

# ĐỀ XUẤT THIẾT KẾ BỘ CHUYỂN ĐỔI VÀ GHÉP KÊNH HAI MODE DỰA TRÊN CẤU TRÚC GIAO THOA ĐA MODE VÀ CHỮ Y BẰNG ỐNG DẪN SÓNG SILIC

## A DESIGN PROPOSAL FOR A BROADBAND MODE (DE) MULTIPLEXING SYNTHESIZER BASED ON A 3×1 MULTIMODE INTERFERENCE COUPLER AND A Y-JUNCTION USING SILICON WAVEGUIDES

Trần Tuấn Anh, Trần Đức Hân, Vũ Văn Yên

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội; mrtran3332@gmail.com

**Tóm tắt** - Bài báo đề xuất một bộ chuyển đổi ghép/phân kênh hai mode với băng rộng, hiệu suất cao và dung sai chế tạo lớn bởi nền tảng vật liệu silic trên nền thủy tinh silic SiO<sub>2</sub>. Bằng cách sử dụng một bộ ghép giao thoa đa mode 3×1 MMI, một bộ ghép tiếp giáp chữ Y hình sin ở hai nhánh ra và hai bộ dịch pha hình cánh bướm tuyến tính, tổng hợp mode từ sự kết hợp của mode cơ sở và mode bậc một được chuyển đổi thành mode cơ sở, được sáng tỏ thông qua mô phỏng. Kết quả mô phỏng bằng phương pháp mô phỏng truyền chùm ba chiều 3D-BPM (three dimensions - beam propagation method) kết hợp phương pháp hệ số chiết suất hiệu dụng cho thấy hiệu suất chuyển đổi mode cao lên đến 93,32% trong toàn bộ băng C với suy hao chèn thấp. Thêm nữa, cấu trúc đề xuất có dung sai chế tạo theo chiều rộng vùng đa mode có thể đạt được ± 20nm. Cấu kiện được đề xuất phù hợp cho những ứng dụng của mạch tích hợp quang trên một chip.

**Từ khóa** - bộ ghép (phân) kênh theo mode; bộ ghép đa mode; bộ ghép hình chữ Y; phương pháp truyền chùm; ống dẫn sóng silic.

### 1. Giới thiệu

Các hệ thống truyền dẫn quang dung lượng lớn đáp ứng cho nhu cầu gia tăng của lưu lượng số liệu, chẳng hạn Internet hay các dịch vụ truyền video không ngừng được phát triển trong những năm gần đây. Một trong những công nghệ truyền dẫn phổ biến hiện tại để đáp ứng nhu cầu phát triển dung lượng là công nghệ ghép kênh phân chia theo bước sóng WDM (wavelength division multiplexing) [1] với các bước sóng lên đến 100 Gbps. Bên cạnh đó, một số phương pháp sử dụng như ghép kênh phân chia theo trạng thái phân cực PDM (polarization division multiplexing), các dạng điều chế đa mức (multilevel modulation format) [2] cũng là các chọn lựa để nâng cao dung lượng. Tuy nhiên, các công nghệ trên nền quang sợi bị chi phối bởi ảnh hưởng của tán sắc và tán sắc mode phân cực (PMD) đến hiệu năng hoạt động của hệ thống, do vậy chưa tận dụng được nền tảng băng thông khổng lồ của sợi quang.

Một cách tiếp cận mới là sử dụng kỹ thuật ghép kênh phân chia theo mode - MDM (mode division multiplexing). Gần đây, MDM được quan tâm lớn trong cộng đồng nghiên cứu như là giải pháp tốt để gia tăng dung lượng cho hệ thống truyền dẫn qua sợi quang [3] để vượt qua vấn đề giới hạn Shannon [4], [5] cho mỗi kênh riêng rẽ. Trong đó, mỗi kênh quang được thực hiện với mỗi mode riêng phân chia theo bậc của mode hoặc kể cả trạng thái phân cực mode. Đặc biệt là kỹ thuật này kết hợp với công nghệ WDM hoặc điều chế đa mức, điều chế pha vì sai sẽ làm tăng dung lượng hệ thống lên nhiều lần, bằng đúng số lượng mode được sử dụng. Các bộ thu kết hợp đơn mode sử dụng các bộ xử lý

**Abstract** - This paper proposes a new design for a mode (de)multiplexing synthesizer with broad bandwidth, high mode conversion efficiency and large fabrication tolerance on a silicon-on-insulator (SOI) platform. By using a 3×1 multimode interference (MMI) coupler, a sinusoidal symmetric Y junction coupler and two linear butterfly-shaped phase shifters, mode synthesis from the fundamental mode TE<sub>0</sub> and the first-order mode TE<sub>1</sub> to the fundamental mode TE<sub>0</sub> is achieved by numerical simulation. The phase evolution in the structure is discussed in detail. Performance analysis of the mode synthesizer is carried out numerically. Simulation results by using three dimension beam propagation method (3D-BPM) incorporated with effective index method (EIM) show high performance of the device whose maximal mode conversion efficiency can be up to 93.32% (i.e., insertion loss can be less than 0.3 dB) in the whole C-band. In addition, the proposed mode synthesizer has large fabrication tolerance. For example, the width deviations of the multimode interference coupler can be as large as 20 nm. The proposed device is suitable for applications to on-chip photonics integrated circuits.

**Key words** - Mode (de) multiplexers, MMI coupler, symmetric Y coupler, beam propagation method (BPM), SOI waveguide.

2×2 MIMO (đa đầu vào đa đầu ra) để lọc và tách riêng các mode phân cực. Nếu các mode trong hệ thống MDM tăng lên, số lượng bộ xử lý MIMO tăng theo và độ phức tạp tính toán cũng tăng lên rất nhanh. Để loại trừ xử lý MIMO trong các hệ thống MDM, yêu cầu cần thiết kể các bộ ghép kênh MDM toàn quang. Việc thiết kế các bộ MDM như vậy có thể thực hiện bằng hai cách: (1) sử dụng các mạch tích hợp quang phẳng - PLC (planar lightwave circuits) [1] [6]; hoặc (2) sử dụng kỹ thuật quang sợi [7]. Việc sử dụng kỹ thuật quang sợi đã nhằm tạo ra các bộ ghép kênh MDM kết hợp với kỹ thuật WDM để nâng cao dung lượng có một số ưu điểm như: tương thích dễ với sợi quang, hiệu suất biến đổi mode và tách ghép mode tốt, suy hao nhỏ; tuy nhiên, khả năng tiện lợi trong xử lý kém, khó điều khiển bởi các hiệu ứng vật lý, diện tích hiệu dụng của sợi quang là lớn (do đường kính lõi cỡ 8-10 μm với sợi đơn mode) nên khó phối ghép với các mạch kích thước nano.

Công nghệ sử dụng mạch quang phẳng PLCs bằng vật liệu silic trên nền chất cách điện mà hầu hết là thủy tinh silic - SOI (silicon on insulator) có nhiều ưu điểm như: sai khác hệ số chiết suất lõi-vỏ lớn, nên khả năng bắt giữ ánh sáng cao, suy hao vật liệu tương đối thấp ở dải bước sóng telecom, kích thước mode hiệu dụng nhỏ, nên mạch tích hợp sẽ có kích thước nhỏ và thuận lợi phối ghép với các mạch kích thước nano, tốc độ xử lý cao, khả năng onchip và tái cấu hình linh hoạt [8]. Hơn nữa, giá thành vật liệu rẻ, rất sẵn có và công nghệ chế tạo tương thích công nghệ chế tạo vi mạch bán dẫn CMOS, nên giá thành sản phẩm các mạch tích hợp là thấp, khả năng tích hợp nguyên khối cao.

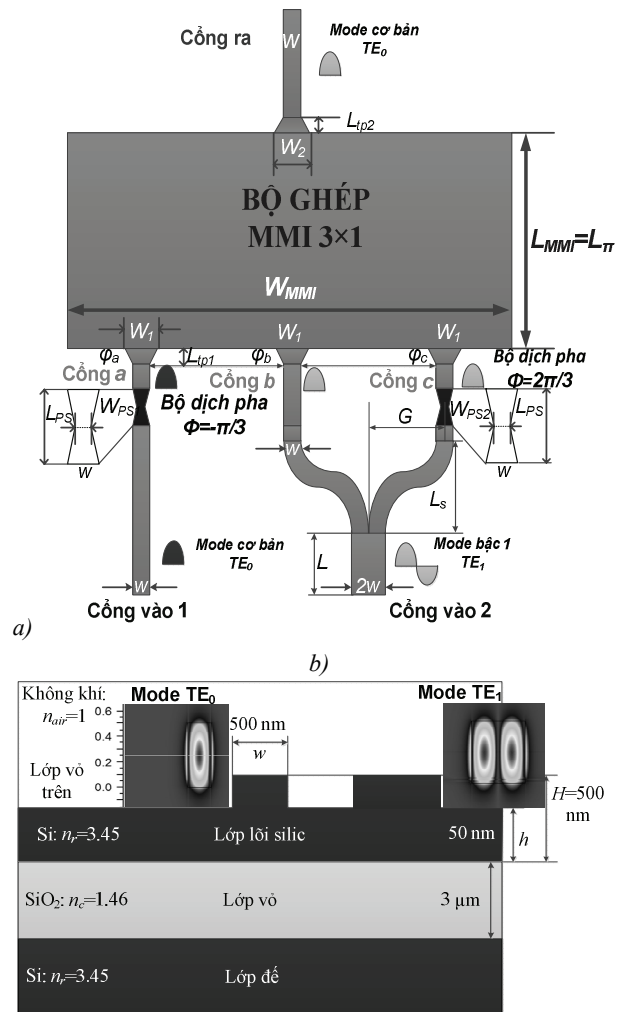
Do vậy, các bộ ghép MDM sử dụng công nghệ PLCs hầu hết được thiết kế và chế tạo trong các nghiên cứu là sử dụng các ống dẫn sóng SOI.

Gần đây, một số bộ chuyển đổi và ghép kênh MDM dựa trên nền tảng vật liệu SOI đã được đề xuất bằng cách sử dụng các bộ ghép đoạn nhiệt (adiabatic coupler), bộ chia chữ Y [9] hay bộ ghép giao thoa đa mode – MMI [6], [10], [11], bộ cộng hưởng vòng, v.v. Tuy nhiên, các cấu trúc như vậy có một dung sai chế tạo tương đối thấp, chế tạo phức tạp. Ngược lại, sử dụng ống dẫn sóng MMI có ưu điểm vì: băng thông tương đối cao, dung sai chế tạo lớn, suy hao chèn thấp. Một số nghiên cứu lý thuyết và mô phỏng gần đây đã đề xuất sử dụng cấu trúc dùng bộ ghép tiếp giáp chữ Y kết hợp bộ ghép MMI để tạo ra các bộ ghép kênh hai mode TMM (two mode (de)multiplexer), đã chứng tỏ các ưu điểm như kích thước nhỏ, khả năng tích hợp cao, băng thông tương đối lớn, đặc biệt dung sai chế tạo khá lớn [11].

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một thiết kế mô phỏng của một bộ chuyển đổi mode và ghép kênh mode đồng thời bằng cách sử dụng một bộ ghép chữ Y và một ống dẫn sóng giao thoa đa mode  $3 \times 1$  trên nền vật liệu silic và thủy tinh silic (vật liệu SOI). Phương pháp truyền chùm – BPM [12] (beam propagation method) và phương pháp hệ số hiệu dụng – EIM (effective index method) [13] được sử dụng để phân tích và mô phỏng, tối ưu hóa hoạt động của toàn bộ cấu trúc đề xuất. Kết quả cho thấy, cấu trúc thiết kế là tích hợp cao và băng rộng.

## 2. Nguyên lý thiết kế và tối ưu thiết kế

Hình 1a thể hiện sơ đồ nguyên lý của bộ biến đổi và ghép kênh theo mode dựa trên ống dẫn sóng silic dạng sườn. Lõi là tinh thể silic với chiết suất  $n_r=3,45$  và lớp vỏ là thủy tinh silic  $\text{SiO}_2$  với chiết suất  $n_c=1,46$ , lớp vỏ trên là không khí với chiết suất  $n_{air}=1$ . Cấu trúc được thiết kế cho hoạt động ở mode phân cực TE và bước sóng hoạt động ở vùng cửa sổ thứ tư  $\lambda=1550$  nm. Cấu trúc đề xuất gồm có hai ống dẫn sóng đầu vào với hình ảnh mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn FEM (finite element method) cho hai mode và hình chiếu đứng như Hình 1b. Ống dẫn sóng thứ nhất là một ống dẫn sóng hẹp hình chữ nhật với độ rộng  $w$  để chủ yếu hầu như dẫn chỉ mode cơ bản và gọi là cổng vào 1 (cánh bên trái trên Hình 1a). Trên cánh này chúng ta đặt một cấu trúc ống dẫn sóng hình cánh bướm tuyến tính để dịch pha  $\Delta\Phi_1 = -\pi/3$ . Ống dẫn sóng thứ hai bên cánh phải của Hình 1a là một ống dẫn sóng rộng để hỗ trợ tối thiểu 2 mode là một bộ ghép tiếp giáp chữ Y đối xứng với độ rộng ống dẫn sóng thân chữ Y là  $2w$ . Hai ống dẫn sóng đầu ra của tiếp giáp chữ Y là hai ống dẫn sóng truy nhập đơn mode hình sin với cùng độ rộng  $w$ . Hai ống dẫn sóng hình sin cách trục trung tâm khoảng cách ký hiệu là  $G$  và chiều dài  $L_s$  mà ta sẽ xác định giá trị ở phần sau, các ống dẫn sóng hình sin này sau đó được nối với các ống dẫn thẳng có độ rộng cũng là  $w$ . Cánh ngoài cùng bên phải đầu ra của tiếp giáp chữ Y được nối với ống dẫn sóng hình cánh bướm tuyến tính để dịch pha một lượng  $\Delta\Phi_2 = 2\pi/3$ . Các giá trị này sẽ được lý giải tại sao được chọn như vậy và cách nào tạo dịch pha ở phần phân tích tiếp theo của bài báo này.

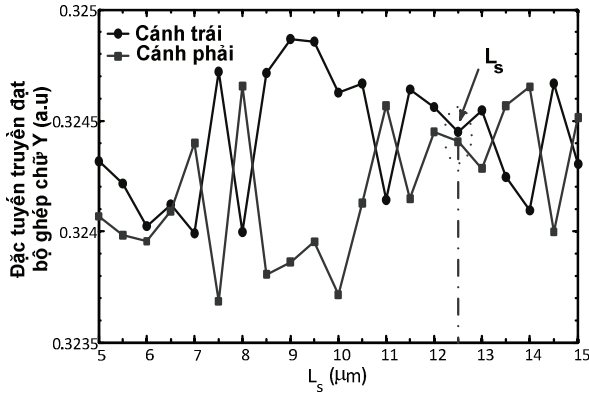


**Hình 1.** Sơ đồ cấu trúc của bộ ghép mode dựa trên ống dẫn sóng SOI: a) Hình chiếu bằng. b) Hình chiếu đứng và các mode mô phỏng được phóng vào các ống dẫn sóng đầu

1. Ống dẫn sóng cổng vào 1 sẽ được dẫn mode cơ bản  $TE_0$ , trong khi phần thân của tiếp giáp chữ Y ở cổng vào 2 sẽ được đưa vào một cách đồng thời mode bậc một  $TE_1$  với công suất gấp 2 công suất của mode cơ bản ở cổng vào 1. Sau đó, ba ống dẫn sóng đơn mode này được thiết kế với khoảng cách bằng nhau là  $2G$  được nối với một ống dẫn sóng đa mode (MMI)  $3 \times 1$  để tổng hợp chuyển đổi mode và ghép kênh thành mode cơ bản ở ống dẫn sóng đơn mode ở đầu ra trung tâm với độ rộng  $w$  của vùng giao thoa đa mode. Ba ống dẫn sóng truy nhập đầu vào nối với ống dẫn sóng giao thoa đa mode được ký hiệu lần lượt là các cổng  $a$ ,  $b$  và  $c$  như thể hiện ở Hình 1a. Để cải thiện hiệu suất ghép nối và chuyển đổi mode giữa các cổng vào và ra của vùng đa mode, các ống dẫn sóng truy nhập vào và ra này được kết nối với các ống dẫn sóng hình búp măng tuyến tính độ rộng đáy lớn lần lượt là  $W_1$  và  $W_2$  và cùng chiều dài  $L_{tp}$  trước và sau khi kết nối với vùng giao thoa đa mode.

2. Hoạt động của tiếp giáp chữ Y là một bộ ghép nối 3-dB (bộ chia quang đầu ra 50:50). Chiều dài thân chữ Y được chọn là  $L = 20$   $\mu\text{m}$ . Đỉnh trên của lớp tiếp giáp gồm có hai ống dẫn sóng hình sin với khoảng cách từ ống dẫn sóng đến đường trung tâm là  $G$ . Trong thiết kế này, ba cổng vào  $a, b$  và  $c$  của bộ ghép MMI được bố trí tại vị trí có tọa độ so với tâm hình chữ nhật tương ứng là:  $-W_{MMI}/3, 0$  và

$+W_{MMI}/3$  (ở đây,  $W_{MMI}$  là độ rộng của vùng MMI, vậy nên  $2G = W_{MMI}/3$ ). Bộ ghép MMI  $3 \times 1$  được thiết kế để hoạt động bởi cơ chế giao thoa tổng quát. Phân màu đồ biểu thị mode cơ sở và phân màu vàng thay thế cho mode bậc một.



**Hình 2.** Mô phỏng BPM cho chiều dài ống dẫn sóng hình sin của bộ ghép hình chữ Y là một hàm số

Chúng ta sử dụng ống dẫn sóng silic dạng sườn với tổng độ dày của lớp silic là:  $H=0,5 \mu\text{m}$  và độ cao của tấm màng silic là:  $h = 50 \text{ nm}$ . Độ rộng  $w$  của ống dẫn sóng đơn mode là nằm trong dải từ 160 nm đến 560 nm để thỏa mãn điều kiện đơn mode cho ống dẫn sóng silic ở bước sóng 1550 nm [14]. Độ rộng  $w$  được chọn là 500 nm trong thiết kế được đề xuất này.

Do sự giới hạn của tài nguyên tính toán, chúng ta sử dụng phương pháp 3D-BPM kết hợp với phương pháp hệ số hiệu dụng EIM để thiết kế và tối ưu toàn bộ cấu trúc. Kích thước lưới cho mô phỏng BPM được chọn là:  $\Delta x = 5 \text{ nm}$ ,  $\Delta z = 10 \text{ nm}$ . Chiều dài của các ống dẫn sóng hình sin  $L_s$  được xác định bởi mô phỏng BPM cốt để bộ ghép chữ Y hoạt động như là một bộ chia 3dB (tỷ lệ chia 50:50) suy hao thấp. Như được thấy trên Hình 2: đặc tuyến truyền đạt của bộ ghép chữ Y tốt nhất tại chiều dài là 12,5  $\mu\text{m}$  khi khoảng hở  $G$  được chúng ta chọn trước là 0,8  $\mu\text{m}$ . Do đó, trong thiết kế này chúng ta chọn  $L_s = 12,5 \mu\text{m}$  (các tham số kích thước này tương đương với bán kính cong của các ống dẫn sóng hình sin là 71,1  $\mu\text{m}$  với góc tâm bằng 5 radian) như được nhìn thấy với điểm đánh dấu trên Hình 2. Chú ý rằng các đặc tính truyền dẫn được biểu diễn trên Hình 2 với điều kiện thiết lập chuẩn hóa cân bằng của hai mode, mà ở đó công suất của mode  $TE_0$  và mode  $TE_1$  tương ứng với 33,33% (1/3) và 66,66% (2/3) của tổng công suất của các đầu vào (thiết lập là 1 đơn vị công suất).

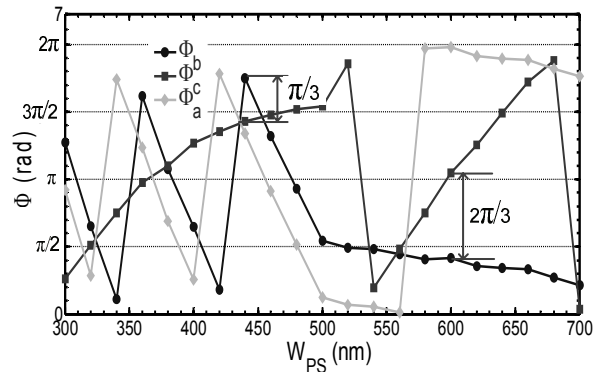
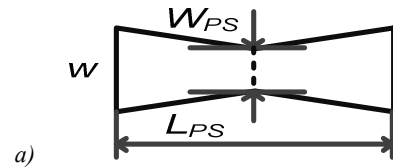
Các thiết bị giao thoa đa mode-MMI dựa trên tính chất tự tạo ảnh, theo đó các mode được dẫn trong ống dẫn sóng được kích thích và giao thoa theo chu kỳ khi một trường đầu vào một ống dẫn sóng nhỏ được truyền đến vùng ống dẫn sóng lớn hơn. Sau đó, các trường được kích thích trong vùng đa mode được phát dọc theo hướng truyền. Do cơ chế *giao thoa tổng quát* [15], [16], ảnh tự chụp sẽ được tái tạo tại các chiều dài là ba lần *chiều dài nửa phách* (half-beat length). Ở đây, nửa chiều dài phách được cho bởi công thức [15] sau đây:

$$L_\pi = \frac{4n_{\text{eff}}W_e^2}{3\lambda} \quad (1)$$

Ở đây:  $W_e = W_{MMI} + \frac{\lambda}{\pi}(n_{\text{eff}}^2 - n_c^2)$  (cho mode phân

cực TE) là độ rộng hiệu dụng của vùng MMI,  $\lambda$  là bước sóng hoạt động và  $n_{\text{eff}}$  là hệ số chiết suất hiệu dụng.

Để đạt được một biến đổi và tổng hợp mode  $TE_0$  từ một mode  $TE_0$  và một mode  $TE_1$ , bộ ghép MMI được thiết kế để hoạt động như là một bộ kết hợp quang  $3 \times 1$ . Xuất phát từ ý tưởng: tại chiều dài  $L_{MMI}=L_\pi$  thì bộ ghép  $3 \times 3$  MMI hoạt động như là một bộ chia đường quang 1/3 hoặc một bộ kết hợp quang  $3 \times 1$  theo cơ chế giao thoa tổng quát. Hơn nữa, để kiểm tra rằng: khi bộ ghép MMI hoạt động như là một bộ kết hợp quang tại khoảng cách  $L_{MMI}=L_\pi$ , nếu chúng ta thực hiện đưa vào ba cổng  $a$ ,  $b$  và  $c$  các tín hiệu quang với công suất bằng nhau (hay biên độ bằng nhau) và các pha đầu vào tương ứng là:  $\varphi_a=-\pi/3$ ,  $\varphi_b=0$  and  $\varphi_c=-\pi/3$  thì các tín hiệu này sẽ được kết hợp tại cổng đầu ra trung tâm của vùng MMI. Thêm vào đó, chú ý rằng khi đưa mode  $TE_1$  vào cổng đầu vào 2, hai mode  $TE_0$  sẽ được phân tách ra từ mode này vào hai nhánh đầu ra của bộ ghép tiếp giáp chữ Y đối xứng với công suất ra bằng nhau và dịch pha của hai nhánh dẫn các mode  $TE_0$  là  $\pi$ , trong đó góc pha của nhánh trái nhanh hơn nhánh phải ở trên Hình 1. Do đó, tín hiệu từ cổng đầu vào 1 cần được dịch pha là:  $-\pi/3$ . Cũng như vậy, tín hiệu trước khi dẫn đến cổng vào  $a$  và tín hiệu từ cổng ra bên phải của cánh ngoài cần được dịch pha bằng  $2\pi/3$  trước khi dẫn đến cổng  $c$  cho hoạt động chuyển đổi và tổng hợp ghép kênh mode tại vùng giao thoa đa mode.



b)

**Hình 3.** Cấu trúc hoạt động của bộ dịch pha -PS dựa trên ống dẫn sóng SOI hình cánh bướm. a) sơ đồ khối của các PS, b) mô phỏng BPM cho góc pha của các PS khi cho độ rộng giữa biến đổi

Sai khác pha gồm  $+2\pi/3$  giữa ánh sáng tại nhánh trái và nhánh phải của bộ ghép chữ Y và  $-\pi/3$  tại ống dẫn sóng đưa vào mode cơ sở là điều kiện cần thiết để kết hợp ánh sáng vào bộ ghép MMI cho hoạt động tổng hợp ghép kênh mode. Do đó, các bộ dịch pha-PS (phase shifter) được bố trí để phù hợp với những sự sai pha này. Bộ dịch pha PS có dạng cấu trúc ống dẫn sóng hình búp măng ghép kiểu cánh bướm tuyến tính [17], được mô tả theo sơ đồ như Hình 3a. Khi độ rộng của ống dẫn sóng biến đổi theo chiều ngang cánh bướm thì hằng số truyền thay đổi, như thế làm hệ số chiết suất hiệu

dụng thay đổi gây sóng dẫn bị trễ và tạo ra một dịch pha. Do đó, các bộ dịch pha làm dịch pha giữa ánh sáng dọc theo chiều dài đường truyền so với ống dẫn sóng cùng độ rộng đầu vào. Hình 3b thể hiện kết quả sai pha do mô phỏng giữa một PS hình cánh bướm và ống dẫn sóng thẳng cùng chiều dài  $L_{PS}=20 \mu\text{m}$  và độ rộng vào  $w=500 \text{ nm}$  khi chúng ta thay đổi độ rộng dọc thân của cánh bướm  $W_{PS}$ . Trong mô phỏng này, chúng ta giả thiết phân cực điện từ là mode TE và các PS được tạo ra bởi ống dẫn sóng dây nano vật liệu SOI. Sự phụ thuộc của bước sóng vào PS cho thấy rằng các PS là không nhạy với bước sóng trong băng C ở dải 1525 nm - 1565 nm (dịch pha hầu như không thay đổi theo bước sóng). Độ rộng của các bộ dịch pha được chọn theo mô phỏng là  $W_{PS1} = 594 \text{ nm}$  và  $W_{PS2} = 400 \text{ nm}$  để đạt các dịch pha cần thiết như phân tích ở trên tương ứng với  $-\pi/3$  và  $+2\pi/3$  (xem Hình 3b).

Độ rộng của bộ ghép MMI được xác định bởi quan hệ như phân tích ở trên là:  $W_{MMI} = 6G = 4.8 \mu\text{m}$ . Điều này nhằm ngăn xuyên nhiễu không mong muốn giữa các ống dẫn sóng đầu ra. Hệ số hiệu dụng được tính toán bởi sử dụng công cụ giải mode (mode solver) từ phần mềm mô phỏng BPM được thương mại hóa Rsoft-Component Suite (của hãng Synopsys Inc). Sau đó, chiều dài nửa phách của bộ ghép MMI tại bước sóng 1550 nm được tính toán theo công thức phân tích truyền mode trong biểu thức (1). Tiếp theo, ta tối ưu bằng BPM xung quanh giá trị phân tích này để cho hiệu suất chuyển đổi và ghép mode tại đầu rất rung tâm vùng đa mode là:  $L_{\pi} = 59 \mu\text{m}$ . Do vậy, ta chọn chiều dài vùng đa mode MMI bởi:  $L_{MMI} = L_{\pi}$ . Cốt để giảm suy hao chèn và tăng sự bắt giữ ánh sáng, các ống dẫn sóng hình búp măng tuyến tính được sử dụng để kết nối giữa phần ống dẫn sóng đa mode với các ống dẫn sóng truy nhập (thường là đơn mode). Chiều dài của các ống dẫn sóng này được cố định là  $L_{PS} = 10 \mu\text{m}$ . Bằng cách sử dụng mô phỏng BPM, chúng ta nhận được các giá trị tối ưu đáng lớn tương ứng của các ống dẫn sóng hình thang (hình búp măng tuyến tính) này:  $W_1=0.75 \mu\text{m}$  và  $W_2=1.9 \mu\text{m}$ .

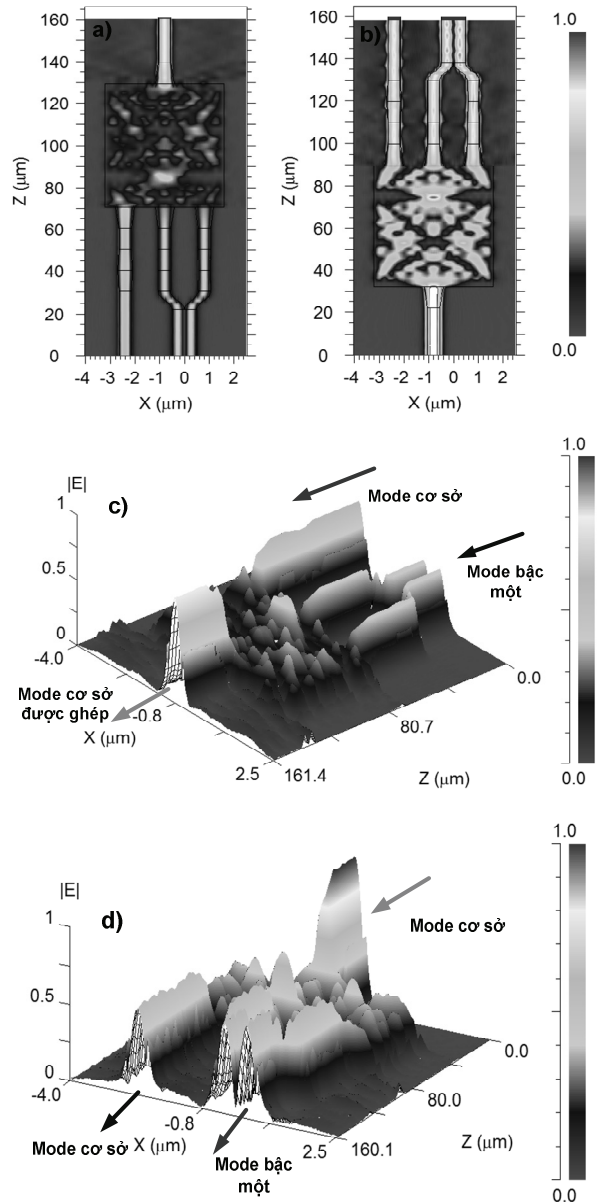
**Bảng 1.** Công suất mode cơ sở được chuyển đổi và ghép kênh ở đầu ra được chuẩn hóa

Bước sóng 1550 (nm)	Suy hao chèn - I.L (dB)
Mode muxer	-0.43
Mode demuxer	-0.26

**3. Đánh giá hiệu năng hệ thống và thảo luận**

Hình 4 thể hiện phân bố trường điện từ tại bước sóng hoạt động 1550 nm bằng mô phỏng BPM của cấu kiện đề xuất. Hình 4a mô phỏng cho cấu kiện khi thực hiện chức năng của bộ tổng hợp mode được gọi là mode-muxer (chuyển đổi và ghép kênh mode) khi đưa vào đồng thời hai mode cơ sở và mode bậc một ở đầu vào và ngược lại, Hình 4b mô phỏng cho cấu kiện đề xuất khi đóng vai trò của bộ biến đổi và phân kênh 2 mode được gọi là mode-demuxer. Có thể thấy rằng ánh sáng được ghép một cách hiệu quả trong cấu kiện: phần rất nhỏ công suất phát xạ ra các lớp vỏ của ống dẫn sóng khi ghép với ống dẫn sóng đa mode. Hình 4c và Hình 4d thể hiện mô phỏng cho mô đun biên độ phức của biên độ điện trường  $|E|$  cho trường hợp bộ ghép kênh và phân kênh. Hình ảnh trực quan cho thấy hiệu quả

hoạt động khi méo dạng sóng rất nhỏ. Lưu ý rằng, do sự hoạt động không hoàn hảo của bộ ghép đa mode MMI nên chiều dài của bộ phân kênh mode được tối ưu bằng mô phỏng của chúng tôi cho thấy giá trị tối ưu của suy hao chèn và đặc tính truyền đạt là  $L_{MMI} = L_{\pi} = 56,7 \mu\text{m}$ .



**Hình 4.** Hình ảnh mô phỏng của mẫu điện trường bằng phương pháp BPM, hình ảnh đường bao cho cấu kiện với chức năng: a) bộ ghép kênh mode, b) bộ phân kênh mode và hình ảnh mô đun phức của biên độ điện trường cho c) bộ ghép kênh mode, d) bộ phân kênh mode

Đối với một bộ ghép/phân kênh theo mode hay nói chung của một mạch quang phẳng tích hợp nói chung, một trong những tham số quan trọng nhất là suy hao chèn - I.L (insertion loss). Tham số hiệu năng này của bộ biến đổi và ghép kênh theo mode được định nghĩa như sau:

$$I.L = 10 \log \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \tag{2}$$

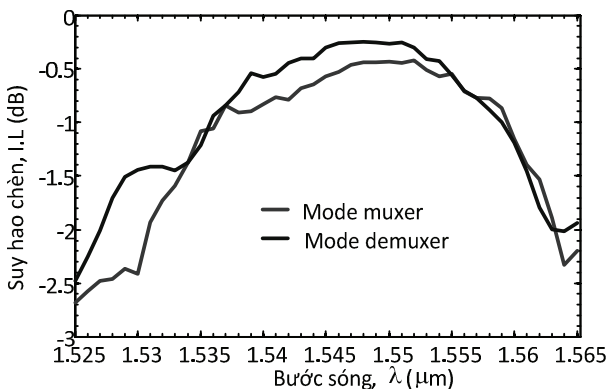
Ở đây,  $P_{in}$  là tổng công suất của các ống dẫn sóng đầu

vào,  $P_{out}$  là công suất đầu ra. Giá trị suy hao chèn được tính toán nhờ dữ liệu thu được bởi mô phỏng BPM cho bước sóng 1550 nm cho cấu kiện mode-muxer hoặc mode-demuxer như thấy ở trên Bảng 1. Kết quả cho thấy rằng bộ ghép kênh theo mode có suy hao chèn thấp.

Băng tần quang là một tham số hiệu năng tiếp theo rất quan trọng cho hoạt động của một thiết bị ghép kênh, phân kênh quang. Hình 5 thể hiện sự phụ thuộc bước sóng bởi mô phỏng BPM của phổ truyền đạt của suy hao chèn - I.L như tính toán ở công thức (2) trên khi cho trường hợp thiết bị hoạt động là bộ chuyển đổi và ghép kênh mode và ngược lại là phân kênh mode.

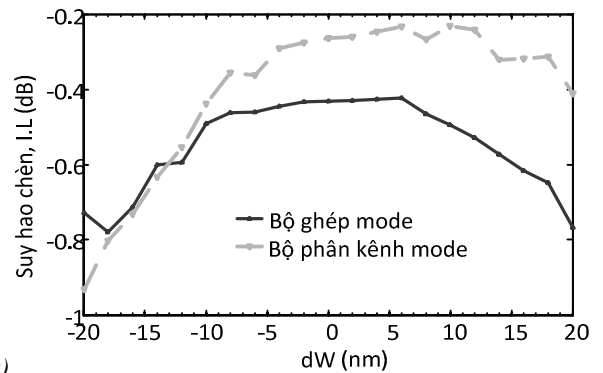
Chúng ta nghiên cứu sự phụ thuộc của bước sóng trong dải băng C của vùng cửa sổ thứ ba từ 1525 nm đến 1565 nm khi giữ kích thước cấu trúc cố định và công suất đầu vào chuẩn hóa là 1 đơn vị công suất. Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu suất chuyển đổi mode cho ghép hoặc phân kênh theo mode là cao trong toàn bộ băng C bởi suy hao chèn - I.L thay đổi trong khoảng từ 0.3 dB (93,32%) đến 2,7 dB trong toàn bộ khoảng băng này (như được thấy trên Hình 5), do vậy thiết bị thiết kế đã đề xuất có suy hao nhỏ trong dải băng rộng. Chiều dài cấu kiện vào khoảng 160  $\mu\text{m}$  là ít hơn một số cấu kiện tương tự đã được công bố thời gian gần đây, như tham khảo. Kích thước nhỏ của cấu kiện chứng tỏ khả năng phù hợp cho các mạch tích hợp trên nền một chip.

Phần tiếp theo nghiên cứu về dung sai chế tạo của hệ thống. Chúng ta biết cấu kiện giao thoa đa mode có tính chất dung sai chế tạo lớn [16]. Phần này xem xét ảnh hưởng của dung sai theo độ rộng của ống dẫn sóng đến hiệu năng quang học về đặc tính truyền đạt, cụ thể là suy hao chèn.

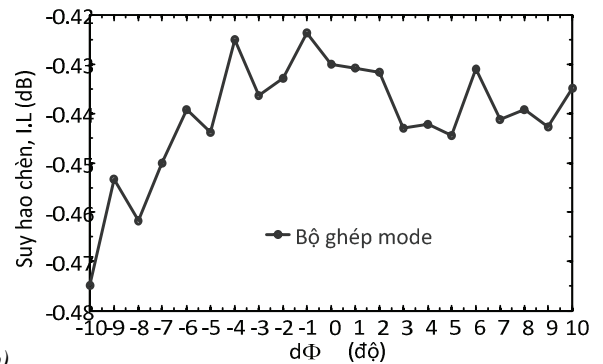


**Hình 5.** Đáp ứng phổ bước sóng của cấu trúc thiết kế bằng mô phỏng BPM cho băng C

Bằng cách sử dụng mô phỏng BPM, chúng ta xem xét suy hao chèn theo phụ thuộc hàm của dung sai độ rộng ống dẫn sóng vùng giao thoa đa mode cho cấu kiện trong vai trò của một bộ chuyển đổi và ghép kênh mode (mode muxer) cũng như phân kênh (mode demuxer). Như thấy trên Hình 6, suy hao chèn - I.L của cấu kiện đề xuất thay đổi nhỏ, không quá 1 dB trong dải sai số của độ rộng vùng MMI là  $\pm 20$  nm. Dung sai này khá lớn, dễ dàng thực hiện được theo phương pháp chế tạo ống dẫn sóng bằng công nghệ chế tạo vi mạch CMOS hiện hành (chẳng hạn sử dụng công nghệ DUV 248 nm) [18].



a)



b)

**Hình 6.** Sai số chế tạo được mô phỏng bằng phương pháp BPM theo: a) độ rộng ống dẫn sóng đa mode; b) sai số pha đầu vào của mode bậc một so với mode cơ sở

Cuối cùng, chúng ta đánh giá ảnh hưởng của sai pha giữa hai mode cơ sở và mode bậc một đến hiệu năng suy hao chèn của thiết bị trong vai trò của một bộ biến đổi và ghép kênh theo mode. Mô phỏng BPM cho thấy, sai pha  $d\Phi$  của mode bậc một so với mode cơ sở biến đổi trong khoảng  $\pm 10^\circ$  (hay  $\pi/18$  radian) thì suy hao chèn không quá 0,5 dB. Đây là khoảng sai lệch được phép là khá lớn. Chú ý rằng, sự méo dạng mode cơ sở tổng hợp do được ghép kênh ở đầu ra cũng như ảnh hưởng của hiệu ứng phi tuyến Kerr đến hiệu năng quang học không nằm trong khuôn khổ của bài báo này. Nghiên cứu kỹ hơn vấn đề này, chúng tôi sẽ có dịp đề cập chi tiết hơn trong một bài báo khoa học khác tới đây.

#### 4. Kết luận

Tóm lược lại, một thiết kế cho cấu kiện biến đổi và ghép/phân kênh phân chia theo mode dựa trên ống dẫn sóng đa mode MMI và cấu trúc ghép nối theo tiếp giáp hình chữ Y sử dụng các bộ dịch pha thụ động đã được đề xuất và mô phỏng số. Các dữ liệu mô phỏng bằng mô phỏng BPM cho thấy hiệu suất chuyển đổi mode và ghép/phân kênh theo mode cao, từ 0,3 dB (53,7%) cho đến khoảng 2,7 dB (93,32%) trong toàn bộ dải bước sóng băng C (1525 nm – 1565 nm). Các kết quả mô phỏng BPM cũng cho thấy rằng băng thông cao, suy hao chèn thấp, dung sai chế tạo lớn – 20 nm (hơn nhiều so với các tiến trình chế tạo ống dẫn sóng sử dụng công nghệ CMOS hiện hành cho chế tạo vi mạch) cho thấy rằng cấu trúc là rất có triển vọng cho ứng dụng của thiết bị ghép kênh phân chia theo mode. Toàn bộ kích thước cấu kiện được thiết kế có thể được tích hợp trên một nền khoảng  $4,2\mu\text{m} \times 160\mu\text{m}$ . Rõ ràng, cấu trúc kích cỡ nhỏ cho phép cấu kiện có thể thích hợp cho hệ thống mạch tích hợp mạch nhỏ.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N. Hanzawa, K. Saitoh, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, M. Koshiba, and F. Yamamoto, "Mode multi/demultiplexing with parallel waveguide for mode division multiplexed transmission", *Opt. Express*, vol. 22, no. 24, pp. 29321–29330, 2014.
- [2] N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, A. E. Willner, and S. Ramachandran, "Terabit-Scale Orbital Angular Momentum Mode Division Multiplexing in Fibers", *Science (80-. )*, vol. 340, no. 6140, pp. 1545–1548, 2013.
- [3] F. Saitoh, K. Saitoh, and M. Koshiba, "A design method of a fiber-based mode multi/demultiplexer for mode-division multiplexing.", *Opt. Express*, vol. 18, no. 5, pp. 4709–4716, 2010.
- [4] R. Ryf, S. Randel, A. H. Gnauck, C. Bolle, A. Sierra, S. Mumtaz, M. Esmacelpour, E. C. Burrows, R. J. Essiambre, P. J. Winzer, D. W. Peckham, A. H. McCurdy, and R. Lingle, "Mode-division multiplexing over 96 km of few-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing", *J. Light. Technol.*, vol. 30, no. 4, pp. 521–531, 2012.
- [5] S. G. Leon-Saval, N. K. Fontaine, J. R. Salazar-Gil, B. Ercan, R. Ryf, and J. Bland-Hawthorn, "Mode-selective photonic lanterns for space-division multiplexing", *Opt. Express*, vol. 22, no. 1, pp. 1036–1044, 2014.
- [6] T. Uematsu, Y. Ishizaka, Y. Kawaguchi, K. Saitoh, and M. Koshiba, "Design of a compact two-mode multi/demultiplexer consisting of multimode interference waveguides and a wavelength-insensitive phase shifter for mode-division multiplexing transmission", *J. Light. Technol.*, vol. 30, no. 15, pp. 2421–2426, 2012.
- [7] S. Randel, R. Ryf, A. Sierra, P. J. Winzer, A. H. Gnauck, C. A. Bolle, R.-J. Essiambre, D. W. Peckham, A. McCurdy, and R. Lingle, "6×56-Gb/s mode-division multiplexed transmission over 33-km few-mode fiber enabled by 6×6 MIMO equalization", *Opt. Express*, vol. 19, no. 17, pp. 16697–16707, 2011.
- [8] Y. Shi, S. Anand, and S. He, "Design of a polarization insensitive triplexer using directional couplers based on submicron silicon rib waveguides", *J. Light. Technol.*, vol. 27, no. 11, pp. 1443–1447, 2009.
- [9] J. B. Driscoll, R. R. Grote, B. Souhan, J. I. Dadap, M. Lu, and R. M. Osgood, "Asymmetric Y junctions in silicon waveguides for on-chip mode-division multiplexing.", *Opt. Lett.*, vol. 38, no. 11, pp. 1854–6, 2013.
- [10] M. Ye, Y. Yu, J. Zou, W. Yang, and X. Zhang, "On-chip multiplexing conversion between wavelength division multiplexing-polarization division multiplexing and wavelength division multiplexing-mode division multiplexing", *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 4, pp. 758–761, 2014.
- [11] Y. Li, C. Li, C. Li, B. Cheng, and C. Xue, "Compact two-mode (de)multiplexer based on symmetric Y-junction and Multimode interference waveguides", *Opt. Express*, vol. 22, no. 5, p. 5781, 2014.
- [12] M. Koshiba, S. Member, Y. Tsuji, and M. Hikari, "Time-Domain Beam Propagation Method and Its Application to Photonic Crystal Circuits", vol. 18, no. 1, pp. 102–110, 2000.
- [13] Y. F. Li, C. Y. Wang, and M. L. Hu, "A fully vectorial effective index method for photonic crystal fibers: Application to dispersion calculation", *Opt. Commun.*, vol. 238, no. 1–3, pp. 29–33, 2004.
- [14] S. T. Lim, C. E. Png, E. A. Ong, and Y. L. Ang, "Single mode, polarization-independent submicron silicon waveguides based on geometrical adjustments", *Opt. Express*, vol. 15, no. 18, pp. 11061–72, Sep. 2007.
- [15] M. Bachmann, P. a Besse, and H. Melchior, "General self-imaging properties in  $N \times N$  multimode interference couplers including phase relations", *Appl. Opt.*, vol. 33, no. 18, p. 3905, 1994.
- [16] L. B. Soldano and E. C. M. Pennings, "Optical Multi-Mode Interference Devices Based on Self-Imaging: Principles and Applications", *J. Light. Technol.*, vol. 13, no. 4, pp. 615–627, 1995.
- [17] S. H. Jeong and K. Morito, "Novel optical 90o hybrid consisting of a paired interference based 2×4 MMI coupler, a phase shifter and a 2×2 MMI coupler", *J. Light. Technol.*, vol. 28, no. 9, pp. 1323–1331, 2010.
- [18] W. Bogaerts, R. Baets, P. Dumon, V. Wiaux, S. Beckx, D. Taillaert, B. Luyssaert, J. Van Campenhout, P. Bienstman, and D. Van Thourhout, "Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology", *J. Light. Technol.*, vol. 23, no. 1, pp. 401–412, 2005.

(BBT nhận bài: 26/9/2016, phản biện xong: 20/10/2016)