

THIẾT KẾ VI MẠCH CHUYỂN ĐỔI VÀ DẪN THẲNG MODE QUANG SỬ DỤNG CẤU TRÚC TINH THỂ QUANG TỬ SILIC XUYÊN CHÉO ỒNG DẪN SÓNG

Chu Văn Cường¹, Lê Đức Toàn¹, Trương Cao Dũng¹

¹Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông

Tóm tắt— Trong bài báo này, chúng tôi trình bày một đề xuất đồng thiết kế về vi mạch với chức năng chuyển đổi và dẫn thẳng hai mode sóng quang trong phân cực TE dựa trên cấu trúc tinh thể quang tử silic. Kết quả nghiên cứu, tính toán thông số của vi mạch dựa vào mô phỏng số như phương pháp khai triển sóng phẳng PWE và phương pháp sai phân hữu hạn miền thời gian FDTD. Kết quả mô phỏng đã cho thấy vi mạch có hiệu năng quang học tốt, đó là khả năng cho phép dẫn sóng quang qua góc 90°, khả năng xuyên chéo ống dẫn sóng một cách đồng thời với suy hao thấp. Bên cạnh đó, đáp ứng băng thông của vi mạch là cao trong 50-nm với suy hao chèn <8dB và xuyên nhiễu thấp <-30 dB có thể chuyển đổi mode quang dựa trên sự thay đổi chiết suất của các tinh thể quang tử tại các ngõ giao lộ. Cũng vậy, dung sai hình học về bán kính và dung sai vật liệu về chiết suất tinh thể đối với hiệu năng quang học là lớn lần lượt là $\Delta r = \pm 5\text{nm}$ và $\Delta n = \pm 0.05$.

Từ Khóa— Bộ chuyển đổi mode, xuyên chéo ống dẫn sóng mode, mô phỏng số, tinh thể quang tử.

I. GIỚI THIỆU

Gần đây, những đột phá trong quang tử silic đã tạo ra nền tảng cho việc tính toán hiệu suất cao nhiều lõi dựa vào thông tin quang trên chip [1][2]. Gần đây, ghép kênh phân chia theo mode MDM (mode division multiplexing) trên nền tảng vật liệu SOI (silicon-on-insulator) được xem như một công nghệ hấp dẫn và hứa hẹn, đặc biệt các hệ thống lai ghép giữa WDM-MDM cung cấp một cách tiếp cận hiệu quả để tăng thêm khả năng truyền tải của kết nối quang trên chip [3]–[5]. Nhiều kết quả nghiên cứu đa dạng của các thiết bị và thành phần khác nhau của hệ thống MDM đã được công bố và chứng tỏ trong các báo cáo khoa học cũng như trong thực tế, chẳng hạn các bộ ghép kênh phân chia theo mode [6][7], các bộ chuyển mạch mode [8]–[10], bộ chọn đường mode [11][12], các bộ phân chia công suất mode [13][14]. Trong một hệ thống MDM, bộ chuyển đổi mode (mode converter) là một trong những phần tử cơ bản nhất [15]–[18]. Một giao diện xuyên chéo ống dẫn sóng đa mode nhỏ gọn, là một thành phần thiết yếu để thực hiện kết

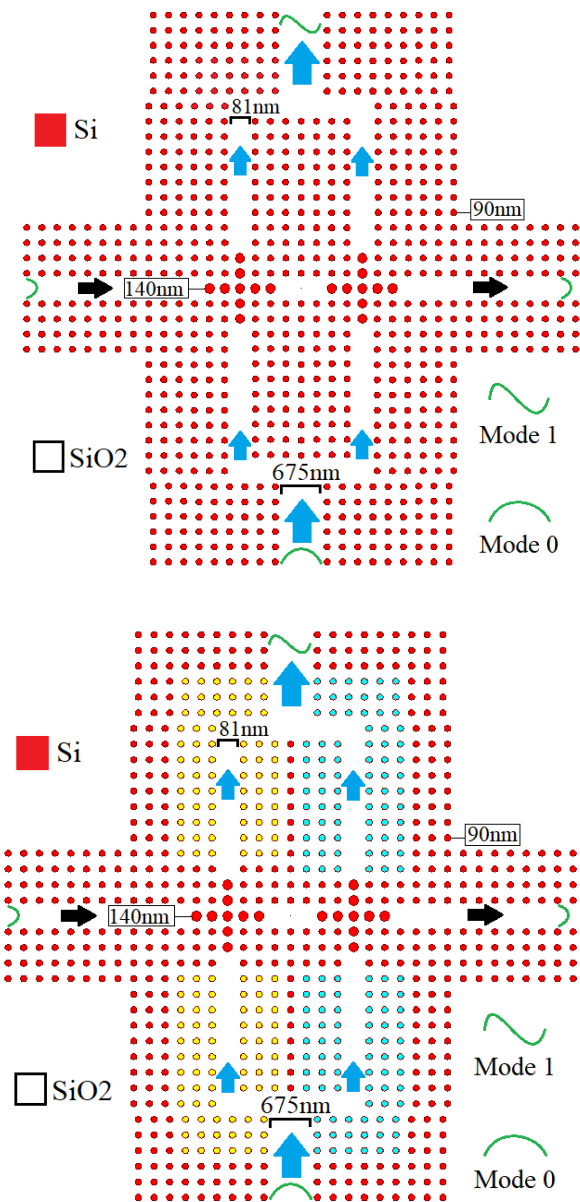
nối mạng quang MDM tích hợp dày đặc và linh hoạt từ nhiều hướng, lại hiếm khi được giải quyết do khớp nối phức tạp tại vùng giao nhau cho các mode bậc cao [19]–[21]. Bởi vì, phân giao cắt giữa các ống dẫn sóng thường có khuyết điểm là tán xạ và xuyên nhiễu âm tại điểm giao nhau do mặt sóng mở rộng và đặc tính không thích hợp pha. Trong thập kỷ qua, các nhà nghiên cứu đã đề xuất một số phương án để cải thiện hiệu suất giao cắt giữa hai ống dẫn sóng. Gần đây, hiệu ứng tự hình ảnh trong bộ ghép giao thoa đa mode (MMI) thông thường đã được sử dụng để nhận ra sự giao nhau giữa ống dẫn sóng chế độ kép [22]. Thật không may, các vị trí tự tạo ảnh hạn chế được bù đắp giữa mode cơ bản và mode bậc nhất trong ống dẫn sóng thông thường dẫn đến chiều dài khớp nối tương đối lớn và làm phức tạp quá trình thiết kế. Mặt khác, các thiết bị xuyên chéo ống dẫn sóng (waveguide crossing) thường được thực hiện dựa trên cơ chế của ống dẫn sóng phản xạ toàn phần không hỗ trợ các sóng ánh sáng dẫn trong cấu trúc có bán kính cong nhỏ.

Cấu trúc tinh thể quang tử PhC (photonic crystal) là một cấu trúc nano điện môi tuần hoàn cho phép sự lan truyền của sóng điện từ giống như điện tử trong tinh thể ảnh hưởng đến chuyển động của điện tử bằng cách xác định các dải năng lượng điện tử cho phép hoặc bị cấm [23][24]. Cấu trúc tinh thể quang tử chứa các vùng có hằng số điện môi (hay chiết suất) cao, thấp lặp đi lặp lại, các photon dưới dạng sóng truyền qua cấu trúc này có thể bị cấm hoặc không tùy thuộc vào bước sóng của chúng. Với mạng tinh thể đồng nhất có tính tuần hoàn trong một cấu trúc sẽ ảnh hưởng đến việc lan truyền của sóng quang sự ảnh hưởng này được thể hiện trên dải băng quang tử PBG (Photonic Band Gap). PBG là một dải bước sóng mà các bước sóng trong dải này hoàn toàn bị chặn hoặc hạn chế lan truyền trong cấu trúc. Một cấu trúc PhC có thể có một đến vài dải PBG hoặc cũng có thể không có dải PBG nào, các dải PBG trong một cấu trúc PhC phụ thuộc vào thông số của mạng tinh thể như hằng số mạng tinh thể và bán kính các tinh thể. Gần đây, nhiều cấu trúc vi mạch sử dụng PhC đã chứng tỏ được nhiều ưu điểm về khả năng dẫn sóng qua các ngã rẽ vuông góc, suy hao tương đối thấp, giam giữ ánh sáng

Tác giả liên hệ: Trương Cao Dũng,

Email: dungtc@ptit.edu.vn

Đến tòa soạn: 12/10/2020, chỉnh sửa: 15/12/2020, chấp nhận đăng: 31/12/2020.



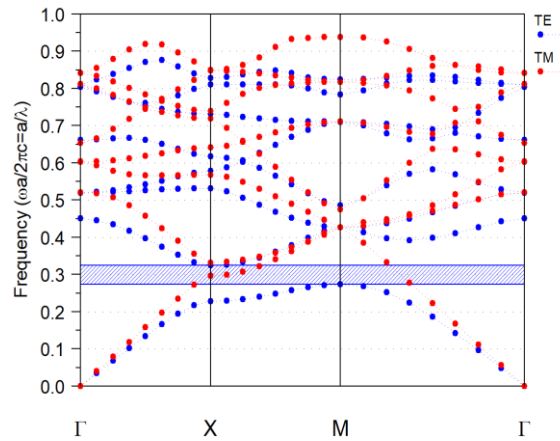
Hình 1: Vi mạch dẫn thẳng mode (a) và chuyển đổi mode (b).

trong kích thước chỉ vài micromet [25][26].

Trong bài báo này chúng tôi đề xuất một vi mạch với khả năng chuyển đổi mode của một sóng quang và khả năng xuyên chéo ống dẫn sóng khi đi qua giao điểm của hai ống dẫn sóng, sử dụng cho các bước sóng nằm trong dải bước sóng 1540nm đến 1590nm với hai mode TE₀ và TE₁. Vi mạch được thiết kế dựa trên cấu trúc tinh thể quang tử hai chiều (2D-PhC) và được tối ưu thông qua mô phỏng số bằng phương pháp sai phân hữu hạn miền thời gian trong không gian dẫn sóng hai chiều (2D-FDTD) là những phương pháp mô phỏng số chính xác nhất hiện nay về mô phỏng quang học, trường điện từ nói chung và ống dẫn sóng tinh thể quang tử bằng vật liệu silic nói riêng.

II. NGUYÊN LÝ THIẾT KẾ VÀ TỐI ƯU CẤU TRÚC

Vi mạch được thiết kế dựa trên cấu trúc tinh thể quang tử hai chiều sử dụng cho bước sóng 1550nm được trình bày



Hình 2. Band gap cấu trúc tinh thể quang tử silic được giải bằng phương pháp khai triển sóng phẳng PWE.

như trên Hình 1. Cấu trúc có dạng hình chữ thập, trong đó bao gồm một cơ cấu ống dẫn sóng theo trục dọc đóng vai trò của một thiết bị chuyển đổi mode hoặc dẫn thẳng hai mode và phương ngang là một ống dẫn sóng hỗ trợ hai mode. Theo chiều dọc, ống dẫn đa mode (hai mode) được chia thành hai kênh dẫn đơn mode bên trong vi mạch. Ống dẫn đa mode có rộng 675nm, các kênh dẫn đơn mode còn lại có độ rộng nhỏ hơn, 81nm (hình 1).

Để thiết kế vi mạch, cấu trúc mạng tinh thể quang tử đã được áp dụng. Trong đó, các tinh thể sắp xếp dạng hình vuông, các tinh thể trong mạng là các thanh điện môi nano Si (silicon nano rods) với chiết suất $n_{Si} = 3,45$ ở bước sóng 1550 nm hình trụ tròn được nhúng bao quanh là thủy tinh silica SiO₂ (chiết suất 1,44 tại bước sóng 1550 nm). Các thanh điện môi có bán kính $r = 90nm$ và hằng số chu kỳ điện môi $a = 450nm$. Tổng kích thước của một đơn vị vi mạch quang tử vuông là $160nm * 160nm$. Với hằng số chu kỳ điện môi và kích thước bán kính các tinh thể như trên, sử dụng phương pháp mô phỏng số khai triển sóng phẳng PWE (plane wave expansion) chúng tôi đã tìm được một dải bandgap của vi mạch trong mode TE, nằm trong khoảng $0,275 \leq a/\lambda \leq 0,324$, như được trình bày trên Hình 2. Chuyển sang miền bước sóng ta thu được là $1388 nm \leq \lambda \leq 1636 nm$. Các bước sóng nằm trong dải này không bị phân tán trong cấu trúc PhC. Điều này chứng minh rằng bước sóng chúng tôi đề xuất không bị phân tán trong cấu trúc và hoàn toàn lan truyền được trong cấu trúc vi mạch. Dựa vào điều này chúng tôi thực hiện lược bỏ các tinh thể để tạo ra các kênh dẫn.

Trong một cấu trúc tinh thể quang tử việc thay đổi một vài tinh thể trong cấu trúc không làm thay đổi band gap của cả cấu trúc nhưng sự thay đổi này có thể tạo ra một số thay đổi đặc biệt ở bên trong cấu trúc. Để tạo ra chức năng dẫn thẳng mode giúp cho hai sóng quang đi qua giao điểm của vi mạch mà không gây ảnh hưởng lên nhau, năm thanh điện môi bán kính 140nm được bố trí để sắp xếp theo hình chữ nhật đặt tại giao điểm của các kênh dẫn. Năm thanh điện môi này có tác dụng cho phép hai sóng quang đi qua giao điểm của kênh dẫn bởi sự phù hợp bandgap mà gần như không xuyên nhiễu ra khỏi hướng truyền, đảm bảo sóng quang truyền tới cổng ra không bị thay đổi mode đồng thời công suất bị suy hao không nhiều. Tương tự như vậy, bằng

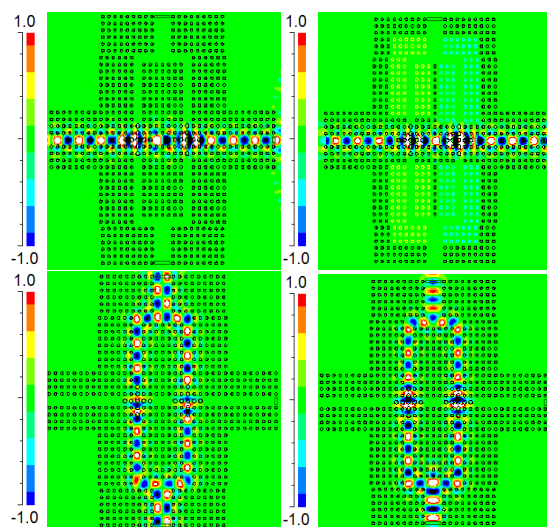
Bảng 1. Chiết suất các loại tinh thể

Loại tinh thể	Chiết suất
Màu đỏ	3,46
Màu xanh ngọc	3,2
Màu vàng	3,6

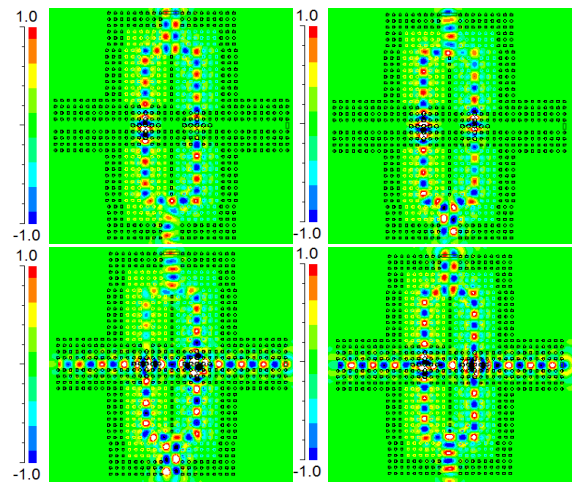
phương pháp thay đổi tính chất các thanh điện môi chúng tôi đã thiết kế chức năng chuyển đổi mode. Chức năng này được tạo ra dựa vào sự thay đổi chiết suất của các thanh điện môi xung quanh kênh dẫn để có thể chuyển đổi mode tại đầu ra (mode TE₀ chuyển sang mode TE₁, mode TE₁ chuyển sang mode TE₀). Lưu ý rằng, do cấu trúc dọc hoạt động như một bộ giao thoa kế MZI nên sự kết hợp pha từ hai cánh sẽ tạo ra chuyển đổi mode giữa TE₀ và TE₁ nếu dịch pha là 180° (π radian). Để chuyển đổi mode chúng tôi đã thay đổi chiết suất của thanh điện môi bên cạnh hai kênh dẫn, một kênh các tinh thể được tăng chiết suất lên 3,6-các tinh thể màu vàng trong Hình 1, một kênh các tinh thể được giảm chiết suất xuống 3,2-các tinh thể màu xanh ngọc trong hình 3. Sóng quang từ kênh dẫn đa mode được chia vào hai kênh dẫn đơn đã có sự thay đổi chiết suất, trong quá trình truyền hai kênh dẫn đơn này có tác dụng làm thay đổi pha của sóng quang. Bằng cách khảo sát pha là hàm của sự thay đổi chiết suất thông qua phương pháp mô phỏng FDTD từ công cụ mô phỏng được thương mại hóa Rsoft-Fullwave, lệch pha cần thiết 180° cho sự kết hợp chuyển đổi bậc mode giữa các nhánh đơn mode ở hướng dọc được tìm thấy nếu các chiết suất tinh thể màu thỏa mãn các trị số như được liệt kê trên Bảng 1. Ở đây, sự thay đổi về chiết suất của các thanh điện môi trong cấu trúc được thể hiện bằng các màu khác nhau trên Hình 1, giá trị chiết suất của các loại thanh điện môi trong chế độ chuyển đổi mode (thiết bị là một bộ mode converter) được thể hiện ở Bảng 1.

III. MÔ PHỎNG ĐÁNH GIÁ ĐẶC TÍNH VÀ THẢO LUẬN

Để khảo sát tính năng và hiệu năng của vi mạch, chúng tôi đã mô phỏng cấu trúc đã đề xuất dựa trên phương pháp sai phân hữu hạn miền thời gian FDTD (finite difference-



Hình 3. Kết quả mô phỏng FDTD cho chức năng truyền thẳng hai mode xuyên chéo qua ống dẫn sóng.



Hình 4. Kết quả mô phỏng FDTD cho chức năng chuyển đổi hai mode xuyên chéo qua ống dẫn sóng.

time domain). Thực hiện mô phỏng chức năng dẫn thẳng hai mode được trình bày tại Hình 3, và mô phỏng chức năng chuyển đổi hai mode xuyên chéo ống dẫn sóng được trình bày tại Hình 4, một cách tương ứng. Hình ảnh trực giác từ mô phỏng truyền trường trên hai hình vẽ cho thấy rằng vi mạch quang đã thực hiện được chức năng dẫn thẳng (through) hai mode và chuyển đổi (convert) hai mode một cách thành công xuyên chéo qua ống dẫn sóng nằm ngang mà hầu như không bị xuyên nhiễu, đảm bảo các mode sóng quang không bị thay đổi khi đi qua các giao điểm.

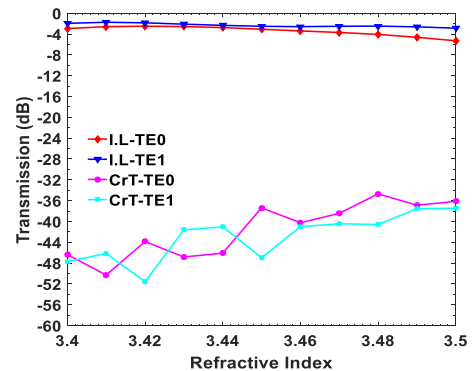
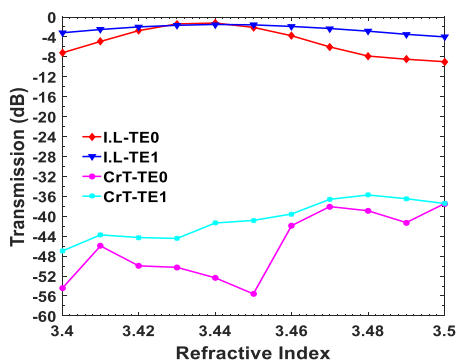
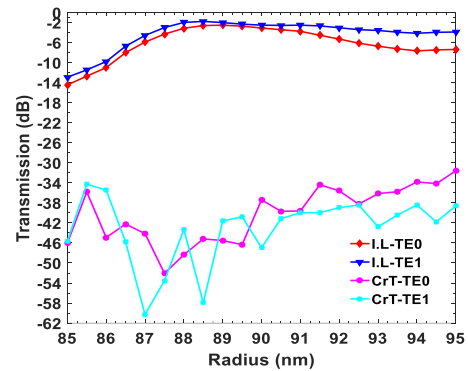
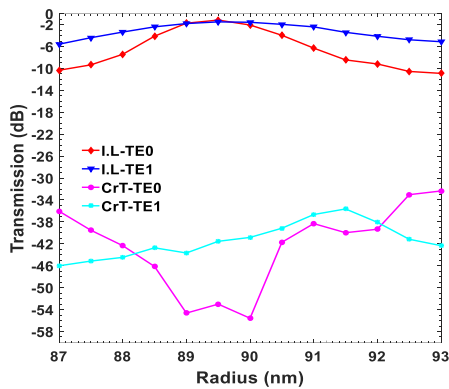
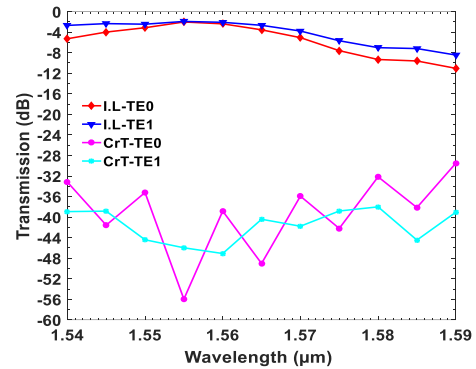
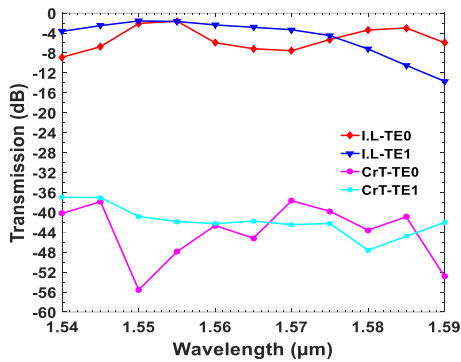
Chúng tôi đã thực hiện đánh giá hiệu năng của vi mạch dựa trên các đáp ứng hàm số của các thông số: dải bước sóng khảo sát trong phổ băng vùng cửa sổ telecom thứ ba từ 1540nm-1590nm, sự thay đổi bán kính của tất cả các thanh điện môi, sự thay đổi chiết suất của tất cả các thanh điện môi. Dựa vào việc khảo sát các thông số này chúng tôi đưa ra được các đồ thị hiệu năng của vi mạch trong từng trường hợp.

Tiếp tục thực hiện mô phỏng để đánh giá tính năng chuyển đổi mode, chúng tôi thay đổi chiết suất các thanh điện môi xung quanh kênh dẫn để tạo ra chức năng chuyển đổi mode như đề xuất ban đầu, kết quả mô phỏng chức năng được thể hiện tại hình 5. Kết quả cho thấy vi mạch đã thực hiện tốt chức năng chuyển đổi mode, với sóng quang đầu vào mode₀ (TE₀) chúng tôi thu được mode₁ (TE₁) tại đầu ra và ngược lại. Sau khi mô phỏng đánh giá thành công các tính năng của vi mạch đã đề ra. Chúng tôi thực hiện đánh giá hiệu năng của vi mạch dựa trên các thông số đã đưa ra trước đó. Các kết quả được đánh giá bằng hai tham số chính là suy hao chèn I.L (Insertion loss) và xuyên nhiễu Cr.T (Crosstalk), được mô tả như sau:

$$I.L = 10 \log \left(\frac{P_d}{P_{in}} \right) \quad (1)$$

$$Cr.T = 10 \log \left(\frac{P_d}{\sum P_{\lambda k}} \right) \quad (2)$$

Trong đó P_{in} là công suất đầu vào, P_d là công suất đầu ra mong muốn, $\sum P_{\lambda k}$ là công suất đầu ra không mong muốn. Chúng tôi đã thực hiện đánh giá hiệu năng dựa trên ba

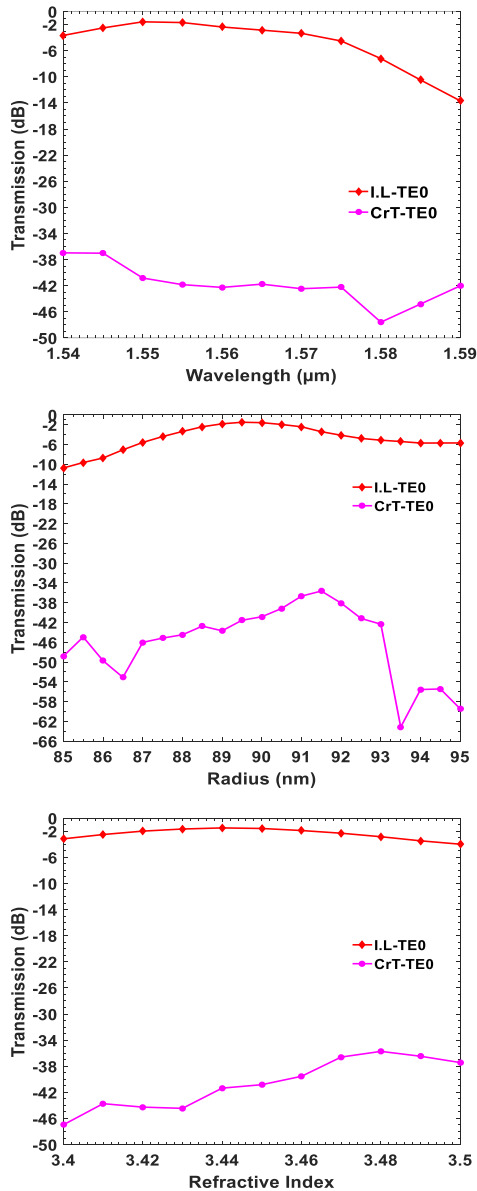


Hình 5. Hiệu năng truyền dẫn của vi mạch với chức năng dẫn thẳng khi truyền 2 mode TE0 và TE1 qua ống dẫn đa mode khi không có mode truyền cắt ngang.

Hình 6. Hiệu năng truyền dẫn của vi mạch với chức năng chuyển đổi bậc mode khi truyền 2 mode TE0 và TE1 qua ống dẫn đa mode khi không có mode truyền cắt ngang.

trường hợp: thực hiện đánh giá hiệu năng chức năng dẫn thẳng mode qua ống dẫn đa mode, thực hiện đánh giá hiệu năng chức năng dẫn thẳng mode qua ống dẫn đơn mode, thực hiện đánh giá hiệu năng chức năng chuyển đổi mode. Các kết quả được thể hiện tại Hình 5, Hình 6, Hình 7. Tại Hình 5 đã cho thấy với chức năng dẫn thẳng mode khi truyền 2 mode TE0 và TE1 qua mà không có sự truyền tín hiệu quang qua ống dẫn sóng truyền cắt ngang. Kết quả cho thấy, vi mạch có hiệu năng tốt khi hoạt động với dải bước sóng $1540\text{nm} \leq \lambda \leq 1590\text{nm}$, công suất tín hiệu đầu ra cao và xuyên nhiễu thấp, hiệu số insertion loss (I.L) và crosstalk (Cr.T) luôn lớn hơn 22dB. Với dung sai chế tạo bán kính các tinh thể trong khoảng $85\text{nm} \leq r \leq 95\text{nm}$, vi mạch luôn cho hiệu số I.L và Cr.T lớn hơn 20dB, tương tự khi chiết suất các tinh thể thay đổi trong dải $3.4 \leq n \leq 3.5$ hiệu số I.L và Cr.T lớn hơn 30dB. Các kết quả trên đã cho thấy với chức năng dẫn thẳng hiệu năng quang học của vi

mạch khá tốt. Đồ thị đánh giá chức năng chuyển đổi mode hiệu năng của vi mạch được thể hiện tại Hình 6, được thực hiện khi truyền hai mode TE0 và TE1 lần lượt được biến đổi thành cặp mode TE1 và TE0 ở đầu ra mà không có sự truyền của tín hiệu dẫn sóng cắt ngang. Nhìn vào đó chúng ta thấy được rằng, tương tự như chức năng dẫn thẳng, trong dải bước sóng khảo sát $1540\text{nm} \leq \lambda \leq 1590\text{nm}$ hiệu số giữa I.L và Cr.T luôn lớn hơn 22dB, chỉ số I.L tại bước sóng 1550nm nhỏ dưới 2dB. Dung sai chế tạo bán kính các tinh thể trong khoảng $85\text{nm} \leq r \leq 95\text{nm}$ luôn có hiệu số I.L và Cr.T lớn hơn 18dB, tương tự với dung sai chiết suất $3.4 \leq n \leq 3.5$ chỉ số hiệu năng luôn lớn hơn 30dB. Qua đó cho thấy với chức năng chuyển đổi mode hiệu năng của vi mạch cũng rất tốt. Cuối cùng chúng tôi đánh giá chức năng dẫn thẳng với ống dẫn sóng đơn mode truyền ngang xuyên qua cấu trúc thẳng khi hướng dọc không có kích thích các mode quang, kết quả được thể hiện tại Hình 7, hiệu năng của vi



Hình 7. Hiệu năng truyền dẫn của vi mạch với chức năng dẫn thẳng khi 2 mode TE₀ và TE₁ không được truyền mà chỉ có ống dẫn sóng đơn mode truyền cắt ngang.

mạch khi thực hiện chức năng dẫn thẳng qua ống dẫn sóng đơn mode cho hiệu năng rất tốt. Trong dải bước sóng $1540\text{nm} \leq \lambda \leq 1590\text{nm}$ hiệu số giữa I.L và Cr.T luôn lớn hơn 30dB, chỉ số I.L tại bước sóng 1550nm nhỏ dưới 2dB cho thấy suy hao thấp. Dung sai chế tạo bán kính các tinh thể trong khoảng $85\text{nm} \leq r \leq 95\text{nm}$ luôn có hiệu số I.L và Cr.T lớn hơn 24dB. Tương tự, với dung sai chiết suất $3,4 \leq n \leq 3,5$ chỉ số hiệu năng luôn lớn hơn 30dB. Kết quả cho thấy hiệu năng với ống dẫn đơn là tốt nhất. Sau khi đánh giá với ba trường hợp, chức năng của vi mạch chúng tôi thấy rằng với dung sai bán kính 10%, dung sai chiết suất 3% so với thông số đưa ra ban đầu hiệu năng của vi mạch thay đổi không quá lớn.

Thêm vào đó, thiết bị đã đề xuất trong nghiên cứu này

được bố trí trên một diện tích cực nhỏ cỡ $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ nên tiềm năng ứng dụng trong các vi mạch quang tử cỡ lớn VLSPICs (very large scale photonic integrated circuits). Mặt khác, so sánh với các cấu trúc của thiết bị chuyển đổi mode của công nghệ quang tử silic dựa trên ống dẫn sóng phản xạ toàn phần [27]–[29] thì cấu trúc sử dụng PhC trong nghiên cứu này có kích thước nhỏ hơn nhiều với khả năng dẫn tín hiệu quang trong các khớp nối vuông góc và xuyên chéo kênh với chất lượng cực tốt về độ xuyên nhiễu với cùng độ rộng đáp ứng băng thông bước sóng.

IV. KẾT LUẬN

Để kết thúc, bài báo này trình bày thiết kế ngắn gọn của một thiết bị dẫn thẳng hoặc chuyển đổi bậc mode xuyên chéo ống dẫn sóng dựa trên cấu trúc tinh thể quang tử bằng vật liệu silic trên nền thủy tinh silic. Việc nghiên cứu thiết kế, tối ưu hoạt động và đặc tính hóa được sử dụng các phương pháp mô phỏng số. Kết quả cho thấy thiết bị hoạt động có hiệu năng quang học cao trong băng thông rộng 50-nm với suy hao chèn thấp hơn 8dB, xuyên nhiễu kênh luôn nhỏ hơn -30dB. Bên cạnh đó, dung sai chế tạo của thiết bị là tương đối lớn với đáp ứng dung sai hình học và vật liệu tương ứng là $\Delta r = \pm 5\text{nm}$, $\Delta n = \pm 0.05$. Hơn nữa, toàn bộ thiết bị có thể bố trí trong một diện tích chân đế rất nhỏ $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$. Do vậy, thiết bị quang tử đề xuất có tiềm năng ứng dụng lớn trong các vi mạch quang tử tích hợp tốc độ cao, các thiết bị kết nối quang và các hệ thống thông tin MDM liên chip.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông trong đề tài có mã số HV-2020-ĐT-12.

REFERENCES

- [1] R. Min, R. Ji, Q. Chen, L. Zhang, and L. Yang, “A universal method for constructing n-port nonblocking optical router for photonic networks-on-chip,” *J. Light. Technol.*, vol. 30, no. 23, pp. 3736–3741, 2012, doi: 10.1109/JLT.2012.2227945.
- [2] C. Zhang, S. Zhang, J. D. Peters, and J. E. Bowers, “ $8 \times 8 \times 40$ Gbps fully integrated silicon photonic network on chip,” *Optica*, vol. 3, no. 7, p. 785, 2016, doi: 10.1364/optica.3.000785.
- [3] P. Dong, Y.-K. Chen, T. Gu, L. L. Buhl, D. T. Neilson, and J. H. Sinsky, “Reconfigurable 100 Gb/s Silicon Photonic Network-on-Chip [Invited],” *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 7, no. 1, p. A37, 2015, doi: 10.1364/JOCN.7.000A37.
- [4] X. Wu, C. Huang, K. Xu, C. Shu, and H. K. Tsang, “Mode-Division Multiplexing for Silicon Photonic Network-on-Chip,” *IEEE J. Light. Technol.*, vol. 35, no. 15, pp. 3223–3228, 2017.
- [5] M. Ye, Y. Yu, G. Chen, Y. Luo, and X. Zhang, “On-chip WDM mode-division multiplexing interconnection with optional demodulation function,” *Opt. Express*, vol. 23, no. 25, p. 32130, 2015, doi: 10.1364/OE.23.032130.
- [6] D. Dai, C. Li, S. Wang, H. Wu, Y. Shi, and Z. Wu, “10-Channel Mode (de) multiplexer with Dual Polarizations,” *Laser Photonics Rev.*, vol. 1700109, pp. 1–9, 2017, doi: 10.1002/lpor.201700109.
- [7] J. Li *et al.*, “Ultra-Low-Noise Mode-Division Multiplexed WDM Transmission over 100-km FMF Based on a Second-Order Few-Mode Raman Amplifier,” *J. Light. Technol.*, vol.

- 36, no. 16, pp. 3254–3260, 2018, doi: 10.1109/JLT.2018.2839710.
- [8] Q. Fang *et al.*, “Ultralow power silicon photonics thermo-optic switch with suspended phase arms,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 23, no. 8, pp. 525–527, 2011, doi: 10.1109/LPT.2011.2114336.
- [9] D. Dai, “Silicon Nanophotonic Integrated Devices for On-Chip Multiplexing and Switching,” *J. Light. Technol.*, vol. 35, no. 4, pp. 572–587, 2017, doi: 10.1109/JLT.2016.2587727.
- [10] X. Zi, L. Wang, K. Chen, and K. S. Chiang, “Mode-Selective Switch Based on Thermo-Optic Asymmetric Directional Coupler,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 30, no. 7, pp. 618–621, 2018, doi: 10.1109/LPT.2018.2808466.
- [11] H. Jia, T. Zhou, X. Fu, J. Ding, L. Zhang, and L. Yang, “Integrated five-port non-blocking optical router based on mode-selective property,” *Nanophotonics*, vol. 7, no. 5, pp. 853–858, 2018, doi: 10.1515/nanoph-2018-0010.
- [12] H. Jia, T. Zhou, X. Fu, J. Ding, L. Zhang, and L. Yang, “Four-port mode-selective silicon optical router for on-chip optical interconnect,” *Opt. Express*, vol. 26, no. 8, pp. 9740–9748, 2018, doi: 10.1364/OE.26.009740.
- [13] Y. Luo, Y. Yu, M. Ye, C. Sun, and X. Zhang, “Integrated dual-mode 3 dB power coupler based on tapered directional coupler,” *Sci. Rep.*, vol. 6, pp. 1–7, 2016, doi: 10.1038/srep23516.
- [14] Z. Li, Y. Liu, H. Guan, W. Han, and Z. Li, “Ultra-compact low-loss 1×4 optical power splitter with splitting ratio of 1:2:4:8 based on two-stage cascaded MMI couplers,” *Opt. Lett.*, vol. 44, no. 22, p. 5622, 2019, doi: 10.1364/ol.44.005622.
- [15] D. Dai, S. He, and H. K. Tsang, “Bilevel mode converter between a silicon nanowire waveguide and a larger waveguide,” *J. Light. Technol.*, vol. 24, no. 6, pp. 2428–2433, 2006, doi: 10.1109/JLT.2006.874554.
- [16] C. Zhu, “A compact silicon-based TM₀-to-TM₂ mode-order converter using shallowly-etched slots,” *J. Opt.*, p. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aad7de>, 2018, doi: 10.1080/15248372.2013.767261.
- [17] H. Ye *et al.*, “Ultra-Compact Waveguide-Integrated TE-Mode Converters with High Mode Purity by Designing Ge/Si Patterns,” *IEEE Photonics J.*, vol. 11, no. 4, 2019, doi: 10.1109/JPHOT.2019.2924544.
- [18] H. D. T. Linh, T. C. Dung, K. Tanizawa, D. D. Thang, and N. T. Hung, “Arbitrary TE₀/TE₁/TE₂/TE₃ Mode Converter Using 1×4 Y-Junction and 4×4 MMI Couplers,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, no. c, pp. 1–8, 2019, doi: 10.1109/JSTQE.2019.2937169.
- [19] C. Sun, Y. Yu, and X. Zhang, “Ultra-compact waveguide crossing for a mode-division multiplexing optical network,” *Opt. Lett.*, vol. 42, no. 23, pp. 4913–4916, 2017, doi: 10.1364/OL.42.004913.
- [20] W. Chang *et al.*, “An Ultracompact Multimode Waveguide Crossing Based on Subwavelength Asymmetric Y-Junction,” *Photonics Res.*, vol. 10, no. 4, pp. 660–665, 2018, doi: 10.1109/JPHOT.2018.2847762.
- [21] B. Wu, Y. Yu, and X. Zhang, “Multimode waveguide crossing with ultralow loss and low imbalance,” *Opt. Express*, vol. 28, no. 14, pp. 14705–14710, 2020, doi: 10.1364/oe.392445.
- [22] 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.
- [23] E. Yablonovitch, “Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, no. 20, pp. 2059–2062, 1987.
- [24] H. S. Dutta, A. K. Goyal, V. Srivastava, and S. Pal, “Coupling light in photonic crystal waveguides: A review,” *Photonics Nanostructures - Fundam. Appl.*, vol. 20, pp. 41–58, 2016, doi: 10.1016/j.photonics.2016.04.001.
- [25] Q. Liu, Z. Ouyang, C. J. Wu, C. P. Liu, and J. C. Wang, “All-optical half adder based on cross structures in two-dimensional photonic crystals,” *Opt. Express*, vol. 16, no. 23, p. 18992, 2008, doi: 10.1364/OE.16.018992.
- [26] S. Naghizade and S. M. Sattari-Esfahlan, “An Optical Five Channel Demultiplexer-Based Simple Photonic Crystal Ring Resonator for WDM Applications,” *J. Opt. Commun.*, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1515/joc-2017-0129.
- [27] H.-L. Han *et al.*, “High performance ultra-compact SOI waveguide crossing,” *Opt. Express*, vol. 26, no. 20, p. 25602, 2018, doi: 10.1364/oe.26.025602.
- [28] C. Sun, Y. YU, and X. Zhang, “Silicon mode multiplexer processing dual-path mode-division multiplexing signals,” *Opt. Lett.*, vol. 41, no. 23, pp. 2–5, 2016, doi: 10.1364/OL.41.005511.
- [29] W. Chang *et al.*, “Inverse design and demonstration of an ultracompact broadband dual-mode 3 dB power splitter,” *Opt. Express*, vol. 26, no. 18, p. 24135, 2018, doi: 10.1364/oe.26.024135.

A CODESIGN OF OPTICAL MODE CONVERTER AND MODE CROSSING BASED ON SILICON PHOTONIC CRYSTAL STRUCTURES

Abstract—This paper presents a co-designed proposal of photonic integrated circuits with capabilities of converting and crossing for two optical waveguide modes in TE polarization based on the silicon photonic crystal structure. Calculation and optimization results of structural parameters are based on numerical simulation methods such as the plane wave expansion method and finite difference time domain method. The simulation results showed that the PICs have good optical performance when guiding optical waves through 90° angle bent waveguides and waveguide crossing sections simultaneously with low attenuation. Besides, the bandwidth responses of proposed devices are as much as 50-nm with insertion loss smaller than 8 dB and crosstalk under -30 dB, which can switch optical modes by manipulating a specific refractive index modulation progress of photonic crystals at intersections. The geometrical tolerance of radius and the material tolerance of the refractive index for optical performance are relatively large, corresponding to $\Delta r = \pm 5\text{nm}$ and $\Delta n = \pm 0.05$, respectively.

Keywords— Mode converter, mode waveguide crossing, silicon photonic crystal, co-design, numerical. simulation.



Chu Văn Cường đang là sinh viên chuẩn bị tốt nghiệp đại học tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông (PTIT). Anh ấy từng là thành viên của phòng thí nghiệm quang tử học AI tại PTIT từ năm 2018. Anh ấy đang theo đuổi chương trình học tập sau đại học. Hướng nghiên cứu quan tâm chính của anh ấy bao gồm mạch tích hợp quang tử, tinh thể quang tử, kết nối

ứng dụng chuyển đổi quang-điện tử, thiết kế hệ thống quang điện tử nhúng được.



Lê Đức Toàn tốt nghiệp đại học Giao thông vận tải Hà Nội tương ứng các cấp độ B.E, M.Sc. năm 2000, 2003. Hiện tại, anh ấy là giảng viên khoa Kỹ thuật Điện tử tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông. Hướng nghiên cứu quan tâm chính của anh ấy bao gồm: Thiết kế các vi mạch điện tử tương tự và số, lý thuyết mạch, các cấu kiện quang-điện tử.



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

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