

# NGHIÊN CỨU, PHÂN TÍCH VÀ THIẾT KẾ MÔ PHÒNG CẤU TRÚC CÁCH TỬ BRAGG CHO BỘ LỌC XEN RỄ BƯỚC SÓNG

Trần Thị Thanh Thủy, Trương Minh Đức  
Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông

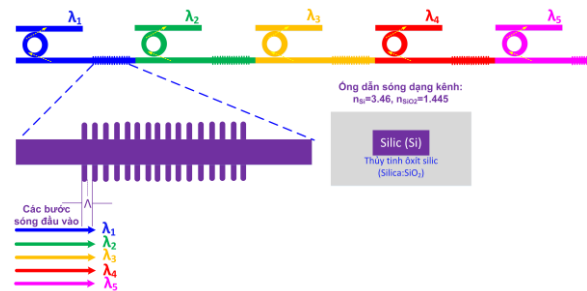
**Abstract**— Trong bài báo này, chúng tôi trình bày nguyên lý hoạt động về mặt lý thuyết và phương pháp mô phỏng số dựa trên lý thuyết ghép mode của cách tử nhiễu xạ Bragg ống dẫn sóng WGBG và nguyên lý phản xạ bước sóng cộng hưởng Bragg. Sau đó, chúng tôi trình bày một đề xuất thiết kế mô phỏng số và đánh giá đặc trưng quang học của một cấu trúc cách tử Bragg ống dẫn sóng kết hợp vi cộng hưởng vòng thông qua mô phỏng FDTD cho việc lọc các bước sóng DWDM. Kết quả đo lường thông qua mô phỏng cấu trúc cho thấy cách tử WGBG đạt hiệu suất cao 100% cùng băng thông FWHM luôn nằm trong khoảng cách kênh 0.8nm. Thêm vào đó, cấu trúc cộng hưởng vòng đề xuất có đặc tính truyền đạt hiệu suất cao (>86%). Những giá trị tốt như vậy có thể đưa cấu trúc thiết kế tiềm năng lớn cho ứng dụng làm các thiết bị tách ghép kênh mật độ cao trong các hệ thống thông tin quang DWDM.

**Keywords**— DWDM, cách tử Bragg ống dẫn sóng WGBG, mô phỏng số, CMT, FDTD, hệ số hiệu dụng.

## I. GIỚI THIỆU

Do sự gia tăng bùng nổ về số lượng thiết bị đầu cuối di động và sự phát triển nhanh chóng của các ứng dụng đa phương tiện và dịch vụ điện toán đám mây, nhu cầu về dung lượng truyền và băng thông của mạng quang tăng theo cấp số nhân. Công nghệ ghép kênh phân chia theo bước sóng (WDM) đã nổi lên như một giải pháp được sử dụng rộng rãi nhất để đáp ứng nhu cầu ngày càng tăng về băng thông [1]–[3]. Một thiết bị quan trọng trong mạng WDM là bộ ghép kênh thêm/thả quang (OADM). Nó có thể loại bỏ/thêm một cách có chọn lọc một hoặc nhiều kênh bước sóng tại một nút mạng mà không cần thực hiện chuyển đổi quang-điện-sang-quang (OEO) đắt tiền.

Cách tử Bragg đã được sử dụng trong nhiều ứng dụng khác nhau, chẳng hạn như bộ lọc, bù tán sắc, định hình xung [4], v.v.. Gần đây, sự tích hợp của cách tử Bragg ống dẫn sóng trên nền tảng silicon-on-insulator (SOI) đã và đang thu hút sự quan tâm nghiên cứu ngày càng tăng. Cách tử Bragg băng thông hẹp rất hữu ích trong nhiều ứng dụng, chẳng hạn như bộ lọc kênh ghép kênh phân chia theo bước sóng (WDM). Để hạn chế một băng thông hẹp, cần phải xây dựng các lưới Bragg dài hơn với khớp nối yếu. Cách tử Bragg ống dẫn sóng dài nano có sự chông chéo mạnh mẽ của chế độ quang học với sự nhiễu loạn trên các thành bên,



Hình.1. Cấu trúc của một cách tử Bragg ống dẫn sóng được thiết kế để lọc 5 bước sóng trong dải C-band của lưới ITU-T.G694.1.

dẫn đến hệ số ghép nối lớn, ngay cả khi biên độ uốn nếp cách tử chỉ là vài nanomet. Để giảm hệ số ghép nối, nhiễu loạn chiết suất theo chu kỳ không gian được đặt ở xa ống dẫn sóng dài [5] hoặc được xây dựng trên phiên của ống dẫn sóng sườn [6]. Vì chúng là thiết bị hai công nên cần có bộ ghép chênh lệch đa chế độ  $2 \times 2$  [7], nhánh Y không đối xứng [8] hoặc bộ ghép đoạn nhiệt [9] để loại bỏ phản xạ Bragg. Tuy nhiên, rất khó để đạt được chế tạo chính xác như vậy.

Bài báo này trình bày nghiên cứu hoạt động của cách tử Bragg ống dẫn sóng thẳng dựa trên điều biến kính lọc *apodization* chỉ bằng phương pháp hình học sử dụng nền vật liệu SOI (silicon-on-insulator) tương thích với công nghệ chế tạo vi mạch điện tử tích hợp cỡ lớn VLSI (very large scale integrated circuits). Sau đó, bài báo đề xuất thiết kế cách tử nhiễu xạ Bragg ống dẫn sóng kết hợp các bộ cộng hưởng vòng để tạo ra bộ lọc bước sóng DWDM theo tiêu chuẩn ITU-T G.694.1 cho kỹ thuật ghép kênh DWDM của thông tin quang thông qua các công cụ thiết kế cấu trúc quang tử GratingMode và FullwaveFDTD của phần mềm thương mại hóa Rsoft.

## II. NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG CỦA CÁCH TỬ BRAGG ỐNG DẪN SÓNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Một cách tử Bragg ống dẫn sóng WGBG (*waveguide Bragg grating*) bao gồm một cấu trúc điều chế có tính chu

Tác giả liên hệ: Trần Thị Thanh Thủy,

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

Đến tòa soạn: 21/11/2022, chỉnh sửa: 15/12/2022, chấp nhận đăng: 21/12/2022.

kỳ tuần hoàn của hệ số chiết suất dọc theo lõi của sợi trong một sợi quang đơn mode hoặc là điều chế độ rộng chạm nổi bờ viền (*relief*) kiểu răng lược với một khẩu độ kính lọc (*apodization*) có hình dạng theo kiểu đồng nhất (*uniform*) hoặc theo kiểu hình cosin (*cosine*). Hình.1 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 Hình.1, cách tử Bragg ống dẫn sóng có chiều rộng  $w$  cỡ  $0.2\div 0.5\mu\text{m}$  và chiều cao  $220\text{nm}$  (hình cắt theo phương truyền được thể hiện ở mặt cắt của Hình.1 được chế tạo từ vật liệu silic và có lớp vỏ (*cladding*) được chế tạo từ vật liệu silica ( $\text{SiO}_2$ ). Chiết suất lớp lõi và vỏ tương ứng  $n_{\text{Si}} \approx 3.465$  và  $n_{\text{SiO}_2} \approx 1.45$  ở bước sóng  $1550\text{ nm}$ . 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  $\Lambda \approx$  cỡ  $0.2\div 0.5\mu\text{m}$ . Lớp kính lọc (*apodization*) được thiết kế với răng cưa hình chữ nhật. Toàn bộ cấu trúc dẫn sóng được chế tạo từ phiên SOI tiêu chuẩn (*standard SOI wafer*) cung cấp cho công nghệ chế tạo CMOS của VLSI. 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  $l_B$ , phổ truyền đi về phía đầu ra là phổ thiếu hụt đi phần phổ với bước sóng  $l_B$ .

Theo luật Bragg, cách tử nhiễu xạ Bragg dựa trên ống dẫn sóng điện môi hay bán dẫn thuần nhất (như silic chẳng hạn) sẽ chỉ phản xạ một bước sóng riêng được gọi là bước sóng Bragg và được xác định bởi hệ thức:

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

Ở đây  $\Lambda$  là chu kỳ cách tử và  $n_{\text{eff}}$  là hệ số chiết suất hiệu dụng của lõi ống dẫn sóng của cách tử quang học và  $m=1,2,3,\dots$  là bậc nhiễu xạ, bậc cộng hưởng hay bậc cách tử. Nguyên lý hoạt động của cách tử Bragg ống dẫn sóng cũng tương tự cách tử Bragg sợi FBG (*fiber Bragg grating*)

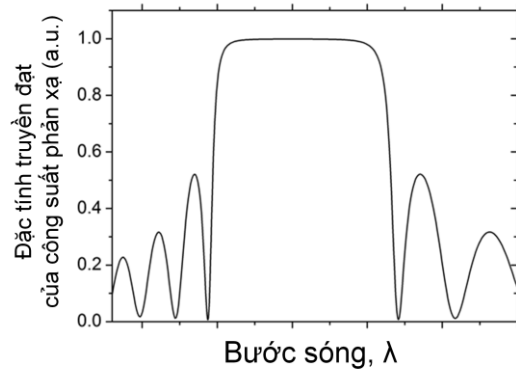
Khoảng cách bước sóng giữa cực tiểu đầu tiên (xem Hình.2), hoặc băng thông  $\Delta\lambda$  là (trong giới hạn cách tử mạnh) với cấu trúc cách tử điều chế theo hệ số chiết suất lõi (là hàm biến đổi) được đưa ra bởi hệ thức:

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

Với trường hợp WBG theo kiểu điều chế điều chế theo độ rộng cạnh theo chiều rộng hoặc điều chế theo độ khác của chiều cao thì băng thông  $\Delta\lambda$  được xác định theo lý thuyết ghép mode bởi [11][12]:

$$\Delta\lambda = \frac{l_B^2}{pn_g} \sqrt{k^2 + (p/L)^2}, \quad k = \frac{\Gamma(n_1^2 - n_2^2)}{l_0 n_{\text{eff}}}$$

Ở đây,  $l_B$  là bước sóng cộng hưởng (bị phản xạ) theo luật Bragg,  $n_g$  là vận tốc nhóm của sóng lan truyền trong cách tử,  $k$  là hệ số ghép (*coupling coefficient*) của cách tử,  $L$  là chiều dài của cách tử. Độ mạnh của hệ số  $k$  phụ thuộc vào hệ số xếp chồng quang hay cũng là sự không phù hợp pha  $\Gamma$ . Với sóng theo phân cực TE thì giải hệ phương trình Maxwell của sóng dẫn trong cách tử ống dẫn sóng chúng ta thu được phương trình siêu việt (*transcendental equation*) là:



Hình.2. Đặc tính độ phản xạ (theo công suất) của phổ phản xạ là hàm của bước sóng: phổ đạt đỉnh tại bước sóng Bragg.

$$v \tan v = \left( \frac{V^2}{4} - v^2 \right)^{1/2}, \quad \text{với } v = \frac{w}{2} (k_0^2 n_1^2 - b^2)^{1/2} \quad (4)$$

Ở đây,  $k_0 = \frac{2p}{l_0}$  là số sóng trong không gian tự do với bước sóng hoạt động  $l_0$ ,  $V$  được gọi là tham số  $V$  được xác định bởi:  $V = k_0 w (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ ,  $w$  là độ rộng của phần lõi cách tử. Sự phản xạ  $R$  của ống dẫn sóng tại bước sóng cộng hưởng Bragg được xác định bởi:

$$R = \frac{k^2 \sinh^2 g L}{g^2 \cosh^2 g L + \frac{\Gamma^2}{4} \sinh^2 g L}, \quad \text{ở đây } g^2 = k^2 + \frac{\Gamma^2}{4} \quad (5)$$

Ở đây, hệ số ghép tại bước sóng Bragg xác định bởi:

$$k = k_B = \frac{2(n_1 - n_2)}{l_B} \quad (6)$$

Lúc này, hệ số không phù hợp pha  $\Gamma$  được xác định bởi:

$$\Gamma = 2b - K \quad (7)$$

Với  $b$  là hằng số truyền sóng,  $K$  là hệ số điều chế bề rộng cách tử (*modewidth*).

Chú ý rằng cách tử phản xạ ánh sáng trên một phần nhỏ nanomet vì  $l_B$  thường khoảng  $1\mu\text{m}$ . Do đó, tính chất này cũng làm cho cách tử rất hữu ích trong các hệ thống viễn thông cáp quang.

Hình.2 thể hiện sự phụ thuộc hàm theo bước sóng của công suất bị phản xạ thu được từ biểu thức (5). Có thể thấy rằng, công suất phản xạ cực đại tại bước sóng cộng hưởng Bragg  $l_B$ . Búp sóng chính có độ rộng băng thông  $\Delta\lambda$  được xác định từ hệ thức (2). Với các cấu trúc cách tử có hình dáng hình học khác nhau về kiểu dáng hình dạng của các thành bên như kiểu dáng chạm nổi răng cưa cách tử là hình chữ nhật hay hình sine (*relief*), kiểu kính lọc (*apodized type*) khác nhau, khác nhau theo độ sâu khác nhau đối với cách tử Bragg ống dẫn sóng khác nhau, bán kính lõi (nếu ống dẫn sóng lõi là hình trụ tròn thay vì hình chữ nhật), 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  $R = P_B(l_B)$  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 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  $10 \cdot \log_{10}(0.5) \approx 3$ ).

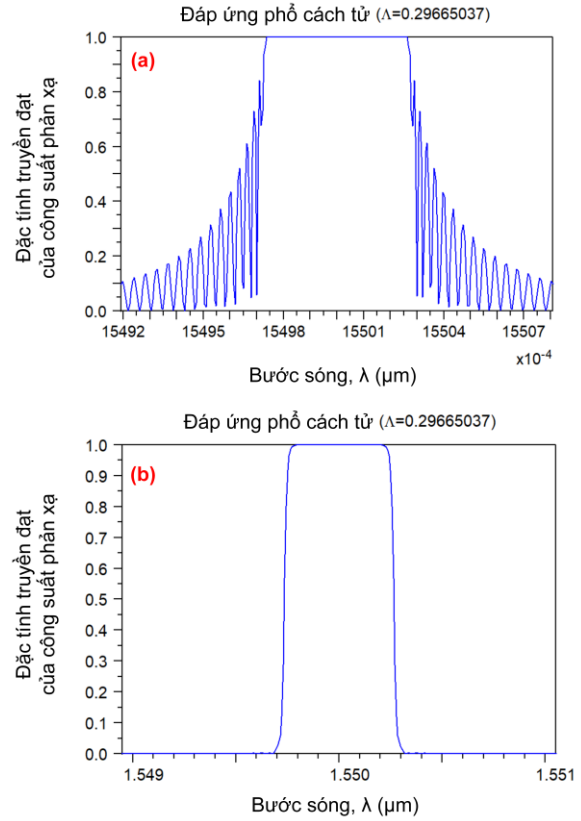
Chúng ta đã trình bày nguyên lý hoạt động của cấu trúc cách tử Bragg ống dẫn sóng (WGBG) đã được trình bày theo phân tích lý thuyết về mặt toán học. Tuy nhiên, giống như trường hợp truyền sóng trong ống dẫn sóng quang, cách thức hành xử của tín hiệu quang truyền qua ống dẫn sóng tuân theo những đặc trưng 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 WGBG, 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 [10],[11]:

$$\frac{da_p(z)}{dz} = i \sum_{m=1}^M \left\{ \begin{aligned} &(k_{p,m}^t + k_{p,m}^z) a_m(z) e^{i(b_m - b_p)z} \\ &+ (k_{p,m}^t - k_{p,m}^z) b_m(z) e^{-i(b_m + b_p)z} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

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

Trong đó,  $\beta$  là hằng số lan truyền,  $a$  và  $b$  tương ứng biểu diễn cho biên độ của mode tiến và lùi theo phương truyền



Hình.3. Mô phỏng số cho phổ phản xạ của cấu trúc WGBG theo bước sóng trong dải phổ bước sóng của số 1550nm với kiểu chạm khắc viên (relief) khác nhau cùng chu kỳ (duty circle) là 50% cho: (a) kiểu hình chữ nhật và (b) kiểu hình cosine.

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 ngụ 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:

$$k_{p,m}^t = \frac{w e_0}{2} \frac{\int_S [n_3^2(x, y, z) - n_2^2(x, y)] \mathbf{e}_{t,p}(x, y) \cdot \mathbf{e}_{t,m}(x, y) dS}{\int_S \mathbf{e}_{t,p}(x, y) \times \mathbf{h}_{t,p}(x, y) dS} \quad (10)$$

$$k_{p,m}^z = \frac{w e_0}{2} * \frac{\int_S [n_3^2(x, y, z) - n_2^2(x, y)] \frac{n_2^2(x, y)}{n_3^2(x, y, z)} \mathbf{e}_{z,p}(x, y) \cdot \mathbf{e}_{z,m}(x, y) dS}{\int_S \mathbf{e}_{t,p}(x, y) \times \mathbf{h}_{t,p}(x, y) dS} \quad (11)$$

**Bảng.1. Các tham số thiết kế thu được từ mô phỏng số cho bộ lọc DWDM.**

Tần số trung tâm (THz)	Bước sóng trung tâm cần lọc (nm)	Hệ số hiệu dụng	Chu kỳ cách tử $\Lambda$ (nm)
193	1553.32	2.6098	297.59
193.1	1552.52	2.6105	297.36
192.2	1551.72	2.6112	297.13
193.3	1550.92	2.6118	296.91
193.4	1550.12	2.6124	296.68
193.5	1549.32	2.6130	296.46

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:

$$\frac{d}{dz} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = i\mathbf{C} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \quad (12)$$

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:

$$\mathbf{C} = \mathbf{U}^{-1} \mathbf{D} \mathbf{U} \quad (13)$$

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:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \end{pmatrix}_{z_1} = \mathbf{T} \begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \end{pmatrix}_{z_2} \quad (14)$$

Phần phản xạ được định nghĩa là [12]:

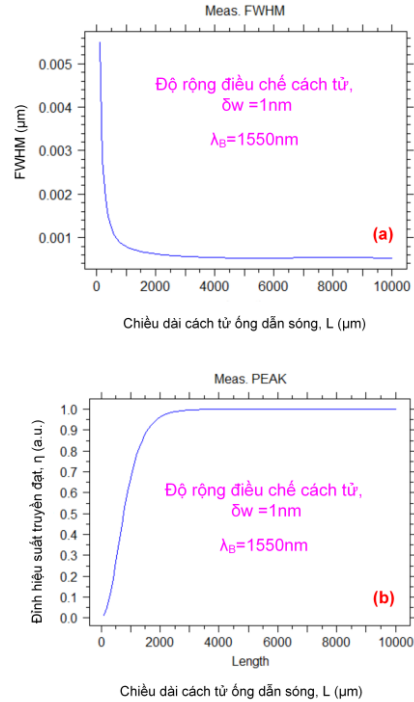
$$r(z, d) = \frac{v(z, d)}{u(z, d)} \quad (15)$$

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 [12]:

$$k(z) = \frac{2i}{p} \int_{-\infty}^{\infty} r^*(z, d) dd \quad (16)$$

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

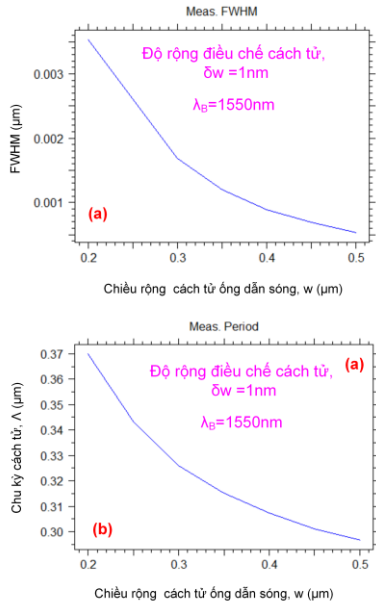


Hình.4. Mô phỏng đặc tính phổ phản xạ và bước sóng cộng hưởng Bragg tại 1550nm với độ rộng apodization là  $\Delta w = 1\text{nm}$ , độ rộng cách tử  $w = 0.5\mu\text{m}$  là hàm của chiều dài cách tử cho: (a) độ rộng FWHM và (b) định hiệu suất truyền đạt.

### III. THIẾT KẾ MÔ PHỎNG CẤU TRÚC WGBG CHO CHỨC NĂNG LỌC BƯỚC SÓNG DWDM VÀ ĐÁNH GIÁ ĐẶC TÍNH QUANG

Trong phần này, một thiết kế mô phỏng số cho một bộ lọc bước sóng dựa trên cấu trúc WGBG được đề xuất và mô phỏng số. Đầu tiên, chúng ta xét cấu trúc WGBG là một cấu trúc ống dẫn sóng dạng kênh (channel waveguide) hình chữ nhật với lõi silic có độ rộng  $w = 0.5\mu\text{m}$  và có lớp vỏ bao quanh là thủy tinh silica (silic đi ô xít  $\text{SiO}_2$ ). Chiết suất lớp lõi và vỏ lần lượt có giá trị là 3.465 và 1.45 tại giá trị bước sóng ở vùng 1550nm. Cách tử được tạo ra theo kiểu khắc bằng chùm điện tử (electron beam lithography) hoặc tia cực tím rất sâu EUV (extremely ultraviolet photolithography) theo chu kỳ biến điệu chạm khắc viền là  $\Delta w = 1\text{nm}$ . Chu kỳ cách tử được giữ cố định là  $\Lambda = 0,005\mu\text{m}$  với các vạch cách tử hình sine (grating profile). Cách tử được tạo dạng theo khâu độ lọc (apodized apature) theo kiểu đồng nhất. Cách tử cũng có thể điều chế theo kiểu điều biến chiết suất lõi bằng cách pha tạp germanium vào lõi silic. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, chúng ta chỉ xét cấu trúc cách tử được điều biến hình học theo kiểu thuần nhất về hình học. Điều này là tương thích với tiến trình CMOS chế tạo ống dẫn sóng từ các phiên SOI tiêu chuẩn (dày 220nm lõi Si trên nền BOX bằng thủy tinh ô xít  $\text{SiO}_2$  dày 3 $\mu\text{m}$  và lớp chất nền dày 2mm) của công nghệ chế tạo chip vi mạch điện tử cỡ lớn VLSI (very large scale integrated circuit).

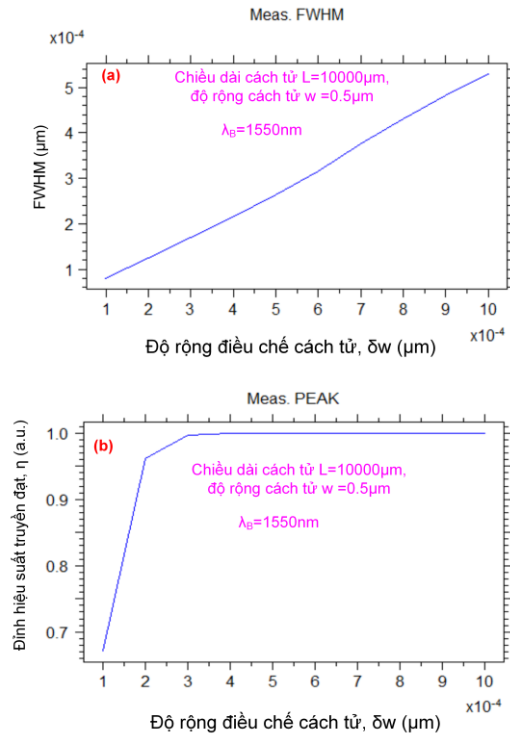
Sử dụng công cụ mô phỏng GratingMode của phần mềm thương mại hóa Rsoft, chúng ta khảo sát đặc tính phổ và



Hình.5. Mô phỏng đặc tính phổ FWHM phân xạ và chu kỳ cách tử tại bước sóng phản xạ cộng hưởng Bragg ở 1550nm với chiều rộng apodization  $\Delta w = 1\text{nm}$ , chiều dài  $L = 10000\mu\text{m}$  theo sự phụ thuộc hàm số của chiều rộng cách tử  $w$  cho: (a) FWHM và (b) chu kỳ cách tử  $\Lambda$ .

bước sóng cộng hưởng của nhiễu xạ Bragg của cấu trúc đã đề xuất. Các tham số mô phỏng được thiết lập độ rộng chu kỳ cách tử (*grating pitch*)  $\Lambda$  cỡ từ  $0.2\mu\text{m}$  đến  $0.5\mu\text{m}$ , độ sâu điều chế cách tử là  $\Delta w = 1\text{nm}$  kiểu chạm viền là hình chữ nhật hoặc hình sine với độ rộng chu kỳ nhiệm vụ (*duty cycle*) là 50%, độ rộng thân lõi chính của cách tử ống dẫn sóng là  $w = 0.5\mu\text{m}$  với chiều cao lõi Si là  $220\text{nm}$  trong cơ chế ống dẫn sóng dạng kênh sẽ chỉ hỗ trợ hoạt động đơn mode của trạng thái phân cực điện ngang ( $\text{TE}_0$  mode) và chiều dài ống cách tử dẫn sóng WBGB được xét cỡ lớn, dài từ  $100\mu\text{m}$  trở lên. Hình 3(a,b) cho thấy khi chiều dài cách tử  $L = 10000\mu\text{m}$ , với hai kiểu apodization hình chữ nhật và hình cosine thì để bước sóng cộng hưởng để có phản xạ Bragg tại  $\lambda_B = 1.55\mu\text{m}$  thì hệ số hiệu dụng đều có giá trị như nhau, và do vậy, từ công thức (1) ta thu được chu kỳ cách tử tương ứng điều kiện phản xạ cộng hưởng Bragg là khoảng  $0.2966\mu\text{m} = 296.6\text{nm}$  với hiệu suất tại bước sóng Bragg vẫn là  $P_B(\lambda_B) = 100\%$  nhưng độ rộng FWHM tương ứng với kiểu apodization hình chữ nhật lớn hơn hình cosine một chút do xuất hiện nhiều búp sóng phụ rất hẹp hơn dồn sát cần búp chính đối với kiểu hình chữ nhật mà đối với trường hợp kiểu hình cosine thì hình dạng đáp ứng phổ lại mịn và không xuất hiện các búp cộng hưởng yếu phụ ở cạnh bên phổ bước sóng trung tâm.

Tiếp theo, chúng ta xét khi độ rộng điều chế răng cách tử  $\Delta w = 1\text{nm}$ , bước sóng phản xạ Bragg mong muốn là  $1550\text{nm}$ , chúng ta khảo sát thông qua mô phỏng số từ công cụ GratingMod để đo lường đặc tính độ rộng đầy đủ tại nửa cực đại FWHM và hiệu suất truyền đạt tại đỉnh tương ứng bước sóng trung tâm của cộng hưởng Bragg theo chiều dài cách tử  $L$ . Hình.4(a,b) cho thấy khi chiều dài cách tử tăng lên thì FWHM nói chung giảm nhanh và hiệu suất truyền đạt tăng nhanh. Đến khi chiều dài đạt một giá trị ngưỡng nhất định cỡ  $2000\mu\text{m} = 2\text{mm}$  thì FWHM và đỉnh hiệu suất truyền đạt (gần 100%) được giữ hầu như không đổi, tức đạt



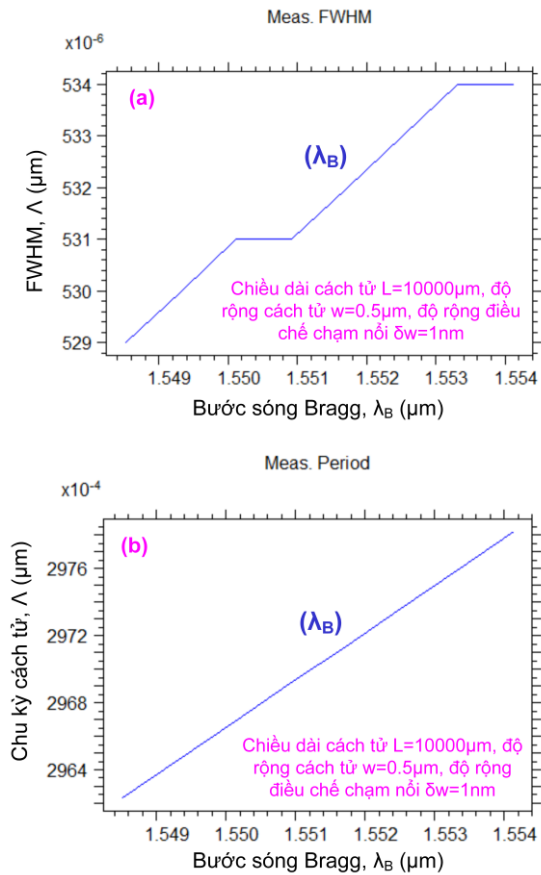
Hình.6. Hiệu năng quang học theo sự phụ thuộc hàm vào độ sâu điều chế hệ số apodization  $\Delta w$  cho: (a) FWHM và (b) đỉnh hiệu suất truyền đạt tại bước sóng Bragg.

bảo hòa. Trong bài báo này, để phù hợp với việc phối ghép với các vòng vi cộng hưởng nhằm lọc các bước sóng DWDM ra riêng rẽ, chiều dài cách tử cho mỗi phần tách mỗi bước sóng được lựa chọn là dài  $L = 10000\mu\text{m} = 10\text{mm}$ .

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 các bước sóng riêng rẽ trong vùng cửa sổ thông tin quang thứ ba (*third telecom window*) tại một số bước sóng theo tiêu chuẩn lưới tần số và bước sóng trung tâm của khuyến nghị ITU-T.G694.1 với độ rộng kênh (*channel spacing*)  $\Delta\lambda = 0.8\text{nm}$  thì mô phỏng số từ công cụ GratingMod tìm ra giá trị hiệu dụng và tương ứng là chu kỳ cách tử, như thể hiện các giá trị kết quả tương ứng được trình bày trên Bảng.1.

Tiếp theo, chúng ta khảo sát và đánh giá đặc tính quang học của cấu trúc cách tử đã được đề xuất thiết kế. Hình.5 thể hiện các kết quả mô phỏng khi bước sóng phản xạ mong muốn  $\lambda_B = 1.55\mu\text{m}$ , chiều dài  $L = 10000\mu\text{m}$ , độ rộng điều chế viền răng cưa (*apodization*)  $\Delta w = 1\text{nm}$  theo vài giá trị của các biến số chiều rộng cách tử  $w$  được khảo sát. Kết quả cho thấy, khi độ rộng  $w$  tăng từ  $0.2\mu\text{m}$  đến  $0.5\mu\text{m}$ , độ rộng băng thông FWHM giảm dần từ  $35\text{nm}$  xuống khoảng  $0.5\text{nm}$  (nằm trọn trong khoảng cách kênh  $\Delta\lambda = 0.8\text{nm}$  của khuyến nghị ITU-T.G694.1), như được thấy ở Hình.5(a) và chiều rộng của chu kỳ cách tử  $\Lambda$  cũng giảm dần như được thấy trên Hình.5(b). Cũng cần lưu ý rằng, tại chiều dài được xét là  $10000\mu\text{m}$ , hệ số công suất đỉnh tại bước sóng phản xạ Bragg đạt gần như 100%.

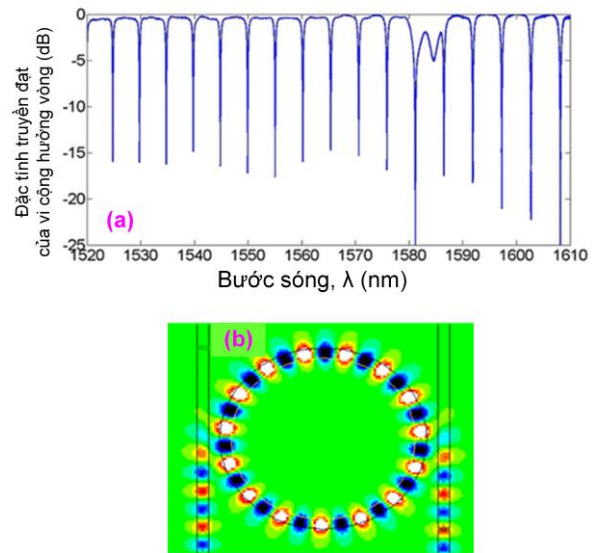
Bên cạnh đó, chúng ta khảo sát các đặc trưng quang học



Hình.7. Mô phỏng đặc tính phổ FWHM phân xạ và chu kỳ cách tử tại bước sóng phân xạ cộng hưởng Bragg ở 1550nm với chiều dài L=10000μm, độ rộng cách tử w=0.5μm và chiều rộng apodization δw=1nm theo sự phụ thuộc hàm của đáp ứng phổ bước sóng chứa đựng các bước sóng Bragg cần thiết kế cho: (a) FWHM và (b) chu kỳ cách tử Λ.

thông qua độ rộng điều chế δw (apodization) của cách tử. Hình.6 thể hiện kết quả mô phỏng của các đặc trưng quang học của cấu trúc WGBG đã đề xuất tại bước sóng Bragg 1550nm và chiều dài cách tử L=10000μm. Hình.6(a) thể hiện FWHM tăng theo sự tăng với độ dốc gần tuyến tính theo hàm của δw vì bậc của cách tử được thiết kế là bậc một. Hình.6(b) cho thấy công suất đỉnh cũng tăng nhanh khi δw tăng từ 0.1nm đến 0.3nm thì đạt đỉnh 100% và khi δw vượt qua 0.3nm, đỉnh công suất tại bước sóng phản xạ Bragg đạt bão hòa 100%.

Đáp ứng phổ của một vi mạch hay thiết bị quang tử là rất quan trọng vì nó thể hiện đặc tính động của hệ thống. Chúng ta nghiên cứu thông qua mô phỏng số bằng lý thuyết ghép mode CMT (coupled mode theory) đối với cách tử theo sự phụ thuộc vào phổ của bước sóng được khảo sát trong phổ băng C của các bước sóng trong lưới của ITU-T.G694.1 và khoảng cách kênh quét là 0.8nm cùng một số tham số thiết kế giữ cố định như: L = 10000μm, w = 0.5μm và δw = 1nm. Hình.7(a) cho thấy FWHM tăng theo sự tăng của bước sóng với một tỷ lệ gần tuyến tính trong dải bước sóng được xét ở Bảng.1. Chúng ta có thể thấy FWHM tăng nhẹ nhưng trong dải bước sóng DWDM được thiết kế và sử dụng thì vẫn nhỏ hơn khoảng cách kênh Δλ=0.8nm. Cũng vậy, Hình.7(b) cho thấy rằng chu kỳ cách tử tăng tỷ lệ tuyến tính theo bước sóng Bragg cần phân xạ. Điều này có được là bởi vì chúng ta thiết kế cấu trúc bậc nhiều xạ trong cách tử là bậc một và trong một dải phổ băng C, với



Hình.8. Mô phỏng FDTD cho cấu trúc rẽ bước sóng 1550.92 qua ống dẫn sóng cộng hưởng vòng với chiều rộng các ống dẫn sóng w=0.5μm, khoảng cách ghép giữa ống dẫn sóng thẳng và vòng là g=150nm, bán kính vòng r=3.74μm.

ống dẫn sóng có bề rộng khá lớn w=0.5μm có đáp ứng phổ rộng với chiết suất hiệu dụng (n<sub>eff</sub>) sẽ giữ giá trị gần như không đổi trong khoảng rộng từ 1525nm÷1625nm (chứa băng C+L của cửa sổ bước sóng thông tin quang thứ ba),

do đó mà từ hệ thức (1) với  $l_B = \frac{2n_{eff}\Lambda}{m}$  chúng ta sẽ thu được đặc tính tuyến tính của Λ theo đáp ứng bước sóng.

Cuối cùng, trong một kịch bản ứng dụng để lọc các bước sóng phản xạ ra các kênh riêng rẽ ở các ống dẫn sóng đơn mode riêng rẽ, chúng ta sử dụng cơ cấu cộng hưởng vòng kết hợp với cấu trúc cách tử để tách riêng rẽ từng bước sóng một. Theo lý thuyết về cộng hưởng vòng thì ghép mode giữa ống dẫn sóng thẳng và một vi vòng (bán kính r) với độ rộng ống dẫn sóng bằng nhau (cả về chiều rộng và chiều cao trong cấu trúc ống dẫn sóng dạng kênh) thì điều kiện xảy ra cộng hưởng vòng khi có sự phù hợp về moment của sóng dẫn bởi [13]:

$$m\lambda_m = 2\pi r n_{eff} \quad (17)$$

Ở đây, m là số mode dẫn của vi vòng, λ<sub>m</sub> tương ứng là bước sóng cộng hưởng ứng với mode bậc m, r là bán kính của vi vòng, n<sub>eff</sub> là chiết suất hiệu dụng của vi vòng tương ứng với khi bước sóng là λ<sub>m</sub>, nó phụ thuộc vào chiều rộng ống dẫn sóng, khoảng cách hở g (gap) ghép nối giữa ống dẫn sóng thẳng và ống dẫn sóng vi vòng.

Theo lý thuyết về ống dẫn sóng vi cộng hưởng vòng, một cấu trúc vi cộng hưởng vòng gồm có một vòng cộng hưởng là ống dẫn sóng hình nhẫn vòng (ring resonator) được ghép với hai ống dẫn sóng thẳng định hướng song song bởi khoảng hở (gap) lần lượt là g<sub>1</sub> và g<sub>2</sub> với hệ số ghép do cảm ứng điện trường lần lượt là k<sub>1</sub> và k<sub>2</sub>, hệ số suy hao của vi vòng do tán xạ uốn cong và hấp thụ là α, hệ số suy hao chèn do ống dẫn sóng thẳng định hướng là γ và bán kính của vi

cộng hưởng vòng là  $r$ . Khi đó, hàm truyền đạt của trường đầu rẽ đầu ra (drop port) và đầu vào (input port) được xác định bởi hệ thức [14]:

$$\frac{E_d}{E_i} = \frac{-\sqrt{k_1}\sqrt{k_1}Dc \exp(jf)}{1 - \sqrt{1-k_1}\sqrt{1-k_1}c^2 \exp^2(jf)} \quad (18)$$

Trong đó,  $D = (1-g)^{1/2}$ ,  $c = D \cdot \exp(-aL/4)$ ,  $L = 2pr$ ,  $f = 2Lp n_{eff} / l$ ,  $\lambda$  là bước sóng hoạt động trong ống dẫn sóng.

Trong điều kiện thiết kế đối xứng, chúng ta xác định  $g_1 = g_2 = g$ , khi đó do y hết nhau về mặt cấu tạo và tính đối xứng hình học,  $k_1 = k_2 = k$ . Các phương trình trên giúp thiết kế bộ cộng hưởng vòng như một công tắc và giúp tìm ra giá trị tối ưu của các tham số khác nhau.

Đầu tiên, bằng cách sử dụng mô phỏng FTDT với độ rộng ống dẫn sóng là  $w = 500\text{nm}$ ,  $g = 150\text{nm}$ , chúng ta thay đổi bán kính  $r$  cỡ  $3-4\mu\text{m}$  để tìm ra bước sóng cộng hưởng tại  $\lambda = 1550.92\text{nm}$  với giá trị bán kính được tìm thấy bởi mô phỏng FDTD là  $r = 3.74\mu\text{m}$ . Phổ truyền dẫn (transmission) theo sự phụ thuộc bước sóng được của cấu trúc ghép vi vòng để lọc bước sóng đơn trong dải DWDM đã chọn tương ứng với lọc bước sóng  $\lambda = 1550.92\text{nm}$  được trình bày trên Hình.8(a) và sự truyền mẫu đường bao điện trường (contour map) như được thể hiện trên Hình.8(b). Hình.8(b) cho thấy đặc tính truyền dẫn của cộng hưởng vòng trong dải bước sóng băng C vùng cửa sổ 1550nm có hiệu suất cao khi mức suy hao thấp hơn 0.3dB. Bằng cách tương tự như vậy, khi ta điều chỉnh các giá trị của  $r$  khác sẽ lần lượt tìm ra bán kính thích hợp điều kiện cộng hưởng với các bước sóng khác mà đã được liệt kê như trên Bảng.1 để tách ra hoàn toàn các bước sóng còn lại. Các giá trị được tìm thấy bởi mô phỏng FDTD cho vi cộng hưởng vòng được trình bày như các kết quả ở Bảng.2. Các kết quả cho thấy mức suy hao do cộng hưởng vòng chỉ trong giới hạn phạm vi khoảng từ 0.52dB đến 0.65dB, tương ứng với hiệu suất kém nhất là 86% (suy hao 0.65dB) đến khoảng 89% là có thể ứng dụng được trong thực tế khi thiết kế chế tạo các bộ ghép kênh quang xen kẽ các bước sóng trong dải ITU-T. G964.1. Như vậy, việc lọc các bước sóng DWDM khi sử dụng cấu trúc cách tử Bragg ống dẫn sóng kết hợp với các vi cộng hưởng vòng đã được hoàn tất.

Các kết quả nghiên cứu bằng phương pháp tương tự cũng có thể áp dụng cho việc thiết kế các bộ lọc các bước sóng xen kẽ với phổ bước sóng hoạt động ở vùng cửa sổ thông tin quang thứ hai (phổ 1310nm).

### KẾT LUẬN

Bài báo này trình bày nguyên lý hoạt động của cách tử nhiễu xạ Bragg ống dẫn sóng và đề xuất thiết kế mô phỏng số một cấu trúc WGBG ứng dụng cho lọc các bước sóng DWDM để tạo ra các bộ ghép/phân kênh phân chia theo bước sóng mật độ cao với khoảng cách kênh là  $\Delta\lambda = 0.8\text{nm}$ . Kết quả thiết kế và mô phỏng bằng phương pháp CMT cho thấy cách tử có thể hoạt động với hiệu suất phân xạ theo điều kiện cộng hưởng Bragg đạt hiệu suất cao 100% với FWHM luôn nằm trong khoảng  $\Delta\lambda$  và kết hợp phương pháp mô phỏng FTDT cho cấu trúc vi cộng hưởng vòng để tạo ra các mạch chọn lọc bước sóng DWDM thích hợp. Cấu trúc thiết kế đề xuất do vậy có tiềm năng ứng dụng cho hệ thống DWDM với các bước sóng hoạt động ở vùng cửa sổ 1550nm và theo tiêu chuẩn lưới  $\Delta\lambda = 0.8\text{nm}$  phù

**Bảng.2. Các tham số thiết kế vi cộng hưởng vòng thu được từ mô phỏng số FDTD cho bộ lọc xen kẽ DWDM.**

Tần số trung tâm (THz)	Bước sóng trung tâm cần lọc (nm)	Hệ số hiệu dụng	Bán kính vi cộng hưởng vòng ( $\mu\text{m}$ )	Suy hao truyền đạt (dB)
193	1553.32	2.6098	3.65	0.51
193.1	1552.52	2.6105	3.69	0.54
192.2	1551.72	2.6112	3.72	0.56
193.3	1550.92	2.6118	3.74	0.58
193.4	1550.12	2.6124	3.76	0.61
193.5	1549.32	2.6130	3.77	0.65

hợp với khuyến nghị ITU-T.G.694.1. Mở rộng ra, nguyên lý cũng áp dụng được để tách các bước sóng DWDM mật độ cao hơn với khoảng cách kênh nhỏ hơn như  $\Delta\lambda = 0.4\text{nm}$  cho ứng dụng vào các hệ thống thông tin ghép kênh DWDM dung lượng cao.

### LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông trong đề tài có mã số 14 -HV-2022-VT1

### REFERENCES

- [1] G. C. Mandal and A. S. Patra, "High capacity hybrid WDM/TDM-PON employing fiber-to-the-home for triple-play services with 128 ONUs," *J. Opt.*, vol. 46, no. 3, pp. 347–351, 2017, doi: 10.1007/s12596-017-0410-5.
- [2] S. Ullah *et al.*, "Optical Multi-Wavelength Source for Single Feeder Fiber Using Suppressed Carrier in High Capacity LR-WDM-PON," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 70674–70684, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2880426.
- [3] F. Donati Simões, D. Moutinho Pataca, and M. Lacerda Rocha, "Design of a comb generator for high capacity coherent-WDM systems," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 10, no. 3, pp. 1690–1696, 2012, doi: 10.1109/TLA.2012.6222572.
- [4] J. Chen, B. Liu, and H. Zhang, "Review of fiber Bragg grating sensor technology," *Front. Optoelectron. China*, vol. 4, no. 2, pp. 204–212, 2011, doi: 10.1007/s12200-011-0130-4.
- [5] H. Y. D. Yang and D. R. Jackson, "Theory of line-source radiation from a metal-strip grating dielectric-slab structure," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 48, no. 4, pp. 556–564, 2000, doi: 10.1109/8.843669.
- [6] C. S. Huang and W. C. Wang, "SU8 inverted-rib waveguide Bragg grating filter," *Appl. Opt.*, vol. 52, no. 22, pp. 5545–5551, 2013, doi: 10.1364/AO.52.005545.
- [7] A. Maese-Novo *et al.*, "Wavelength independent multimode interference coupler," *Opt. Express*, vol. 21, no. 6, p. 7033, 2013, doi: 10.1364/oe.21.007033.
- [8] W. Chang *et al.*, "An Ultracompact Multimode Waveguide Crossing Based on Subwavelength Asymmetric Y-Junction," *IEEE Photonics J.*, vol. 10, no. 4, pp. 1–8, 2018, doi: 10.1109/JPHOT.2018.2847762.
- [9] L. Xu *et al.*, "Compact high-performance adiabatic 3-dB coupler enabled by subwavelength grating slot in the silicon-on-insulator platform," *Opt. Express*, vol. 26, no. 23, p. 29873, 2018, doi: 10.1364/oe.26.029873.
- [10] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*. Academic Press, 1999.

- [11] 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.
- [12] L. Poladian, "Simple grating synthesis algorithm," *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 18, p. 1400, 2000, doi: 10.1364/ol.25.001400.
- [13] D. Rabus, "Ring Resonators: Theory and Modeling, in Integrated Ring Resonators," in *Integrated Ring Resonators*, Springer, 2007, pp. 3–40.
- [14] J. K. Rakshit, T. Chattopadhyay, and J. N. Roy, "Design of ring resonator based all optical switch for logic and arithmetic operations - A theoretical study," *Optik (Stuttg.)*, vol. 124, no. 23, pp. 6048–6057, 2013, doi: 10.1016/j.ijleo.2013.04.075.

IoT, ứng dụng trí tuệ nhân tạo và khai thác các mô hình học máy trong cung cấp giải pháp.

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

**Abstract**— In this paper, we present the theoretical operating principle and numerical simulation method based on the mode-coupled theory of the WBG waveguide Bragg diffraction grating and the Bragg resonant wavelength reflection principle. Then, we present a design proposal for numerical simulation and optical characterization of a waveguide Bragg grating structure incorporating ring microresonance through FDTD simulation for filtering DWDM wavelengths. The measurement results through structural simulation show that the WBG grating achieves 100% high efficiency and the FWHM bandwidth is always within 0.8 nm channel distance. In addition, the proposed ring resonance structure has high transmission efficiency (>96%). Such good values can give the design structure great potential for application as high-density demultiplexers in DWDM optical communication systems.

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



**Trần Thị Thanh Thủy** tốt nghiệp Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông tương ứng các cấp độ B.E năm 2021 và đang theo học chương trình Thạc sĩ. Hiện tại, cô 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 cô ấy bao gồm: vi mạch

quang điện tử tích hợp, các hệ thống thông tin quang tốc độ cao, IoT, ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong IoT.



**Trương Minh Đức** tốt nghiệp kỹ sư tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông năm 2014, Tốt nghiệp Thạc sĩ tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông năm 2022. 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 là: tích hợp hệ thống nhúng, xây dựng giải pháp và nghiên cứu chế tạo hệ thống