

# NGHIÊN CỨU VÀ THIẾT KẾ MÔ PHÒNG CÁCH TỬ BRAGG SỢI CHO CẢM BIẾN NHIỆT ĐỘ

Trương Cao Dũng

Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông

**Abstract**— Trong bài báo này, chúng tôi trình bày nguyên lý hoạt động về mặt lý thuyết và phương pháp mô phỏng số dựa trên lý thuyết ghép mode của cách tử nhiễu xạ Bragg sợi FBG và nguyên lý cảm biến nhiệt độ. Sau đó, chúng tôi trình bày một đề xuất thiết kế mô phỏng số và đánh giá đặc trưng quang học của một cấu trúc cách tử Bragg sợi cho cảm biến nhiệt độ bằng phương pháp quang học. Cấu trúc được thiết kế bằng công cụ mô phỏng số thương mại hóa và được đánh giá đo lường sử dụng mô phỏng mức hệ thống quang sợi. Kết quả đo lường thông qua mô phỏng cấu trúc cho thấy sợi FBG sử dụng cho cảm biến nhiệt độ có dải rộng  $110^{\circ}\text{C}$  trong khoảng biến động chỉ  $50\ \mu\text{W}$  nên có độ phân giải cao ở mức  $0.45\ \mu\text{W}/^{\circ}\text{C}$  và sai số nhỏ chỉ cỡ  $\pm 1\%$ . Những giá trị tốt như vậy có thể đưa cấu trúc thiết kế tiềm năng lớn cho ứng dụng cảm biến quang học độ nhạy lớn và độ chính xác cao trong cuộc sống.

**Keywords**— Cảm biến quang, nhiệt độ, cách tử Bragg sợi FBG, nhiễu xạ, mô phỏng số, hệ số hiệu dụng.

## I. GIỚI THIỆU

Tất cả chúng ta đều sử dụng cảm biến nhiệt độ trong cuộc sống hàng ngày của mình bởi nhiệt độ là một thông số hóa lý và thông số môi trường rất quan trọng trong cuộc sống. Chúng ta có thể kể ra các cảm biến nhiệt là nhiệt kế để đo nhiệt độ thân thể con người, máy nước nóng gia đình, lò vi sóng, tủ lạnh, bếp nấu ăn hoặc máy điều hòa không khí. Thông thường, cảm biến nhiệt độ có rất nhiều ứng dụng để đo lường và giám sát thông số nhiệt độ lĩnh vực giám sát địa kỹ thuật, y sinh, nông nghiệp, công nghiệp [1]–[4].

Cảm biến nhiệt độ là một công cụ đơn giản để đo mức độ nóng hoặc mát và chuyển nó thành một đơn vị có thể đọc được. Cảm biến điện nhiệt độ là một thiết bị phổ biến, điển hình là cặp nhiệt điện hoặc máy dò nhiệt độ điện trở, cung cấp phép đo nhiệt độ ở dạng có thể đọc được thông qua tín hiệu điện. Nhiệt kế là dạng cơ bản nhất của đồng hồ nhiệt độ dùng để đo mức độ nóng và lạnh. Một cặp nhiệt điện TC (thermocouple) được làm từ hai kim loại khác nhau tạo ra hiệu điện thế tỷ lệ thuận với sự thay đổi của nhiệt độ [5],[6]. Một máy dò nhiệt độ điện trở RTD (Resistance Temperature Detector) là một biến trở thay đổi

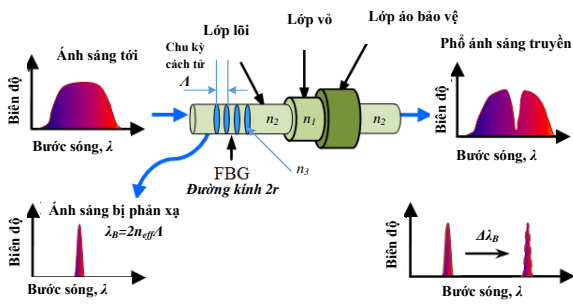
điện trở của nó tỷ lệ thuận với sự thay đổi nhiệt độ một cách chính xác, có thể lặp lại và gần như tuyến tính thường được sử dụng để chế tạo ra đồng hồ điện đo nhiệt độ [7]. Mặc dù các thiết bị điện tử cảm biến nhiệt độ hiện nay được chế tạo hàng loạt bằng các công nghệ như RTD, TC, cảm biến bán dẫn, với giá thành rẻ nhưng vẫn tồn tại nhiều điểm yếu như: độ chính xác tuyến tính thấp, độ phân giải không cao, đáp ứng biến đổi chậm, kích thước khá lớn, dải nhiệt độ đo không cao và đặc biệt là ảnh hưởng mạnh bởi nhiễu điện từ làm giảm cấp chính xác nên trong nhiều ứng dụng đòi hỏi độ chính xác cao và đáp ứng nhanh thì không đạt yêu cầu cần thiết.

Công nghệ cảm biến đã bị thống trị bởi cảm biến điện trong nhiều thập kỷ. Tuy nhiên, có một số tính năng mà các cảm biến thông thường cần cải tiến đáng kể bao gồm độ nhạy với nhiễu điện, tồn nhiễu công đi dây cáp, v.v. Do thời gian hoạt động ngắn này, các nhà nghiên cứu trên toàn thế giới đã phải nỗ lực rất nhiều để cải tiến các cảm biến truyền thống. Do đó, những nỗ lực này đã tạo ra một thế hệ cảm biến mới khác nhau bao gồm cả công nghệ sợi quang được gọi là cảm biến quang sợi FOS (fiber optic sensor). Gần đây, cảm biến nhiệt độ quang học có thể mang lại những lợi thế quan trọng. Chúng có thể hoạt động trong phạm vi nhiệt độ rất rộng, độ chính xác cao, không nhạy cảm với nhiễu điện từ và không cần cấp điện (điều này rất quan trọng đối với một số ứng dụng điện áp cao, nơi cần sử dụng vật liệu cách điện). Đặc biệt, các cảm biến nhiệt độ bằng phương pháp quang học hoạt động tốc độ băng thông cao và độ phân giải cao là những ưu điểm cực lớn. Có một số công nghệ của cảm biến nhiệt quang dựa trên các cấu trúc như: buồng vi gương cộng hưởng Fabry-Perot [1], [8], [9], các cảm biến quang sợi dựa trên tán xạ Rayleigh [10],[11], tán xạ Brillouin [12]–[14] hay tán xạ Raman [15]–[18] có độ phân giải cao nhưng đắt tiền vì cần các cơ chế cấu tạo và sử dụng các hiệu ứng tán xạ phức tạp. Đặc biệt thông dụng phổ biến hiện nay giá thành rẻ là các cảm biến nhiệt độ bằng quang học dựa trên sợi cách tử nhiễu xạ Bragg [19]–[22]. Cảm biến cách tử Bragg sợi FBG (fiber Bragg grating) đã được sử dụng để phát hiện biến dạng, nhiệt độ, cảm biến độ ẩm, cảm biến tham số vật lý v.v. với một số ưu điểm như miễn nhiễm với nhiễu điện từ, độ phân giải cao, cho ví dụ, cách tử sợi quang FBG thường cảm biến nhiệt độ có bước sóng Bragg gần  $1550\ \text{nm}$  có độ nhạy nhiệt độ cao, đặc biệt khả năng dễ dàng chế

Tác giả liên hệ: Trương Cao Dũng,

Email: [dungtc@ptit.edu.vn](mailto:dungtc@ptit.edu.vn)

Đến tòa soạn: 8/2022, chỉnh sửa: 9/2022, chấp nhận đăng: 10/2022.



Hình1. Cấu trúc của một cách tử Bragg sợi.

tạo với giá thành thấp bởi tương thích công nghệ chế tạo sợi quang viễn thông [23].

Bài báo này trình bày nghiên cứu hoạt động của sợi FBG và đề xuất ứng dụng sợi cách tử nhiễu xạ Bragg cho thiết kế và mô phỏng số cảm biến nhiệt độ với độ nhạy cao thông qua công cụ thiết kế cấu trúc quang tử GratingMode và công cụ mô phỏng hệ thống quang học OptSim của phần mềm thương mại hóa Rsoft.

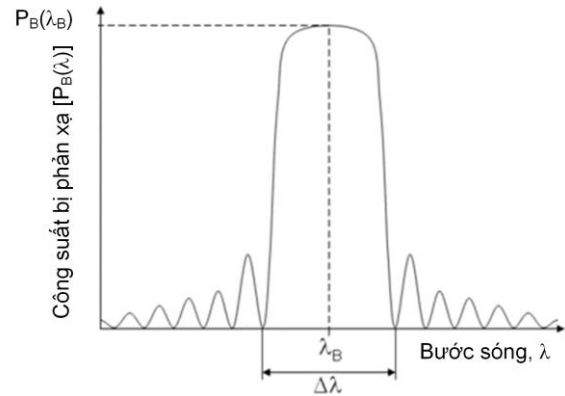
## II. NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG CẢM BIẾN CỦA CÁCH TỬ BRAGG SỢI VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Một cách tử Bragg sợi FBG bao gồm một cấu trúc điều chế có tính chu kỳ tuần hoàn của hệ số chiết suất dọc theo lõi của sợi trong một sợi quang đơn mode. Kiểu này bao gồm các cách tử sợi là các cấu trúc cách đều nhau và đồng nhất trong một vùng sợi, nơi mà pha (phase) phía trước là vuông góc với trục chính truyền sóng của sợi với các mặt phẳng cách tử có chu kỳ không đổi, là được xem như khối xây dựng cơ bản cho hầu hết các cấu trúc cách tử Bragg. Hình1 mô tả cấu trúc cơ bản của một cách tử nhiễu xạ Bragg sợi với các tín hiệu phản xạ và truyền đi khi đầu vào là một nguồn phổ băng rộng BBS (broadband source). Như được thể hiện trên Hình1, cách tử Bragg sợi FBG có đường kính lõi 2r cỡ 5÷8 μm và có lớp vỏ (cladding) được chế tạo từ vật liệu silica (SiO<sub>2</sub>) với chiết suất n<sub>1</sub> ≈ 1.45 ở bước sóng 1550 nm, chiết suất lõi n<sub>2</sub> cũng từ silica nhưng pha tạp thêm các nguyên tố như Ge để làm tăng chiết suất với mức chênh lệch chiết suất lõi (core) vỏ cỡ từ 0.01÷0.05 để hỗ trợ hoạt động đơn mode. Cách tử ở lõi có chiết suất n<sub>3</sub> lớn hơn n<sub>2</sub> và có chênh lệch Δn = n<sub>3</sub> - n<sub>2</sub> cỡ 0.0003÷0.002. Lớp áo bảo vệ được chế tạo từ plastic hay lớp phủ polymer. Cấu trúc lõi được chế tạo thành các cách tử với chu kỳ tuần hoàn với N cách tử (N thường lớn cỡ hơn 1000) và có khoảng bề dày cách tử Λ ≈ 0.5 μm. Một nguồn phổ rộng được truyền vào đầu vào sẽ có một phổ hẹp bước sóng phản xạ với bước sóng cộng hưởng được gọi là bước sóng Bragg l<sub>B</sub>, phổ truyền đi về phía đầu ra là phổ thiếu hụt đi phần phổ với bước sóng l<sub>B</sub>.

Theo luật Bragg, cách tử sẽ chỉ phản xạ một bước sóng riêng được gọi là bước sóng Bragg và được xác định bởi hệ thức:

$$l_B = 2n_{eff} \Lambda \quad (1)$$

Ở đây, Λ là chu kỳ cách tử và n<sub>eff</sub> là hệ số chiết suất hiệu dụng của lõi sợi quang. Khoảng cách bước sóng giữa cực



Hình2. Kết quả phân tích sự phụ thuộc hàm của công suất phản xạ theo bước sóng và đỉnh tại bước sóng cộng hưởng Bragg.

tiểu đầu tiên (xem Hình2), hoặc băng thông Δλ là (trong giới hạn cách tử mạnh) được đưa ra bởi

$$\Delta\lambda = \left[ \frac{2\Delta n h}{p} \right] l_B \quad (2)$$

ở đây Δn = n<sub>3</sub> - n<sub>2</sub> là sự chênh lệch trong hệ số điều biến chiết suất lõi của cách tử và h là tỉ lệ chia của công suất trong lõi. Do đó, độ sâu của điều chế chỉ số xác định phạm vi của bước sóng phản xạ Δλ. Đối với cách tử điển hình là từ 10<sup>-3</sup> đến 10<sup>-4</sup>. Lưu ý rằng cách tử phản xạ ánh sáng trên một phần nhỏ nanomet vì l<sub>B</sub> thường khoảng 1 μm. Do đó, tính chất này cũng làm cho cách tử rất hữu ích trong các hệ thống viễn thông cáp quang bên cạnh ứng dụng cảm biến.

Lưu ý rằng giá trị gần đúng này không áp dụng cho các cách tử yếu trong đó chiều dài cách tử, L<sub>g</sub>, là không lớn khi được so sánh với l<sub>B</sub> / Δn.

Phản xạ đỉnh P<sub>B</sub>(l<sub>B</sub>) được xấp xỉ bởi công thức [24]:

$$P_B(l) \approx \tanh^2 \left[ \frac{Nh(V)\Delta n}{n_2} \right] \quad (3)$$

Ở đây, N là số cách tử. Phương trình đầy đủ cho công suất bị phản xạ P<sub>B</sub>(l<sub>B</sub>) được viết chính xác như sau:

$$P_B(l) = \frac{\sinh^2 \left[ h(V)\Delta n \sqrt{1-\Gamma^2} \frac{N\Lambda}{l} \right]}{\cosh^2 \left[ h(V)\Delta n \sqrt{1-\Gamma^2} \frac{N\Lambda}{l} \right] - \Gamma^2} \quad (4)$$

Với

$$\Gamma(l) = \frac{1}{h(V)\Delta n} \left[ \frac{l}{l_B} - 1 \right] \quad (5)$$

Hình2 thể hiện sự phụ thuộc hàm theo bước sóng của công suất bị phản xạ thu được từ biểu thức (4). Có thể thấy rằng, công suất phản xạ cực đại tại bước sóng cộng hưởng Bragg l<sub>B</sub>. Búp sóng chính có độ rộng băng thông Δλ được xác định từ hệ thức (2). Với các cấu trúc hình học có bán kính

khác nhau, hệ số chiết suất lõi có chênh lệch  $\Delta n = n_3 - n_2$  khác nhau, chu kỳ cách tử  $\Lambda$  khác nhau hay số lượng cách tử  $N$  khác nhau thì bước sóng Bragg và băng thông cũng khác nhau. Tương tự, tùy thuộc vào cấu trúc mà hệ số phân chia tỷ số công suất  $h$ , vốn đặc trưng cho hiệu suất truyền đạt tương đối so với mức cực đại mà công suất phản xạ đỉnh có thể đạt cực đại là bao nhiêu (phần trăm). Ví dụ, trong ứng dụng thông tin quang, mong muốn phản xạ bước sóng  $l_B$  tốt thì hàm  $P_B(l_B)$  đạt càng gần 100% thì chất lượng thông tin càng tốt.

Một tham số cũng quan trọng đặc trưng cho phổ búp sóng chính chính được gọi là FWHM (full width at half maxum) của phổ búp sóng chính. FWHM có định nghĩa là hiệu giữa hai giá trị của biên độ lập mà tại đó biên độ phụ thuộc bằng một nửa giá trị lớn nhất của nó. Xét trong biểu diễn phổ thì FWHM là khoảng băng tần giữa hai điểm mà biên độ đỉnh giảm đi một nửa (hay chúng ta quen gọi là băng thông 3-dB vì  $10 \cdot \log_{10}(0.5) \approx 3$ ).

Sự cộng hưởng của cách tử Bragg phụ thuộc vào tính chu kỳ của cách tử, sai khác chiết suất lõi-vỏ của sợi, bán kính hình học lõi  $r$  và chiết suất hiệu dụng của lõi sợi và có thể bị thay đổi liên quan đến các hiệu ứng tác động ngoài bởi sự thay đổi của sự căng và nhiệt độ. Sự dịch của bước sóng cộng hưởng Bragg có thể được xác định bởi biểu thức như sau [25]:

$$\Delta l_B = 2n_{eff} \Lambda \left( \left\{ 1 - \left( \frac{n_{eff}^2}{2} \right) \left[ P_{12} - n (P_{11} + P_{12}) \right] \right\} \Delta e_T + \left\{ a + \left( \frac{dn_{eff}}{dT} \right) \right\} \Delta T \right) \quad (6)$$

Trong đó,  $\Delta e_T$  và  $\Delta T$  tương ứng là sự thay đổi sức căng và nhiệt độ,  $P_{ij}$  ( $i,j=1,2$ ) là các hệ số Pockel của tensor quang,  $n$  là hệ số Poisson,  $\alpha$  là hệ số khai triển nhiệt của vật liệu sợi,  $\frac{dn_{eff}}{dT} = z$  là gia số của biến đổi chiết suất hiệu dụng của lõi sợi (với phần chiết suất vật liệu xây dựng nên cách tử) theo nhiệt độ chính là hệ số nhiệt-quang (thermo-optic coefficient) của vật liệu silica pha tạp một số oxit để tạo ra lõi của FBG, được lấy bằng giá trị xấp xỉ với các hệ số tương ứng của vật liệu silica thuần (SiO<sub>2</sub>). Với vật liệu silica thuần nhất, ở bước sóng công tác là 1550 nm thì các hệ số triển khai nhiệt và hệ số nhiệt-quang đã được các kết quả đo lường thực nghiệm xác định lần lượt là  $\alpha = 0.55 \times 10^{-6} / ^\circ C$  và  $z = 8.6 \times 10^{-6} / ^\circ C$ .

Với lưu ý rằng:  $l_B = 2n_{eff} \Lambda$ , nói chung, biểu thức từ (6) có thể viết gọn ở dạng [26]:

$$\frac{\Delta l_B}{l_B} = (z + a) \Delta T + (1 - P_e) \Delta e_T \quad (7)$$

Ở đây,  $P_e \approx 0.22$  là hệ số quang đàn hồi (elasto-optical coefficient) đối với vật liệu oxit SiO<sub>2</sub> ở bước sóng 1550 nm. Như vậy, sợi FBG có thể cảm biến đồng thời được sự thay

đổi nhiệt độ và cảm biến được sức căng (sức căng này phụ thuộc theo nhiệt độ và cả áp lực của hệ số quang đàn hồi) của lõi sợi. Tùy thực tế áp dụng, nếu không xét đến cảm biến về mặt sức căng thì thành phần này sẽ không xuất hiện ( $\Delta e_T = 0$ ) và do vậy, chúng ta thu được biểu thức cảm biến theo quy luật tuyến tính [26]:

$$\frac{\Delta l_B}{l_B} = (z + a) \Delta T \quad (8)$$

Bằng cách đo lường khoảng dịch bước sóng cộng hưởng Bragg theo sự biến đổi tương đối của bước sóng Bragg chúng ta sẽ xác định được khoảng thay đổi nhiệt độ một cách tỷ lệ tuyến tính. Chúng ta có thể thấy cách tử Bragg sợi có thể cảm biến nhiệt độ và sức căng một cách đồng thời. Cũng vậy, khi chuyển đổi tác động ngoài một tham số vật lý mà chuyển hóa thành sức căng hay nhiệt độ thì sợi FBG có thể cảm biến được nhiều yếu tố hóa lý khác.

Chúng ta đã trình bày nguyên lý hoạt động của cấu trúc cách tử Bragg sợi và khả năng cảm biến nhiệt độ đã được trình bày theo phân tích lý thuyết về mặt toán học. Tuy nhiên, giống như trường hợp truyền sóng trong sợi quang, cách thức hành xử của tín hiệu quang truyền qua sợi tuân theo những đặc trưng của phương trình vi phân bậc hai phi tuyến là phương trình Schrodinger phi tuyến NLS (Nonlinear Schrodinger equation). Ở đó, chiết suất hiệu dụng  $n_{eff}$  chỉ có thể có nghiệm xấp xỉ thông qua lời giải bằng phương pháp số. Cũng vậy, các đặc tính truyền dẫn hay phản xạ theo mô hình quan hệ trường điện từ hay mạch điện từ thì phải được nghiên cứu bằng ma trận tán xạ. Về phương diện các phương pháp số của toán lý, phương pháp mô phỏng vi phân hữu hạn miền thời gian FDTD là phương pháp chính xác và đầy đủ nhất để nghiên cứu về quang sóng và trường điện từ. Tuy nhiên, phương pháp này cần tiêu tốn thời gian và tài nguyên mô phỏng lớn nên có thể khi giám sát các yếu tố trường điện từ trong cấu trúc lớn sẽ vượt quá khả năng của hệ thống với sự giới hạn về tài nguyên tính toán và năng lực vi xử lý. Để nghiên cứu cách tử, ngoài việc sử dụng phương pháp FDTD hay phương pháp truyền chùm BPM để tìm chiết suất hiệu dụng, một phương pháp dựa trên lý thuyết ghép mode CMT (coupled-mode theory) và ma trận truyền dẫn được sử dụng để nghiên cứu đặc tính của các biến đổi Fourier giữa miền thời gian và miền tần số để xác định các đặc trưng bước sóng cộng hưởng Bragg  $l_B$ , phổ  $\Delta l$  của cấu trúc FBG, hay dịch tần số cộng hưởng Bragg  $\Delta l_B$ . Theo lý thuyết ghép mode CMT, quan hệ tương tác giữa các thành phần biên độ trường ngang tự do cho một ống dẫn sóng được xáo trộn và cảm ứng điện từ theo quan hệ của cặp phương trình vi phân như sau [27],[28]:

$$\frac{da_p(z)}{dz} = i \sum_{m=1}^M \left\{ \left( k_{p,m}^t + k_{p,m}^z \right) a_m(z) e^{i(b_m - b_p)z} + \left( k_{p,m}^t - k_{p,m}^z \right) b_m(z) e^{-i(b_m + b_p)z} \right\} \quad (9)$$

$$\frac{db_p(z)}{dz} = i \sum_{m=1}^M \left\{ \left( k_{p,m}^t - k_{p,m}^z \right) a_m(z) e^{i(b_m + b_p)z} + \left( k_{p,m}^t + k_{p,m}^z \right) b_m(z) e^{-i(b_m - b_p)z} \right\} \quad (10)$$

Trong đó,  $\beta$  là hằng số lan truyền,  $a$  và  $b$  tương ứng biểu diễn cho biên độ của mode tiền và lùi theo phương truyền sóng  $z$ ,  $p$  và  $m$  là chỉ số thứ tự (hay bậc) của mode thứ  $p$  và

thứ  $m$  tương tác với nhau. Hệ phương trình vi phân trên ngẫu ý trường phụ thuộc thời gian theo hàm điều hòa của hằng số truyền sóng và phương truyền sóng. Hệ số ghép mode  $k_{p,m}$  của các mode bậc  $p$  và  $m$  được xác định như sau:

$$k_{p,m}^t = \frac{\omega \epsilon_0}{2} \frac{\iint_S [n_3^2(x, y, z) - n_2^2(x, y)] \mathbf{e}_{t,p}(x, y) \cdot \mathbf{e}_{t,m}(x, y) dS}{\iint_S \mathbf{e}_{t,p}(x, y) \cdot \mathbf{h}_{t,p}(x, y) dS} \quad (11)$$

$$k_{p,m}^z = \frac{\omega \epsilon_0}{2} * \frac{\iint_S [n_3^2(x, y, z) - n_2^2(x, y)] \frac{n_2^2(x, y)}{n_3^2(x, y, z)} \mathbf{e}_{z,p}(x, y) \cdot \mathbf{e}_{z,m}(x, y) dS}{\iint_S \mathbf{e}_{t,p}(x, y) \cdot \mathbf{h}_{t,p}(x, y) dS} \quad (12)$$

Trong đó, ta ký hiệu  $\mathbf{e}$  và  $\mathbf{h}$  là cường độ của trường điện và trường từ (là các đại lượng véc tơ) và  $S$  là diện tích không gian phân bố trường điện từ,  $n_3(x, y, z)$  là hàm chiết suất theo trục tọa độ của cách tử,  $n_2(x, y)$  là hàm chiết suất ở mặt phẳng cắt vuông góc trục  $z$  (tức mặt phẳng  $Oxy$ ) của chiết suất lõi.

Phương trình vi phân thông thường kết hợp (11) và (12) có thể được biểu diễn dưới dạng ma trận như sau:

$$\frac{d}{dz} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = i\mathbf{C} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \quad (13)$$

Ở đây,  $\mathbf{C}$  là ma trận của các hệ số ghép. Giả thiết  $\mathbf{C}$  là độc lập với  $z$  trong một khoảng  $(z_1, z_2)$ . Ma trận  $\mathbf{C}$  có một dạng xếp chồng giá trị riêng:

$$\mathbf{C} = \mathbf{U}^{-1} \mathbf{D} \mathbf{U} \quad (14)$$

Ở đây,  $\mathbf{D}$  là ma trận đường chéo thực và  $\mathbf{U}$  là chuyển vị của ma trận véc tơ riêng (eigenvector matrix). Do đó, chúng ta thu được ma trận truyền đạt  $\mathbf{T}$  của một cấu trúc mạch 4 cực trong khoảng  $(z_1, z_2)$  bởi quan hệ:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \end{pmatrix}_{z_1} = \mathbf{T} \begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \end{pmatrix}_{z_2} \quad (15)$$

Phần phản xạ được định nghĩa là [29]:

$$r(z, d) = \frac{v(z, d)}{u(z, d)} \quad (16)$$

Trong đó  $d$  đặc trưng cho phân tỷ lệ với sự khác biệt giữa sóng tới và tần số Bragg và hồ sơ cách tử phức  $q(z)$  mã hóa tất cả thông tin về quá trình thay đổi về bờ viền và cạnh trong các vòng nhiễu xạ trên bề mặt quang học (apodization) và sự dịch chirp của cách tử.

Từ đây, chúng ta tìm ra quan hệ của hệ số ghép mode như sau [29]:

$$k(z) = \frac{2i}{p} \int_{-\infty}^{\infty} r^*(z, d) dd \quad (17)$$

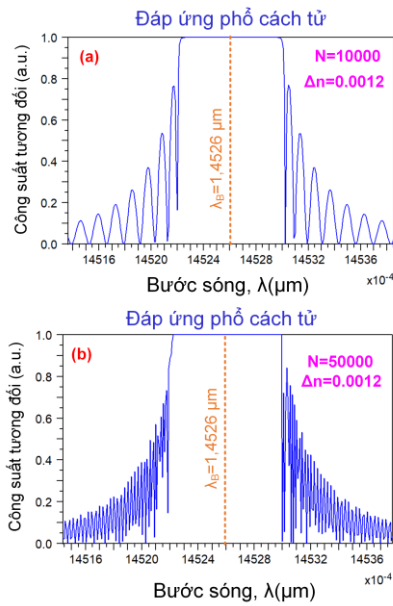
Như vậy, cấu trúc cách tử có thể được xây dựng lại và đặc tính hóa từng bước một bằng phương pháp số.

Để chế tạo FBG, sợi cảm quang được tiếp xúc với ánh sáng cực tím cường độ cao, tạo thành sự thay đổi tuần hoàn chiết suất của lõi sợi. Kiểu này, hay cách tử, phản ánh một bước sóng ánh sáng cụ thể phụ thuộc vào chu kỳ,  $\Lambda$ , của cấu hình chiết suất được hình thành trong lõi. Trong hoạt động cơ bản nhất của nó như một cảm biến, chỉ số điều chế bên trong FBG bị thay đổi bởi một kích thích bên ngoài, dẫn đến sự thay đổi bước sóng được FBG phản ánh. Bằng cách đo sự thay đổi của bước sóng phản xạ, kích thích bên ngoài có thể được xác định.

Cách tử sợi quang Bragg được tạo ra bằng cách "ghi" hoặc "ghi" sự biến thiên có hệ thống (định kỳ hoặc không theo chu kỳ) của chiết suất vào lõi của một loại sợi quang đặc biệt bằng cách sử dụng nguồn cực tím (UV) cường độ cao như tia UV. Hai quy trình chính được sử dụng: can thiệp và che giấu. Phương pháp thích hợp hơn tùy thuộc vào loại lưới được sản xuất. Mặc dù sợi quang polyme bắt đầu được quan tâm nghiên cứu vào những năm 2000, nhưng sợi silica pha tạp germani được sử dụng phổ biến nhất (để tăng chiết suất), làm cho nó trở nên nhạy quang trong tia cực tím (UV) [30]. Sợi pha tạp germani có tính cảm quang, có nghĩa là chiết suất của lõi thay đổi khi tiếp xúc với tia UV. Mức độ thay đổi phụ thuộc vào cường độ và thời gian phơi sáng cũng như độ nhạy sáng của sợi quang. Cụ thể, cảm quang có nghĩa là tiếp xúc với tia UV sẽ gây ra sự thay đổi chiết suất vĩnh viễn. Để viết một sợi có hệ số phản xạ cao, cách tử Bragg trực tiếp trong sợi, mức độ pha tạp với germani cần phải cao. Tuy nhiên, các sợi tiêu chuẩn có thể được sử dụng nếu độ nhạy sáng được tăng cường bằng cách ngâm trước sợi trong hydro. Trong một số trường hợp, độ nhạy quang được tạo ra hoặc tăng thêm khi nạp hydro.

Phương pháp phổ biến nhất để chế tạo FBG là cho sợi cảm quang tiếp xúc với mẫu rìa giao thoa trong ánh sáng UV. Điều này thường được thực hiện bằng cách hướng đầu ra của máy cắt laser qua mặt nạ pha (về cơ bản là cách tử nhiễu xạ). Mặt nạ pha làm nhiễu xạ ánh sáng laser tới thành nhiều thứ tự khác nhau, chúng chồng lên nhau và giao thoa quang học với nhau trong vùng lân cận mặt nạ. Sự giao thoa này tạo ra các vùng đứng yên, xen kẽ của cường độ laser cao và thấp có khoảng cách bằng khoảng thời gian mặt nạ pha hoặc một nửa giá trị này, tùy thuộc vào hình dạng phơi sáng chính xác [31].

Trong khi quá trình này là đơn giản về mặt khái niệm, trong thế giới thực có một số rào cản đáng kể cần vượt qua khi sản xuất FBG. Đầu tiên là chi phí, cụ thể là của máy kích thích laser (laser excimer) cũng như mặt nạ pha. Tiếp theo là giữ và định vị tất cả các thành phần sao cho cách tử có khoảng cách chính xác và các đặc điểm biến đổi chỉ số có thể được tạo ra ở chính xác vị trí chính xác dọc theo sợi. Và, nếu mục tiêu là tạo ra một số lượng lớn FBG với mỗi loại có đặc tính nhất quán, hệ thống phải có một số cách để thích ứng với các biến thể hàng loạt trong chỉ số của sợi quang được sử dụng.

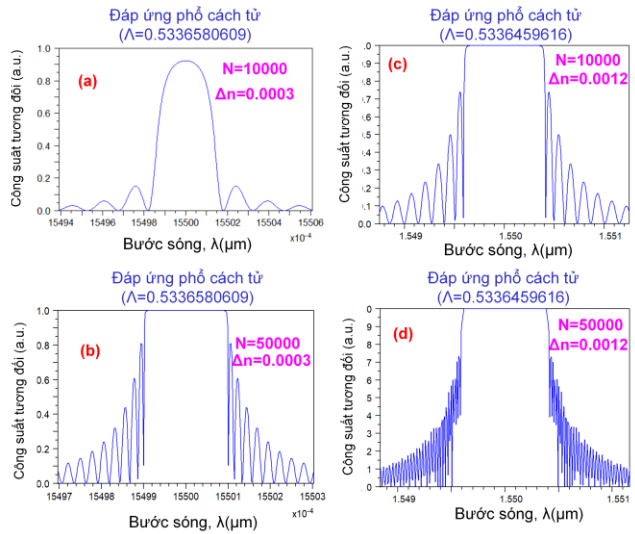


Hình 3. Mô phỏng đặc tính phổ phân xạ và bước sóng cộng hưởng Bragg tại chu kỳ  $\Lambda = 0.5 \mu\text{m}$  và  $\Delta n = 0.0012$  cho (a)  $N = 10000$  và (b)  $N = 50000$ .

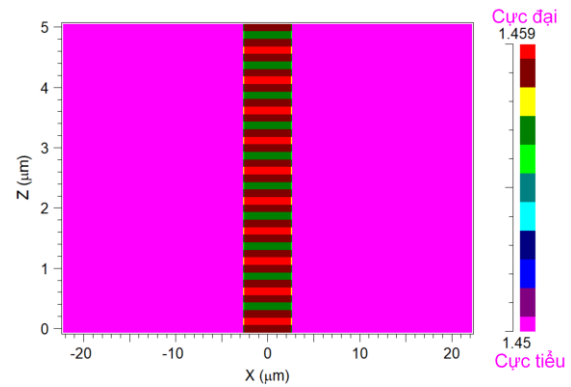
### III. THIẾT KẾ MÔ PHÒNG SỢI FBG CHO CẢM BIẾN NHIỆT ĐỘ VÀ ĐÁNH GIÁ ĐẶC TÍNH QUANG

Trong phần này, một thiết kế mô phỏng số cho một cảm biến nhiệt độ dựa trên cấu trúc FBG được đề xuất và mô phỏng số. Đầu tiên, chúng ta xét sợi FBG với đường kính lõi là  $d=2r= 5,25 \mu\text{m}$  và có lớp vỏ dày  $125 \mu\text{m}$  theo tiêu chuẩn tương thích sợi quang viễn thông. Lớp vỏ được chế tạo từ thủy tinh silic ôxít  $\text{SiO}_2$  (silica) có chiết suất là 1,45. Sợi được chế tạo theo kiểu hồ sơ chênh lệch lõi-vỏ theo kiểu chiết suất bậc. Lớp lõi được chế tạo bằng silica pha tạp silicon tetrachloride ( $\text{SiCl}_4$ ) và phosphorous oxychloride ( $\text{POCl}_3$ ) đạt được chiết suất  $n_2=1,458$  (tức là  $\Delta n_{c-c} = n_2 - n_1 = 0,008$ ). Để tạo cách tử theo chu kỳ, kỹ thuật “ghi” bằng tia UV để điều chế chiết suất lõi theo chu kỳ cách tử  $\Lambda = 0,005 \mu\text{m}$  với các vạch cách tử hình chữ nhật (grating profile) và với sự nhảy chiết suất  $\Delta n = n_3 - n_2$  nằm trong dải khoảng 0.0003 đến 0.0012 bằng cách pha tạp germanium tetrachloride ( $\text{GeCl}_4$ ). Lưu ý rằng các giá trị chiết suất nhắc đến là xét ở bước sóng 1550 nm.

Sử dụng công cụ mô phỏng GratingMode của phần mềm thương mại hóa Rsoft, chúng ta khảo sát đặc tính phổ và bước sóng cộng hưởng của nhiều xạ Bragg của cấu trúc đã đề xuất. Các tham số mô phỏng được thiết lập độ rộng chu kỳ cách tử (grating pitch)  $\Lambda = 0.5 \mu\text{m}$ , độ sâu điều chế cách tử  $\Delta n = n_3 - n_2 = 0.0012$ . Hình 3(a) cho thấy khi số lượng cách tử  $N = 10000$  thì bước sóng cộng hưởng để có phản xạ Bragg là  $l_B = 1.45261 \mu\text{m}$  ( $n_{\text{eff}} = l_B / 2\Lambda = 1.45261$ ), hiệu suất tại bước sóng Bragg là  $P_B(l_B) = 100\%$  và độ rộng FWHM là  $0.000815861 \mu\text{m}$ . Khi  $N = 50000$  và với cùng điều kiện, bước sóng cộng hưởng để có phản xạ Bragg vẫn giữ nguyên là  $l_B = 1.45261 \mu\text{m}$  ( $n_{\text{eff}} = l_B / 2\Lambda = 1.45261$ ), hiệu suất tại bước sóng Bragg vẫn là  $P_B(l_B) = 100\%$  nhưng



Hình 4. Mô phỏng đặc tính phổ phân xạ và định bước sóng Bragg ở 1550 nm tìm ra chu kỳ  $\Lambda$  của cách tử tại (a)  $\Delta n = 0.0003$ ,  $N = 10000$ ; (b)  $\Delta n = 0.0003$ ,  $N = 50000$ ; (c)  $\Delta n = 0.0012$ ,  $N = 10000$ ; (d)  $\Delta n = 0.0012$ ,  $N = 50000$ .

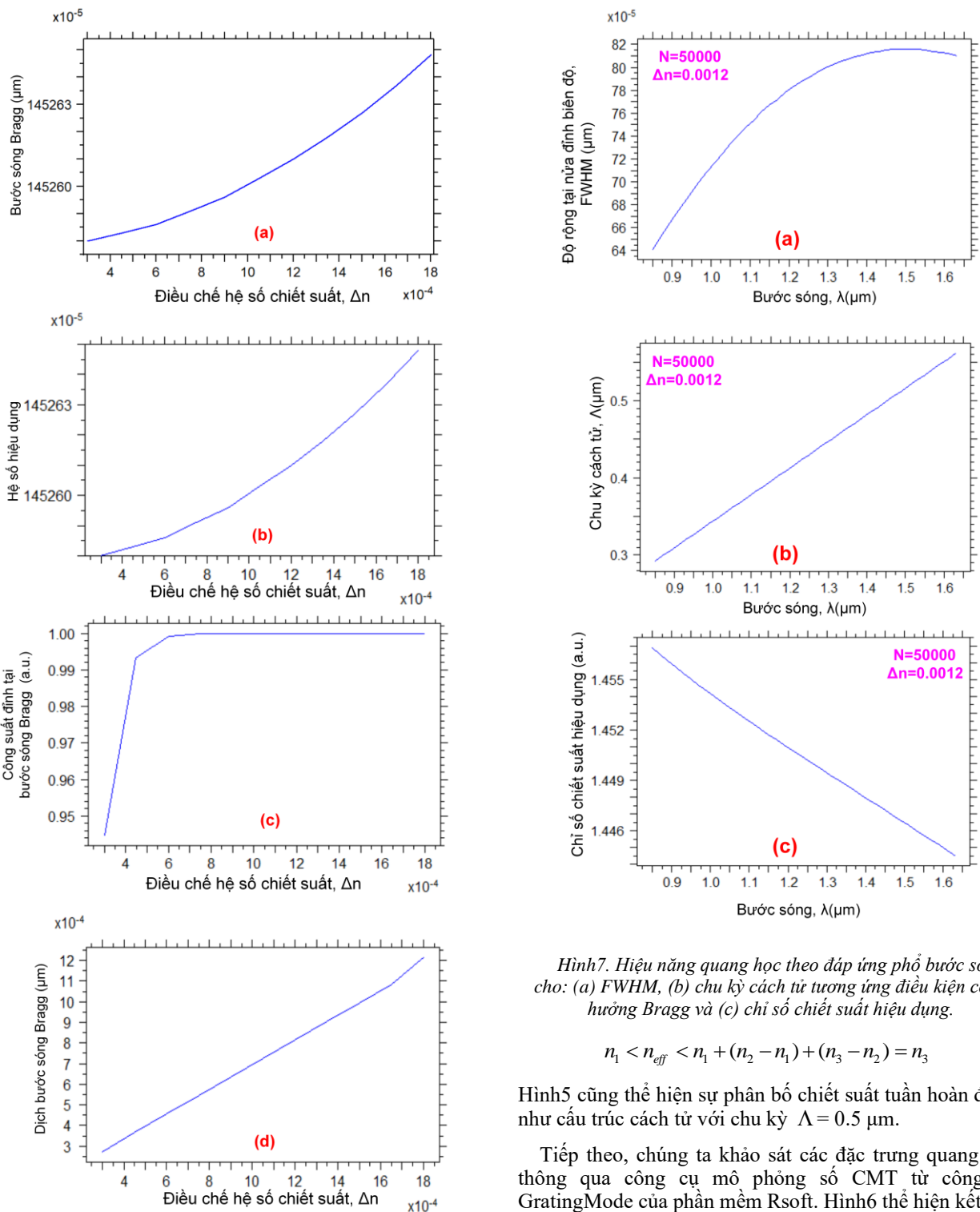


Hình 5. Mô phỏng số cho hồ sơ phân bố chiết suất hiệu dụng  $n_{\text{eff}}$  trong cấu trúc FBG.

độ rộng FWHM nhỏ hẹp hơn một chút là  $0.000806861 \mu\text{m}$  do xuất hiện nhiều búp sóng phụ rất hẹp hơn đồn sát cần búp chính.

Giả sử chúng ta muốn tìm ra cách tử với chu kỳ  $\Lambda$  mà tại đó, bước sóng cộng hưởng để có phản xạ Bragg là 1550 nm thì mô phỏng số tìm ra giá trị hiệu dụng và tương ứng là chu kỳ cách tử. Hình 4 thể hiện các kết quả mô phỏng khi bước sóng phân xạ mong muốn  $l_B = 1.55 \mu\text{m}$  với vài giá trị của các biến số khảo sát. Cụ thể, với  $\Delta n = n_3 - n_2 = 0.003$ , Hình 4(a) cho thấy khi  $N = 10000$  thì phổ bước sóng Bragg rộng và chỉ đạt hiệu suất đỉnh khoảng 0.9 (90%), khi tăng  $N$  lên 50000 thì hiệu suất tại đỉnh đạt giá trị 100% và FWHM hẹp hơn như thể hiện ở Hình 4(b). Tương tự, khi tăng  $\Delta n = 0.0012$ , với  $N = 10000$ , Hình 4(c) cho thấy hiệu suất tại bước sóng Bragg đạt 100%, độ rộng phổ FWHM hẹp hơn so với  $\Delta n = 0.0003$  nhưng rộng hơn một chút so với trường hợp của Hình 4(d) là được xét với  $N = 50000$ . Như vậy có thể thấy rằng, càng tăng số lượng cách tử và độ sâu điều chế chiết suất, phổ Bragg càng hẹp và hiệu suất đỉnh càng cao.





Hình7. Hiệu năng quang học theo đáp ứng phổ bước sóng cho: (a) FWHM, (b) chu kỳ cách tử tương ứng điều kiện cộng hưởng Bragg và (c) chỉ số chiết suất hiệu dụng.

$$n_1 < n_{eff} < n_1 + (n_2 - n_1) + (n_3 - n_2) = n_3 \quad (18)$$

Hình5 cũng thể hiện sự phân bố chiết suất tuần hoàn đúng như cấu trúc cách tử với chu kỳ  $\Lambda = 0.5 \mu\text{m}$ .

Tiếp theo, chúng ta khảo sát các đặc trưng quang học thông qua công cụ mô phỏng số CMT từ công cụ GratingMode của phần mềm Rsoft. Hình6 thể hiện kết quả mô phỏng của các đặc trưng quang học của cấu trúc FBG đã đề xuất với  $N=50000$  và  $\Lambda = 0.5 \mu\text{m}$  theo sự biến đổi hàm của điều chế chiết suất lõi cách tử ( $\Delta n$ ) từ 0.0003 đến 0.0018. Hình6(a) thể hiện bước sóng cộng hưởng Bragg tăng theo sự tăng với độ dốc bậc cao hơn bậc tuyến tính của điều chế chiết suất lõi và tương ứng ở Hình6(b) cho thấy hệ số (chiết suất) hiệu dụng của cách tử cũng tăng tỷ lệ thuận như sự tăng bước sóng Bragg (vì  $\Lambda$  không đổi). Hệ số độ sâu điều chế chiết suất tăng cũng sẽ làm tăng hiệu suất công suất hay biên độ tại đỉnh bước sóng cộng hưởng Bragg. Hình6(c) cho thấy độ dốc khi  $\Delta n$  tăng từ 0.0003 đến 0.0006 thì hiệu suất từ khoảng 94% tăng đến giá trị bão hòa

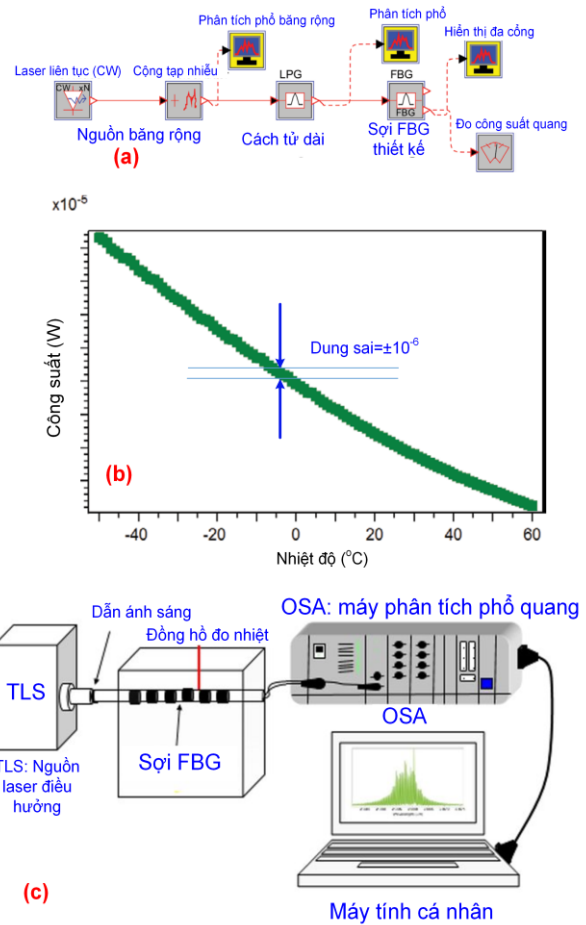
Hình6. Hiệu năng quang học theo sự phụ thuộc hàm vào độ sâu điều chế hệ số chiết suất  $\Delta n$  cho: (a) bước sóng phản xạ Bragg; (b) hệ số hiệu dụng; (c) công suất đỉnh tại bước sóng cộng hưởng Bragg phản xạ; (d) dịch bước sóng Bragg.

Mô phỏng số của biểu diễn phân bố hệ số (chiết suất) hiệu dụng của lõi cách tử được thể hiện như Hình5. Theo nguyên lý về mode quang và truyền sóng trong sợi quang [32], chiết suất hiệu dụng luôn lớn hơn chiết suất lớp vỏ (cladding layer) nhưng nhỏ hơn giá trị cực đại của chênh lệch các chiết suất, nghĩa là:

cực đại 100%. Cũng vậy, khoảng dịch giữa các bước sóng Bragg  $\Delta\lambda_B$  cũng là hàm tăng theo  $\Delta n$  với sự tăng gần như tuyến tính.

Đáp ứng bước sóng là một đặc tính động quan trọng của một thiết bị hay hệ thống, nói lên sự biến đổi của các tham số quan trọng đối với sự phụ thuộc theo bước sóng (hoặc tần số). Trong hệ thống quang học ứng dụng, các laser thương mại có các bước sóng ở nhiều tần số khác nhau. Trong thông tin quang sợi, có ba bước sóng phổ biến là 850nm, 1310nm và 1550nm. Để nghiên cứu đặc tính quang quan trọng của sợi FBG dùng cho cảm biến đã được đề xuất thiết kế, chúng ta xem xét sự biến đổi của tham số độ rộng tại nửa đỉnh biên độ FWHM, chu kỳ cách tử tương ứng với điều kiện phản xạ cộng hưởng Bragg và chỉ số (chiết suất) hiệu dụng theo đáp ứng phổ bước sóng từ 850nm đến 1630nm bởi mô phỏng số CMT như được trình bày trên Hình7. Hình7(a,b,c) được vẽ từ dữ liệu mô phỏng qua công cụ GratingMod bởi phương pháp CMT ứng với một số điều kiện đã chọn tại  $N=50000$ ,  $\Delta n=0.0012$  cho thấy rằng, với kết quả từ Hình7(a) thì FWHM của sợi FBG tăng từ 0.64nm đến 0.815nm khi bước sóng tăng từ 850nm đến 1470nm, giữ bảo hòa khi bước sóng nằm trong dải 1470nm÷1530nm, rồi sau đó giảm nhẹ dần xuống 0.81nm khi bước sóng nằm trong khoảng từ 1530nm đến 1630nm. Trong khi đó, kết quả trên Hình7(b) chỉ ra sự tăng gần như tuyến tính của chu kỳ cách tử tương ứng bước sóng với cộng hưởng Bragg, điều này được lý giải là bởi vì bậc của điều biến hệ số chiết suất của cách tử thiết kế được chọn là hàm bậc nhất và chiết suất hiệu dụng của sợi thay đổi tuyến tính rất nhỏ của sợi FBG như được thấy trên Hình7(c).

Cuối cùng, để đo lường sự cảm biến nhiệt độ, chúng ta xây dựng hệ thống thiết lập bằng công cụ mô phỏng hệ thống Rsoft OptSim để khảo sát đặc tính cảm biến nhiệt độ. Hình8(a) mô tả một hệ thống với nguồn phát băng rộng BBS từ một laser sóng liên tục (CW laser) được thiết lập tại giá trị trung tâm là 1550nm. Sau đó, hệ thống được thêm một nguồn nhiễu phát xạ tự phát được khuếch đại ASE (Amplified spontaneous emission) và qua một cách tử chu kỳ dài LPG (long-period grating) trước khi qua vi mạch cảm biến nhiệt độ được đề xuất dựa trên cách tử nhiễu xạ Bragg sợi FBG. Hệ thống thiết lập trong sự vắng mặt của ngoại lực là sức căng. Cuối cùng, hệ thống quan sát công suất quang thu được theo công suất là hàm biến đổi của nhiệt độ. Hình8(b) thể hiện kết quả đo được tại máy thu công suất quang và bộ hiển thị đa công, đa chức năng qua thiết lập mô phỏng hệ thống. Kết quả chạy mô phỏng cho thấy rằng, trong khoảng đo nhiệt độ từ dải 110°C từ -50°C đến 60°C, biến động công suất giảm độ cong đều khá gần tuyến tính theo sự tăng nhiệt độ với biến động chỉ  $5 \times 10^{-5}$  W = 50  $\mu$ W. Như vậy, độ phân giải có thể xấp xỉ 50  $\mu$ W/110°C  $\approx$  0.45  $\mu$ W/°C. Chúng ta cũng có thể thấy từ Hình7(b), độ phân giải của hệ thống là rất cao với dung sai  $\pm 10^{-6}$  W  $\approx \pm 1$   $\mu$ W, tương ứng  $\pm 1$  % cho mỗi giá trị nhiệt độ đo. Một ví dụ cho kịch bản ứng dụng của FGB sử dụng được trong thực tế với vai trò cảm biến chính của một đồng hồ đo nhiệt độ tự nhiên ngoài trời được thể hiện trên Hình8(c). Nguồn nhiệt độ trong kịch bản này là trực tiếp từ ánh sáng mặt trời và được xác định bằng nhiệt kế thủy ngân tiêu chuẩn. FBG được đặt bên trong một ống thủy tinh hoạt động như một nửa của FBG để làm cho nó ổn định trong giá đỡ Perspex. Sau đó, nguồn laser từ bộ laser có thể điều hướng (TLS: tunable laser source) được phóng vào FBG



Hình8. Sơ đồ thiết lập mô phỏng đo lường cảm biến nhiệt độ dựa trên cấu trúc FBG ở mức hệ thống quang sợi (a), kết quả đo công suất quang theo cảm biến trong dải nhiệt độ từ -50°C đến 60°C (b) và sơ đồ ứng dụng của cảm biến nhiệt dựa trên sợi FBG trong thực tế.

và truyền qua FBG, và kết quả đầu ra của quang phổ có thể kiểm tra bằng cách sử dụng máy phân tích quang phổ (OSA: optical spectrum analyser) [33].

### KẾT LUẬN

Để kết thúc, bài báo này trình bày nguyên lý hoạt động của cách tử nhiễu xạ Bragg sợi và nguyên lý cảm biến cùng đề xuất thiết kế mô phỏng số và đánh giá đặc trưng quang học của một cấu trúc FBG ứng dụng cho cảm biến nhiệt độ bằng phương pháp quang học. Kết quả đo lường thông qua mô phỏng cấu trúc ở mức hệ thống quang sợi cho thấy sợi FBG sử dụng cho cảm biến nhiệt độ có dải rộng 110°C trong khoảng biến động chỉ 50  $\mu$ W nên có độ phân giải cao ở mức 0.45  $\mu$ W/°C và sai số nhỏ chỉ cỡ  $\pm 1$  %. Những giá trị tốt như vậy có thể đưa cấu trúc thiết kế tiềm năng lớn cho việc chế tạo ra cảm biến quang học độ nhạy lớn và độ chính xác cao trong các ứng dụng của cuộc sống.

### LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông trong đề tài có mã số HV-2022-ĐT-12.

## REFERENCES

- [1] Q. Wang, L. Zhang, C. Sun, and Q. Yu, "Multiplexed fiber-optic pressure and temperature sensor system for down-hole measurement," *IEEE Sens. J.*, vol. 8, no. 11, pp. 1879–1883, 2008, doi: 10.1109/JSEN.2008.2006253.
- [2] J. Zhang *et al.*, "Highly Sensitive Temperature Sensor Using PANDA Fiber Sagnac Interferometer," *IEEE J. Light. Technol.*, vol. 29, no. 24, pp. 3640–3644, 2011.
- [3] H. Kairm *et al.*, "Concept and model of a metamaterial-based passive wireless temperature sensor for harsh environment applications," *IEEE Sens. J.*, vol. 15, no. 3, pp. 1445–1452, 2015, doi: 10.1109/JSEN.2014.2363095.
- [4] Y. Li, H. Cheng, Z. Alhalili, G. Xu, and G. Gao, "The progress of magnetic sensor applied in biomedicine: A review of non-invasive techniques and sensors," *J. Chinese Chem. Soc.*, vol. 68, no. 2, pp. 216–227, 2021, doi: 10.1002/jccs.202000353.
- [5] M. Ranaweera, I. Choi, and J. S. Kim, "Cell integrated thin-film multi-junction thermocouple array for in-situ temperature monitoring of solid oxide fuel cells," *2015 IEEE SENSORS - Proc.*, pp. 0–3, 2015, doi: 10.1109/ICSENS.2015.7370102.
- [6] I. I. Fedosov, "Thermocouple Condition Monitoring Using Thermocouple Resistance. Experimental Study," in *Proceedings - 2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2020*, 2020, pp. 349–352, doi: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117727.
- [7] V. S. Turkani *et al.*, "A Screen-Printed Nickel Based Resistance Temperature Detector (RTD) on Thin Ceramic Substrate," in *IEEE International Conference on Electro Information Technology*, 2020, vol. 2020-July, pp. 577–580, doi: 10.1109/EIT48999.2020.9208252.
- [8] P. A. R. Tafulo, P. A. S. Jorge, J. L. Santos, F. M. Araújo, and O. Frazão, "Intrinsic Fabry-Pérot cavity sensor based on etched multimode graded index fiber for strain and temperature measurement," *IEEE Sens. J.*, vol. 12, no. 1, pp. 8–12, 2012, doi: 10.1109/JSEN.2011.2107737.
- [9] B. Wang, Y. Niu, S. Zheng, Y. Yin, and M. Ding, "A High Temperature Sensor Based on Sapphire Fiber Fabry-Perot Interferometer," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 32, no. 2, pp. 89–92, 2020, doi: 10.1109/LPT.2019.2957917.
- [10] S. Loranger, M. Gagné, V. Lamin-Jezzi, and R. Kashyap, "Rayleigh scatter based order of magnitude increase in distributed temperature and strain sensing by simple UV exposure of optical fibre," *Sci. Rep.*, vol. 5, no. March, pp. 1–7, 2015, doi: 10.1038/srep11177.
- [11] A. K. Sang, M. E. Froggatt, D. K. Gifford, S. T. Kreger, and B. D. Dickerson, "One centimeter spatial resolution temperature measurements in a nuclear reactor using Rayleigh scatter in optical fiber," *IEEE Sens. J.*, vol. 8, no. 7, pp. 1375–1380, 2008, doi: 10.1109/JSEN.2008.927247.
- [12] X. Bao, J. Dhliwayo, N. Heron, D. J. Webb, and D. A. Jackson, "Experimental and Theoretical Studies on a Distributed Temperature Sensor Based on Brillouin Scattering," *J. Light. Technol.*, vol. 13, no. 7, pp. 1340–1348, 1995, doi: 10.1109/50.400678.
- [13] Y. Dong, L. Chen, and X. Bao, "High-Spatial-Resolution Time-Domain Simultaneous Strain and Temperature Sensor Using Brillouin Scattering and Birefringence in a Polarization-Maintaining Fiber," *IEEE Photonics J.*, vol. 22, no. 18, pp. 1364–1366, 2010, doi: 10.1590/S0004-28032014000300006.
- [14] V. L. Iezzi, S. Loranger, M. Marois, and R. Kashyap, "High-sensitivity temperature sensing using higher-order Stokes stimulated Brillouin scattering in optical fiber," *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 4, p. 857, 2014, doi: 10.1364/ol.39.000857.
- [15] M. S. Peixoto E Silva, T. H. C. De Barros, H. P. Alves, J. F. Do Nascimento, and J. F. Martins Filho, "Evaluation of Fiber Optic Raman Scattering Distributed Temperature Sensor between -196 and 400 °c," *IEEE Sens. J.*, vol. 21, no. 2, pp. 1527–1533, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.3016322.
- [16] H. Wu *et al.*, "Few mode fibers based quasi-single mode Raman distributed temperature sensor," *25th Int. Conf. Opt. Fiber Sensors*, vol. 10323, p. 103236D, 2017, doi: 10.1117/12.2263426.
- [17] T. Coelho, E. Melao, A. Bessa, D. Coelho, M. Lamin, and M. J. Pontes, "Numerical Analysis of Remote Optical Fiber Sensors with Raman Optical Amplification," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 18, no. 6, pp. 1085–1092, 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9099686.
- [18] S. Delepine-Lesoille, I. Planes, M. Landolt, G. Hermand, and O. Perrochon, "Compared performances of Rayleigh, Raman, and Brillouin distributed temperature measurements during concrete container fire test," *25th Int. Conf. Opt. Fiber Sensors*, vol. 10323, p. 103236G, 2017, doi: 10.1117/12.2263449.
- [19] B. Zhang and M. Kahrizi, "High-Temperature Resistance Fiber Bragg Grating," *IEEE Sens. J.*, vol. 7, no. 4, pp. 586–591, 2007.
- [20] W. Gao, J. Liu, H. Guo, X. Jiang, S. Sun, and H. Yu, "Multi-Wavelength Ultra-Weak Fiber Bragg Grating Arrays for Long-Distance Quasi-Distributed Sensing," *Photonic Sensors*, vol. 12, no. 2, pp. 185–195, 2022, doi: 10.1007/s13320-021-0635-4.
- [21] Y. Zhan, "Fiber Bragg grating temperature sensor for multiplexed measurement with high resolution," *Opt. Eng.*, vol. 43, no. 10, p. 2358, 2004, doi: 10.1117/1.1786938.
- [22] J. D. Young, T. L. Lowder, R. H. Selfridge, and S. M. Schultz, "Packaging of surface relief fiber Bragg gratings for harsh high temperature environments," *Smart Sens. Phenomena, Technol. Networks, Syst. 2008*, vol. 6933, p. 693308, 2008, doi: 10.1117/12.776378.
- [23] J. K. Sahota, N. Gupta, and D. Dhawan, "Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: a comprehensive review," *Opt. Eng.*, vol. 59, no. 06, p. 1, 2020, doi: 10.1117/1.oe.59.6.060901.
- [24] T. Erdogan, "Fiber grating spectra," *J. Light. Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1277–1294, 1997, doi: 10.1109/50.618322.
- [25] H. Lee, Z. Jin, and M. Song, "Investigation of fiber Bragg grating temperature sensors for applications in electric power systems," *Adv. Sens. Syst. Appl. II*, vol. 5634, p. 579, 2005, doi: 10.1117/12.576105.
- [26] H. Li, L. Ma, Q. Zhao, F. Zhang, C. Wang, and X. Liu, "Rapid response of high precision fiber bragg grating based temperature sensor," in *2018 the 3rd Optoelectronics Global Conference, OGC 2018*, 2018, pp. 64–67, doi: 10.1109/OGC.2018.8529849.
- [27] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*. Academic Press, 1999.
- [28] J. Skaar, L. Wang, and T. Erdogan, "On the synthesis of fiber Bragg gratings by layer peeling," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 37, no. 2, pp. 165–173, 2001, doi: 10.1109/3.903065.
- [29] L. Poladian, "Simple grating synthesis algorithm," *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 18, p. 1400, 2000, doi: 10.1364/ol.25.001400.
- [30] Z. Zhifeng and T. Xiaoming, "Polymer Optical Fiber Bragg Grating," in *Handbook of Smart Textiles*, Springer, 2015, pp. 597–613.
- [31] A. Cusano, D. Paladino, and A. Iadicicco, "Microstructured Fiber Bragg Gratings," *J. Light. Technol.*, vol. 27, no. 11, pp. 1663–1697, 2009, doi: 10.1109/JLT.2009.2021535.
- [32] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*,



Fourth. John Wiley&Sons, 2010.

- [33] A. Afrozeh, “Highly Sensitive FBG-Based Sensor for Temperature Measurement Operating in Optical Fiber,” *Plasmonics*, vol. 16, no. 6, pp. 1973–1982, 2021, doi: 10.1007/s11468-021-01457-y.

## RESEARCH AND NUMERICAL DESIGN OF A TEMPERATURE SENSOR BASED ON FIBER BRAGG GRATING

**Abstract**— In this paper, we present the working principle and the investigation method on aspects of the theoretical analysis and the numerical simulation for an optical temperature sensor which is based on the fiber Bragg grating structure. Commercially numerical simulation tools including GratingMode and OptSim tools of Rsoft’s simulation software have been utilized to characterize optical performances. Results measured by the numerical simulation process show that the proposed FBG structure allows to detect the temperature a wide range up to 110°C in a small optical power variation of 50  $\mu$ W with a high resolution of 0.45  $\mu$ W/oC and a low tolerance of  $\pm 1$  %. Such a good performance can make the designed FBG structure a great potential for high-resolution and high-accuracy temperature optic sensors.

**Keywords**— fiber optic sensor, temperature, fiber Bragg grating (FBG), diffraction, numerical simulation methods, effective index.



**Trương Cao Dũng** tốt nghiệp đại học Bách Khoa Hà Nội tương ứng các cấp độ B.E, M.Sc. và Ph.D. năm 2003, 2006 và 2015. Hiện tại, anh ấy là giảng viên khoa Kỹ thuật Điện tử tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông. Hướng nghiên cứu quan tâm chính của anh ấy bao gồm: vi mạch quang điện tử tích hợp, các hệ thống thông tin quang tốc độ cao, thiết kế

các hệ thống quang điện tử nhúng được, cảm biến quang, ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong quang tử và mạng nơ ron quang tử.