

# CHUYỂN ĐỔI MODE QUANG VÀ ĐỊNH TUYẾN 4 NGÕ RA SỬ DỤNG ỐNG DẪN SÓNG CHỮ Y VÀ GIAO THOA ĐA MODE MMI

## 4-OUTPUT OPTICAL MODE CONVERTER AND ROUTER USING Y-SHAPED WAVEGUIDE AND MULTIMODE INTERFEROMETER

Nguyễn Văn Tuấn<sup>1\*</sup>, Phan Tuấn Anh<sup>2</sup>, Phạm Minh Đức<sup>3</sup>, Võ Duy Phúc<sup>1</sup>, Nguyễn Thị Hồng Yến<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng, Đà Nẵng, Việt Nam

<sup>2</sup>Công ty Cổ phần Thương mại và Dịch vụ Asiatech Việt Nam, Hà Nội, Việt Nam

<sup>3</sup>Công ty phần mềm Gear inc Việt Nam, Hà Nội, Việt Nam

\*Tác giả liên hệ / Corresponding author: nvtuan@dut.udn.vn

(Nhận bài / Received: 07/11/2023; Sửa bài / Revised: 19/12/2023; Chấp nhận đăng / Accepted: 25/12/2023)

**Tóm tắt** - Bài báo đề xuất một thiết kế mới của thiết bị chuyển đổi mode quang và định tuyến có 4 ngõ ra cho hệ thống ghép kênh theo mode (MDM). Thiết bị bao gồm ống dẫn sóng chữ Y 4 nhánh (1x4-Y) kết hợp với 2 bộ dịch pha (PS) và bộ giao thoa đa mode 4x4 (4x4-MMI). Bằng cách thiết lập các giá trị thích hợp cho các thông số của từng thành phần, thiết bị đã thực hiện được việc chuyển đổi lần lượt 4 luồng tín hiệu ở ngõ vào tương ứng với các mode TE<sub>0</sub>, TE<sub>1</sub>, TE<sub>2</sub> và TE<sub>3</sub> thành 4 luồng tín hiệu mode TE<sub>0</sub> và được định tuyến ở 4 ngõ ra khác nhau. Thiết bị được tính toán, thiết kế đồng thời được tối ưu hóa thông qua phương pháp truyền chùm tia ba chiều (3D BPM) sử dụng phần mềm Rsoft-BeamPROP để đạt được suy hao chèn rất thấp và nhiễu xuyên kênh rất nhỏ, lần lượt bé hơn 0,5 dB và -28 dB trong dải rộng 20 nm chung quanh bước sóng trung tâm 1550 nm của băng C.

**Từ khóa** - Bộ chuyển đổi mode quang; ghép kênh phân chia theo mode; bộ giao thoa đa mode; bộ dịch pha.

### 1. Đặt vấn đề

Những năm gần đây, nhu cầu thông tin liên lạc và giải trí của xã hội không ngừng gia tăng nhanh chóng với sự ra đời và phát triển của các ứng dụng dữ liệu lớn, điện toán đám mây, trí tuệ nhân tạo AI, kết nối vạn vật IoT, thông tin di động thế hệ mới và nhu cầu giải trí con người trên các thiết bị điện tử ngày càng cao. Điều này tạo ra thách thức to lớn cho vấn đề xử lý tín hiệu và truyền tải thông tin với dung lượng cực lớn, đòi hỏi băng thông truy nhập cực rộng để truyền dữ liệu tốc độ cực cao (hàng ngàn Gbit/s trong một kênh). Tuy nhiên, dung lượng của hệ thống thông tin sợi quang hiện nay sử dụng công nghệ ghép kênh theo bước sóng (WDM) còn nhiều hạn chế, chưa khai thác hiệu quả băng tần rộng lớn của sợi quang. Để phá vỡ rào cản về dung lượng, thời gian gần đây, công nghệ kết hợp ghép kênh theo bước sóng và theo mode (WDM-MDM) đã và đang được nghiên cứu và từng bước đưa vào sử dụng [1-3]. Trong đó, công nghệ ghép kênh theo mode (MDM) dựa trên cơ sở các mạch tích hợp quang tử trên chip [3-7], áp dụng các hiệu ứng giao thoa đa mode (MMI), ống dẫn sóng chữ Y, sử dụng vật liệu Silicon-on-Insulator (SOI) cho chi phí thấp, hiệu quả chuyển đổi mode cao, độ tương phản chiết suất lớn tương thích tốt với chất bán dẫn oxit kim loại.

**Abstract** - This paper proposes a new design of a four-output optical mode converter-routing device which is indispensable in Mode Division Multiplexing (MDM) systems. The device includes a 4-branch Y-shaped waveguide (1x4-Y) combined with 2 phase shifters (PS) and a 4x4 multimode interferometer (4x4-MMI). These components with appropriate parameters can convert input modes (TE<sub>0</sub>, TE<sub>1</sub>, TE<sub>2</sub>, TE<sub>3</sub>) into the TE<sub>0</sub> mode and route them to four separate outputs corresponding to input modes. The device is calculated, designed and optimized through the method of three-dimension beam propagation BeamPROP in Rsoft to achieve noticeably small insertion loss and crosstalk, at less than 0,5 dB and -28 dB, respectively, in a 20 nm bandwidth around the 1550 nm center wavelength of the C band.

**Key words** - Optical mode converter; mode division multiplexing; multimode interferometer; phase shifter.

Một số nghiên cứu gần đây về tách/ghép mode, chuyển đổi mode và định tuyến trên chip quang tử đã được đề xuất và thử nghiệm [4-12]. Trong [11], các tác giả đã trình bày một thiết kế mới của thiết bị tách/ghép kênh, phân chia hai mode dựa trên cấu trúc rẽ nhánh chọn lọc mode của ống dẫn sóng dạng bus. Thiết bị tách hai kênh thành công với băng thông rộng, suy hao thấp dưới 1 dB và nhiễu xuyên kênh nhỏ hơn -20 dB. Tuy nhiên, bài báo chỉ mới đề cập đến 2 mode TE<sub>0</sub>/TE<sub>1</sub> ở ngõ vào và 3 mode TE<sub>0</sub> ở ngõ ra. Trong [12], nhóm tác giả đã đề xuất mới thiết bị chuyển đổi mode TE<sub>0</sub>/TE<sub>1</sub> và định tuyến ở 3 ngõ ra, trong đó góc dịch pha của 2 bộ dịch pha PS1 và PS2 thay đổi để có thể định tuyến mode TE<sub>0</sub> ở ngõ ra tương ứng với tín hiệu vào ở mode TE<sub>0</sub> hay mode TE<sub>1</sub>. Thiết bị đạt hiệu quả chuyển đổi cao với suy hao chèn và suy hao xuyên kênh thấp, tuy nhiên bài báo chỉ mới đề cập đến 2 mode TE<sub>0</sub>/TE<sub>1</sub> ở ngõ vào và 3 mode TE<sub>0</sub> ở ngõ ra.

Trong bài báo này, nhóm tác giả đề xuất mới một thiết bị chuyển đổi mode quang và định tuyến có 4 ngõ ra cho hệ thống ghép kênh theo mode (MDM). Thiết bị bao gồm ống dẫn sóng chữ Y 4 nhánh (1x4-Y-Junction) kết hợp với 2 bộ dịch pha (PS) và bộ giao thoa đa mode 4x4 (4x4-MMI). Thiết bị được thiết kế và tối ưu hóa thông qua

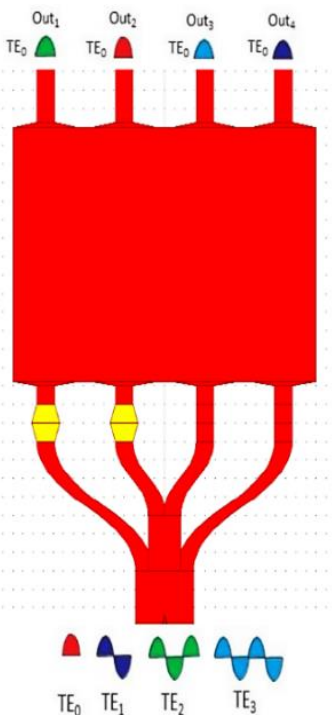
<sup>1</sup> The University of Danang - University of Science and Technology, Danang, Vietnam (Nguyen Van Tuan, Vo Duy Phuc, Nguyen Thi Hong Yen)

<sup>2</sup> Asiatech Vietnam Trading and Services Joint Stock Company, Hanoi, Vietnam (Phan Tuan Anh)

<sup>3</sup> Vietnam Gear inc Software Company, Hanoi, Vietnam (Pham Minh Duc)

phương pháp truyền chùm tia ba chiều (3D BPM) để đạt được suy hao chèn rất thấp và nhiều xuyên kênh rất nhỏ, lần lượt là bé hơn 0,5 dB và -28 dB trong dải rộng 20 nm chung quanh bước sóng trung tâm 1550 nm của băng C. Thiết bị thực hiện việc chuyển đổi lần lượt 4 luồng tín hiệu ở ngõ vào tương ứng với các mode TE<sub>0</sub>, TE<sub>1</sub>, TE<sub>2</sub> và TE<sub>3</sub> thành 4 luồng tín hiệu mode TE<sub>0</sub> và đưa đến 4 ngõ ra khác nhau.

Hình 1 biểu diễn sơ đồ khối của thiết bị chuyển đổi mode quang và định tuyến (gọi tắt là thiết bị) sử dụng vật liệu Silicon-On-Insulator (SOI) bao gồm ống dẫn sóng chữ Y 4 nhánh kết hợp với 2 bộ dịch pha (PS) và bộ giao thoa đa mode 4 ngõ vào và 4 ngõ ra. Nguyên lý hoạt động của thiết bị có thể được trình bày như sau: khi luồng tín hiệu mode TE<sub>1</sub> đưa đến ngõ vào thì thiết bị sẽ chuyển đổi thành luồng tín hiệu mode TE<sub>0</sub> và định tuyến để đưa đến ngõ ra Out4 (tính từ bên trái sang phải như trong Hình 1). Khi luồng tín hiệu mode TE<sub>2</sub> đưa đến ngõ vào thì nó cũng sẽ được chuyển đổi thành luồng tín hiệu mode TE<sub>0</sub> nhưng được đưa đến ngõ ra Out1. Tương tự, khi luồng tín hiệu mode TE<sub>3</sub> đưa đến ngõ vào thì nó sẽ được chuyển đổi thành luồng tín hiệu mode TE<sub>0</sub> và được đưa đến ngõ ra Out3. Tuy nhiên, khi luồng tín hiệu mode TE<sub>0</sub> đưa đến ngõ vào thì thiết bị này vẫn giữ nguyên mode TE<sub>0</sub> và định tuyến để đưa đến ngõ ra Out2.



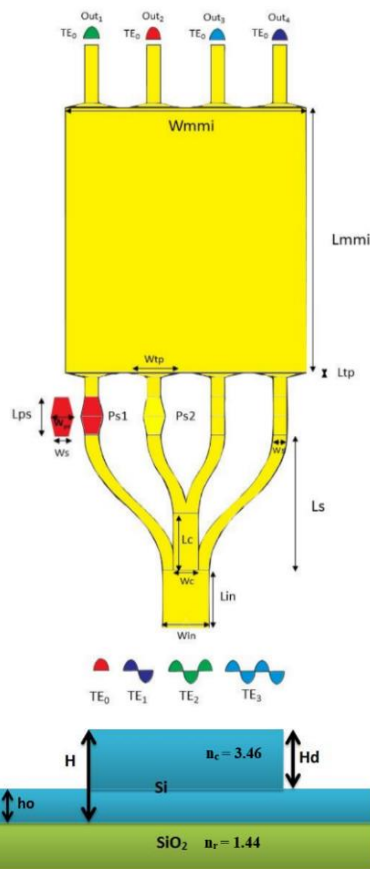
Hình 1. Sơ đồ khối thiết bị chuyển đổi mode quang và định tuyến 4 ngõ ra

Thứ tự định tuyến ngõ ra cho các luồng tín hiệu phụ thuộc vào kết cấu, kích thước của các bộ phận cấu thành thiết bị bao gồm ống dẫn sóng chữ Y 4 nhánh, 2 bộ dịch pha (màu vàng) và bộ giao thoa đa mode MMI. Việc chọn thứ tự ngõ ra như trên nhằm đảm bảo cho thiết bị có cấu trúc giản đơn và đạt hiệu suất cao nhờ có sự định tuyến của các mode TE<sub>0</sub> trong các nhánh của chữ Y và sự giao thoa của chúng trong bộ giao thoa đa mode (được thể hiện trong phần kết quả khảo sát và thảo luận).

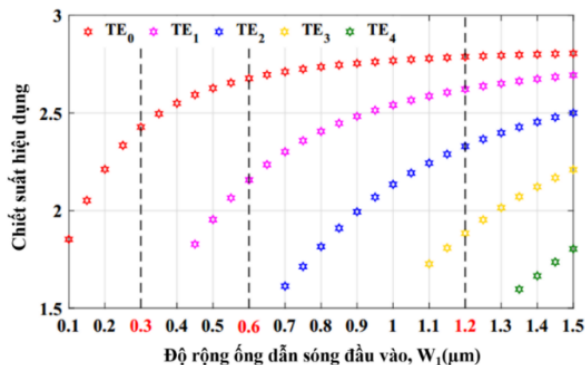
Bảng 1 trình bày tóm tắt vị trí ngõ ra tương ứng với các luồng tín hiệu vào lần lượt là TE<sub>0</sub>, TE<sub>1</sub>, TE<sub>2</sub> và TE<sub>3</sub>.

Bảng 1. Tóm tắt vị trí ngõ ra của các mode

Mode ngõ vào	Đường đi của các mode	Vị trí ngõ ra
TE <sub>0</sub>	Giữ nguyên mode TE <sub>0</sub> và qua 2 nhánh giữa của Y (giải trình: đường đi trong MMI và đến ngõ ra Out2 sẽ được giải thích cụ thể hơn trong kết quả khảo sát)	Out2
TE <sub>1</sub>	Chuyển thành mode TE <sub>0</sub> và qua 2 nhánh hai bên của Y	Out4
TE <sub>2</sub>	Chuyển thành mode TE <sub>0</sub> và qua 2 nhánh hai bên của Y	Out1
TE <sub>3</sub>	Chuyển thành mode TE <sub>0</sub> và qua 2 nhánh giữa của Y	Out3



Hình 2. Sơ đồ khối với các thông số về kích thước của thiết bị chuyển đổi mode quang và định tuyến 4 ngõ ra



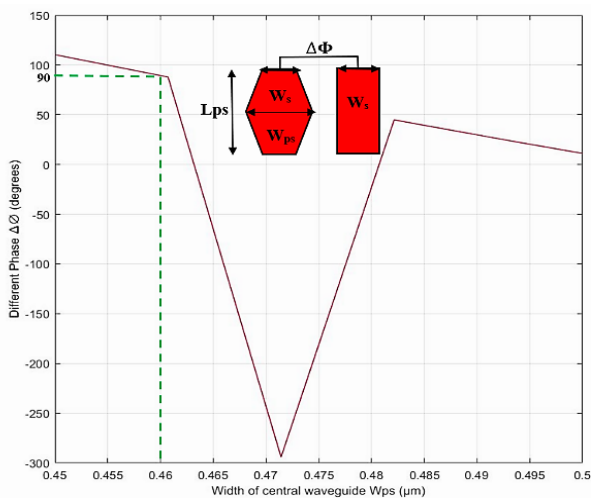
Hình 3. Quan hệ giữa chiết suất hiệu dụng và độ rộng đầu vào của ống dẫn sóng [13]

## 2. Tính toán thiết kế

Hình 2 trình bày sơ đồ khối với các thông số về kích thước thiết bị chuyển đổi mode quang và định tuyến 4 ngõ ra. Ống dẫn sóng có cấu trúc dạng Rib/Ridge để tăng hiệu quả truyền ánh sáng, giảm tổn hao công suất. Lớp dẫn Si có chiết suất là 3,46 (tại bước sóng  $\lambda=1550$  nm) đặt trên vật liệu nền  $\text{SiO}_2$  có chiết suất 1,44. Chiều cao của lớp Si lần lượt là  $H = 0,5 \mu\text{m}$  và  $h_0 = 0,22 \mu\text{m}$ .

Hình 3 biểu diễn mối quan hệ giữa chiết suất hiệu dụng và độ rộng đầu vào của ống dẫn sóng chữ Y [13]. Dựa vào kết quả nghiên cứu trong Hình 3, có thể thấy để tiếp nhận cả 4 mode TE<sub>0</sub>, TE<sub>1</sub>, TE<sub>2</sub>, TE<sub>3</sub> đưa vào thiết bị, cần chọn độ rộng đầu vào của ống dẫn sóng chữ Y là  $W_{in} \geq 1,1 \mu\text{m}$ . Sau đó, dựa vào kết quả khảo sát bằng phần mềm Rsoft, làm việc ở chế độ khảo sát BeamPROP [14] thông qua quá trình quét giá trị các thông số thiết bị (trong đó có  $W_{in}$ ) để xác định giá trị tối ưu, bài báo chọn được giá trị tốt nhất  $W_{in} = 1,4 \mu\text{m}$ , tương ứng với chiều dài đầu vào của chữ Y là  $L_{in} = 15 \mu\text{m}$ . Từ đó, độ rộng của mỗi nhánh nhỏ của chữ Y được chọn bằng nhau và bằng  $W_s = W_{in}/4 = 0,35 \mu\text{m}$ . Độ rộng này chỉ cho 1 mode cơ bản TE<sub>0</sub> chạy qua nhằm thực hiện chuyển đổi các mode bậc cao TE<sub>1</sub>, TE<sub>2</sub>, TE<sub>3</sub> ở đầu vào ống dẫn sóng thành mode TE<sub>0</sub> chạy qua 4 nhánh nhỏ. Độ rộng đầu vào 2 nhánh trung tâm của chữ Y là  $W_c = 2W_s = 0,7 \mu\text{m}$ .

Hai nhánh 1 và 2 (tính từ bên trái sang) kết hợp với 2 bộ dịch pha tương ứng là PS1 và PS2 làm dịch pha tín hiệu quang 90° giữa 2 đầu vào và ra của chúng nhằm thực hiện việc giao thoa các trường quang trong bộ MMI để định tuyến các mode TE<sub>0</sub> đến các ngõ ra theo yêu cầu cho trước. Bộ dịch pha PS1 hỗ trợ việc lựa chọn công ra cho 2 mode TE<sub>1</sub>, TE<sub>2</sub> với độ dịch pha  $\Delta\Phi = 90^\circ$ . Bộ dịch pha PS2 hỗ trợ việc lựa chọn công ra cho 2 mode TE<sub>0</sub>, TE<sub>3</sub> cũng có độ dịch pha  $\Delta\Phi = 90^\circ$ . Hai bộ dịch pha được chọn giống nhau (cùng kích thước) với chiều dài và chiều rộng lần lượt là  $L_{ps} = 10 \mu\text{m}$ ,  $W_s = 0,35 \mu\text{m}$ .



**Hình 4.** Quan hệ giữa độ lệch pha và độ rộng  $W_{ps}$  của bộ dịch pha PS

Hình 4 trình bày mối quan hệ giữa độ lệch pha và độ rộng  $W_{ps}$  của bộ dịch pha PS bằng phần mềm Rsoft, BeamPROP [14]. Dựa vào kết quả khảo sát trong Hình 4, có thể thấy bộ dịch pha PS có kích thước như trên với độ

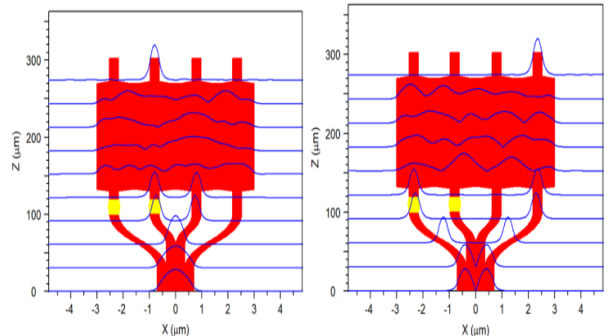
rộng ở giữa của nó là  $W_{ps} = 0,46 \mu\text{m}$  thì sẽ cho độ dịch pha là 90° theo đúng yêu cầu thiết kế.

**Bảng 2.** Bảng thông số thiết kế của thiết bị

Stt	Ký hiệu	Kích thước	Ghi chú
1	$W_{in}$	$1,4 \mu\text{m}$	Độ rộng đầu vào của ống dẫn sóng chữ Y
2	$L_{in}$	$15 \mu\text{m}$	Chiều dài đầu vào của ống dẫn sóng chữ Y
3	$W_c$ ( $W_c=W_{in}/2$ )	$0,7 \mu\text{m}$	Độ rộng đầu vào 2 nhánh trung tâm chữ Y
4	$W_s$ ( $W_s=W_{in}/4$ )	$0,35 \mu\text{m}$	Độ rộng của mỗi nhánh nhỏ của chữ Y
5	$W_{mmi}$	$6 \mu\text{m}$	Độ rộng bộ giao thoa đa mode MMI
6	$L_{mmi}$	$137,5 \mu\text{m}$	Chiều dài bộ giao thoa đa mode MMI
7	$W_{ps}$	$0,46 \mu\text{m}$	Độ rộng ở giữa bộ dịch pha PS1 và PS2
8	$L_{ps}$	$10 \mu\text{m}$	Chiều dài bộ dịch pha PS1 và PS2
9	$W_{tp}$	$1,25 \mu\text{m}$	Độ rộng taper
10	$L_{tp}$	$2,5 \mu\text{m}$	Chiều dài taper
11	$L_s$	$70 \mu\text{m}$	Chiều dài ống dẫn sóng

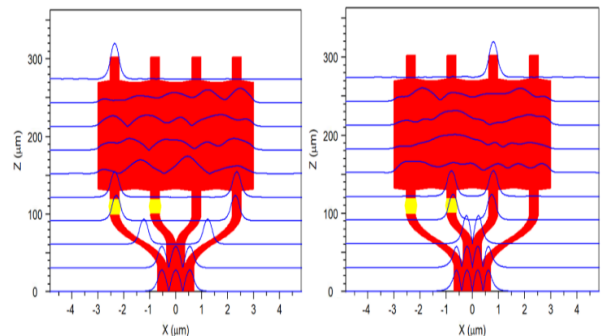
Bảng 2 trình bày giá trị các thông số của thiết bị dựa vào kết quả tính toán thiết kế và tối ưu bằng phần mềm Rsoft, BeamPROP [14].

## 3. Kết quả khảo sát và thảo luận



(Hình 5a)

(Hình 5b)



(Hình 5c)

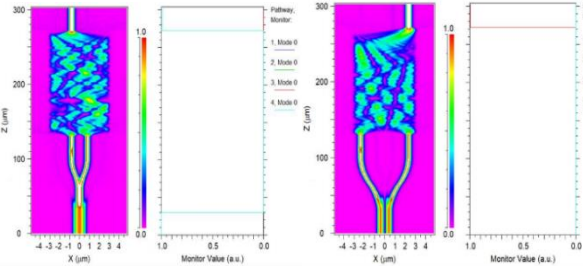
(Hình 5d)

**Hình 5.** Sự thay đổi của trường quang khi đưa lần lượt các tín hiệu ở ngõ vào: TE<sub>0</sub> (Hình 5a); TE<sub>1</sub> (Hình 5b); TE<sub>2</sub> (Hình 5c); TE<sub>3</sub> (Hình 5d)

Hình 5 trình bày kết quả khảo sát biểu diễn sự thay đổi của trường quang tương ứng với bước sóng 1550 nm qua

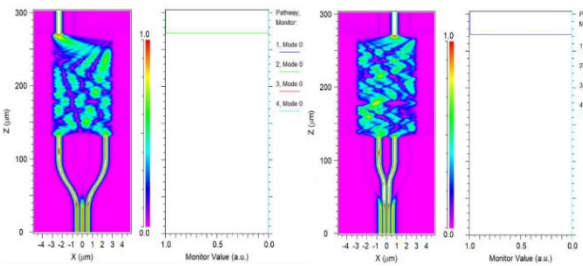
các nhánh của ống dẫn sóng chữ Y và qua bộ giao thoa đa mode (MMI) để đến các ngõ ra khác nhau khi đưa lần lượt các tín hiệu ở ngõ vào: TE0 (Hình 5a); TE1 (Hình 5b); TE2 (Hình 5c); TE3 (Hình 5d). Cụ thể, khi đưa tín hiệu mode TE0 đến ngõ vào, do tính chất đối xứng tự nhiên của nó mà mode TE0 được chia thành 2 mode TE0 đi vào 2 nhánh giữa (nhánh 2 và 3) của chữ Y, có cùng công suất ở 2 nhánh và cùng pha. Trong khi tín hiệu trong nhánh 3 đi thẳng vào bộ MMI thì tín hiệu trong nhánh 2 qua bộ dịch pha PS2 90° trước khi vào MMI. Sau đó, chúng giao thoa với nhau trong bộ MMI để định tuyến và xuất tín hiệu mode TE0 ở ngõ ra Out2. Khi đưa tín hiệu mode TE3 đến ngõ vào thì nó cũng được chuyển đổi thành 2 mode TE0 đi vào 2 nhánh giữa (nhánh 2 và 3) của Y, có cùng công suất ở 2 nhánh và ngược pha. Tương tự như trên, tín hiệu trong nhánh 3 đi thẳng vào bộ MMI còn tín hiệu trong nhánh 2 qua bộ dịch pha PS2 90° trước khi vào MMI. Tiếp đến, chúng giao thoa với nhau trong MMI để định tuyến và xuất tín hiệu mode TE0 ở ngõ ra Out3.

Tương tự, khi đưa hai tín hiệu mode TE1 và TE2 đến ngõ vào thì chúng qua 2 nhánh đối xứng ở bên ngoài (nhánh 1 và 4) của chữ Y. Tín hiệu qua nhánh 1 có bộ dịch pha PS1 thì bị lệch pha 90° trước khi vào MMI, còn tín hiệu vào nhánh 4 thì đi thẳng vào MMI. Sau đó, chúng giao thoa với nhau trong MMI để định tuyến và xuất tín hiệu mode TE0 ở ngõ ra lần lượt là Out4 và Out1 tương ứng với tín hiệu vào ở mode TE1 và TE2.



(Hình 6a)

(Hình 6b)



(Hình 6c)

(Hình 6d)

**Hình 6.** Sự phân bố trường quang khi đưa lần lượt các tín hiệu ở ngõ vào: TE0 (Hình 6a); TE1 (Hình 6b); TE2 (Hình 6c); TE3 (Hình 6d)

Hình 6 biểu diễn kết quả khảo sát sự phân bố trường quang qua các nhánh của chữ Y và qua bộ MMI để đến các ngõ ra khi đưa lần lượt các tín hiệu ở ngõ vào: TE0 (Hình 6a); TE1 (Hình 6b); TE2 (Hình 6c); TE3 (Hình 6d). Qua đó, có thể thấy khi các tín hiệu mode TE0, TE1, TE2 và TE3 lần lượt được đưa đến ngõ vào sẽ được thiết bị chuyển đổi về mode cơ bản TE0 ở các nhánh chữ Y và định tuyến đến các ngõ ra tương ứng là Out2, Out4, Out1 và Out3 đúng với yêu cầu thứ tự ở ngõ ra trong Bảng 1. Đồng thời, các

giá trị quan sát (Monitor Value) trong Hình 6 cũng thể hiện tổn hao công suất tín hiệu đi qua thiết bị từ ngõ vào đến ngõ ra tương ứng với bước sóng làm việc  $\lambda=1550$  nm trong cả 4 trường hợp là rất nhỏ (<1%), nghĩa là hiệu suất của thiết bị đạt trên 99%.

#### 4. Đánh giá chất lượng của thiết bị thiết kế

##### + Suy hao chèn: IL (Insertion Loss)

Suy hao chèn được tính toán nhờ quan hệ giữa năng lượng của trường điện từ tại ngõ ra và ngõ vào của thiết bị, được biểu diễn như sau:

$$IL(\text{dB}) = 10 \times \lg \left( \frac{p_{\text{out}_{\text{desirable}_i}}}{p_{\text{in}}} \right) \quad (1)$$

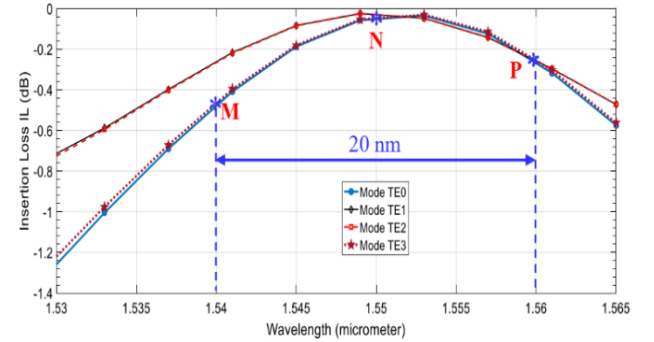
Trong đó,  $p_{\text{out}_{\text{desirable}_i}}$  và  $p_{\text{in}}$  lần lượt là công suất ra mong muốn ở ngõ ra thứ  $i$  ( $i=1; 2; 3; 4$ ) và công suất ngõ vào của thiết bị.

##### + Nhiễu xuyên kênh: CrT (Crosstalk)

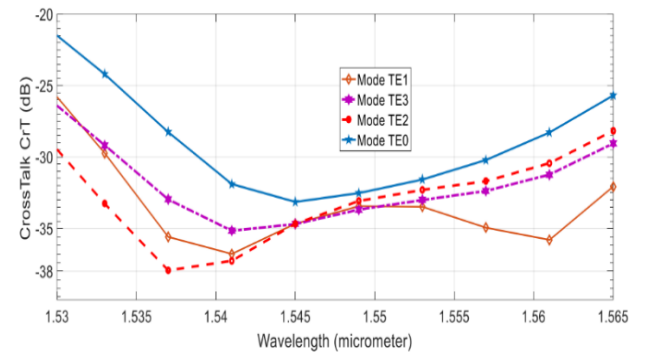
$$\text{CrT}(\text{dB}) = 10 \times \lg \left( \frac{p_{\text{out}_{\text{unwanted}}}}{p_{\text{out}_{\text{desirable}_i}} \right) \quad (2)$$

Trong đó,  $p_{\text{out}_{\text{unwanted}}}$  là công suất không mong muốn cùng xuất hiện với công suất mong muốn ở ngõ ra của thiết bị.

##### + Kết quả khảo sát suy hao chèn và nhiễu xuyên kênh



**Hình 7.** Suy hao chèn (IL) theo bước sóng tương ứng với các tín hiệu TE0, TE1, TE2 và TE3 đưa đến ngõ vào của thiết bị



**Hình 8.** Nhiễu xuyên kênh (CrT) theo bước sóng tương ứng với các tín hiệu TE0, TE1, TE2 và TE3 đưa đến ngõ vào của thiết bị

Hình 7 và Hình 8 lần lượt biểu diễn mối quan hệ giữa suy hao chèn (IL), nhiễu xuyên kênh (CrT) theo bước sóng trong băng C (từ 1,530  $\mu\text{m}$  đến 1,565  $\mu\text{m}$ ) tương ứng với 4 luồng tín hiệu mode TE0, TE1, TE2 và TE3 đưa đến ngõ vào của thiết bị. Qua đó, có thể thấy thông qua quá trình tính toán và sử dụng phương pháp truyền chùm tia ba chiều (3D BPM), thiết bị được thiết kế và tối ưu hóa nên đạt được mức suy hao chèn và nhiễu xuyên kênh rất thấp. Cụ thể,

trong tất cả 4 trường hợp tín hiệu vào thì suy hao chèn IL <0,5 dB và nhiễu xuyên kênh CrT <-28 dB trong dải rộng 20 nm chung quanh bước sóng trung tâm 1550nm (1,55  $\mu\text{m}$ ) của băng C. Đồ thị biểu diễn suy hao chèn theo bước sóng trong Hình 7 cũng phản ánh đặc tính truyền dẫn, tỷ lệ suy hao do hấp thụ, phản xạ của thiết bị. Từ biểu thức (1) ta có thể xác định được tỷ số công suất tín hiệu ở ngõ ra và ngõ vào của thiết bị như sau:

$$IL(\text{dB}) = 10 \lg \left( \frac{P_{\text{out}_{\text{desirable}_i}}}{P_{\text{in}}} \right) \Rightarrow \frac{P_{\text{out}_{\text{desirable}_i}}}{P_{\text{in}}} = 10^{IL(\text{dB})/10} \quad (3)$$

Trong Hình 7, điểm N tương ứng với bước sóng trung tâm 1550 nm, điểm M và P tương ứng với lần lượt các bước sóng 1540 nm và 1560 nm, biểu diễn dải rộng 20 nm chung quanh bước sóng trung tâm 1550 nm. Từ biểu thức (3), tại điểm N ta tính được giá trị cụ thể của tỷ số công suất tín hiệu vào và ra của thiết bị (ở 4 ngõ ra gần bằng nhau):

$$\frac{P_{\text{out}_{\text{desirable}}}}{P_{\text{in}}} \times 100\% \geq = 10^{-0,003} \times 100\% = 99,3\%$$

Tương tự, tại điểm M (tương ứng với ngõ ra Out2 và Out3 có hiệu quả truyền dẫn thấp nhất so với Out1 và Out2)

$$\frac{P_{\text{out}_{\text{desirable}}}}{P_{\text{in}}} \times 100\% = 10^{-0,045} \times 100\% = 90,2\%$$

Tại điểm P:

$$\frac{P_{\text{out}_{\text{desirable}}}}{P_{\text{in}}} \times 100\% = 10^{-0,025} \times 100\% = 94,4\%$$

## 5. Kết luận

Bài báo đã trình bày một thiết kế mới của thiết bị chuyển đổi mode quang và định tuyến có 4 ngõ ra cho hệ thống ghép kênh theo mode (MDM). Thiết bị đã thực hiện được việc chuyển đổi lần lượt 4 luồng tín hiệu ở ngõ vào tương ứng với các mode TE<sub>0</sub>, TE<sub>1</sub>, TE<sub>2</sub> và TE<sub>3</sub> thành 4 luồng tín hiệu mode TE<sub>0</sub> và được định tuyến ở 4 ngõ ra khác nhau theo yêu cầu cho trước. Hiệu suất chuyển đổi công suất của thiết bị rất cao tương ứng với mức suy hao chèn IL <0,5 dB và nhiễu xuyên kênh CrT <-28 dB trong dải rộng 20 nm chung quanh bước sóng trung tâm 1550 nm (1,55  $\mu\text{m}$ ) của băng C. Với kích thước nhỏ gọn ( $W_{\text{mmi}} \times L_{\text{mmi}} \times H$ ) = 6  $\mu\text{m} \times 137,5 \mu\text{m} \times 0,5 \mu\text{m}$ ) và kết cấu giản đơn (chỉ bao gồm 1 ống dẫn sóng chữ Y, 2 bộ dịch pha và 1 bộ giao thoa đa mode MMI), đồng thời có hiệu suất cao nên cấu trúc và mô hình của thiết bị đề xuất mới này có thể được sử dụng trong các ứng dụng chế tạo vi mạch tích hợp quang tử trên chip trong tương lai gần.

**Lời cảm ơn:** Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài mã số B2022-DNA-11.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. Sharma, S. Kaur, N. Nair, and K. S. Bhatia, "Investigation of WDM-MDM PON employing different modulation formats", *Elsevier, Optik*, Vol. 257, 168855, May 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.168855>.
- [2] P. Guo, W. Hou, L. Guo, Z. Ning, M. S. Obaidat, and W. Liu, "WDM-MDM Silicon-Based Optical Switching for Data Center Networks", *ICC 2019 IEEE International Conference on Communications Shanghai China*, INSPEC Accession Number: 18919630, 2029, pp. 20-24, DOI:10.1109/ICC.2019.8762082.
- [3] L. Han, S. Liang, J. Xu, L. Qiao, H. Zhu and W. Wang, "Simultaneous Wavelength-and-Mode-Division (De)multiplexing for High-Capacity On-Chip Data Transmission Link", *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, no. 2, 2016. DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2547419.
- [4] D. D. Tu, H. D. T. Linh, V. Q. Phuoc, D. D. Thang, T. C. Dung and N. T. Hung, "Optical mode conversion based on silicon-on-insulator material  $\psi$ -junction coupler and multimode interferometer", *Optics and Laser Technology*, Vol. 142, 107177, October 2021. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107177>.
- [5] M. Huang *et al.*, "Experimental Demonstration of 2- $\mu\text{m}$  On-chip Two-mode Division Multiplexing Using Tapered Directional Coupler-based Mode(de)multiplexer", *2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), San Diego, CA, USA*, Inspec Accession Number: 17843003, 14 June 2018.
- [6] Yu. He, Y. Zhang, X. Jiang, C. Qiu and Y. Su, "On-chip Silicon Three-mode (De)Multiplexer Employing Subwavelength Grating Structure", *Europe Conference Optic Communication ECOC*, September 2017, pp 17-21.
- [7] Z. Zhang, Y. Yu, and S. Fu, "Broadband On-Chip Mode Division Multiplexer Based on Adiabatic Couplers and Symmetric Y-Junction", *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 2, 6600406, 2017.
- [8] D. Dai *et al.*, "10-Channel Mode (de)multiplexer with Dual Polarizations", *Laser & Photonics Reviews*, vol. 12, no.1, 1700109, 2018.
- [9] C. D. Truong, T. H. Nguyen, Q. T. Pham, M. T. Trinh, and K. Vu, "Three-Mode Multiplexer and Demultiplexer Utilizing Trident and Multimode Couplers", *Elsevier, Optics Communications*, Vol. 435, pp. 334-340, 2019.
- [10] D. D. Tu, N. C. Tin, and H. D. T. Linh, "Design of Mode Division Multiplexer using asymmetric Y-shaped structure applied in MDM system", *Journal of Science and Technology, College of Science - Hue University*, Vol. 14, No. 01, pp. 85-94, 2019.
- [11] N. T. H. Duy, T. T. Anh, T. D. Hai, B. P. Thuong, L. N. Quynh, N. M. Thang, and T. C. Dung, "A Low Loss Mode Division (de)multiplexing Device Based on Soi Waveguide in the Form of a Branched Bus". *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, vol. 11, no. 132.2, pp. 25-28, 2018.
- [12] T. X. Hop *et al.*, "Design of Silicon TE<sub>0</sub>/TE<sub>1</sub> Mode Router Using Mach-Zehnder and Multimode Interferometers", *UD-Journal of Science and Technology: Issue on Information and Communications Technology*, Vol. 19, No.6.2, pp. 22-27, 2021.
- [13] H. D. T. Linh, "Mode Division Multiplexing signal processing based on photonic integrated circuits", *PhD thesis in engineering, Danang University of Science and Technology - University of Danang*, 2022.
- [14] Rsoft, *BeamPROP*. Synopsys, Inc., Optical Solutions Group, 2015.06.