

BỘ LỌC SÓNG QUANG HỌC VÙNG ÁNH SÁNG ĐỎ PHẨM CHẤT CAO SỬ DỤNG PHIẾN TINH THỂ QUANG TỬ HAI CHIỀU

Nguyễn Văn Ân^{1*}, Nguyễn Hoàng Hà²

¹ Khoa Điện tử - Viễn thông, Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế

² Khoa Công nghệ thông tin, Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế

*Email: ngvanan2009@gmail.com

Ngày nhận bài: 11/3/2019; ngày hoàn thành phản biện: 1/3/2019; ngày duyệt đăng: 25/3/2019

TÓM TẮT

Báo cáo trình bày việc thiết kế, tính toán và mô phỏng bộ lọc cộng hưởng dẫn sóng (Guided-Mode Resonances, GMR) vùng ánh sáng đỏ phẩm chất cao dựa trên sự giao thoa của các mode cộng hưởng lệch pha trong phiến tinh thể quang tử hai chiều (2D-PCS). Hệ số phẩm chất (Q) của bộ lọc GMR được tăng cường bằng cách khắc thêm vào giữa tâm mỗi ô đơn vị của cấu trúc mạng đơn một hố trụ tròn không khí bán kính r . Phương pháp sai phân hữu hạn miền thời gian được sử dụng để tính toán, mô phỏng phổ phản xạ cho bộ lọc GMR. Phổ GMR được làm khớp với biểu thức đặc trưng của phổ cộng hưởng bất đối xứng để xác định chính xác các tham số của phổ: bước sóng cộng hưởng λ_0 , hệ số phẩm chất Q và tham số bất đối xứng q . Các kết quả thu được cho thấy phổ phản xạ và đặc trưng quang học của bộ lọc GMR phụ thuộc vào bán kính r . Kết quả này có ý nghĩa rất quan trọng, là cơ sở để nghiên cứu các linh kiện “quang học không gian” hiệu suất cao.

Từ khóa: bộ lọc quang học, phương pháp FDTD, tinh thể quang tử.

1. MỞ ĐẦU

Cấu trúc 2D-PCS với khả năng tồn tại vùng cấm quang (Photonic Band Gap, PBG) đã được nghiên cứu, thiết kế và chế tạo các linh kiện quang tử dùng để dẫn truyền, giam giữ, điều khiển và kiểm soát ánh sáng trong không gian hai chiều. 2D-PCS đang được xem là cấu trúc then chốt cho các mạch tích hợp quang ứng dụng trong thông tin quang, cảm biến quang và các hệ thống máy tính lượng tử trong tương lai. Với khả năng kiểm soát sự lan truyền và bức xạ tự phát của ánh sáng, cấu trúc 2D-PCS đã và đang được quan tâm nghiên cứu do tiềm năng ứng dụng đa dạng của nó. Cấu trúc 2D-PCS có thể được sử dụng để chế tạo diode quang [1], thiết bị cảm biến sinh học [2], ống dẫn sóng và bộ điều hướng (Circulator) với độ uốn cong đột ngột suy hao cực

thấp [3, 4], bộ cách ly quang (Isolator) [3, 5], bộ tách sóng đa kênh hiệu suất cao [6], bộ tạo trễ lan truyền quang [7], chuyển mạch quang năng lượng cực thấp [8], cổng logic cơ bản [9, 10], bộ lọc sóng quang học phẳng [11],...

Một trong những ứng dụng của cấu trúc 2D-PCS đang được quan tâm nghiên cứu là sử dụng chúng để thiết kế các phần tử chọn lọc bước sóng quang. Các bộ lọc sóng quang học phẳng dựa trên sự kết hợp của cấu trúc 2D-PCS dẫn sóng và hốc cộng hưởng yêu cầu sự chính xác của kích thước hốc cộng hưởng vì mỗi sự thay đổi nhỏ của kích thước hốc cộng hưởng thường đem lại những thay đổi rất lớn về bước sóng và hệ số phẩm chất Q của phổ cộng hưởng [12]. Ngoài tính chất dẫn truyền và điều khiển sóng trong mặt phẳng, cấu trúc 2D-PCS còn có khả năng kết hợp với sóng tới từ môi trường ngoài để hình thành cộng hưởng dẫn sóng (GMR) khi điều kiện cân bằng pha giữa hai sóng được thỏa mãn [13, 14]. Bộ lọc GMR sử dụng cấu trúc 2D-PCS có ưu điểm là không cần chế tạo hốc cộng hưởng và dễ dàng kết hợp với các kênh dẫn sóng vào/ra. Các bộ lọc GMR vùng khả kiến được quan tâm nghiên cứu nhiều trong thời gian qua vì nó có nhiều ứng dụng cho các linh kiện hiển thị, cảm biến hình ảnh như màn hình tivi, máy tính, điện thoại di động, máy ảnh số, thiết bị đọc sách điện tử, máy chiếu kỹ thuật số và nhiều ứng dụng đặc biệt khác [15]. Nhiều vật liệu đã được nghiên cứu, sử dụng để chế tạo các bộ lọc GMR vùng khả kiến như hạt nano kim loại và các chất màu nhạy sáng [15]. Tuy nhiên, việc sử dụng các chất màu nhạy sáng và các hạt nano kim loại bộc lộ nhiều nhược điểm như hiệu suất quang thấp do hấp thụ ánh sáng và phát nhiệt nhiều, độ chọn lọc bước sóng không cao,... Gần đây, việc sử dụng cấu trúc 2D-PCS cho các bộ lọc GMR vùng khả kiến đã khắc phục được những nhược điểm của việc sử dụng vật liệu chất màu nhạy sáng và hạt nano kim loại [16, 17]. Hiện nay, hướng nghiên cứu sử dụng cấu trúc 2D-PCS trên nền vật liệu phiến silic nitrit (Si_3N_4) với để là thủy tinh cho các bộ lọc GMR vùng khả kiến để hạn chế các tổn hao của việc sử dụng vật liệu kim loại và silic tinh thể là một hướng đi mới có tính thời sự trong công nghệ chế tạo linh kiện quang tử [16, 18]. Vấn đề đặt ra cho nghiên cứu là bộ lọc GMR vùng khả kiến sử dụng cấu trúc 2D-PCS phải có hệ số phẩm chất Q cao và có thể đơn giản trong chế tạo linh kiện. Cách tiếp cận của nghiên cứu này là đề xuất cấu trúc 2D-PCS đơn giản ứng dụng cho bộ lọc GMR vùng ánh sáng đỏ có hệ số phẩm chất Q cao đồng thời tính toán và mô phỏng để lý giải, chứng minh đề xuất là hợp lý.

Trong báo cáo này, chúng tôi trình bày việc thiết kế, tính toán và mô phỏng phổ GMR sử dụng cấu trúc 2D-PCS ứng dụng cho bộ lọc sóng quang học vùng ánh sáng đỏ với hệ số phẩm chất Q cao. Các tham số quang học đặc trưng cho bộ lọc GMR như bước sóng cộng hưởng λ_0 , hệ số phẩm chất Q và tham số bất đối xứng q của phổ được xác định gián tiếp thông qua việc sử dụng biểu thức đặc trưng của phổ cộng hưởng bất đối xứng dạng Fano.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Hiệu ứng GMR cho bởi cấu trúc 2D-PCS là sự kết hợp cộng hưởng giữa sóng của ánh sáng tới và mode cộng hưởng của cấu trúc 2D-PCS khi điều kiện cân bằng pha được thỏa mãn. Phổ GMR thường có dạng bất đối xứng (dạng Fano). Cộng hưởng Fano có nguồn gốc từ vật lý nguyên tử và được Ugo Fano đề xuất năm 1961 [19]. Bản chất vật lý của cộng hưởng Fano là sự giao thoa giữa môi trường liên tục và các tán xạ cộng hưởng dẫn đến phổ cộng hưởng có dạng bất đối xứng.

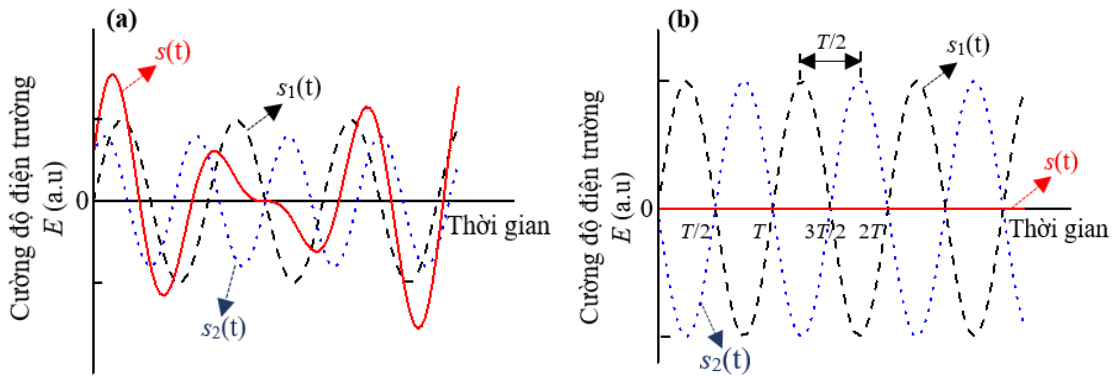
$$\text{Phổ cộng hưởng Fano được cho bởi: } R(\varepsilon) = F \frac{(\varepsilon + q)^2}{1 + \varepsilon^2} \quad (1)$$

trong đó: $\varepsilon = 2 \frac{2\pi c(1/\lambda - 1/\lambda_0)}{F}$, $Q = \frac{\lambda_0}{F}$: hệ số phẩm chất, F : hệ số nhân của biên độ, q : tham số bất đối xứng, c : tốc độ ánh sáng trong chân không, F : độ bán rộng phổ, λ : bước sóng khảo sát, λ_0 : bước sóng cộng hưởng (nằm giữa cực đại và cực tiểu gần nhau nhất của phổ cộng hưởng bất đối xứng).

Nguồn gốc của phổ GMR bất đối xứng dạng Fano trong cấu trúc mạng kép sử dụng 2D-PCS liên quan đến sự kích thích của cộng hưởng tập hợp mạng ngược pha (ALCR) và cộng hưởng tập hợp mạng đồng pha (ILCR) được lai ghép thông qua hiệu ứng ghép nối mạng [20]. Dạng phổ bất đối xứng có thể được giải thích bằng việc sử dụng lý thuyết lai ghép [21], mỗi mạng đơn của các hố không khí trong cấu trúc 2D-PCS cho một mode cộng hưởng tập hợp mạng tương ứng, khi hai mạng hố không khí với bán kính khác nhau được kết hợp để tạo thành một mạng kép, hai mode cộng hưởng tập hợp mạng với năng lượng cộng hưởng khác nhau sẽ lai ghép để tạo thành mode ILCR và mode ALCR. Với mode ILCR, hai mode của mạng đơn luôn dao động cùng chiều cùng pha hoặc ngược pha với ánh sáng tới, do đó trường tái bức xạ của hai mạng đơn giao thoa tăng cường ở trường xa, dẫn đến bức xạ được tăng cường tới không gian tự do, mode ILCR ghép nối hiệu quả với ánh sáng tới. Với mode ALCR, hai mode của mạng đơn dao động ngược chiều nhau, dẫn đến trường tái bức xạ bị hủy diệt ở trường xa, mode cộng hưởng ALCR có thời gian sống của photon lớn và ghép nối yếu với ánh sáng tới. Sự tương tác của mode ALCR và mode ILCR sẽ sinh ra dạng bất đối xứng của phổ phản xạ.

Phổ cộng hưởng đặc trưng của mạng kép 2D-PCS được tạo thành từ hai mạng đơn của các hố hình trụ không khí có cùng độ sâu, bán kính khác nhau hoặc bằng nhau (hố của mạng này nằm ở tâm ô đơn vị của mạng kia) có thể được giải thích bởi hệ hai mode dao động điều hòa đặc trưng tương ứng cho hai mạng đơn là $s_1(t)$ và $s_2(t)$ với biểu thức có thể được viết dưới dạng: $s_1(t) = A_1 \cdot \sin(\omega t)$, $s_2(t) = A_2 \cdot \sin(\omega t + \varphi)$, dao động tổng hợp của hai mode là $s(t) = s_1(t) + s_2(t)$. Khi bán kính hố trụ không khí của hai mạng đơn khác nhau, tần số và biên độ dao động của hai mode sẽ khác nhau, $s(t)$ có thể được tăng cường hoặc suy giảm tùy thuộc vào quan hệ về pha của $s_1(t)$ và $s_2(t)$ (Hình 1(a)).

Khi $s_1(t)$ và $s_2(t)$ ngược pha nhau, mode ALCR được kích thích, hệ số kết hợp giữa cấu trúc và ánh sáng tới từ không gian tự do giảm, kết quả cho ta đỉnh phản xạ của phổ cộng hưởng. Khi hai bán kính hở trụ không khí có giá trị tiến lại gần nhau, tần số và biên độ dao động của $s_1(t)$ và $s_2(t)$ tiến dần về nhau và có độ lệch pha xấp xỉ π , mode ALCR được kích thích, hệ số phẩm chất Q của phổ sẽ tăng lên. Trường hợp bán kính hở trụ không khí của hai mạng đơn bằng nhau, $s_1(t)$ và $s_2(t)$ có cùng biên độ, cùng tần số nhưng ngược pha nhau, dao động tổng hợp $s(t)$ sẽ bị triệt tiêu (Hình 1(b)), lúc này GMR không thể được kích thích trực tiếp bởi ánh sáng tới thông thường nên phổ cộng hưởng cũng biến mất [20, 21].



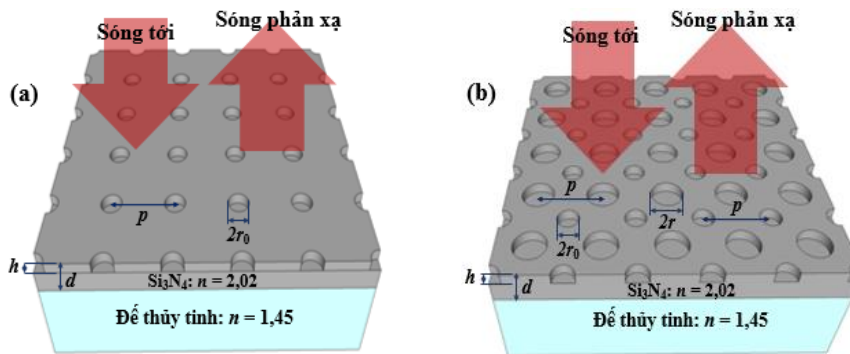
Hình 1. Giảm đồ thời gian của hai mode cộng hưởng tập hợp mạng có biên độ, tần số khác nhau (a) và hai mode cộng hưởng tập hợp mạng cùng biên độ, cùng tần số nhưng ngược pha nhau (b).

3. THIẾT KẾ CẤU TRÚC VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Cấu trúc 2D-PCS cộng hưởng dẫn sóng được đề cập đến trong báo cáo này được mô tả như ở Hình 2. Hình 2(a) là cấu trúc 2D-PCS ban đầu gồm một lớp điện môi silic nitrit (Si_3N_4) có độ dày d và chiết suất $n = 2,02$ tại bước sóng vùng ánh sáng đỏ đặt trên nền đế thủy tinh có chiết suất $n = 1,45$. Lớp điện môi Si_3N_4 có thể dễ dàng chế tạo trên đế thủy tinh bằng kỹ thuật bốc bay trong chân không hoặc phún xạ. Cấu trúc 2D-PCS có kiểu mạng hình vuông được tạo ra bằng cách khắc tuần hoàn theo chu kỳ p các hố trụ tròn không khí có bán kính r_0 và độ sâu h tính từ bề mặt không khí lên nền lớp điện môi Si_3N_4 . Ánh sáng tới được chiếu vuông góc với bề mặt cấu trúc 2D-PCS, ánh sáng này kết hợp với mode cộng hưởng trong 2D-PCS tạo ra phổ GMR khi điều kiện cân bằng pha giữa hai sóng được thỏa mãn. Hệ số phẩm chất của bộ lọc GMR như cấu trúc Hình 2(a) phụ thuộc vào bán kính hố trụ tròn r_0 , độ sâu h và chu kỳ tuần hoàn p của chúng. Khi r_0 và h giảm hoặc p tăng, hệ số kết hợp giữa mode cộng hưởng trong 2D-PCS và ánh sáng tới giảm, độ bán rộng phổ phản xạ cộng hưởng giữa chúng sẽ giảm, dẫn đến hệ số phẩm chất Q cho bởi cấu trúc sẽ được tăng cường [22]. Tuy nhiên đây không phải là phương án tối ưu vì trong chế tạo thực nghiệm đối với cấu trúc như

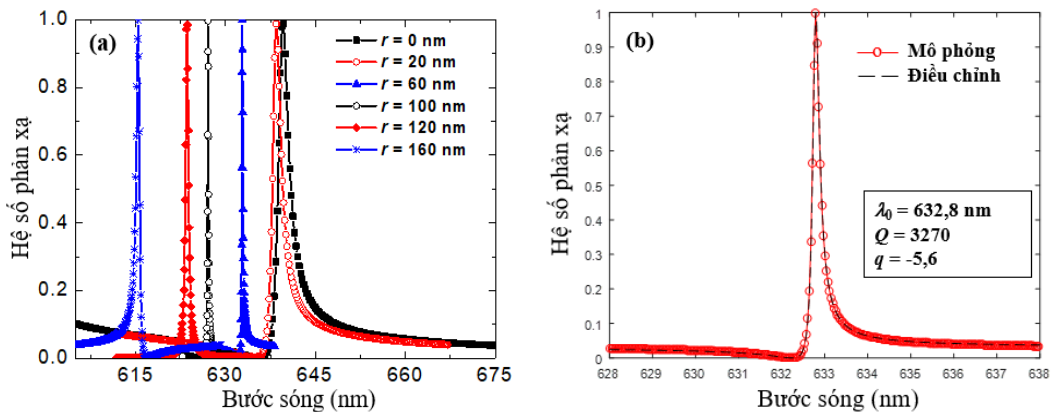
Hình 2(a), bán kính r_0 và độ sâu h không thể giảm hoặc chu kỳ p không thể tăng quá một giới hạn cho phép. Do vậy, việc tìm kiếm cấu trúc đơn giản và tối ưu để tăng được hệ số phẩm chất Q mà không thay đổi r_0 , h và p của cấu trúc ban đầu được đề xuất như trên Hình 2(b). Trong Hình 2(b), các hố trụ tròn không khí bán kính r có cùng độ sâu h được khắc thêm vào giữa tâm mỗi ô đơn vị của cấu trúc 2D-PCS ban đầu.

Phương pháp sai phân hữu hạn miền thời gian được sử dụng để mô phỏng phổ phản xạ của kiểu cấu trúc 2D-PCS cho bởi Hình 2(b) với điều kiện biên tuần hoàn theo phương x và y nằm trong mặt phẳng chứa hai phương tuần hoàn của cấu trúc và điều kiện biên hấp thụ hoàn hảo (PML) theo phương thẳng đứng z . Ánh sáng tới là nguồn xung Gaussian phổ rộng được chiếu thẳng góc lên bề mặt cấu trúc, sóng phản xạ tương ứng được thu cùng phương nhưng ngược chiều với ánh sáng tới. Bước sóng cộng hưởng λ_0 , hệ số phẩm chất Q và tham số bất đối xứng q của phổ bất đối xứng được ước lượng qua việc làm khớp phổ phản xạ nhận được từ số liệu mô phỏng với biểu thức (1) đặc trưng cho phổ cộng hưởng Fano.



Hình 2. Cấu trúc 2D-PCS mạng hình vuông của các hố trụ tròn không khí bán kính r_0 , độ sâu h , chu kỳ p khắc trong nền điện môi Si_3N_4 có độ dày d (a); cấu trúc 2D-PCS sau khi khắc thêm các hố trụ tròn không khí bán kính r , độ sâu h vào giữa tâm mỗi ô đơn vị (b).

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN



Hình 3. Phổ phản xạ của bộ lọc GMR với các giá trị khác nhau của bán kính r (a); minh họa việc làm khớp phổ phản xạ với biểu thức đặc trưng của phổ Fano trong trường hợp $r = 60$ nm (b).

Để GMR xảy ra trong vùng ánh sáng đỏ, các tham số hình học của 2D-PCS cho bởi Hình 2(a) được lựa chọn như sau: chu kỳ tuần hoàn $p = 370$ nm, độ dày lớp điện môi Si_3N_4 $d = 180$ nm, bán kính và độ sâu của hố trụ tròn tương ứng là $r_0 = 80$ nm và $h = 70$ nm. Hình 3(a) hiển thị kết quả mô phỏng phổ phản xạ GMR cho bởi cấu trúc ở Hình 2(b) ứng với một số giá trị bán kính r khác nhau của các hố hình trụ tròn không khí được khắc thêm vào giữa tâm mỗi ô đơn vị của cấu trúc ở Hình 2(a). Kết quả cho thấy phổ cộng hưởng dịch chuyển về vùng sóng ngắn khi tăng bán kính r (giảm chiết suất hiệu dụng của cấu trúc), điều này hoàn toàn phù hợp với các công bố trước đây về sự dịch chuyển phổ GMR theo chiết suất hiệu dụng của cấu trúc 2D-PCS [20, 23, 24].

Phổ GMR có dạng bất đối xứng Fano. Vì vậy, để xác định chính xác các tham số đặc trưng cho phổ, chúng tôi thực hiện việc làm khớp biểu thức (1) với các phổ phản xạ thu được ở Hình 3(a), Hình 3(b) là một ví dụ minh họa cho việc điều chỉnh này ứng với trường hợp $r = 60$ nm. Kết quả, chúng tôi nhận được sự phụ thuộc của các tham số đặc trưng cho phổ cộng hưởng Fano theo các giá trị của bán kính r như trong Bảng 1.

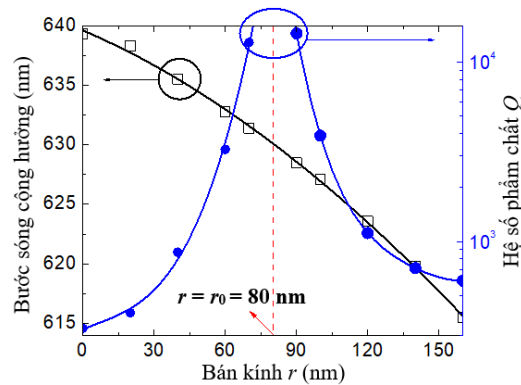
Bảng 1. Giá trị các tham số của phổ cộng hưởng Fano phụ thuộc vào bán kính r

Bán kính hố r (nm)	0	20	60	100	120	160
Bước sóng cộng hưởng λ_0 (nm)	639,3	638,3	632,8	627,1	623,6	615,5
Hệ số phẩm chất Q	328	400	3270	3900	1115	605
Tham số bất đối xứng q	-4,2	-4,4	-5,6	-12,0	-55,0	5,0
Hệ số nhân F	0,0536	0,0490	0,0309	0,0069	0,00033	0,0385

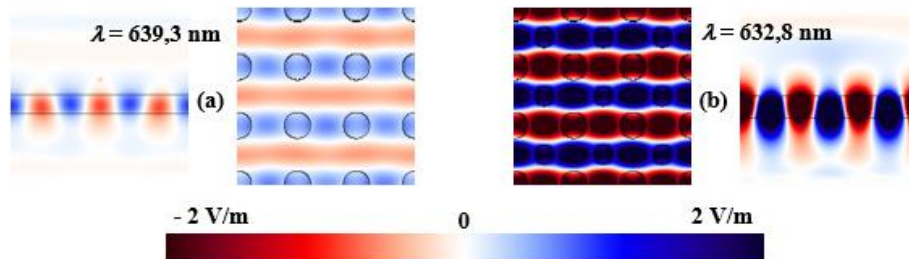
Từ các số liệu ở Bảng 1, chúng tôi nhận được đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của bước sóng cộng hưởng λ_0 và hệ số phẩm chất Q của phổ GMR theo bán kính r như ở Hình 4. Từ kết quả ở Hình 4 cho thấy: khi r tăng từ 0 lên giá trị $r_0 = 80$ nm, hệ số phẩm chất Q tăng lên; đặc biệt với trường hợp $r = r_0 = 80$ nm, phổ GMR biến mất. Khi r tiếp tục tăng từ giá trị $r_0 = 80$ nm lên giá trị $r = 160$ nm, hệ số phẩm chất Q giảm. Kết quả này có thể được giải thích như sau: khi r tăng từ 0 lên giá trị r_0 , hai mode cộng hưởng tập hợp mạng của hai mạng đơn thành phần lệch pha nhau giao thoa với nhau làm giảm hiệu quả ghép nối giữa sóng tới từ không gian ngoài với mode cộng hưởng của cấu trúc nên độ bán rộng phổ cộng hưởng giảm, dẫn đến hệ số phẩm chất Q của phổ tăng lên. Khi $r = r_0 = 80$ nm, hai mode cộng hưởng tập hợp mạng thành phần có cùng biên độ cùng tần số nhưng ngược pha nhau nên chúng triệt tiêu lẫn nhau, nghĩa là đối với trường hợp $r = r_0 = 80$ nm, GMR không thể được kích thích trực tiếp bởi ánh sáng tới và phổ cộng hưởng biến mất [20]. Ngoài ra, kết quả trên Hình 4 cũng cho thấy: hệ số phẩm chất Q cho bởi cấu trúc 2D-PCS Hình 2(b) luôn có giá trị lớn hơn so với hệ số phẩm chất Q cho bởi cấu trúc mạng đơn Hình 2(a) (tương ứng với $r = 0$), nghĩa là việc

đề xuất cấu trúc 2D-PCS như trên Hình 2(b) để thiết kế bộ lọc sóng quang học GMR vùng ánh sáng đỏ nhằm nâng cao hệ số phẩm chất Q cho bộ lọc là hoàn toàn hợp lý.

Hình 5 hiển thị sự phân bố điện trường trong cấu trúc 2D-PCS theo mặt phẳng xz và mặt phẳng xy tại bước sóng cộng hưởng $\lambda_0 = 639,3$ nm và $\lambda_0 = 632,8$ nm tương ứng cho hai trường hợp $r = 0$ và $r = 60$ nm với cùng một thang độ lớn của giá trị biên độ điện trường. Kết quả Hình 5 cho thấy: trường hợp $r = 0$ chỉ có một mode điện trường phân bố trong cấu trúc 2D-PCS, trong khi đó với trường hợp $r = 60$ nm ta nhận được hai mode điện trường phân bố trong cấu trúc; ngoài ra, mật độ năng lượng điện trường phân bố trong cấu trúc với trường hợp $r = 60$ nm lớn hơn so với trường hợp $r = 0$, điều này hoàn toàn hợp lý vì hệ số phẩm chất Q ứng với trường hợp $r = 60$ nm lớn hơn so với trường hợp $r = 0$ hay thời gian giam giữ photon trong cấu trúc với trường hợp $r = 60$ nm dài hơn.



Hình 4. Sự phụ thuộc của bước sóng cộng hưởng λ_0 và hệ số phẩm chất Q theo bán kính r .



Hình 5. Sự phân bố của điện trường tại bước sóng cộng hưởng $\lambda_0 = 639,3$ nm (a) và $\lambda_0 = 632,8$ nm (b) cho bởi cấu trúc Hình 2(b) ứng với trường hợp $r = 0$ và $r = 60$ nm.

5. KẾT LUẬN

Bộ lọc sóng quang học làm việc trong vùng ánh sáng đỏ trên cơ sở hiệu ứng GMR của cấu trúc 2D-PCS với hệ số phẩm chất Q cao nhờ có sự giao thoa của hai mode cộng hưởng lệch pha trong cấu trúc 2D-PCS đã được chúng tôi thiết kế, tính toán và mô phỏng với các thông số cụ thể. Cấu trúc 2D-PCS được tạo ra bằng cách khắc thêm các hố trụ tròn không khí vào giữa tâm các ô đơn vị của cấu trúc mạng đơn đã

tăng cường được hệ số phẩm chất Q của bộ lọc nhưng bước sóng cộng hưởng trong vùng ánh sáng đỏ của các phổ thay đổi không đáng kể so với cấu trúc ban đầu. Cấu trúc 2D-PCS được đề xuất đơn giản, phổ cộng hưởng không phụ thuộc vào sự phân cực của ánh sáng tới. Kết quả nghiên cứu có thể sử dụng để thiết kế và chế tạo các linh kiện quang chọn lọc bước sóng ứng dụng trong công nghệ màn hình hiển thị, LED, laser,... trên nền tảng GMR sử dụng cấu trúc 2D-PCS.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài nghiên cứu cấp Đại học Huế năm 2018, mã số DHH2018-01-123.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Bin Liu, Yun-Feng Liu, Shu-Jing Li, Xing-Dao He (2016). High efficiency all-optical diode based on photonic crystal waveguide, *Opt. Comm.*, Vol. 368, pp. 7-11.
- [2]. Hai Yan, Chun-Ju Yang, Naimei Tang, Yi Zou, Swapnajit Chakravarty, Amanda Roth, and Ray T. Chen (2017). Specific Detection of Antibiotics by Silicon-on-Chip Photonic Crystal Biosensor Arrays, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 17, No. 18, pp. 5915-5919.
- [3]. Le Zhang, Dongxiao Yang, Kan Chen, Tao Li, Song Xia (2013). Design of nonreciprocal waveguide devices based on two-dimensional magneto-optical photonic crystals, *Optics & Laser Technology*, Vol. 50, pp. 195-201.
- [4]. Yong Wang, Dengguo Zhang, Shixiang Xu, Zhengbiao Ouyang, Jingzhen Li (2016). Low-loss Y-junction two-dimensional magneto-photonic crystals circulator using a ferrite cylinder, *Opt. Comm.*, Vol. 369, pp. 1-6.
- [5]. A. Soltani, F. Ouerghi, F. AbdelMalek, S. Haxha, H. Ademgil, and E. K. Akowuah (2017). Unidirectional Light Propagation Photonic Crystal Waveguide Incorporating Modified Defects, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, Vol. 130, pp. 1370-1376.
- [6]. V. Kannaiyan, R. Savarimuthu, S.K. Dhamodharan (2018). Investigation of 2D-photonic crystal resonant cavity based WDM demultiplexer, *Opto-Electronics Review*, Vol. 26, pp. 108-115.
- [7]. Y. Zhang, X. Zhang X, Y. Wang, R. Zhu, Y. Gai, X. Liu, P. Yuan (2013). Reversible Fano resonance by transition from fast light to slow light in a coupled-resonator-induced transparency structure, *Opt. Express*, Vol. 21, No. 7, pp. 8570-8586.
- [8]. Kozaki, A. Shinya, S. Matsuo, T. Sato, E. Kuramochi, and M. Notomi (2013). Ultralow-energy and high-contrast all-optical switch involving Fano resonance based on coupled photonic crystal nanocavities, *Opt. Express*, Vol. 21, No. 10, pp. 11877-11888.
- [9]. Hojjat Sharifi, Seyyedeh Mehri Hamidi, Keivan Navi (2016). A new design procedure for all-optical photonic crystal logic gates and functions based on threshold logic, *Opt. Comm.*, Vol. 370, pp. 231-238.

- [10]. S. Divya, A. Sivanantha Raja, S. Selvendran (2017). Designing of All Optical Nand Gate Based On 2d Photonic Crystal, *Advances in Natural and Applied Sciences*, Vol. 11, No. 7, pp. 36-40.
- [11]. Zohreh Rashki, Seyyed Javad Seyyed Mahdavi Chabok (2017). Novel design of optical channel drop filters based on two-dimensional photonic crystal ring resonators, *Opt. Comm.*, Vol. 395, pp. 231-235.
- [12]. Hiroshi Sekoguchi, Yasushi Takahashi, Takashi Asano, and Susumu Noda (2014). Photonic crystal nanocavity with a Q -factor of ~ 9 million, *Opt. Express*, Vol. 22, No. 1, pp. 916-924.
- [13]. Y. Ding and R. Magnusson (2004). Resonant leaky-mode spectral-band engineering and device applications, *Opt. Express*, Vol. 12, No. 23, pp. 5661-5674.
- [14]. Robert Magnusson and Mehrdad Shokooh-Saremi (2008). Physical basis for wideband resonant reflectors, *Opt. Express*, Vol. 16, No. 5, pp. 3456-3462.
- [15]. Ram W. Sabnis (1999). Color filter technology for liquid crystal displays, *Displays*, Vol. 20, No. 3, pp. 119-129.
- [16]. Mohammad Jalal Uddin, and Robert Magnusson (2013). Guided-Mode Resonant Thermo-Optic Tunable Filters, *Photon. Technol. Lett. IEEE*, Vol. 25, No. 15, pp. 1412-1415.
- [17]. Fei Cheng, Jie Gao, Liliana Stan, Daniel Rosenmann, David Czaplewski, and Xiaodong Yang (2015). Aluminum plasmonic metamaterials for structural color printing, *Opt. Express*, Vol. 23, No. 11, pp. 14552-14560.
- [18]. Mohammad Jalal Uddin and Robert Magnusson (2013). Highly efficient color filter array using resonant Si_3N_4 gratings, *Opt. Express*, Vol. 21, No. 10, pp. 12495-12506.
- [19]. U. Fano (1961). Effects of Configuration Interaction on Intensities and Phase Shifts, *Phys. Rev.*, Vol. 124, No. 6, pp. 1866-1878.
- [20]. Wenyu Zhao, Huan Jiang, Bingyi Liu, Yongyuan Jiang, Chengchun Tang, and Junjie Li (2015). Fano resonance based optical modulator reaching 85% modulation depth, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 107, No. 17, pp. 171109.
- [21]. Wenyu Zhao, Dongquan Ju, Yongyuan Jiang, and Qiwen Zhan (2014). Dipole and quadrupole trapped modes within biperiodic Silicon particle array realizing threechannel refractive sensing, *Opt. Express*, Vol. 22, No. 25, pp. 31277-31285.
- [22]. Quang Minh Ngo, Khai Q. Le, and Vu Dinh Lam (2012). Optical bistability based on guided-mode resonances in photonic crystal slabs, *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 29, No. 6, pp. 1291-1295.
- [23]. Van An Nguyen, Quang Minh Ngo, and Khai Quang Le (2018). Efficient Color Filters Based on Fano-Like Guided-Mode Resonances in Photonic Crystal Slabs, *IEEE Photonics Journal*, Vol. 10, No. 1, pp. 2700208.
- [24]. Chunchen Lin, Zhaolin Lu, Shouyuan Shi, Ge Jin, and Dennis W. Prather (2005). Experimentally demonstrated filters based on guided resonance of photonic-crystal films, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 87, No. 9, pp. 091102.

GUIDED-MODE RESONANCES IN TWO-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTAL SLABS FOR HIGH QUALITY RED FILTER APPLICATIONS

Nguyen Van An^{1*}, Nguyen Hoang Ha²

¹ Faculty of Electronics and Telecommunications, University of Sciences, Hue University

² Faculty of Information Technology, University of Sciences, Hue University

*Email: ngvanan2009@gmail.com

ABSTRACT

This report presents the designs, calculations and simulations of the high quality guided-mode resonance (GMR) filter in the red region based on the interference of the two in-plane waves oscillate towards the opposite directions with a phase difference in two-dimensional photonic crystal slabs (2D-PCS). The quality factor (Q -factor) of the GMR filter is enhanced by introducing in the center of each unit cell of a single lattice structure of a radial air cylinder r . In this work, the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method was used to determine the reflection spectra and simulated optical characteristics of the GMR filter. The simulated spectra have asymmetric forms (Fano-like) and were fitted to the theoretical model to determine exactly the resonant characteristics such as resonant wavelength λ_0 , Q -factor and asymmetric factor (q -factor). The results show that the reflectance spectrum and the optical characteristics of the GMR filter depend on the radius r . These results are very important, they are the basis for studying efficient “free-space optic” devices.

Keywords: optical filter, finite-difference time-domain method, photonic crystals.



Nguyễn Văn Ân sinh ngày 08/12/1973 tại Quảng Nam. Năm 1996, ông tốt nghiệp cử nhân ngành Vật lý tại trường Đại học Khoa học - Đại học Huế. Năm 2000, ông tốt nghiệp thạc sĩ chuyên ngành Vật lý chất rắn tại trường Đại học Khoa học - Đại học Huế. Hiện tại đang là nghiên cứu sinh tiến sĩ chuyên ngành Vật liệu quang học, Quang điện tử và Quang tử thuộc Viện Khoa học vật liệu - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Từ năm 1996 đến nay, ông công tác tại trường Đại học Khoa học - Đại học Huế.

Lĩnh vực nghiên cứu: điện tử, quang tử, cảm biến quang tử.



Nguyễn Hoàng Hà sinh ngày 22/11/1976 tại Thăng Bình, Quảng Nam. Năm 1999, ông tốt nghiệp cử nhân ngành Công nghệ thông tin tại trường Đại học Khoa học - Đại học Huế. Năm 2005, ông tốt nghiệp thạc sĩ chuyên ngành Khoa học máy tính tại trường Đại học Khoa học - Đại học Huế. Năm 2017, ông tốt nghiệp tiến sĩ chuyên ngành Khoa học máy tính tại trường Đại học Khoa học - Đại học Huế. Hiện tại đang công tác tại khoa Công nghệ thông tin, trường Đại học Khoa học - Đại học Huế.

Lĩnh vực nghiên cứu: Xử lý song song và phân tán, tính toán lưới và tính toán đám mây.

