# Nghiên cứu bộ lọc quang học bậc cao dựa trên sự ghép nối tiếp của nhiều cộng hưởng qua khe dẫn sóng hẹp trong cấu trúc tinh thể quang tử hai chiều

**Hoàng Thu Trang[1,2], Ngô Quang Minh[1,2*]**

*[1]Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam*
*[2]Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam*

Ngày nhận bài 9/2/2018; ngày chuyển phản biện 13/2/2018; ngày nhận phản biện 15/3/2018; ngày chấp nhận đăng 22/3/2018

***Tóm tắt:***

**Bài báo này trình bày các kết quả lý thuyết và tính toán mô phỏng của bộ lọc quang học bậc cao sử dụng cấu trúc khe dẫn sóng hẹp trong tinh thể quang tử hai chiều kết hợp với dãy hốc vi cộng hưởng nối tiếp. Sự dẫn sóng trong khe hẹp được thiết kế để tăng khả năng giam giữ và cường độ điện-từ trường bên trong vùng điện môi có chiết suất thấp, điều này làm gia tăng tỷ số *Q/V* của bộ cộng hưởng được thiết kế từ các khe hẹp đó. Việc ghép nối tiếp nhiều cộng hưởng được phân tích dựa vào phương pháp lý thuyết ghép các mode cộng hưởng trong miền thời gian (CMT). Kết quả lý thuyết được các tác giả kiểm chứng lại bằng mô phỏng qua việc sử dụng phương pháp đạo hàm hữu hạn trong miền thời gian (FDTD). Kết quả cho thấy có sự phù hợp tốt giữa lý thuyết và mô phỏng. Bộ lọc quang học bậc cao dựa trên sự ghép nối tiếp nhiều cộng hưởng được coi là nền tảng để tác giả nghiên cứu các linh kiện quang học tích hợp phẳng.**

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

***Chỉ số phân loại:*** ***1.3***

## Mở đầu

Việc nghiên cứu cấu trúc tinh thể quang tử ứng dụng cho các linh kiện quang học đã và đang thu hút rất nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học bởi tính chất quang đặc biệt của nó mà các loại vật liệu sẵn có trong tự nhiên không có được. Cấu trúc tinh thể quang tử là cấu trúc vật liệu nhân tạo được tạo nên bằng việc sắp xếp tuần hoàn các lớp vật liệu có hằng số điện môi khác nhau theo 1 chiều (1D), 2 chiều (2D), hoặc 3 chiều (3D) trong không gian và tạo thành các vùng cấm quang theo 1D, 2D và 3D tương ứng. Các bước sóng (tần số) nằm trong vùng cấm quang bị phản xạ hoàn toàn khi gặp bề mặt cấu trúc tinh thể quang tử, tuy nhiên nó lại có tính chất đặc biệt là có thể điều khiển được khi ta thiết kế các bộ cộng hưởng hoặc bộ dẫn sóng trong cấu trúc tinh thể quang tử đó, có nghĩa là ánh sáng với bước sóng (tần số) đó được giam giữ trong cấu trúc hoặc được truyền qua cấu trúc với hiệu suất 100% [1-3].

Nhờ sự phát triển của các trang thiết bị và công nghệ hiện đại, đặc biệt là công nghệ nano, các cấu trúc tinh thể quang tử 2D đã được nghiên cứu và chế tạo thành công với bước sóng (tần số) làm việc tại vùng thông tin quang hoặc vùng khả kiến và đã có một số kết quả ứng dụng, đặc biệt cho viễn thông quang học, laze, đi-ốt phát quang (LED), cảm biến quang học… Tuy nhiên để ứng dụng rộng rãi cấu trúc tinh thể quang tử 2D trong một số lĩnh vực cụ thể, đặc biệt là viễn thông quang học hoặc các mạch tích hợp phẳng khác vẫn rất cần thêm nhiều nghiên cứu chuyên sâu về cả vật liệu và cấu trúc [3-5]. Trong các linh kiện quang tích hợp phẳng dựa trên sự kết hợp của dẫn sóng và cộng hưởng, thì tỷ số ($Q/V$), trong đó $Q$ là hệ số phẩm chất và $V$ là thể tích hình thái học được coi là tham số quyết định hiệu suất của linh kiện quang, tỷ số $Q/V$ càng cao thì hiệu suất linh kiện càng tốt. Hệ số phẩm chất $Q$ và thể tích hình thái học $V$ của bộ cộng hưởng được thiết kế từ cấu trúc tinh thể quang tử 2D mà các công bố gần đây đề cập là ~3,3x$10^6$ và ~1,18 $(\lambda/n)^3$, do vậy $Q/V$ ~2,80x$10^6$ $(\lambda/n)^{-3}$, trong đó $\lambda$ là bước sóng hoạt động và $n$ là chỉ số chiết suất của vật liệu [6-8]. Việc chế tạo bộ cộng hưởng có hệ số phẩm chất $Q$ cao là rất khó vì mỗi sự thay đổi kích thước rất nhỏ của bộ cộng hưởng sẽ dẫn tới sự thay đổi rất lớn của hệ số phẩm chất $Q$. Bên cạnh đó, khi hệ số phẩm chất $Q$ cao, cường độ điện-từ trường sẽ tập trung rất lớn trong một không gian hẹp của bộ cộng hưởng sẽ làm gia tăng các hiệu ứng phi tuyến không mong muốn của vật liệu. Vậy nên, nếu không quan tâm đến thể tích hình thái học $V$, thì việc làm tăng hệ số phẩm chất $Q$ của bộ lọc quang học bằng cách ghép nối tiếp nhiều cộng hưởng thông qua khe dẫn sóng hẹp trong tinh thể quang tử 2D là phương án có tính khả thi cao [9-11]. Việc sử dụng dẫn sóng trong khe hẹp làm tăng khả năng giam giữ và cường độ điện-từ trường bên trong vùng điện môi có chiết suất thấp, điều này làm tăng tỷ số $Q/V$ của bộ cộng hưởng được thiết kế từ các khe hẹp.

*Tác giả liên hệ; Email: minhnq@ims.vast.ac.vn

# A study on high-order optical filters based on coupled resonators through the slot waveguide in two-dimensional photonic crystal

**Thu Trang Hoang[1,2], Quang Minh Ngo[1,2*]**

[1]*Institute of Materials Science, Vietnam Academy of Science and Technology*
[2]*Graduate University of Science and Technology, Vietnam Academy of Science and Tecnology*

Received 9 February; accepted 22 March 2018

***Abstract:***

**In this paper, we present the theoretical and numerical results of the high-order optical filters based on the slotted two-dimensional photonic crystal waveguide conjugated with multiple coupled resonators. Slotted waveguide is designed to enhance the electromagnetic intensity and confine the light in the narrow area with low refractive index, so that the figure-of-merit (*Q/V*) of the resonators is significantly enhanced. The coupling among the resonators is analyzed theoretically, based on the coupled-mode theory in time (CMT). We perform the finite-difference time-domain (FDTD) simulation to confirm the CMT analysis. It is shown that the good agreement between the theory and the simulation. This result will provide a general guide line for planar photonic integrated circuits.**

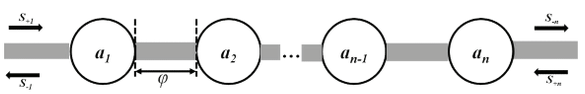
***Keywords:*** ***FDTD method, Optical filter, Photonic crystal.***

***Classification number:*** ***1.3***

Mô hình bộ lọc quang học bậc cao được phân tích lý thuyết dựa trên phương pháp ghép mode cộng hưởng theo thời gian (CMT). Các kết quả lý thuyết được kiểm chứng bằng mô phỏng dựa trên phương pháp đạo hàm hữu hạn trong miền thời gian (FDTD) và phương pháp khai triển sóng phẳng [12, 13]. Các kết quả lý thuyết và mô phỏng cho thấy có sự phù hợp khá tốt. Kết quả của bài báo này là nền tảng cho các nghiên cứu về linh kiện quang tích hợp phẳng.

## Cơ sở lý thuyết

Hình 1 là mô hình của *n* bộ cộng hưởng ghép nối tiếp với nhau thông qua bus dẫn sóng.




**Hình 1. Mô hình của *n* cộng hưởng ghép nối tiếp với nhau.**

Để phân tích sự ghép nối tiếp của *n* bộ cộng hưởng như hình 1, chúng tôi sử dụng lý thuyết ghép các mode cộng hưởng trong miền thời gian [14]. Để đơn giản, chúng ta giả sử các bộ cộng hưởng có cùng tần số cộng hưởng và độ suy hao theo thời gian tương ứng là $\omega_0$ và $1/\tau$. $s_{+1}$ và $s_{-1}$ là biên độ của sóng tới và sóng phản xạ tại cộng hưởng thứ nhất; $s_{+n}$ và $s_{-n}$ tương ứng là biên độ của sóng tới và sóng phản xạ tại cộng hưởng thứ *n;* $|a|^2$ và $|s|^2$ lần lượt là năng lượng của bộ cộng hưởng và của sóng.

$$\begin{aligned}
\frac{da_1}{dt} &= [j(\omega_0+\delta)-\frac{1}{\tau}]a_1+\mu a_2+k s_{+1}\\
\frac{da_i}{dt} &= j(\omega_0+2\delta)a_i+\mu a_{i-1}+\mu a_{i+1} \quad \text{với } 1<i<n \qquad (1)\\
\frac{da_n}{dt} &= [j(\omega_0+\delta)-\frac{1}{\tau}]a_n+\mu a_{n-1}+k s_{+n}
\end{aligned}$$

Ở đây hệ số ghép của sóng và bộ cộng hưởng được cho bởi hệ số $k=e^{j\theta}\sqrt{2/\tau}$ . $\delta$ và $\mu$ lần lượt là độ dịch chuyển tần số cộng hưởng và hệ số ghép hiệu dụng, với $\delta=\cot\varphi/\tau$ và $\mu=-j\csc\varphi/\tau$, φ là góc lệch pha giữa hai cộng hưởng gần nhau nhất. Giả sử hệ chúng ta xét là không có tác động từ bên ngoài, nên $s_{+n}=0$. Sử dụng phương pháp CMT, hệ số truyền qua được cho bởi công thức:

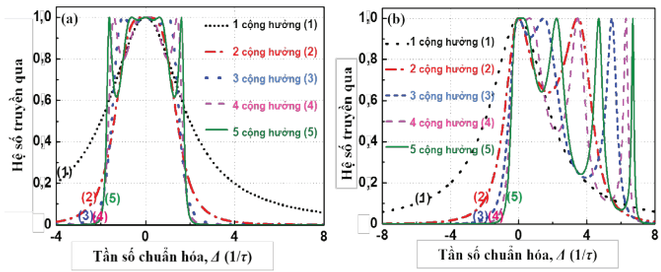
$$T(\omega)=\left|\frac{s_{-n}}{s_{+1}}\right|^2=\left|\frac{k^*k}{j(\Delta-\delta)+1/\tau-\mu f_2}\prod_{i=2}^{n}f_i\right|^2 \qquad (2)$$

trong đó

$$\begin{aligned}
f_n &= \frac{a_n}{a_{n-1}}=\frac{\mu}{j(\Delta-\delta)+1/\tau}\\
f_i &= \frac{a_i}{a_{i-1}}=\frac{1}{j(\Delta-\delta)/\mu-f_{i+1}}
\end{aligned} \qquad (3)$$

Δ là tần số chuẩn hóa từ tần số cộng hưởng, $\Delta=\omega-\omega_0$. Tại bài báo này, chúng tôi xem xét bộ lọc quang học bậc 1, bậc 2, bậc 3, bậc 4 và bậc 5. Sử dụng phương trình (2), phổ truyền qua của các bộ lọc quang học với $\varphi=\pi/2$ và $\varphi=\pi/6$ được mô tả trong hình 2(a) và 2(b).

Hình 2 cho thấy số lượng đỉnh cộng hưởng bằng với số lượng bộ cộng hưởng được ghép nối tiếp. Hình 2(a) là phổ truyền qua của các bộ lọc khi $\varphi=\pi/2$, các bộ lọc có bậc khác nhau đều có chung tần số cộng hưởng trung tâm, $\Delta=0$. Ngoài ra, bộ lọc bậc cao còn có thêm các tần số cộng hưởng khác nằm đối xứng ở hai phía của tần số cộng hưởng trung tâm, bán độ rộng phổ của các cộng hưởng nằm xa cộng hưởng trung tâm có xu hướng hẹp dần. Hình 2(b) là phổ truyền qua của các bộ lọc khi $\varphi=\pi/6$, các bộ lọc vẫn có chung một tần số cộng hưởng nhưng các đỉnh cộng hưởng được phân bố bất đối xứng và khó xác định được vị trí chính xác. Để đơn giản trong nghiên cứu, các bộ lọc quang học bậc cao được thiết kế trong trường hợp góc lệch pha giữa hai cộng hưởng gần nhau nhất $\varphi=\pi/2$.

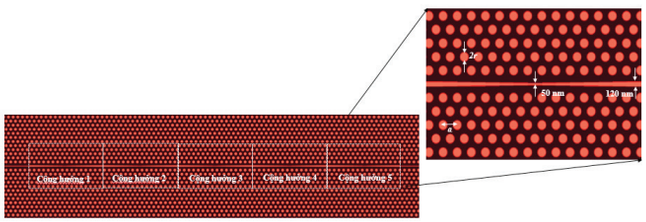



**Hình 2. Phổ truyền qua của các bộ lọc quang học: (a) khi $\varphi = \pi/2$ và (b) khi $\varphi = \pi/6$.**

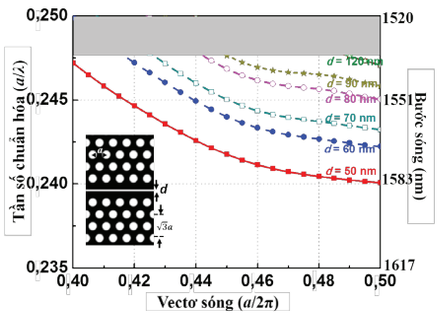
## Kết quả mô phỏng

Để kiểm chứng cho kết quả lý thuyết được trình bày ở trên, các bộ lọc quang học bậc cao dựa trên sự ghép nối tiếp của nhiều cộng hưởng qua khe dẫn sóng hẹp trong cấu trúc tinh thể quang tử 2D đã được chúng tôi mô phỏng nhờ sử dụng phương pháp FDTD. Hình 3 là cấu trúc bộ lọc quang học bậc 5 với các tham số của cấu trúc và vật liệu như sau: Chiết suất hiệu dụng của vật liệu nền silic $n = 2,98$, bán kính hố là $r = 0,3a$ ($a$ là hằng số mạng, $a$ = 380 nm) và mạng tinh thể hình tam giác. Cộng hưởng được tạo ra bằng cách thay đổi độ rộng của khe hẹp từ $d$ = 50 nm tới $d$ = 120 nm với những khoảng cách đều là 10 nm/$a$. Khe dẫn sóng hẹp và các hố được điền đầy bằng vật liệu hữu cơ quang phi tuyến bậc 3 DDMEBT ($n_{fill} = 1,8$), do DDMEBT là vật liệu có hệ số phi tuyến bậc 3 lớn, chúng tôi hy vọng rằng bằng cách sử dụng vật liệu DDMEBT sẽ khắc phục được những nhược điểm của vật liệu nền silic như hiệu ứng hấp thụ hạt tải tự do và hiệu ứng hấp thụ hai photon trong nghiên cứu linh kiện quang lưỡng trạng thái ổn định.

Sự dẫn truyền sóng điện từ trong các bộ dẫn sóng được minh họa trên hình 4. Sử dụng phương pháp khai triển sóng phẳng đối với hệ phương trình Maxwell để giải bài toán với biến số là các mode dẫn trong các bộ dẫn sóng với độ rộng khe hẹp $d$ khác nhau với phân cực là điện trường trong mặt phẳng (TE mode). Với các tham số được chọn của cấu trúc tinh thể quang tử 2D như trên hình 3, thì vùng cấm quang chuẩn hóa là (0,235-0,250 $a/\lambda$), tương ứng với dải sóng trong vùng thông tin quang (1520-1617 nm) chứa các dải dẫn sóng tương ứng với các trường hợp độ khe hẹp $d$ (~ 50-120 nm). Khi độ rộng khe hẹp tăng, dải dẫn sóng có xu hướng dịch về các bước sóng ngắn. Khi $d$ tăng ~120 nm dải dẫn sóng nằm ngoài vùng cấm quang, do vậy việc lựa chọn độ rộng khe hẹp $d$ = 120 nm được xem như là một vách ngăn sóng điện từ, tức là sóng điện từ sẽ bị giam giữ trong bộ cộng hưởng được tạo nên từ khe hẹp có độ rộng $d$ ~ 50 nm. Việc thiết kế buồng cộng hưởng có độ rộng khe hẹp tăng dần sẽ làm giảm sự thay đổi đột ngột sóng điện từ trong buồng cộng hưởng. Độ rộng khe hẹp $d$ = 50 nm còn được chọn làm độ rộng khe dẫn sóng của bộ lọc quang học như hình 3.



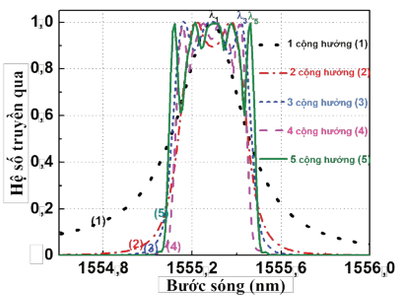

**Hình 3. Cấu trúc của bộ lọc quang học bậc 5 (hình chính) và chi tiết của một bộ cộng hưởng (hình phụ).**




**Hình 4. Các dải dẫn sóng tương ứng với độ rộng khe hẹp $d$ khác nhau.**

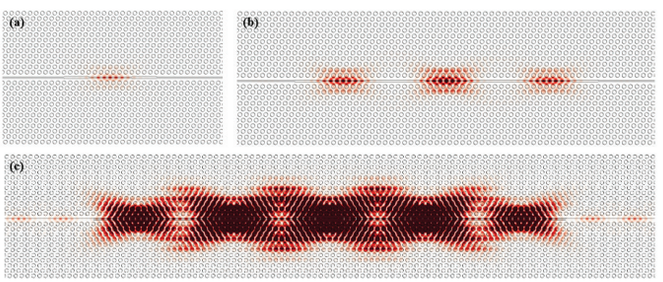
Để mô phỏng đặc trưng truyền qua của các bộ lọc quang học được thiết kế như hình 3, chúng tôi sử dụng phổ dạng Gauss có dải bước sóng từ 1520-1596 nm, phân cực TE, đặt ở đầu vào của khe dẫn sóng (phía trái) và đầu thu được đặt ở lối ra của khe dẫn sóng (phía phải). Giữa đầu vào và đầu ra là số bộ cộng hưởng được ghép nối tiếp. Sử dụng phương pháp mô phỏng FDTD với điều kiện là biên hấp thụ hoàn hảo (PML) có độ dày đủ lớn để hấp thụ hoàn toàn sóng điện từ truyền tới biên và không cho phản xạ ngược lại vào trong cấu trúc. Hình 5 là phổ mô phỏng sự truyền qua của sóng phân cực TE đối với các bộ lọc quang học có bậc khác nhau. Chúng tôi đã tối ưu cấu trúc tinh thể quang tử 2D để góc lệch pha giữa hai bộ cộng hưởng gần nhau nhất $\varphi = \pi/2$. Nhìn vào hình 5, hình dáng phổ mô phỏng của các bộ lọc hoàn toàn giống với hình dáng phổ của các bộ lọc mà chúng tôi đã phân tích lý thuyết ở phần trên, tức là nó có dạng đối xứng và đỉnh cộng hưởng truyền qua là 100%. Bước sóng cộng hưởng trung tâm là 1555,28 nm hoàn toàn phù hợp với bước sóng sử dụng trong viễn thông quang học. Đối với bộ lọc bậc 1, phổ truyền qua có dạng đối xứng Lorentz với bước sóng cộng hưởng $\lambda_1$ = 1555,28 nm và hệ số phẩm chất $Q_1$ = 4463. Phổ của bộ lọc bậc cao không phải dạng Lorentz và có nhiều đỉnh cộng hưởng. Đỉnh phổ cộng hưởng của các bộ lọc bậc cao mà chúng tôi quan tâm nằm ở phía ngoài cùng, do vậy chúng tôi đã sử dụng phương pháp làm khớp phổ cộng hưởng ngoài cùng của bộ lọc bậc 3 và bậc 5 với cộng hưởng có hàm Fano [15]. Hệ số phẩm chất $Q_3$ = 13010 và $Q_5$ = 32020 tương ứng với hai đỉnh cộng hưởng ngoài cùng có bước sóng là $\lambda_3$ = 1555,38 nm đối với bộ lọc bậc 3 và $\lambda_5$ = 1555,46 nm đối với bộ lọc bậc 5. Phổ có đỉnh cộng

hưởng càng xa cộng hưởng trung tâm có bán độ rộng càng hẹp, do vậy hệ số phẩm chất $Q$ càng lớn. Như vậy, bằng cách ghép nối tiếp nhiều bộ cộng hưởng thông qua khe dẫn sóng hẹp trong tinh thể quang tử 2D, chúng tôi đã thu được bộ lọc quang học bậc cao với hệ số phẩm chất $Q$ cao hơn, ví dụ hệ số phẩm chất $Q$ của bộ lọc quang học bậc 5 cao hơn ~7,2 lần hệ số phẩm chất $Q$ của bộ lọc bậc 1 mà không cần thay đổi các tham số khác của cấu trúc tinh thể quang tử 2D.




**Hình 5. Phổ mô phỏng truyền qua của các bộ lọc quang học sử dụng phương pháp mô phỏng FDTD.**

Phân bố năng lượng điện trường của các bộ lọc được minh họa như hình 6. Hình 6(a), 6(b) và 6(c) tương ứng là phân bố năng lượng điện trường của bộ lọc quang học bậc 1, bậc 3 và bậc 5 tương ứng với các bước sóng $\lambda_1$ = 1555,28 nm, $\lambda_3$ = 1555,38 nm, và $\lambda_5$ = 1555,46 nm. Chúng ta thấy rằng, với bộ lọc quang học bậc cao, năng lượng được phân bố và lưu trữ ở tất cả các buồng cộng hưởng, điều này làm cho thời gian sống của bước sóng cộng hưởng trong cấu trúc lâu hơn, tức là hệ số phẩm chất $Q$ sẽ cao hơn.




**Hình 6. Phân bố năng lượng điện trường trong cấu trúc bộ lọc quang học bậc 1 (a), bậc 3 (b) và bậc 5 (c) tương ứng với các bước sóng cộng hưởng $\lambda_1$ = 1555,28 nm, $\lambda_3$ = 1555,38 nm và $\lambda_5$ = 1555,46 nm.**

## Kết luận

Trong bài báo này, chúng tôi đã trình bày kết quả lý thuyết của việc ghép nối tiếp nhiều cộng hưởng thông qua bus dẫn sóng chung nhờ sử dụng phương pháp ghép mode cộng hưởng theo thời gian. Kết quả lý thuyết được kiểm chứng bằng kết quả mô phỏng FDTD đối với bộ lọc quang học bậc cao dựa trên sự ghép cặp nối tiếp của nhiều cộng hưởng qua khe dẫn sóng hẹp trong cấu trúc tinh thể quang tử 2D. Kết quả lý thuyết và mô phỏng hoàn toàn phù hợp. Các bộ lọc quang học có bước sóng cộng hưởng nằm trong vùng thông tin quang và linh kiện thiết kế của bài báo này có thể được sử dụng trong các mạch tích hợp phẳng của viễn thông quang học như các bộ chuyển mạch và dẫn sóng thông tin.

## LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam (VAST) thông qua đề tài mã số VAST03.05/18-19 và chương trình hợp tác đào tạo nghiên cứu sinh giữa Đại học RMIT và Viện Khoa học Vật liệu - Học viện Khoa học và Công nghệ, VAST.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] E. Yablonovitch (1987), "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics", *Phys. Rev. Lett.,* **58(20)**, pp.2059-2062.

[2] S. John (1987), "Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices", *Phys. Rev. Lett.,* **58(23)**, pp.2486-2489.

[3] J.D. Joannopoulos, S.G. Johnson, J.N. Winn, and R.D. Meade (2008), *Photonic Crystals: Molding the flow of light*, Second edition Princeton Univ. Press.

[4] P.N. Prasad (2004), *Nanophotonics*, John Wiley & Sons.

[5] R. Kirchain and L. Kimerling (2007), "A roadmap for nanophotonics", *Nat. Photonics,* **1**, pp.303-305.

[6] K.J. Vahala (2003), "Optical microcavities", *Nature,* **424**, pp.839-846.

[7] K. Nozaki and T. Baba (2006), "Laser characteristics with ultimate-small modal volume in photonic crystal slab point-shift nanolasers", *Appl. Phys. Lett.,* **88**, 211101 (3pp).

[8] G.H. Kim, Y.H. Lee, A. Shinya and M. Notomi (2004), "Coupling of small, low-loss hexapole mode with photonic crystal slab waveguide mode", *Opt. Express,* **12(26)**, pp.6624-6631.

[9] V.R. Almeida, Q. Xu, C.A. Barrios, and M. Lipson (2004), "Guiding and confining light in void nanostructure", *Opt. Lett.,* **29(11)**, pp.1209-1211.

[10] Q.M. Ngo, S. Kim, J. Lee, H. Lim (2012), "All-optical switches based on multiple cascaded resonators with reduced switching intensity-response time products", *J. Lightwave Technol.,* **30(22)**, pp.3525-3531.

[11] T.T. Hoang, Q.M. Ngo, D.L. Vu, K.Q. Le, T.K. Nguyen, H.P.T. Nguyen (2018), "Induced high-order resonance linewidth shrinking with multiple coupled resonators in silicon-organic hybrid slotted two-dimensional photonic crystals for reduced optical switching power in bistable devices", *J. Nanophotonics,* **12(1)**, pp.016014(1-13).

[12] A. Taflove (1995), *Computational electrodynamics*, Norwood, MA: Artech House.

[13] A. Farjadpour, D. Roundy, A. Rodriguez, M. Ibanescu, P. Bermel, J.D. Joannopoulos, S.G. Johnson, and G. Burr (2006), "Improving accuracy by subpixel smoothing in FDTD", *Opt. Lett.,* **31(20)**, pp.2972-2974.

[14] H.A. Haus (1984), *Waves and fields in optoelectronics*, Massachusetts Institute of Technology.

[15] A.E. Miroshnichenko, S. Flach, Y.S. Kivshar (2010), "Fano resonances in nanoscale structures", *Rev. Mod. Phys.,* **82(3)**, pp.2257-2298.