

## NGHIÊN CỨU, THIẾT KẾ HỆ CẢM BIẾN ĐO CHIẾT SUẤT MỘT SỐ DUNG DỊCH LỎNG SỬ DỤNG CÁCH TỬ BRAGG TRONG SỢI QUANG

Nguyễn Văn Ân<sup>1\*</sup>, Ngô Quang Minh<sup>2</sup>, Phạm Thanh Bình<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Khoa Điện, Điện tử và Công nghệ vật liệu, Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế

<sup>2</sup> Trường Đại học Khoa học và Công nghệ Hà Nội

<sup>3</sup> Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

\*Email: ngvanan2009@husc.edu.vn

Ngày nhận bài: 17/10/2025; ngày hoàn thành phản biện: 12/11/2025; ngày duyệt đăng: 6/12/2025

### TÓM TẮT

Cảm biến quang đã được nghiên cứu và ứng dụng rất hiệu quả để xác định hàm lượng độc tố trong môi trường lỏng thông qua việc đo chiết suất của môi trường. Cảm biến quang đo chiết suất môi trường hoạt động dựa trên nguyên lý dịch chuyển bước sóng của tín hiệu quang khi chiết suất của môi trường thay đổi. Trong bài báo này, chúng tôi thiết lập một cấu hình hệ cảm biến quang sợi trên cơ sở tích hợp cách tử Bragg trong sợi quang (FBG) với cấu trúc laser vòng sợi của sợi quang pha tạp Er<sup>3+</sup> để đo chiết suất của dung dịch lỏng mà không cần sử dụng máy phân tích phổ quang (OSA). Hệ cảm biến đã được kiểm chứng bằng thực nghiệm để xác định tỷ lệ pha trộn của dung môi hữu cơ trong xăng và nồng độ nitrate trong các mẫu nước. Các kết quả thực nghiệm cho thấy cấu hình được đề xuất có thể dùng để chế tạo hệ cảm biến có độ nhạy và độ lặp lại cao, đáp ứng nhanh và giá thành thấp ứng dụng trong lĩnh vực cảm biến sinh - hóa.

**Từ khóa:** Cảm biến quang sợi, Cách tử Bragg trong sợi quang, Laser sợi.

### 1. MỞ ĐẦU

Các thiết bị dựa trên cấu trúc FBG đã và đang được rất nhiều nhóm nghiên cứu khoa học và công nghệ trên thế giới quan tâm. Ngoài việc chế tạo các hệ thống liên quan đến lĩnh vực xử lý thông tin như giải điều chế tín hiệu [1], xử lý tín hiệu [2],... FBG còn được nghiên cứu ứng dụng rất nhiều trong lĩnh vực cảm biến quang sợi [3-9], do chúng có nhiều ưu điểm như: thời gian đáp ứng nhanh, kết quả đo lặp lại tốt, độ chính xác cao, chế tạo đơn giản, bền trong môi trường ăn mòn hóa học và sinh học, không bị ảnh hưởng bởi nhiễu điện từ [6], kích thước gọn nhẹ, dễ tích hợp với sợi quang thông tin tiêu chuẩn

để cảm biến từ xa. FBG đã được minh chứng là đầu dò quang có nhiều tính năng ưu việt cho nhiều ứng dụng khác nhau [10, 11], đặc biệt là trong lĩnh vực cảm biến sinh - hóa [7, 8]. Trong các ứng dụng sinh - hóa, cảm biến chiết suất rất quan trọng vì một số chất có thể được phát hiện bằng cách đo chiết suất. Nguyên lý hoạt động của cảm biến quang sợi sử dụng FBG dựa vào sự dịch chuyển phổ phản xạ của FBG dưới tác động của môi trường ngoài. Hệ cảm biến quang sợi trên cơ sở cấu trúc FBG có thể được sử dụng với cấu hình đo phổ phản xạ [4, 7, 8, 10] hoặc cấu hình laser sợi [5, 9]. Trong cấu hình laser sợi với buồng cộng hưởng vòng, FBG có tác dụng như một bộ lọc làm tăng độ phân giải của phép đo [9], nâng cao độ nhạy cho cảm biến. Các phương pháp dò phổ thông thường cần phải sử dụng OSA độ phân giải cao gây tốn kém và không linh động. Vì vậy, việc tìm ra các phương pháp dò phổ bằng phần tử FBG với độ phân giải cao không sử dụng OSA là rất quan trọng.

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một cấu hình hệ cảm biến để đo chiết suất của dung dịch lỏng thông qua việc xác định bước sóng phản xạ Bragg của FBG mà không cần sử dụng OSA. Cấu hình hệ cảm biến dựa trên cấu trúc laser vòng sợi sử dụng sợi quang pha tạp  $Er^{3+}$  kết hợp hai FBG hoạt động như đầu dò tham chiếu và đầu dò cảm biến. FBG được ăn mòn (e-FBG) làm đầu dò cảm biến phù hợp cho các cảm biến sinh - hóa. Cảm biến sinh - hóa này được giải điều chế thông qua việc dò công suất quang bằng bộ lọc tham chiếu FBG (re-FBG) có bước sóng trung tâm điều chỉnh được theo nhiệt độ bởi phương pháp làm mát nhiệt điện. Hệ cảm biến đã được kiểm chứng bằng thực nghiệm để xác định tỷ lệ pha trộn ethanol, methanol trong xăng với dải nồng độ 0%-14% v/v và nitrate trong các mẫu nước ở dải nồng độ thấp 0-50 ppm. Ưu điểm nổi bật của hệ cảm biến này là tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu được cải thiện, độ rộng phổ phát xạ laser rất hẹp giúp nâng cao độ chính xác của phép đo và khả dụng cho cảm biến từ xa. Vì vậy, cấu hình hệ cảm biến đề xuất có thể được sử dụng để phát triển các cảm biến sinh - hóa giá thành thấp, linh động trong các ứng dụng thực tiễn.

## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Cấu trúc và nguyên lý làm việc của FBG

Cách tử Bragg trong sợi quang (FBG) là một phần của sợi quang, gồm các đoạn của lõi sợi có chiết suất thay đổi theo quy luật tuần hoàn dọc theo chiều dài của sợi. Cấu trúc bên trong và nguyên lý làm việc của FBG được minh họa như ở trên Hình 1. Bước sóng trung tâm  $\lambda_B$  của ánh sáng phản xạ từ FBG được xác định theo công thức Bragg [12]:

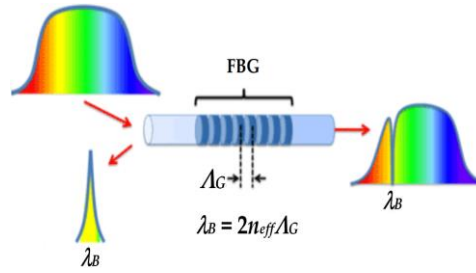
$$\lambda_B = 2n_{eff}\zeta_G \quad (1)$$

trong đó,  $\zeta_G$  và  $n_{eff}$  lần lượt là chu kỳ và chiết suất hiệu dụng của FBG.

Độ dịch phổ phản xạ của FBG dưới tác động của nhiệt độ áp đặt lên nó được xác định theo biểu thức [13]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)\Delta T \quad (2)$$

trong đó:  $\alpha$  là hệ số giãn nở nhiệt của sợi quang và bằng  $0,55 \times 10^{-6}$  đối với sợi thủy tinh silica, đại lượng  $\xi$  đặc trưng cho hệ số nhiệt quang và có giá trị xấp xỉ bằng  $8,3 \times 10^{-6}$  đối với lõi silica pha tạp Germania.



Hình 1. Cấu trúc bên trong và nguyên lý làm việc của FBG [12].

Các FBG bình thường về bản chất không nhạy với chiết suất môi trường ngoài, do lớp lõi chứa cấu trúc FBG được ngăn cách với môi trường ngoài bằng lớp vỏ thủy tinh silica. Để FBG chịu tác động bởi chiết suất của môi trường ngoài, vùng lớp vỏ thủy tinh silica của đoạn sợi quang chứa cấu trúc FBG phải được di dời để vùng lõi có FBG tiếp xúc trực tiếp với môi trường ngoài, loại FBG này được ký hiệu là e-FBG. Dưới tác động của chiết suất môi trường ngoài, chiết suất hiệu dụng của e-FBG đối với các mode dẫn sóng sẽ thay đổi do sự tương tác của trường gần giữa các mode lõi với môi trường ngoài, dẫn đến phổ phản xạ và do đó bước sóng phản xạ Bragg  $\lambda_B$  của e-FBG bị dịch chuyển. Bản chất vật lý của hiện tượng này được giải thích bằng việc áp dụng các phương trình Maxwell lên mặt tiếp xúc giữa hai lớp điện môi [6]. Chiết suất hiệu dụng  $n_{eff}$  của e-FBG phụ thuộc vào chiết suất môi trường ngoài theo biểu thức [3]:

$$n_{eff}^2 = n_1^2 - \left\{ \frac{1 + \sqrt{2}}{1 + \left[ 4 + 4k_0^4 r^4 (n_1^2 - n_2^2)^2 \right]^{1/4}} \right\}^2 (n_1^2 - n_2^2) \quad (3)$$

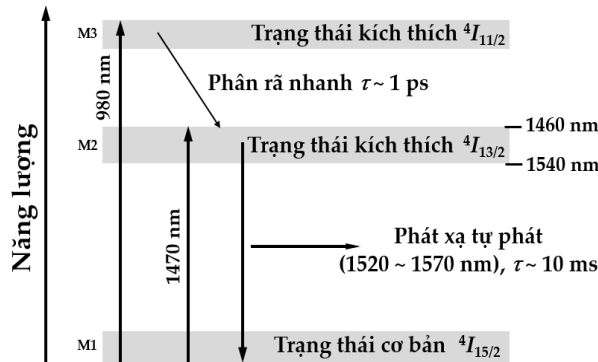
trong đó  $r$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $k_0$  lần lượt là bán kính lõi, chiết suất lõi sợi, chiết suất vỏ phản xạ (lớp phủ - cladding) và hằng số lan truyền tương ứng.

## 2.2. Giải đồ ba mức năng lượng của ion $Er^{3+}$ và cơ chế kích thích trong laser sợi

Quá trình khuếch đại quang của thủy tinh pha tạp  $Er^{3+}$  chủ yếu liên quan đến hai mức năng lượng đó là mức năng lượng cơ bản  $^4I_{15/2}$  (M1) và mức năng lượng kích thích từ  $^4I_{13/2}$  (M2) trở lên. Hình 2 minh họa giải đồ ba mức năng lượng của ion  $Er^{3+}$  trong thủy tinh silica và các quá trình chuyển mức ion tương ứng dưới sự kích thích của nguồn bơm có bước sóng 980 nm và 1470 nm [12, 14, 15].

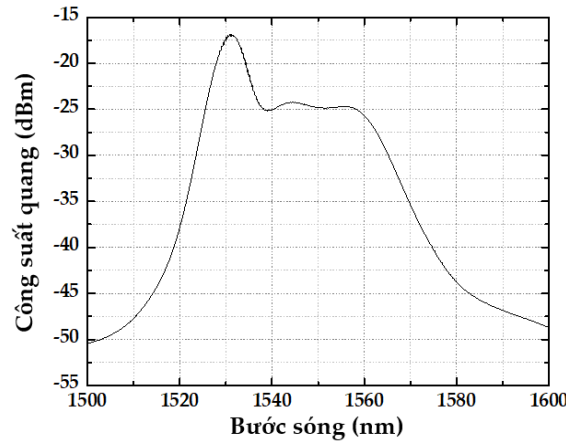
Đặc điểm rất quan trọng là trạng thái  $^4I_{13/2}$  có thời gian sống rất lớn ( $\tau \sim 10$  ms),

trạng thái này được gọi là trạng thái siêu bền. Khi kích thích thủy tinh pha tạp  $\text{Er}^{3+}$  bằng laser có bước sóng 980 nm, các ion  $\text{Er}^{3+}$  sẽ chuyển dời từ trạng thái cơ bản  $^4I_{15/2}$  lên trạng thái trên  $^4I_{11/2}$ , một ion  $\text{Er}^{3+}$  ở trạng thái này có thời gian sống cỡ 1  $\mu\text{s}$  sau đó nó phân rã thành trạng thái trung gian  $^4I_{13/2}$ , vì thời gian sống của ion  $\text{Er}^{3+}$  ở trạng thái  $^4I_{11/2}$  rất ngắn (cỡ 1 ps) nên các ion  $\text{Er}^{3+}$  sẽ nhanh chóng chuyển dời không phát xạ về trạng thái  $^4I_{13/2}$  và dễ dàng tạo ra sự nghịch đảo mật độ phân bố giữa trạng thái kích thích  $^4I_{13/2}$  và trạng thái cơ bản  $^4I_{15/2}$ . Quá trình xảy ra tương tự khi kích thích thủy tinh pha tạp  $\text{Er}^{3+}$  bằng laser có bước sóng 1470 nm [12, 15].



**Hình 2.** Giản đồ ba mức năng lượng của ion  $\text{Er}^{3+}$  trong thủy tinh silica và các quá trình chuyển mức ion khi kích thích bởi nguồn bơm có bước sóng 980 nm và 1470 nm.

Khi một photon có bước sóng trong vùng 1550 nm phát xạ ngẫu nhiên trong thủy tinh pha tạp  $\text{Er}^{3+}$  có nghịch đảo mật độ trạng thái giữa hai mức  $^4I_{13/2}$  và  $^4I_{15/2}$ , hiện tượng phát xạ cưỡng bức sẽ xảy ra. Photon phát xạ ngẫu nhiên sẽ kích thích ion  $\text{Er}^{3+}$  chuyển dời từ trạng thái kích thích  $^4I_{13/2}$  về trạng thái cơ bản  $^4I_{15/2}$ , chuyển dời này phát xạ thêm một photon nữa có cùng bước sóng và pha với photon ban đầu. Vì trong sợi pha tạp  $\text{Er}^{3+}$  có sự tách mức Stark nên trạng thái  $^4I_{13/2}$  là một vùng năng lượng với các mức năng lượng xếp gần liền nhau, do đó sự phát xạ không phải bước sóng đơn sắc 1550 nm mà là một vùng bước sóng rộng trong khoảng từ 1520-1570 nm [14-16]. Khi đó sợi pha tạp tạo ra một dải phổ rộng (phổ ASE) trong vùng bước sóng 1520-1570 nm như được minh họa ở Hình 3.

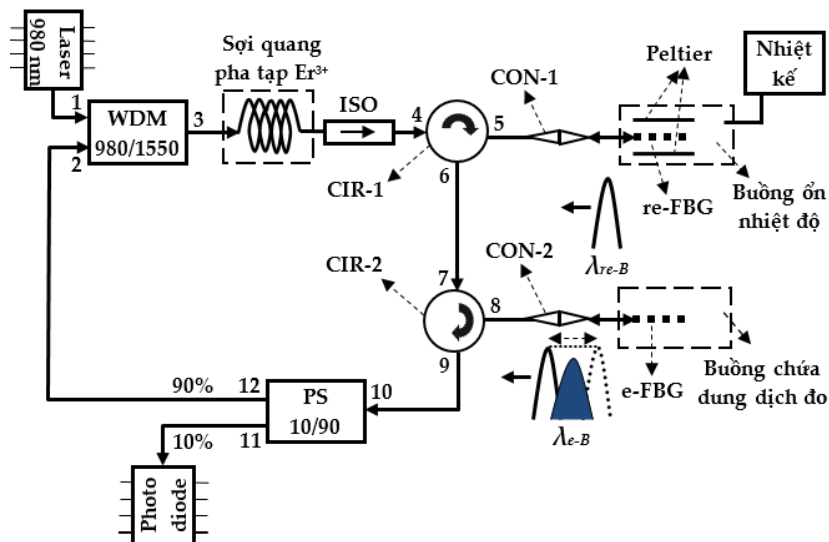


Hình 3. Phổ phát xạ tự phát của sợi quang thủy tinh silica pha tạp Er<sup>3+</sup>.

Phổ khuếch đại được tạo ra trong môi trường khuếch đại là một dải phổ rộng. Để khuếch đại dải phổ hẹp với bước sóng trung tâm xác định, bước sóng đó cần phải được trích ra một cách hiệu quả từ môi trường khuếch đại. Với laser, công việc này được thực hiện trong buồng cộng hưởng nhờ sự chọn lọc bước sóng ánh sáng phát xạ, ánh sáng với bước sóng đã chọn được đưa trở lại môi trường khuếch đại và sau nhiều lần tương tác chúng sẽ được tăng cường.

Để lựa chọn bước sóng phát xạ laser, buồng cộng hưởng có nhiệm vụ chọn lọc bước sóng thích hợp trong vùng phổ khuếch đại ASE dao động trong buồng cộng hưởng. Quá trình chọn lọc bước sóng trong vùng phổ này có thể được thực hiện bởi FBG, ở đây FBG đóng vai trò là gương phản xạ của buồng cộng hưởng của laser.

### 2.3. Hệ cảm biến sinh - hóa và nguyên lý hoạt động



Hình 4. Hệ cảm biến sinh - hóa sử dụng hai FBG tích hợp trong cấu hình laser vòng.

Sơ đồ nguyên lý hệ cảm biến đo chiết suất chất lỏng trên cơ sở tích hợp hai FBG

trong cấu hình laser cộng hưởng vòng do chúng tôi thiết kế được minh họa như trên Hình 4. Trong đó: nguồn bơm là laser diode công suất cao (~ 170 mW) phát bức xạ đơn mode bước sóng 980 nm; môi trường khuếch đại quang là sợi quang pha tạp  $Er^{3+}$  có độ dài 3 m; re-FBG (~ 15 mm) làm đầu dò tham chiếu, re-FBG được gắn trên bề mặt bộ làm lạnh Peltier có nhiệt độ thay đổi trong dải 273 K-343 K với độ chính xác  $\pm 0,1$  K, hệ này được đặt trong buồng ổn nhiệt có gắn nhiệt kế thương mại tiêu chuẩn loại K để giám sát nhiệt độ; e-FBG (~ 15 mm) làm đầu dò cảm biến, bước sóng Bragg của e-FBG và re-FBG trùng nhau trong môi trường tiêu chuẩn và nằm trong khoảng 1520-1570 nm ở nhiệt độ phòng, e-FBG được dùng để đo chiết suất môi trường các chất hữu cơ dạng lỏng có giá trị  $\sim 1,3-1,44$  đơn vị chiết suất (RIU); linh kiện thu tín hiệu quang là photodiode hồng ngoại dùng trong thông tin quang tiêu chuẩn, loại này có khả năng đo công suất ánh sáng hồng ngoại 1550 nm từ 1 nW đến hàng chục mW.

Nguyên lý hoạt động của hệ cảm biến: Laser diode phát bức xạ đơn mode bước sóng 980 nm tới cửa 1 của bộ ghép kênh quang WDM 980/1550 rồi đi ra cửa 3 của nó để truyền tới đoạn sợi quang pha tạp  $Er^{3+}$  để kích thích các ion  $Er^{3+}$ . Phổ phát xạ tự phát (ASE) của  $Er^{3+}$  được truyền theo một chiều qua bộ cách ly quang ISO tới cửa 4 của bộ luân chuyển hướng truyền quang CIR-1 và đi ra cửa 5 của nó để tới re-FBG thông qua điểm kết nối quang CON-1. Vùng phổ phát xạ tự phát có bước sóng lân cận bước sóng phản xạ Bragg  $L_{re-B}$  của re-FBG được phản xạ trở lại cửa 5 của CIR-1. Tín hiệu quang do re-FBG chọn lọc sau khi ra cửa 6 của CIR-1 được đưa tới cửa 7 của CIR-2 rồi được định hướng đi ra cửa 8 để truyền tới e-FBG thông qua điểm kết nối quang CON-2. Tín hiệu quang tới e-FBG có bước sóng trùng với bước sóng phản xạ Bragg  $L_{e-B}$  của e-FBG sẽ được phản xạ trở lại cửa 8, ra cửa 9 và truyền tới cửa 10 của bộ chia công suất quang PS 10/90, 10% công suất quang đưa ra cửa 11 để truyền tới photodiode và đưa ra tín hiệu điện biểu thị cường độ của mode phát xạ laser được e-FBG chọn lọc thông qua mạch chuyển đổi quang - điện, 90% công suất quang còn lại ra cửa 12 đưa về cửa 2 của WDM 980/1550 kết hợp với bước sóng bơm của laser diode để trở lại môi trường khuếch đại quang sợi. Chu trình truyền quang như trên tiếp tục lặp lại và đây chính là quy trình hoạt động của laser cộng hưởng vòng được tích hợp hai FBG đóng vai trò chọn lọc mode phát xạ laser. Từ nguyên lý hoạt động của hệ cảm biến cho thấy: khi mode phát xạ laser do re-FBG chọn lọc trùng với bước sóng phản xạ Bragg của e-FBG đặt trong môi trường đo ( $L_{re-B} = L_{e-B}$ ), cộng hưởng cực đại trong buồng cộng hưởng vòng của laser sẽ xảy ra và cường độ mode laser phát ra sẽ có giá trị lớn nhất, lúc này tín hiệu thu được từ photodiode sẽ đạt giá trị cực đại.

#### 2.4. Quy trình đo chiết suất dung dịch lỏng

Để đo chiết suất dung dịch lỏng bằng thiết bị cảm biến do chúng tôi thiết kế và xây dựng, chúng ta thực hiện các bước như sau:

- Bước 1: Xây dựng đường chuẩn bước sóng phản xạ - nhiệt độ cho re-FBG.

- Bước 2: Xây dựng đường chuẩn bước sóng phản xạ - chiết suất cho e-FBG trên cơ sở sử dụng các dung dịch mẫu chuẩn.

- Bước 3: Đặt đầu dò cảm biến e-FBG vào trong dung dịch lỏng cần xác định chiết suất, thay đổi nhiệt độ áp đặt lên re-FBG, đo công suất quang thu được từ photodiode rồi vẽ đường đặc trưng công suất quang - nhiệt độ. Các phép đo được thực hiện trong điều kiện nhiệt độ môi trường xung quanh e-FBG luôn được giữ ổn định cỡ  $25^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , áp suất khí quyển 1 atm và độ ẩm tương đối không đổi.

- Bước 4: Xác định nhiệt độ áp đặt lên re-FBG tương ứng với giá trị cực đại của công suất quang.

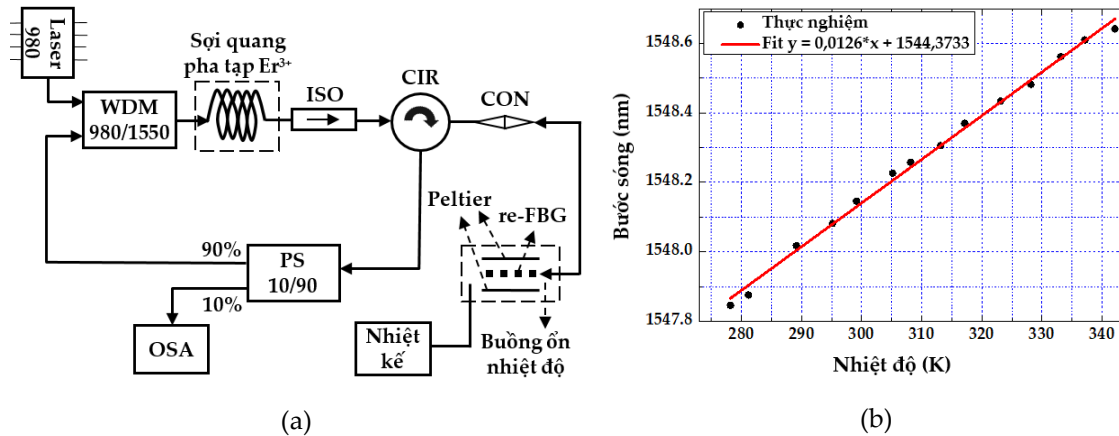
- Bước 5: Dựa vào đường chuẩn bước sóng phản xạ - nhiệt độ của re-FBG để xác định giá trị bước sóng phản xạ tương ứng với nhiệt độ tìm được ở Bước 4.

- Bước 6: Từ bước sóng phản xạ nhận được ở Bước 5, dựa vào đường chuẩn bước sóng phản xạ - chiết suất đã xây dựng cho e-FBG ta sẽ xác định được chiết suất dung dịch lỏng cần đo.

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

#### 3.1. Xây dựng đường chuẩn bước sóng phản xạ - nhiệt độ cho re-FBG

Để xây dựng đường chuẩn bước sóng phản xạ Bragg - nhiệt độ cho re-FBG đã chế tạo, chúng tôi sử dụng cấu hình laser vòng sợi được minh họa như trên Hình 5.a. Thiết bị đo phổ quang được sử dụng là Advantest Q8384 với độ phân giải 0,01 nm.



Hình 5. Cấu hình đo bước sóng phản xạ Bragg - nhiệt độ cho re-FBG (a) và đường chuẩn bước sóng phản xạ Bragg - nhiệt độ của re-FBG (b).

Kết quả khảo sát sự phụ thuộc của bước sóng mode laser được chọn lọc theo nhiệt độ đối với re-FBG đã sử dụng được thể hiện như trên Hình 5.b. Ở đây, nhiệt độ áp đặt lên re-FBG có giá trị thay đổi trong phạm vi 273 K-343 K và được điều khiển thông

qua bộ làm lạnh Peltier. Hình 5.b cho chúng ta thấy bước sóng của mode laser được chọn lọc bởi re-FBG dịch chuyển về vùng sóng dài khi nhiệt độ áp đặt lên re-FBG tăng và sự phụ thuộc này được xấp xỉ bằng đường tuyến tính. Kết quả thực nghiệm thu được có quy luật phù hợp với quy luật dịch chuyển phổ phản xạ của FBG theo nhiệt độ được mô tả bởi biểu thức (2). Đặc tuyến bước sóng phản xạ Bragg - nhiệt độ của re-FBG sẽ là cơ sở dữ liệu để điều chỉnh điểm làm việc cho re-FBG và xác định bước sóng Bragg của e-FBG trong môi trường đo.

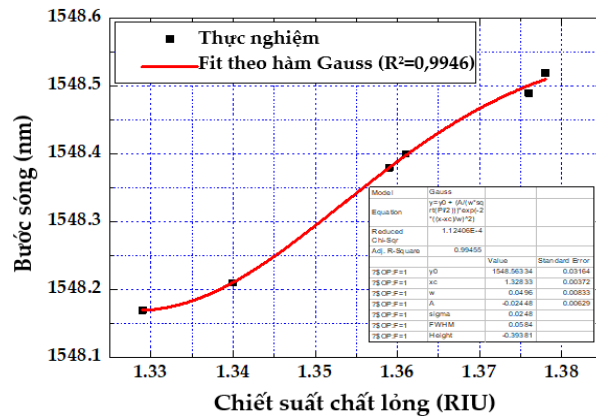
### 3.2. Xây dựng đường chuẩn bước sóng phản xạ - chiết suất cho e-FBG

Để xây dựng đường chuẩn bước sóng phản xạ Bragg - chiết suất của e-FBG, chúng tôi sử dụng cấu hình laser vòng sợi tương tự như trên Hình 5.a, ở đó re-FBG gắn trên bộ làm lạnh Peltier đặt trong buồng ổn nhiệt được thay thế bởi đầu dò cảm biến e-FBG nhúng trong dung dịch lỏng cần đo chiết suất.

Trên cơ sở các dung dịch mẫu chuẩn có chiết suất khác nhau đã biết (nhỏ hơn chiết suất lõi sợi  $n_1$ ,  $n_1 \sim 1,44-1,46$ ) và các bước sóng của mode laser được chọn lọc bởi e-FBG đo được tương ứng từ thực nghiệm khi nhúng e-FBG lần lượt vào trong các dung dịch mẫu chuẩn, chúng tôi nhận được bảng số liệu như ở Bảng 1. Từ Bảng 1, chúng tôi vẽ được đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc bước sóng mode laser cho bởi e-FBG theo chiết suất dung dịch như ở Hình 6. Đặc tuyến ở Hình 6 là phi tuyến trong giới hạn vùng chiết suất dung dịch đã khảo sát và có dạng hàm Gauss với độ lệch chuẩn  $R^2 = 0,9946$ . Đặc tuyến bước sóng phản xạ Bragg  $\lambda_B$  - chiết suất của e-FBG cũng được lưu làm cơ sở dữ liệu để đối chiếu nhằm xác định chiết suất của dung dịch cần đo.

**Bảng 1.** Sự phụ thuộc của  $\lambda_B$  cho bởi e-FBG theo chiết suất một số dung dịch mẫu đo

TT	Mẫu đo	Chiết suất	$\lambda_B$ (nm)
1	Methanol	1,329	1548,17
2	Nước	1,340	1548,21
3	Acetone	1,359	1548,38
4	Ethanol	1,361	1548,40
5	Hexane	1,376	1548,49
6	Iso-propanol	1,378	1548,52

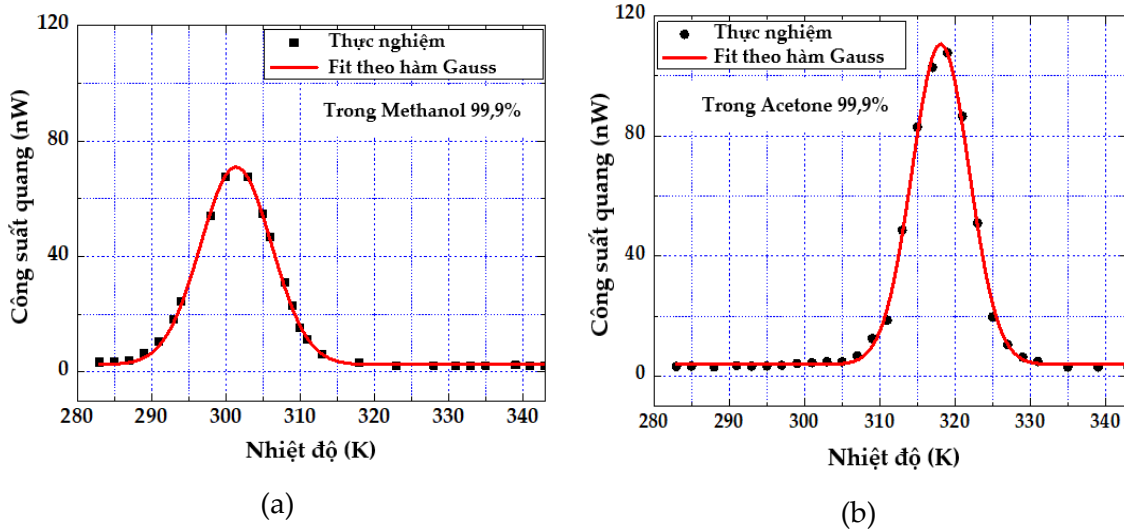


**Hình 6.** Đường chuẩn  $\lambda_B$  - chiết suất của e-FBG.

### 3.3. Kiểm chứng hệ cảm biến bằng thực nghiệm

Để kiểm chứng thiết bị cảm biến đo chiết suất dung dịch sử dụng hai FBG tích hợp trong cấu hình laser sợi với buồng cộng hưởng vòng đã xây dựng, chúng tôi thực nghiệm phép đo cho hai dung dịch mẫu chuẩn là methanol 99,9% có chiết suất 1,329 RIU và acetone 99,9% có chiết suất 1,359 RIU tương ứng. Kết quả đo cường độ mode laser

được chọn lọc bởi re-FBG và e-FBG đối với hai mẫu đo này được biểu diễn như trên Hình 7. Nhiệt độ áp đặt lên re-FBG thay đổi trong dải 283 K-343 K với bước nhảy  $1\text{ K} \pm 0,1\text{ K}$  và thời gian đáp ứng trong một bước cỡ 5 s.



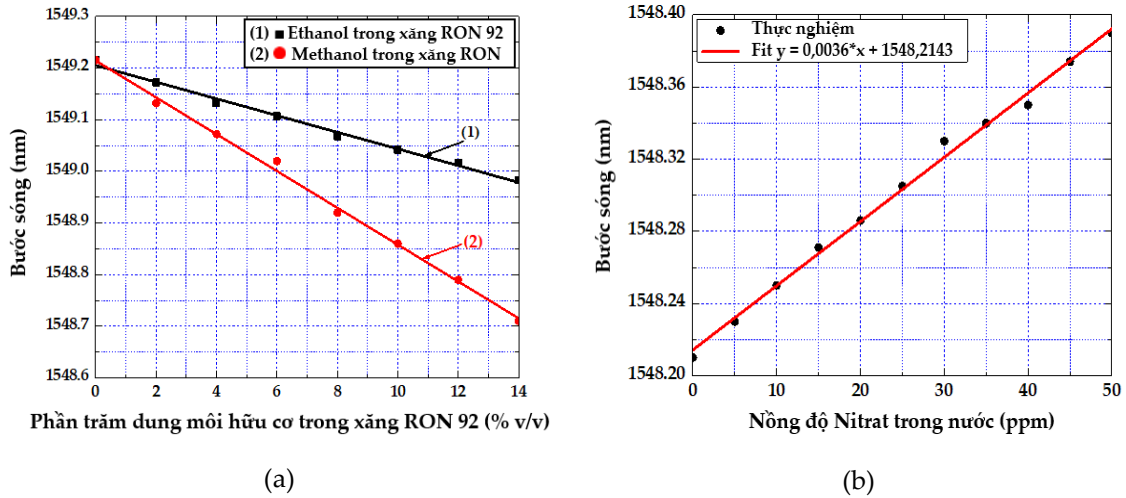
Hình 7. Sự biến đổi của công suất quang theo nhiệt độ áp đặt lên re-FBG khi nhúng đầu dò cảm biến e-FBG trong dung dịch methanol 99,9% (a) và acetone 99,9% (b).

Kết quả trên Hình 7.a cho thấy cường độ mode laser phát ra có giá trị lớn nhất ứng với nhiệt độ  $\sim 301,5\text{ K}$ . Kết hợp với dữ liệu cho bởi đường chuẩn của Hình 5.b với độ chính xác  $0,1\text{ K}$ , chúng ta xác định được bước sóng phản xạ Bragg của e-FBG khi nhúng trong methanol là  $1548,17\text{ nm}$  với độ chính xác  $0,01\text{ nm}$ . Tương tự, Hình 7.b cho ta giá trị nhiệt độ  $318,2\text{ K}$  ứng với cường độ mode laser phát ra cực đại. Kết hợp với dữ liệu cho bởi đường chuẩn Hình 5.b, chúng ta cũng xác định được bước sóng phản xạ Bragg của e-FBG khi nhúng trong acetone là  $1548,38\text{ nm}$  với độ chính xác  $0,01\text{ nm}$ .

So sánh kết quả đo với số liệu cho ở Bảng 1, chúng ta thấy rằng thiết bị cảm biến sử dụng hai FBG tích hợp trong cấu hình laser sợi cộng hưởng vòng đã xác định được các bước sóng phản xạ Bragg của e-FBG trong dung dịch với độ chính xác cao. Như vậy, thiết bị này có thể được sử dụng để đo chiết suất các dung dịch khác có giá trị nằm trong giới hạn đo của thiết bị bằng việc đối chiếu bước sóng phản xạ Bragg đã xác định được với cơ sở dữ liệu hoặc đường chuẩn bước sóng phản xạ Bragg - chiết suất của e-FBG đã được xây dựng trên Hình 6.

### 3.4. Một số kết quả đo thử nghiệm

Để chứng minh tính khả thi của hệ cảm biến đã xây dựng, chúng tôi sử dụng hệ này để phân biệt hai loại dung môi hữu cơ methanol và ethanol trong xăng. Trong các thí nghiệm, xăng RON 92 và xăng hỗn hợp dung môi được đo riêng và bước sóng Bragg trung bình được tính từ năm lần chạy dữ liệu thử nghiệm.



**Hình 8.** Sự dịch chuyển bước sóng Bragg của e-FBG theo nồng độ ethanol và methanol trong xăng RON 92 (a) và theo nồng độ nitrate trong môi trường nước (b).

Hình 8.a hiển thị các kết quả thử nghiệm phát hiện xăng thương mại RON 92 pha trộn với ethanol hoặc methanol trong dải nồng độ 0%-14% v/v. Hình 8.a cho thấy bước sóng phát xạ dịch chuyển về vùng sóng ngắn 0,506 nm và 0,234 nm trong dải nồng độ 0%-14% v/v methanol và ethanol pha với xăng RON 92 tương ứng. Độ nhạy của cảm biến được ước lượng bằng cách tính toán độ dốc của đường làm khớp tuyến tính. Có thể suy luận rằng độ nhạy của cảm biến e-FBG đạt được ~ 45 nm/RIU trong dải chiết suất 1,41-1,43 tương ứng với nồng độ ethanol từ 0% đến 14% v/v trong xăng RON 92. Hệ cảm biến quang này có thể đo nồng độ dung môi pha trộn xăng RON 92 với độ chính xác 0,2% v/v và 0,15% v/v đối với ethanol và methanol tương ứng. Giới hạn phát hiện của phép đo được tính bởi  $LOD = \frac{L}{QS}$  [17] và giá trị đạt được của nó là  $\sim 1,5 \times 10^{-4}$  RIU. Ở đây,  $S$  là độ nhạy của cảm biến,  $L$  là bước sóng của tín hiệu cảm biến và  $Q$  là hệ số phẩm chất của mode laser. Ngoài ra, độ dốc của các đường dịch chuyển bước sóng từ hỗn hợp ethanol và methanol là khác nhau, từ đó chúng ta có thể phân biệt được dung môi hữu cơ đưa vào trong xăng bởi cơ sở dữ liệu hỗn hợp riêng biệt.

Hình 8.b hiển thị kết quả thử nghiệm phát hiện nitrate trong nước ở dải nồng độ 0-50 ppm. Hình 8.b cho thấy sự gia tăng nồng độ nitrate trong môi trường nước dẫn đến bước sóng phát xạ dịch chuyển về vùng sóng dài. Giới hạn phát hiện của phép đo được ước tính ~ 4,5 ppm, giới hạn này gần với giá trị mà hệ cảm biến thu được bằng OSA độ phân giải cao [5] và thấp hơn nhiều so với mức nitrate tối đa cho phép trong nước uống nên hệ có tiềm năng ứng dụng lớn trong việc giám sát nước uống.

#### 4. KẾT LUẬN

Chúng tôi đã thiết kế và chế tạo thành công hệ cảm biến quang sợi sử dụng hai FBG tích hợp trong cấu hình laser sợi bùồng cộng hưởng vòng để đo chiết suất một số

dung dịch lỏng mà không cần sử dụng OSA. Hệ cảm biến này cung cấp cách tiếp cận mới cho các phép đo tại chỗ thời gian thực với độ chính xác và tính ổn định cao; ngoài ra, hệ còn cho thấy có nhiều ưu điểm như độ phân giải cao, thời gian đáp ứng nhanh, khả thi cho các ứng dụng cảm biến từ xa, độ lặp lại và khả năng tái sử dụng tốt nhờ tính năng chống ăn mòn của thủy tinh silica và việc làm sạch bề mặt e-FBG được thực hiện một cách dễ dàng. Các kết quả thực nghiệm cho thấy triển vọng của việc sử dụng hệ cảm biến này cho nhiều lĩnh vực khác nhau như nông nghiệp, công nghiệp, thực phẩm, nước uống, y tế, môi trường,... để cảnh báo và phòng tránh các nguy cơ độc hại.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Y. Yao, Z. Li, Y. Wang, S. Liu, Y. Dai, J. Gong and L. Wang (2017). Performance optimization design for a high-speed weak FBG interrogation system based on DFB laser, *Sensors*, 17(7), 1472.
- [2]. J. Cui, Y. Hu, K. Feng, J. Li and J. Tan (2015). FBG Interrogation Method with High Resolution and Response Speed Based on a Reflective-Matched FBG Scheme, *Sensors*, 15(7), 16516-16535.
- [3]. A. Zhang, Y. Wu, B. Yao, and Y. Gong (2015). Optimization Study on Graphene-Coated Microfiber Bragg Grating Structures for Ammonia Gas Sensing, *Photonic Sensors*, 5(1), 84-90.
- [4]. F. Xiang, G. Wang, Y. Qin, S. Yang, X. Zhong, J. Dai, M. Yang (2017). Improved performance of fiber Bragg hydrogen sensors assisted by controllable optical heating system, *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 29(15), 1233-1236.
- [5]. Thanh Binh Pham, Huy Bui, Huu Thang Le and Van Hoi Pham (2017). Characteristics of the fiber laser sensor system based on etched-Bragg grating sensing probe for determination of the low nitrate concentration in water, *Sensors*, 17(1), 7.
- [6]. G. Tsigaridas, D. Polyzos, A. Ioannou, M. Fakis, P. Persephonis (2014). Theoretical and experimental study of refractive index sensors based on etched fiber Bragg gratings, *Sensors and Actuators A: Physical*, 209, 9-15.
- [7]. R. P. Corotti, J. Thaler, H. J. Kalinowski, M. Muller, J. L. Fabris and R. C. Kamikawachi (2015). Etched FBG written in multimode fibers: sensing characteristics and applications in the liquid fuels sector, *J. of Microw. Optoelectron. and Electromagn. Appl.*, 14(1), 51-59.
- [8]. R. K. Musa, S. A. A. Taha, A. M. Hammadi (2017). Tipped fiber Bragg grating sensor for concentration measurements, *Int. J. Comput. Appl. Sci. IJOCAAS*, 2(3), 123-127.
- [9]. M. S. Ferreira, J. Bierlich, M. Becker, K. Schuster, J. L. Santos and O. Frazão (2014). Ultra-high sensitive strain sensor based on post-processed optical fiber Bragg grating, *Fibers*, 2(2), 142
- [10]. G. Wu, W. Chen, Y. Dai, J. Yang, X. Tan and H. Tian (2017). Application of a type of strain block FBG sensor for strain measurements of squeezing rock in a deep-buried tunnel, *Meas. Sci. Technol.*, 28(11), 115001.
- [11]. C. Zhao, Q. Jiang and Y. Li (2017). A novel biomimetic whisker technology based on fiber Bragg grating and its application, *Meas. Sci. Technol.*, 28(9), 095104.
- [12]. T. K. Subramaniam (2015). Erbium Doped Fiber Lasers for Long Distance Communication

- Using Network of Fiber Optics, *American Journal of Optics and Photonics*, 3(3), 34-37.
- [13]. W. W. Morey, G. Meltz, and W. H. Glenn (1989). Fiber optic Bragg grating sensors, *Fiber Optic and Laser Sensors VII*, 1169, 98-107.
- [14]. W. Balani and M. Saxena (2013). EDFA Gain Performance analysis at 2Gbits/sec in Optical Transmission System, *Int. J. of Multidiscip. and Current research*, 12-16.
- [15]. Van An Nguyen, Van Dai Pham, Thi Hong Cam Hoang, Huu Thang Le, Thu Trang Hoang, Quang Minh Ngo, Van Hoi Pham (2019). A quantitative analysis of the whispering-gallery-mode lasers in Er<sup>3+</sup>-doped silica glass microspheres towards integration in SOI slotted photonic crystal waveguides, *Opt. Comm.*, 440, 14-20.
- [16]. R. Gumenyuk, A. Poudel, T. Jouan, C. Boussard-Plédel, T. Niemi, And L. Petit (2017). Superluminescence and spectral hole burning effect in ultra-short length Er/Yb-doped phosphate fiber, *Opt. Mater. Express*, 7(12), 4358-4366.
- [17]. C. Liao, Q. Wang, L. Xu, S. Liu, J. He, J. Zhao, Z. Li, and Y. Wang (2016). D-Shaped fiber grating refractive index sensor induced by an ultrashort pulse laser, *Appl. Opt.*, 55(7), 1525-1529.

## RESEARCH AND DESIGN OF A SENSOR SYSTEM TO MEASURE THE REFRACTIVE INDEX OF SOME LIQUIDS USING FIBER BRAGG GRATING

Nguyen Van An<sup>1\*</sup>, Ngo Quang Minh<sup>2</sup>, Pham Thanh Binh<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Electronics, Electrical Engineering and Material Technology,  
University of Sciences, Hue University

<sup>2</sup> University of Science and Technology of Hanoi

<sup>3</sup> Institute of Materials Science, Vietnam Academy of Science and Technology

\*Email: ngvanan2009@husc.edu.vn

### ABSTRACT

Optical sensors have been studied and applied effectively to determine the concentration of toxins in liquid media by measuring the medium's refractive index. The optical sensor for measuring the refractive index of the medium operates based on the principle of wavelength shift of the optical signal when the refractive index of the medium changes. In this paper, we establish a fiber optic sensor system configuration based on the integration of fiber Bragg gratings (FBG) with the fiber ring laser structure of an Er<sup>3+</sup>-doped fiber to measure the refractive index of liquid solutions without any optical spectrum analyzer (OSA). The sensor system was experimentally verified to determine the mixing ratio of organic solvents in gasoline and the nitrate concentration in water samples. The experimental results show that the proposed configuration can be used to fabricate a sensor system with high sensitivity and repeatability, fast response, and low cost for applications in biochemical sensing.

**Keywords:** Fiber-optic sensor, Fiber Bragg grating, Fiber laser.