

# THIẾT KẾ BỘ HỢP KÊNH/PHÂN KÊNH 2 MODE SỬ DỤNG CẤU TRÚC CHỮ Y VÀ BỘ GIAO THOA ĐA MODE ỨNG DỤNG TRONG HỆ THỐNG MDM

Hồ Đức Tâm Linh\*, Đào Duy Từ, Nguyễn Ngọc Phúc, Đặng Xuân Vinh, Vương Quang Phước

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

\*Email: hdtlinh@hueuni.edu.vn

## TÓM TẮT

Trong bài báo này, chúng tôi trình bày về bộ hợp kênh/phân kênh 2 mode sử dụng cấu trúc ống dẫn sóng dạng chữ Y và bộ giao thoa đa mode hình chữ nhật (MMI). Hai tín hiệu mode LP<sub>00</sub> và LP<sub>11</sub> được đưa đến ngõ vào, tại đây, thiết bị sẽ thực hiện ghép kênh và chuyển đổi thành hai tín hiệu mode LP<sub>00</sub> tương ứng trên hai ngõ ra. Quá trình thiết kế và tối ưu được thực hiện bằng phương pháp mô phỏng số, sử dụng phương pháp truyền chùm 3 chiều BPM-3D. Với thiết kế trên, bộ hợp kênh hoạt động được trên một dải băng tần rộng từ 1535 nm đến 1560 nm với suy hao chèn luôn lớn hơn 1 dB và ảnh hưởng xuyên nhiễu giữa hai kênh luôn nhỏ hơn -38 dB. Bên cạnh đó, một ưu điểm khác của thiết bị được đề xuất chính là khả năng tối ưu về mặt kích thước, với chiều rộng 5  $\mu\text{m}$ , chiều dài 180  $\mu\text{m}$  và chiều cao 0,52  $\mu\text{m}$ .

**Từ khóa:** MDM, Y-junction, MMI, hợp kênh mode, phân kênh mode.

## 1. GIỚI THIỆU

Trong một vài năm gần đây, kỹ thuật hợp kênh/phân kênh phân chia theo mode (Mode division multiplexing – MDM) được xem là công nghệ đầy hứa hẹn, cho phép tăng đáng kể dung lượng thông tin truyền tải trên tuyến quang [1] cũng như trong các mạch tích hợp quang tử [2]. Kỹ thuật MDM cho phép truyền các kênh dữ liệu khác nhau trên các mode trực giao với nhau (của cùng một bước sóng) mà không xảy ra hiện tượng nhiễu xuyên kênh. Từ đó, có thể tăng được dung lượng truyền dẫn trên tuyến. Hơn thế nữa, dung lượng kênh truyền còn có thể được tăng lên nhiều lần, nếu kết hợp kỹ thuật MDM với kỹ thuật ghép kênh phân chia theo bước sóng truyền thống WDM.

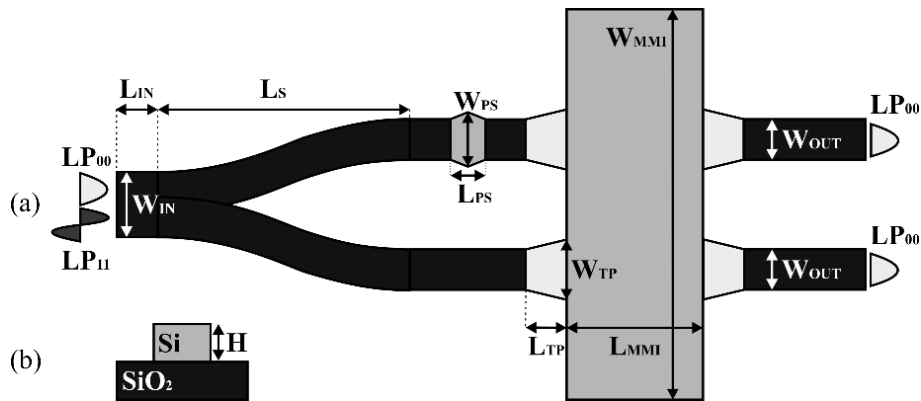
Một trong những thành phần quan trọng nhất của hệ thống MDM là bộ hợp kênh. Thiết bị này cho phép chuyển đổi, kết hợp các mode quang ở bộ phát tín hiệu quang với nhau. Mặt khác, với xu thế hiện tại, các thiết bị hợp kênh/phân kênh cần hướng đến các mục tiêu: cấu trúc nhỏ, băng thông rộng, suy hao thấp, ảnh hưởng nhiễu xuyên âm nhỏ và quy trình chế tạo đơn giản để đáp ứng được các ứng dụng viễn thông băng thông rộng và các ứng dụng trên chip trong tương lai.

Theo đó, các phương pháp khác nhau đã được sử dụng để đề xuất một thiết bị hợp kênh/phân kênh theo mode trong những năm gần đây. Đầu tiên, có thể kể đến là các thiết bị quang

không gian (Free Space Optics - FSO) với sự yêu cầu chính xác trong việc thiết lập ban đầu cùng với nhược điểm công suất suy hao rất lớn [3]. Tiếp đến, bộ hợp kênh/phân kênh dựa trên sợi quang cũng được nghiên cứu bằng cách sử dụng đèn quang tử [4] hoặc là bộ nối quang ghép tầng [5]. Tuy nhiên, các thiết bị dựa trên sợi quang vẫn tồn tại các hạn chế như: kích thước lớn và tán sắc mode cao. Ngoài ra, các bộ ghép kênh/phân kênh sử dụng thạch anh quang tử, đã được chỉ ra trong báo cáo [6], vẫn chưa khắc phục được các nhược điểm về kích thước cũng tính phức tạp trong chế tạo. Các nhà khoa học đã đưa ra một đề xuất khác cho bộ hợp kênh/phân kênh là sử dụng các ống dẫn sóng ánh sáng phẳng PLC [7], dựa trên vật liệu cách điện. So sánh với các đề xuất trước đây, thiết bị này có các ưu điểm nổi trội như suy hao thấp, linh hoạt, độ bắt giữ ánh sáng tốt, kích thước nhỏ, đặc biệt là tích hợp cao và tương thích với công nghệ chế tạo CMOS. Các cấu trúc khác nhau của loại này bao gồm bộ ghép nối hướng không đối xứng (asymmetric directional couplers) [8], bộ ghép nối không đối xứng đoạn nhiệt (adiabatic asymmetric couplers) [9], ghép tầng Y-junctions nối bất đối xứng [10], bộ chia chữ Y bất đối xứng [11] cũng được nghiên cứu. Những thiết bị này có thể hoạt động với một số lượng lớn các mode. Tuy nhiên, khi số lượng mode tăng lên, chúng thật sự khó khăn cho việc chế tạo và kích thước quá dài do cấu hình ghép tầng và bất đối xứng. Chip Silic dựa trên ống dẫn sóng vòng cũng được nghiên cứu cho các hệ thống hợp kênh/phân kênh WDM, tuy nhiên cấu trúc vòng có băng thông hoạt động hẹp và yêu cầu độ chính xác trong chế tạo cao [12]. Để khắc phục hạn chế của các thiết bị trên, bộ hợp kênh/phân kênh sử dụng hai bộ giao thoa đa mode ghép tầng MMI [14] hoặc kết hợp một bộ Y-junction và một bộ giao thoa đa mode MMI [15] đã được đề xuất, thiết bị được cấu tạo này với các ưu điểm vượt trội như băng thông rộng, suy hao thấp, kích thước nhỏ và dung sai chế tạo lớn.

Trong bài báo này, để giảm chiều dài của thiết bị hợp kênh/phân kênh mode, chúng tôi đề xuất cấu trúc đã được sửa đổi cho bộ hợp kênh/phân kênh 2 mode. Thiết bị được đề xuất sử dụng một bộ nối cấu trúc chữ Y (1x2) và một bộ ghép nối MMI 2x2 trên nền vật liệu SOI. Trên cơ sở đó, cấu trúc mới có thể thực hiện đồng thời hai quá trình hợp kênh và chuyển đổi mode (hai mode LP<sub>00</sub> và LP<sub>11</sub> ở ngõ vào sang hai mode LP<sub>00</sub> tương ứng ở hai ngõ ra). Cơ chế hoạt động của thiết bị được đề xuất và giải thích bởi việc sử dụng tương quang ma trận truyền đạt. Quá trình tối ưu hóa và mô tả hoạt động được thực hiện bằng phương pháp truyền chùm BPM-3D. Qua quá trình mô phỏng khảo sát, bộ hợp kênh/phân kênh 2 mode đã cho được những kết quả khả quan, với hiệu suất luôn trên 80% (suy hao chèn 1 dB) trên toàn bộ băng C (hiệu suất cao nhất có thể đạt đến 92% với suy hao chèn 0.3 dB), đồng thời xuyên nhiễu giữa hai kênh luôn nhỏ hơn -38 dB trên toàn bộ dải tần khảo sát này.

Theo đó, cấu trúc của bộ hợp kênh/phân kênh được đề xuất trong nghiên cứu này được mô tả sơ lược như ở hình 1.



Hình 1. Sơ đồ của bộ hợp kênh/phân kênh mode được đề xuất.

## 2. THIẾT KẾ THIẾT BỊ

### 1.2. Mô tả tổng quát.

Hình 1 chỉ ra sơ đồ tổng quát của bộ hợp kênh/phân kênh được đề xuất. Thiết bị bao gồm một bộ ống dẫn sóng chữ Y đối xứng, một bộ dịch pha (PS) và một bộ giao thoa đa mode hình chữ nhật  $2 \times 2$ . Độ rộng  $W_{IN}$  của ống dẫn sóng chính của ống dẫn sóng chữ Y đủ lớn để hỗ trợ dẫn được 2 mode. Ống dẫn sóng chính này được ghép nối với 2 ống dẫn sóng dạng cong hình sin hẹp hơn để chỉ hỗ trợ một mode cơ bản  $LP_{00}$ . Đặc trưng cho hai ống dẫn sóng dạng hình sin này là hai tham số độ dài theo trục đứng  $L_S$  và độ rộng theo trục ngang  $G$  như được chỉ ra trong hình 1. Cánh tay phía trên của ống dẫn sóng chữ Y được kết nối với bộ dịch pha PS để tạo ra một sự thay đổi pha  $\pi/2$ , để ánh sáng có thể ghép nối thích hợp ở đầu ra mong muốn của bộ giao thoa đa mode MMI. Sau đó, hai nhánh của ống dẫn sóng chữ Y được kết nối đến đầu vào bộ MMI  $2 \times 2$  ở các vị trí tương ứng  $\pm W_{MMI}/3$  của độ rộng bộ giao thoa sóng MMI.

Trong thiết kế này, chúng tôi thiết lập độ rộng của bộ ghép nối MMI  $W_{MMI} = 4,8 \mu\text{m}$ . Thiết bị dựa trên vật liệu nền SOI với dạng ống dẫn sóng dạng kênh. Lớp lõi được làm từ Silic trong khi các lớp vỏ được làm từ Silic Đioxit  $\text{SiO}_2$  và không khí. Chỉ số khúc xạ của Si,  $\text{SiO}_2$  và không khí lần lượt là  $n_r = 3,45$ ,  $n_c = 1,46$ ,  $n_{\text{air}} = 1$  ở bước sóng  $1550 \text{ nm}$ . Độ cao và độ rộng của ống dẫn sóng đầu vào được lựa chọn phù hợp với các điều kiện hỗ trợ số lượng mode mong muốn cũng ở bước sóng  $1550 \text{ nm}$ . Tối ưu hóa các tham số cấu trúc và mô tả đặc trưng thiết bị được thực hiện thông qua mô phỏng số sử dụng phương pháp truyền chùm 3D.

### 2.2. Ống dẫn sóng hình dạng chữ Y

Chúng tôi phân tích chỉ số hiệu dụng của các mode dẫn trong ống dẫn sóng dạng kênh ở cổng đầu vào của nhánh chính. Hình 2 chỉ ra sự phụ thuộc của chỉ số hiệu dụng theo độ rộng  $W_{IN}$  của nhánh chính ống dẫn sóng chữ Y. Trong trường hợp này, chúng tôi chọn  $W_{IN} = 1,2 \mu\text{m}$  để thỏa mãn hỗ trợ 2 mode  $LP_{00}$  và  $LP_{11}$  ở đầu vào. Các ống dẫn sóng hẹp của hai nhánh hình chữ Y cũng như các ống dẫn sóng vào ra của MMI  $2 \times 2$  cũng được thiết kế để hỗ trợ chỉ một mode cơ bản  $LP_{00}$ . Vì vậy, độ rộng của các ống dẫn sóng  $W_{OUT}$  đó đều được thiết lập bằng  $0,5 \mu\text{m}$ . Nếu mode  $LP_{00}$  được phát vào ống dẫn sóng chính, do tính chất đối xứng tự nhiên của nó mà mode

LP00 được chuyển đổi thành 2 mode LP00 với công suất được chia đều ở hai nhánh và cùng pha nhau. Ngược lại nếu mode LP11 được đưa vào nhánh chính thì hai nhánh đầu ra của ống dẫn sóng hình chữ Y cũng nhận được 2 mode LP00 với công suất bằng nhau nhưng ngược pha nhau  $180^\circ$ .

Ma trận truyền đạt đối với các mode dẫn của ống dẫn sóng Y-junction có thể biểu diễn lần lượt theo mode cơ bản LP00 và mode bậc một LP11 như sau:

$$Y_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} e^{\frac{\pi}{2}i} \\ e^{\frac{\pi}{2}i} \end{pmatrix} e^{\theta i} \quad (1)$$

$$Y_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} e^{\frac{\pi}{2}i} \\ e^{-\frac{\pi}{2}i} \end{pmatrix} e^{\theta i} \quad (2)$$

Trong đó  $\theta$  là pha tích lũy trường quang của các mode dẫn khi truyền qua ống dẫn sóng chữ Y.

Khi một bộ dịch pha (PS) tạo ra độ dịch pha  $\Delta\Phi = \pi/2$ , thì ma trận truyền đạt đối với hai cánh tay vào ra của MMI có thể được viết như sau:

$$Y_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & e^{\frac{\pi}{2}i} \\ e^{\frac{\pi}{2}i} & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Vì vậy ma trận truyền đạt đối với mode LP00 khi bộ dịch pha được thiết lập 1 góc  $\pi/2$  như sau:

$$Q_0 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & e^{\frac{\pi}{2}i} \\ e^{\frac{\pi}{2}i} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{\pi i} \\ e^{\frac{\pi}{2}i} \end{pmatrix} e^{\theta i} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \end{pmatrix} e^{\theta i} \quad (4)$$

Ma trận truyền đạt cho mode LP11 khi bộ dịch pha được thiết lập là  $\pi/2$  được cho dưới dạng sau:

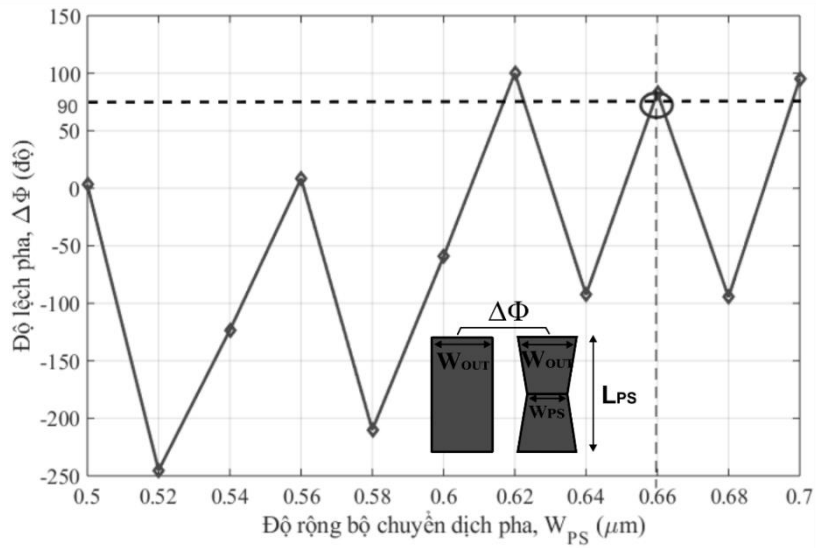
$$Q_0 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & e^{\frac{\pi}{2}i} \\ e^{\frac{\pi}{2}i} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{\pi i} \\ e^{-\frac{\pi}{2}i} \end{pmatrix} e^{\theta i} = \begin{pmatrix} 0 \\ -i \end{pmatrix} e^{\theta i} \quad (5)$$

Biểu thức (4) và (5) chứng tỏ rằng bộ dịch là điều kiện quan trọng cho các tín hiệu đầu vào LP00 và LP11 phân tách và chuyển đổi thành công ở hai cổng đầu ra riêng biệt của MMI.

### 3.2. Bộ dịch pha PS

Để đạt được độ dịch pha  $\Delta\Phi = \pi/2$  cho hoạt động hợp kênh và phân kênh, một ống dẫn sóng hình dạng cánh bướm được sử dụng để làm bộ dịch pha như được chỉ ra trong hình 2. Bộ dịch pha hình cánh bướm này có độ dài  $L_{PS} = 13 \mu\text{m}$  và độ rộng hai đầu vào ra là  $W_{OUT} = 500 \text{ nm}$ . Độ rộng trung tâm  $W_{PS}$  của ống dẫn sóng cánh bướm được khảo sát để đạt được sự thay đổi lệch

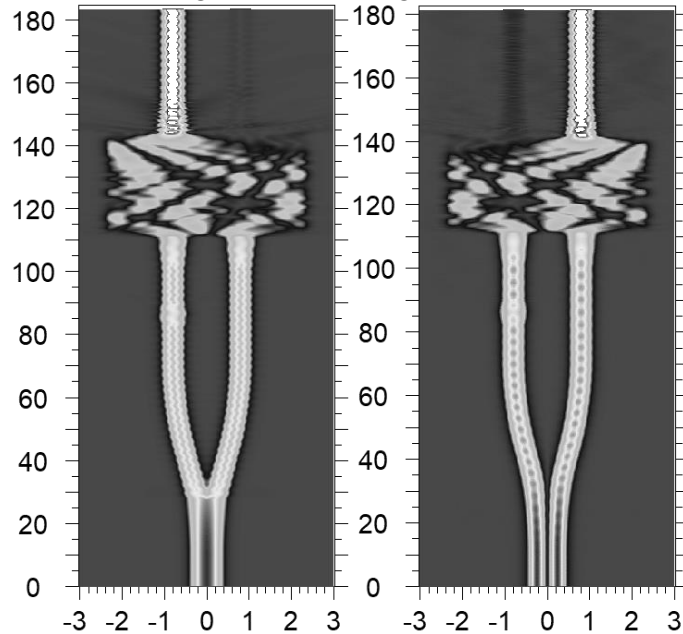
pha giữa đầu vào và đầu ra là  $\pi/2$ . Chúng ta có thể nhìn thấy rằng độ rộng  $W_{PS} = 0,66 \mu\text{m}$  thì độ dịch pha sẽ là  $\pi/2$ .



**Hình 2.** Độ lệch pha đầu ra như một hàm của độ rộng chính giữa của bộ dịch pha PS.

### 3. ĐÁNH GIÁ HIỆU SUẤT CHUYỂN ĐỔI QUANG

Mô phỏng số 3D-BPM được sử dụng để đánh giá hiệu suất chuyển đổi quang của thiết bị ghép kênh/phân kênh 2 mode. Chúng tôi thực hiện khảo sát các mode quang khi chúng được kích thích và truyền vào thiết bị từ cổng đầu vào tới cổng đầu ra.



**Hình 3.** Hình ảnh phân bố trường khi phát tín lần lượt tín hiệu mode LP00 và LP11 vào thiết bị.

Hình 3 chỉ ra trường điện từ của bộ hợp kênh/phân kênh ở bước sóng 1500 nm khi mode LP00 và LP11 lần lượt được đưa vào thiết bị. Thông qua kết quả mô phỏng, chúng ta có thể nhận

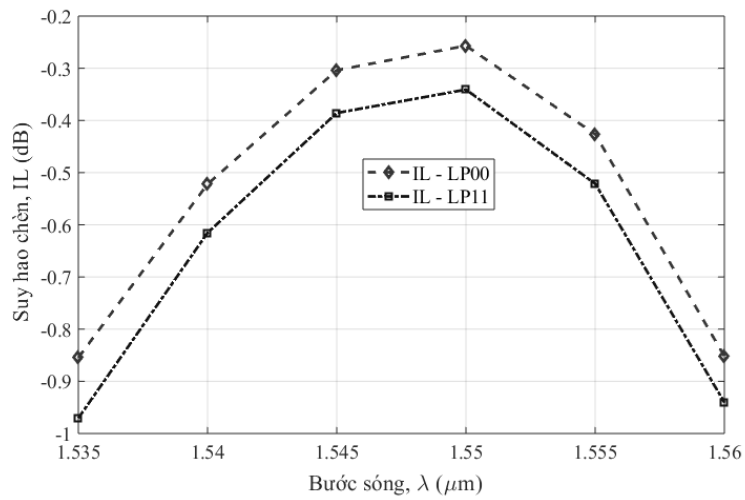
ra được mode LP00 được phân kênh ra ở cổng bên trái và mode LP11 được phân kênh ra ở cổng bên phải tại đầu ra của MMI. Thêm nữa, thông qua hình ảnh này, chỉ có một lượng nhỏ ánh sáng bị phát xạ ra bên ngoài ống dẫn sóng, điều này chứng tỏ sự mất mát công suất rất nhỏ.

Trong phạm vi giới hạn bài báo, để đánh giá chính xác hơn về hiệu suất chuyển đổi quang học của thiết bị, chúng tôi sử dụng 2 tham số suy hao chèn IL và xuyên nhiễu CT được cho bởi công thức sau:

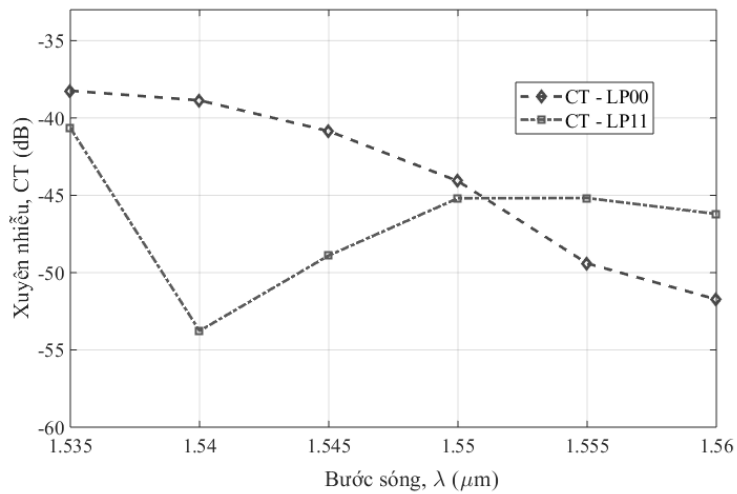
$$IL = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{out\_desirable}}{P_{in}} \right) \quad (6)$$

$$CT = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{unwanted}}{P_{out\_desirable}} \right) \quad (7)$$

Trong đó,  $P_{out\_desirable}$  là công suất tín hiệu ngõ ra mong muốn nhận được,  $P_{unwanted}$  là công suất tín hiệu ngõ ra không mong muốn và  $P_{in}$  là công suất tín hiệu phát ở ngõ vào.



**Hình 4.** Suy hao chèn là một hàm của bước sóng.



**Hình 5.** Xuyên nhiễu là một hàm của bước sóng.

Hình 4 và hình 5 chỉ ra suy hao chèn và xuyên nhiễu của thiết bị như một hàm của bước sóng cho 2 mode LP00 và LP11. Bước sóng bị thay đổi trong khoảng từ 1535 nm tới 1560 nm. Một suy hao chèn nhỏ và xuyên nhiễu đạt được lần lượt trên 1 dB và dưới 38 dB với khoảng bước sóng 25 nm. Hiệu suất chuyển đổi mode thay đổi từ 80 % đến 92 % trong khoảng bước sóng khảo sát này.

#### 4. KẾT LUẬN

Chúng tôi đã trình bày một cấu trúc của bộ hợp kênh/phân kênh sử dụng ống dẫn sóng chữ Y và bộ giao thoa đa mode 2x2 MMI. Với hai mode LP00 và LP11 ở ngõ vào, thiết bị đã phân kênh thành công ở các đầu ra với suy hao chèn lớn hơn 1 dB trong băng C. Hơn nữa, thiết bị được đề xuất có kích thước nhỏ ( $5\ \mu\text{m} \times 180\ \mu\text{m} \times 0,52\ \mu\text{m}$ ) và tương thích với công nghệ chế tạo CMOS. Với các tính năng vượt trội về băng thông, suy hao chèn, nhiễu xuyên âm và kích thước nhỏ thì bộ ghép kênh/phân kênh hiện tại có thể là một ứng cử viên đầy hứa hẹn cho các ứng dụng trên các mạch tích hợp quang tử trên chip và các mạng quang hợp kênh đa mode.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. Berdague, P. Facq, “Mode division multiplexing in optical fiber”, *Appl. Opt.* 21 (1982) 1950–1955.
- [2] D. A. B. Miller, “Optical interconnects to silicon”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 6 (2000) 1312–1317. doi:10.1109/2944.902184.
- [3] K. Yoshida, K. Tanaka, T. Tsujimura, Y. Azuma, “Assisted focus adjustment for free space optics system coupling single-mode optical fibers”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 60 (2013) 5306–5314.
- [4] S. G. L.-Saval, N. K. Fontaine, J. R. S.-Gil, B. Ercan, R. Ryf, J. BlandHawthorn, “Mode-selective photonic lanterns for space-division multiplexing”, *Opt. Express* 22 (2014) 1036–1044.
- [5] N. Bai, et al., “Mode-division multiplexed transmission with inline few-mode fiber amplifier”, *Opt. Express* 20 (2012) 2668–2680.
- [6] A. Sharkawy, S. Shi, D. W. Prather, “Multichannel wavelength division multiplexing with photonic crystals”, *Appl. Opt.* 40 (2001) 2247–2252.
- [7] D. Dai, J. Wang, Y. Shi, “Silicon mode (de)multiplexer enabling high capacity photonic networks-on chip with a single-wavelength-carrier light”, *Optics Letters* 38 (2013) 1422–1424.
- [8] Y.-D. Yang, Y. Li, Y.-Z. Huang, “A. W. Poon, Silicon nitride three-mode division multiplexing and wavelength-division multiplexing using asymmetrical directional couplers and microring resonators”, *Opt. Express* 22 (2014) 22172–22183.
- [9] S. M.-Garaot, S.-Y. Tseng, J. G. Muga, “Compact and high conversion efficiency mode-sorting asymmetric y junction using shortcuts to adiabaticity”, *Optics Letters* 39 (2014) 2306–2309.
- [10] W. Chen, P. Wang, J. Yang, “Mode multi/demultiplexer based on cascaded asymmetric y-junctions”, *Opt. Express* 21 (2013) 25113–25119.

- [11] J. D. Love, N. Riesen, “Single-, few-, and multimode y-junctions”, *J. Light. Technol.* 30 (2012) 304–309.
- [12] L.-W. Luo, et al., “WDM-compatible mode-division multiplexing on a silicon chip”, *Nat. Commun.* 5 (2014) 1–7.
- [13] T. Uematsu, Y. Ishizaka, Y. Kawaguchi, K. Saitoh, M. Koshiba, “Design of a compact two-mode multi/demultiplexer consisting of multimode interference waveguides and a wavelength-insensitive phase shifter for modedivision multiplexing transmission”, *J. Light. Technol.* 30 (2012) 2421–2426.
- [14] Y. Liu, J. Yan, G. Han, “The transmission characteristic of metal-dielectricmetal slot waveguide-based nanodisk cavity with gain medium”, *IEEE Photonics J* 7 (2015) 1–8.
- [15] Y. Li, C. Li, C. Li, B. Cheng, C. Xue, “Compact two-mode (de)multiplexer based on symmetric y-junction and multimode interference waveguides”, *Opt. Express* 22 (2014) 5781–5786.
- [16] L. B. Soldano, E. C. M. Pennings, “Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: Principles and applications”, *J. Light. Technol* 13 (1995) 615–627.