hơn và đồng thời làm giảm giá trị tán sắc dương. Ví dụ, đối với lõi A, tại bước sóng $\lambda = 2.0 \mu\text{m}$, độ tán sắc của sợi có giá trị 77 ps/nm/km khi hằng số mạng $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$. Giá trị này giảm xuống còn 54 ps/nm/km và 31 ps/nm/km tương ứng với hằng số mạng $\Lambda = 3.0 \mu\text{m}$ và $\Lambda = 4.0 \mu\text{m}$. Ngoài ra, bước sóng tán sắc không dịch chuyển về phía bước sóng dài hơn khi hằng số mạng tăng do sự gia tăng của chiết suất hiệu dụng của mode dẫn. Giá trị bước sóng ứng với tán sắc không là $\lambda = 1.48 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.64 \mu\text{m}$ và $\lambda = 1.77 \mu\text{m}$ tương ứng với hằng số mạng $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$, $\Lambda = 3.0 \mu\text{m}$ và $\Lambda = 4.0 \mu\text{m}$. Đồng thời, sự gia tăng của hằng số mạng Λ làm tăng độ tập trung của ánh sáng trong vùng lõi do độ tương phản chiết suất giữa lõi và vỏ tăng lên. Kết quả này cũng thu được tương tự như trong lõi B.

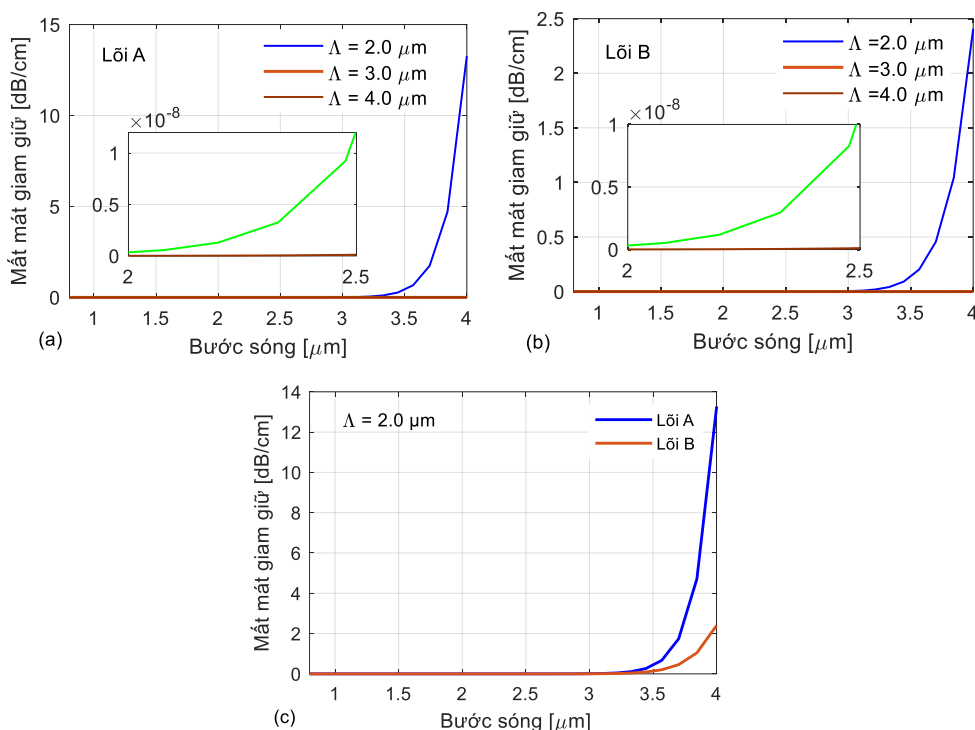


Hình 2. (a-b) Đặc tính tán sắc của chế độ mode cơ bản của sợi tinh thể quang tử lõi kép với các hằng số mạng khác nhau với hệ số lấp đầy $f = 0.55$. (c-e) So sánh đặc tính tán sắc của chế độ mode cơ bản của lõi A và lõi B trong sợi tinh thể quang tử lõi kép với các hằng số mạng khác nhau, hệ số lấp đầy $f = 0.55$

So sánh giữa hai lõi cho thấy khi hằng số mạng $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$, trong dải bước sóng từ $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ đến $\lambda = 1.6 \mu\text{m}$, đường cong tán sắc của hai lõi có dạng gần như tương đồng. Tuy nhiên, ở vùng bước sóng lớn hơn $\lambda = 1.6 \mu\text{m}$, lõi A thể hiện giá trị tán sắc dương cao hơn và đường cong tán sắc kém phẳng hơn so với lõi B như Hình 2(c). Điều này khẳng định trong vùng bước sóng nhỏ ($\lambda < 1.6 \mu\text{m}$), sự tương tác giữa hai lõi là không đáng kể. Tuy nhiên, khi bước sóng tiếp tục tăng, dẫn tới sự tương tác giữa hai lõi lớn hơn, làm tăng độ chênh lệch độ tán sắc. Khi hằng số mạng tăng và có giá trị $\Lambda = 3.0 \mu\text{m}$, sự tương tác giữa hai lõi chỉ xảy ra trong vùng bước sóng dài hơn ($\lambda > 2.6 \mu\text{m}$). Nếu tiếp tục tăng hằng số mạng và có giá trị $\Lambda = 4.0 \mu\text{m}$, lúc này đường cong tán sắc của hai lõi hầu như thay đổi rất nhỏ. Điều này khẳng định khi hằng số mạng lớn (tức là khoảng cách giữa hai lõi tăng), quá trình lan truyền trong các lõi là độc lập và không tương tác với nhau.

3.2 Ảnh hưởng của hằng số mạng lên mất mát giam giữ của sợi tinh thể quang tử lõi kép

Hình 3 mô tả ảnh hưởng của hằng số mạng Λ lên mất mát giam giữ trong sợi tinh thể quang tử lõi kép trong chế độ lan truyền cơ bản. Kết quả chỉ ra rằng, với mỗi hằng số mạng Λ , trong cả hai lõi, mất mát giam giữ của sợi thay đổi theo bước sóng. Khi bước sóng tăng thì mất mát giam giữ cũng tăng. Cả hai lõi của sợi có mất mát giam giữ nhỏ được thu được trong vùng bước sóng từ $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ đến $\lambda = 3.2 \mu\text{m}$. Khi bước sóng lớn hơn $\lambda = 3.2 \mu\text{m}$ thì mất mát giam giữ trong lõi A lớn hơn so với lõi B. Trong trường hợp hằng số mạng $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$ và hệ số lấp đầy $f = 0.55$, tại bước sóng $\lambda = 3.5 \mu\text{m}$, mất mát giam giữ của lõi B có giá trị là 0.15 dB/cm , và lõi A có giá trị là 0.45 dB/cm .



Hình 3. Mất mát giam giữ trong sợi tinh thể lõi kép với các hằng số mạng khác nhau khi hệ số lấp đầy $f = 0.55$

Ngoài ra, các kết quả còn cho thấy mất mát giam giữ trong sợi tinh thể quang tử phụ thuộc rất lớn vào hằng số mạng Λ của sợi. Khi hệ số lấp đầy không đổi, nếu hằng số mạng Λ tăng lên thì mất mát giam giữ của sợi tinh thể quang tử lõi kép giảm rất nhanh. Ví dụ, tại bước sóng $\lambda = 3.5 \mu\text{m}$, trong trường hợp hệ sợi có hằng số mạng $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$, độ mất mát giam giữ của lõi A của sợi có giá trị là 0.45 dB/cm . Khi hằng số mạng tăng lên với giá trị $\Lambda = 3.0 \mu\text{m}$, mất mát giam giữ của lõi A giảm xuống và có giá trị là $1.8 \times 10^{-5} \text{ dB/cm}$. Khi $\Lambda = 4.0 \mu\text{m}$, mất mát giam giữ của lõi A chỉ còn $3 \times 10^{-8} \text{ dB/cm}$. Kết quả này thu được là do khi tăng hằng số mạng sẽ làm tăng sự khác nhau giữa chiết suất

lớp vỏ và lớp lõi. Ngoài ra, khi tăng hằng số mạng, cũng dẫn tới quá trình tương tác giữa hai lõi giảm xuống. Điều này dẫn tới ánh sáng sẽ tập trung và ít bị phân kỳ trong lớp lõi, và do đó, mất mát giam giữ trong sợi giảm.

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, chúng tôi nghiên cứu ảnh hưởng của hằng số mạng Λ lên các đặc tính quang học của sợi tinh thể quang tử lõi kép. Sợi được chế tạo từ thủy tinh mềm PBG-08, gồm tám vòng lỗ không khí được sắp xếp đối xứng theo mạng lục giác đều trong lớp vỏ. Thông qua phương pháp mô phỏng số, ảnh hưởng của hằng số mạng lên đặc tính tán sắc và mất mát giam giữ của sợi đã được phân tích chi tiết.

Kết quả mô phỏng cho thấy khi hằng số mạng Λ tăng, đường cong tán sắc dịch chuyển về phía các bước sóng dài hơn và trở nên phẳng hơn. Đặc biệt, bước sóng tán sắc không tiếp tục dịch chuyển đáng kể về phía bước sóng dài khi Λ tăng, nguyên nhân là do sự gia tăng của chiết suất hiệu dụng của mode lan truyền. So sánh đặc tính tán sắc giữa hai lõi cho thấy, với hằng số mạng nhỏ, sự tương tác giữa hai lõi là rõ rệt, dẫn đến sự chênh lệch đáng kể về tán sắc giữa hai lõi trong vùng bước sóng dài (lớn hơn $\lambda = 1.6 \mu\text{m}$ đối với $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$). Trong vùng này, lõi A thể hiện giá trị tán sắc dương lớn hơn và đường cong tán sắc kém phẳng hơn so với lõi còn lại. Khi hằng số mạng tăng, mức độ chênh lệch tán sắc giữa hai lõi giảm dần. Đặc biệt, tại $\Lambda = 4.0 \mu\text{m}$, độ chênh lệch tán sắc giữa hai lõi trở nên rất nhỏ. Kết quả này là do trong sợi lõi kép ánh sáng lan truyền dưới dạng các supermode (siêu mode) với hằng số truyền và chiết suất hiệu dụng khác nhau. Ngoài ra, trong quá trình lan truyền cũng xảy ra quá trình tương tác giữa các thành phần của supermode (các lõi). Khi tăng hằng số mạng, làm gia tăng khoảng cách giữa hai lõi, khiến ánh sáng lan truyền trong mỗi lõi gần như độc lập và sự tương tác giữa chúng trở nên không đáng kể. Đồng thời, việc tăng hằng số mạng cũng làm giảm mất mát giam giữ trong các lõi của sợi PCF hai lõi, do sự khác biệt chiết suất giữa lớp lõi và lớp vỏ được tăng cường. Ngoài ra, sự gia tăng Λ còn góp phần làm suy giảm tương tác quang học giữa hai lõi.

Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng việc lựa chọn thích hợp hằng số mạng và các tham số cấu trúc cho phép điều chỉnh hiệu quả đặc tính tán sắc của sợi tinh thể quang tử lõi kép trên một dải bước sóng rộng. Hơn nữa, việc sử dụng thủy tinh mềm PBG-08 kết hợp với cấu trúc lỗ không khí cho phép kỳ vọng tổn hao truyền dẫn thấp, đồng thời đơn giản hóa đáng kể quy trình chế tạo sợi.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. V. Smirnov et al., "Optical spectral broadening and supercontinuum generation in telecom applications," *Opt. Fiber Technol.* 12(2):122-147, 2006, DOI:10.1016/j.yofte.2005.07.004.

- [2] T. Udem T et al., “Optical frequency metrology,” *Nature*. 416(6878):233-237, 2002, DOI:10.1038/416233a.
- [3] H. L. Van et al., “Measurement of temperature and concentration influence on the dispersion of fused silica glass photonic crystal fiber infiltrated with water-ethanol mixture,” *Optics Communications*. 407:417-422, 2018, DOI:10.1016/j.optcom.2017.09.059.
- [4] S. Liu et al., “Dispersive waves generation in photonic crystal fibers: The role on supercontinuum generation and rogue waves manipulation,” *Infrared Physics & Technology*. 128:104520, 2023, DOI:10.1016/j.infrared.2022.104520.
- [5] H. L. Van, “Coherence evolution of multi-pulse pumped super-continuum in multicomponent GeSe₂-As₂Se₃-PbSe chalcogenide photonic crystal fiber with four zero dispersion wavelengths,” *J. Opt. Soc. Am. B*. 41(12):2780-2790, 2024, DOI:10.1364/JOSAB.539742.
- [6] X. Li et al., “Design of a pentagonal photonic crystal fiber with high birefringence and large flattened negative dispersion,” *Appl. Opt.* 54(24):7350-7357, 2015, DOI:10.1364/AO.54.007350.
- [7] K. Saitoh et al., “Ultra-flattened chromatic dispersion controllability using a defected-core photonic crystal fiber with low confinement losses,” *Optics Express*. 13(21):8365-8371, 2005, DOI:10.1364/OPEX.13.008365.
- [8] M. Klimczak et al., “Coherent supercontinuum generation in soft glass photonic crystal fibers,” *Photonics Research*. 5(6):710-727, 2017, DOI:10.1364/PRJ.5.000710.
- [9] H. L. Van et al., “Application of ethanol infiltration for ultra-flattened normal dispersion in fused silica photonic crystal fibers,” *Laser Physics*. 28(11):115106, 2018, DOI:10.1088/1555-6611/aad93a
- [10] K. Saitoh et al., “Ultra-flattened chromatic dispersion controllability using a defected-core photonic crystal fiber with low confinement losses,” *Optics Express*. 13(21):8365-8371, 2005, DOI:10.1364/OPEX.13.008365.
- [11] K. Saitoh and M. Koshiba, “Highly nonlinear dispersion-flattened photonic crystal fibers for supercontinuum generation in a telecommunication window,” *Optics Express*. 12(10):2027-2024, 2004, DOI:10.1364/OPEX.12.002027.
- [12] T. H. Tran et al., “Polarization-maintaining highly nonlinear photonic crystal fiber based on Ge₂₀As₂₀Se₁₅Te₄₅ chalcogenide for mid-infrared supercontinuum generation,” *J. Opt.* 27:125503, 2025, DOI:10.1088/2040-8986/ae287b.
- [13] R. Buczynski et al., “Ultra flat supercontinuum generation in silicate dual-core microstructured fiber,” *Laser Phys. Lett.* 6(8):575-581, 2009, DOI:10.1002/lapl.200810143.

- [14] M. T. M. Prince and M. S. Alam, “Comprehensive Analysis of Dual Core Photonic Crystal Fibers for Optimizing Optical Properties Towards Highly Coherent Supercontinuum Generation,” *J. Lightwave Technol.* 41(17):5703-5713, 2023.
- [15] Y. Xu et al., “Ultra-short polarization beam splitter based on rhombic structure dual-core photonic crystal fiber with a central hole filled nematic liquid crystal,” *J. Opt. Soc. Am. B.* 40(1):206-214, 2023, DOI:10.1364/JOSAB.476574.
- [16] H. L. Van et al., “Low pump power coherent supercontinuum generation in heavy metal oxide solid-core photonic crystal fiber infiltrated with carbon tetrachloride covering 930-2500 nm,” *Opt. Express.* 29(24):39586-39601, 2021, DOI :10.1364/OE.443666.
- [17] Lumerical Solutions, Inc. *MODE Solutions*. Accessed: Aug. 24, 2026. [Online]. Available: <http://www.lumerical.com/tcad-products/mode/>
- [18] Agrawal G, “Nonlinear Fiber Optics,” 5th ed. *Academic Press*, 2012.

Tuyên bố về xung đột lợi ích: Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả cảm ơn sự tài trợ của của Trường Đại học Hồng Đức qua đề tài cơ sở với mã số: ĐT-2024-04.