

INTEGRATED OPTICAL MODE CONVERTING AND ROUTING 5-OUTPUT CHIP FOR MODE DIVISION MULTIPLEXING SYSTEMS

Nguyen Van Tuan^{1*}, Le Nguyen Minh Thuan¹, Le Van Son¹,
 Nguyen Tan Hung², Vo Duy Phuc¹, Dao Duy Tuan¹

¹The University of Danang - Danang University of Science and Technology (DUT)

²The University of Danang - Institute of Advanced Science and Technology (AIST)

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	05/3/2025	This paper presents a novel proposal of a device used in a mode division multiplexing system that integrates two functions of optical mode conversion and optical mode routing with five outputs when processing five different modes at the input. The device is designed with one 1x5-Y waveguide, one 5x5-MMI multimode interferometer and two phase shifters to route TE ₀ modes at 5 outputs. The device performs the function of converting 5 signal streams at the input corresponding to different modes: TE ₀ , TE ₁ , TE ₂ , TE ₃ and TE ₄ into 5 signal streams in the base mode (TE ₀ mode), then routing them at 5 different outputs. The device is designed to operate at the wavelength of 1550 nm. The optimization and operation description process is performed using the three-dimensional beam propagation method (3D-BPM). Simulation results show that in the 15 nm wide range of C-band (1530 nm - 1565 nm), the proposed device has very low insertion loss, less than 0.5 dB (corresponding to transmission efficiency > 90%) and very small crosstalk, less than -14 dB (< 4%). In particular, at the wavelength of 1550 nm, the insertion loss and crosstalk could achieve better values, respectively > 94.4% and < -14.2 dB. Since the device is designed with a simple structure, including one 1x5-Y waveguide, 2 phase shifters combined with one 5x5-MMI, its size could be reduced ($W_{mmi} \times L_{mmi} \times H = 6 \mu m \times 138 \mu m \times 0.5 \mu m$) and its transmission efficiency could be improved.
Revised:	04/6/2025	
Published:	04/6/2025	
KEYWORDS		
Optical mode converter and router		
Three-dimensional beam propagation		
TE ₀ , TE ₁ , TE ₂ , TE ₃ , TE ₄		
Insertion loss		
Crosstalk		

TÍCH HỢP CHUYỂN ĐỔI VÀ ĐỊNH TUYẾN MODE QUANG TRÊN CHIP 5 ĐẦU RA SỬ DỤNG TRONG HỆ THỐNG GHEP KÊNH THEO MODE

Nguyễn Văn Tuấn^{1*}, Lê Nguyễn Minh Thuận¹, Lê Văn Sơn¹,
 Nguyễn Tấn Hưng², Võ Duy Phúc¹, Đào Duy Tuấn¹

¹Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng (DUT)

²Viện Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ Tiên tiến - Đại học Đà Nẵng (AIST)

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	05/3/2025	Bài báo trình bày một đề xuất mới của một thiết bị sử dụng trong hệ thống ghép kênh theo mode, tích hợp 2 chức năng chuyển đổi và định tuyến mode có 5 đầu ra khi xử lý 5 mode khác nhau ở đầu vào. Thiết bị được thiết kế gồm 1 ống dẫn sóng (1x5-Y), 1 bộ giao thoa đa mode (5x5-MMI) và 2 bộ dịch pha để định tuyến các mode TE ₀ ở 5 đầu ra. Thiết bị thực hiện được chức năng chuyển đổi lần lượt 5 luồng tín hiệu ở đầu vào tương ứng với các mode khác nhau: TE ₀ , TE ₁ , TE ₂ , TE ₃ và TE ₄ thành 5 luồng tín hiệu ở mode cơ sở (mode TE ₀), sau đó định tuyến chúng ở 5 đầu ra khác nhau. Thiết bị được tính toán thiết kế hoạt động tại bước sóng 1550 nm. Quá trình tối ưu hóa và mô tả hoạt động được thực hiện bằng phương pháp truyền chùm tia ba chiều 3D-BPM. Kết quả mô phỏng cho thấy trong dải rộng 15 nm của băng tần C (1530 nm - 1565 nm) thiết bị đề xuất có suy hao chèn rất thấp, bé hơn 0,5 dB (tương ứng với hiệu suất truyền dẫn > 90%) và nhiễu xuyên kênh rất nhỏ, bé hơn -14 dB (< 4%). Riêng tại bước sóng 1550 nm, suy hao chèn và nhiễu xuyên kênh đạt được các giá trị tốt hơn, lần lượt là > 94,4% và < -14,2 dB. Thiết bị được thiết kế với cấu trúc đơn giản, gồm 1 ống dẫn sóng (1x5-Y), 2 bộ dịch pha kết hợp với 1 bộ giao thoa đa mode (5x5-MMI) nên có thể giảm nhỏ kích thước ($W_{mmi} \times L_{mmi} \times H = 6 \mu m \times 138 \mu m \times 0,5 \mu m$) và nâng cao hiệu suất truyền dẫn.
Ngày hoàn thiện:	04/6/2025	
Ngày đăng:	04/6/2025	
TỪ KHÓA		
Chuyển đổi mode và định tuyến mode quang		
Truyền chùm tia ba chiều		
TE ₀ , TE ₁ , TE ₂ , TE ₃ , TE ₄		
Tổn hao chèn		
Nhiều xuyên kênh		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12219>

* Corresponding author. Email: nvtuan@dut.udn.vn

1. Giới thiệu

Các mạch tích hợp quang tử PIC (Photonic Integrated Circuit) gọi tắt là chip quang tử đóng vai trò quan trọng trong việc giải quyết vấn đề băng thông hạn chế trong các trung tâm dữ liệu và hệ thống truyền thông. Điều này xuất phát từ khả năng truyền tải tín hiệu quang với tốc độ cực cao (hàng ngàn Gbit/s), hiệu quả băng thông tốt hơn, tốc độ bit cao hơn, dung lượng dữ liệu lớn hơn và tính linh hoạt cao hơn so với các chip điện tử (IC) truyền thống. Nhờ đó, chúng có khả năng đáp ứng với nhu cầu cung cấp dữ liệu lớn như thông tin di động thế hệ mới, điện toán đám mây, IoT, đặc biệt là sự bùng nổ của công nghệ trí tuệ nhân tạo AI chuyên xử lý dữ liệu lớn chẳng hạn Google Cloud AI, Microsoft Azure AI, Chatgpt, DeepSeek, v.v. Vì vậy, việc nghiên cứu, thiết kế và chế tạo các chip quang tử đang là lĩnh vực thu hút sự đầu tư lớn từ cả các viện nghiên cứu và các tập đoàn công nghệ trên toàn cầu. Trong vài thập kỷ gần đây, công nghệ ghép kênh phân chia theo bước sóng WDM (Wavelength Division Multiplexing) sử dụng rất nhiều bước sóng trong sợi quang nhằm tăng dung lượng truyền dẫn. Tuy nhiên, khi nhu cầu thông tin càng tăng lên thì giải pháp kết hợp công nghệ ghép kênh phân chia theo bước sóng và ghép kênh phân chia theo mode MDM (Mode Division Multiplexing) là giải pháp đầy hứa hẹn và nhiều tiềm năng [1] – [5]. Để xây dựng hệ thống MDM, nhiều thiết bị quang học đã được đề xuất như bộ ghép kênh/bộ tách kênh theo mode (Mode multiplexer/Demultiplexer), bộ lọc mode quang bậc cao, bộ chia công suất, bộ chuyển đổi và bộ định tuyến mode quang. Trong đó, bộ tích hợp 2 chức năng chuyển đổi và định tuyến mode quang đóng vai trò quan trọng và ngày càng được sử dụng phổ biến trong hệ thống MDM.

Một số công trình gần đây về chuyển đổi mode trong chip quang tử đã được công bố [6] – [8]. Chẳng hạn, nghiên cứu [6] đã đề xuất một bộ chuyển đổi giữa các mode TE_0 , TE_1 và TE_2 có thể cấu hình lại một cách linh hoạt, phù hợp với nhu cầu đa dạng của mạng quang học sử dụng công nghệ MDM, đạt hiệu suất chuyển đổi mode trên 92,5%, với nhiễu xuyên kênh (Crosstalk) thấp hơn -18.9 dB trong toàn bộ băng C. Tuy nhiên, thiết bị tập trung thực hiện chuyển đổi giữa 3 mode, khó đáp ứng với nhu cầu của hệ thống cần số lượng mode chuyển đổi lớn hơn để tăng dung lượng thông tin. Bên cạnh đó, một số nghiên cứu tập trung vào định tuyến mode trong chip quang tử, tiêu biểu [9] – [11]. Bài báo [10] đề xuất một thiết kế bộ định tuyến quang đa mode hiệu quả, phù hợp cho các ứng dụng mạng quang trên chip. Tuy nhiên, các thách thức về độ phức tạp thiết kế, nhiễu xuyên kênh và chi phí cần được giải quyết để tối ưu hóa hiệu suất và khả năng ứng dụng thực tế. Ngoài ra, một số công trình nghiên cứu thiết kế các chip quang tử tích hợp 2 chức năng chuyển đổi và định tuyến mode quang, chẳng hạn [12], [13]. Trong [13], bài báo đề xuất mới thiết bị đa chức năng chuyển đổi mode và định tuyến mode tiên tiến, mang lại nhiều ưu điểm về hiệu suất, tính linh hoạt và khả năng tích hợp, giúp giảm thiểu số lượng thành phần cần thiết trong mạch tích hợp quang tử. Các cấu trúc ống dẫn sóng được thiết kế phù hợp với công nghệ sản xuất, giúp giảm chi phí và tăng tính ứng dụng thực tế. Tuy nhiên, tổn hao chèn còn tương đối cao, khoảng 1,2 dB và 2,5 dB khi thực hiện chuyển đổi đối với các mode bậc thấp và bậc cao tương ứng.

Trong bài báo này, một thiết bị tích hợp 2 chức năng chuyển đổi và định tuyến mode quang có 1 đầu vào cho 5 mode quang khác nhau và 5 đầu ra được đề xuất sử dụng trong hệ thống ghép kênh theo mode. Quá trình tính toán, thiết kế và tối ưu được thực hiện dựa vào phương pháp truyền chùm ba chiều 3D-BPM. Kết quả mô phỏng cho thấy trong dải rộng 15 nm của băng tần C (1530 nm - 1565 nm) thiết bị đề xuất có suy hao chèn rất thấp, đạt được hiệu suất truyền dẫn > 90% và nhiễu xuyên kênh rất nhỏ, bé hơn 4%. Bố cục của bài báo gồm phần 1 giới thiệu tổng quan về hiện trạng các nghiên cứu cùng chủ điểm của bài báo, phần 2 trình bày sơ đồ và thiết kế thiết bị, phần 3 là kết quả tính toán, đánh giá thiết bị thiết kế và bàn luận, phần 4 trình bày kết luận của bài báo.

2. Sơ đồ và thiết kế thiết bị

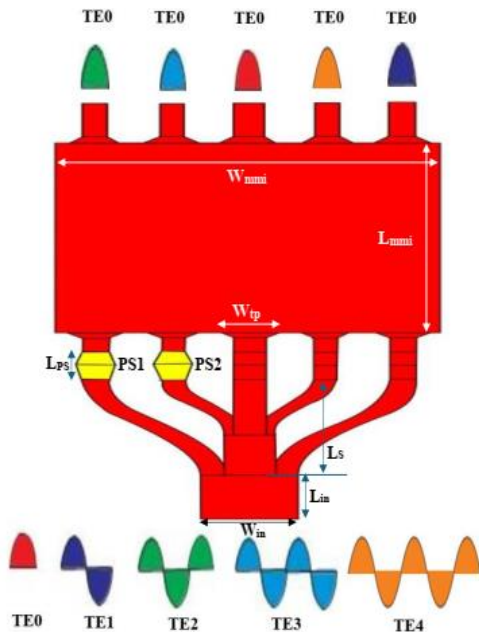
Hình 1 trình bày sơ đồ nguyên lý với một số thông số tiêu biểu về kích thước của thiết bị chuyển đổi và định tuyến mode gồm một ống dẫn sóng chữ Y có 5 nhánh nối với một bộ giao

thoả đa mode 5 đầu vào và 5 đầu ra. Ống dẫn sóng chữ Y có cấu trúc dạng Rib/Ridge nhằm giảm tổn thất công suất và tăng hiệu suất truyền dẫn. Trong nhánh 1 và nhánh 2 (tính từ trái sang phải) của ống dẫn sóng chữ Y có bố trí 2 bộ dịch pha 90° (PS_1 và PS_2) nhằm phối hợp với bộ giao thoa đa mode MMI thực hiện quá trình định tuyến mode ở 5 đầu ra của thiết bị.

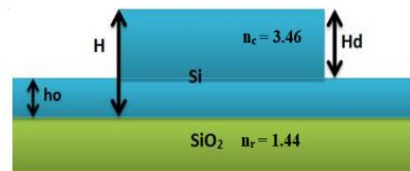
Đầu tiên, 5 luồng tín hiệu ở 5 mode khác nhau ở đầu vào, bao gồm TE_0 , TE_1 , TE_2 , TE_3 , TE_4 đều được chuyển đổi thành 5 luồng tín hiệu ở mode cơ bản TE_0 trong ống dẫn sóng chữ Y trước khi thực hiện định tuyến để đưa vào hệ thống ghép kênh quang theo mode (MDM). Điều này nhằm giảm nhiễu xuyên mode, méo tín hiệu, tương thích với các linh kiện quang truyền thống như Laser, khuếch đại quang, sợi quang đơn mode, hỗ trợ việc ghép mode dễ dàng hơn và giảm tổn hao phụ thuộc mode đồng thời cải thiện chất lượng tín hiệu.

Thiết bị được tính toán thiết kế hoạt động tại bước sóng 1550 nm sao cho nó cấu trúc đơn giản, kích thước phù hợp nhằm tăng hiệu suất truyền dẫn và giảm nhiễu xuyên kênh. Với mục đích đó, thiết bị định tuyến mode TE_0 ở 5 đầu ra có thứ tự như sau: Out1, Out2, Out3, Out4, Out5 tương ứng với 5 luồng tín hiệu mode TE_2 , TE_3 , TE_0 , TE_4 , TE_1 ở đầu vào.

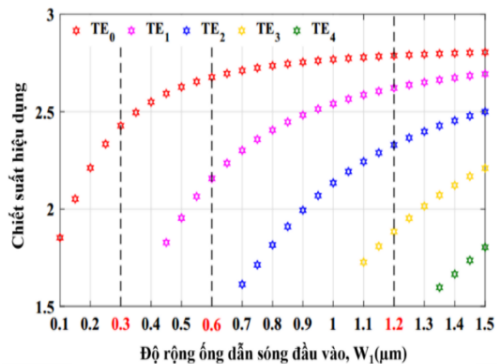
Hình 2 mô tả sơ đồ khối với các thông số về kích thước của ống dẫn sóng có cấu trúc dạng Rib/Ridge. Trong đó, vật liệu nền SiO_2 có chiết suất $n_r = 1,44$; lớp dẫn Silic có chiết suất $n_c = 3,46$. Chiều cao của lớp Silic lần lượt là $H = 0,5 \mu m$ và $h_o = 0,22 \mu m$.



Hình 1. Sơ đồ khối của thiết bị thực hiện 2 chức năng chuyển đổi và định tuyến mode quang 5 đầu ra



Hình 2. Sơ đồ khối của ống dẫn sóng có cấu trúc dạng Rib/Ridge



Hình 3. Quan hệ giữa chiết suất của ống dẫn sóng và độ rộng đầu vào W_{in} [14]

Hình 3 trình bày quan hệ của chiết suất hiệu dụng của ống dẫn sóng chữ Y và độ rộng đầu vào W_{in} [14], tương ứng với 5 mode TE_0 , TE_1 , TE_2 , TE_3 , TE_4 khác nhau. Qua đó, có thể thấy bước đầu ta cần chọn $W_{in} \geq 1,35 \mu m$ để thiết bị có thể nhận được các luồng tín hiệu ở cả 5 mode này. Tiếp đến, bài báo sử dụng phần mềm chuyên dụng Rsoft- BeamPROP [15], cho chạy chương trình để tính chọn các thông số sao cho thiết bị đạt được hiệu suất truyền dẫn cao nhất, được thể hiện thông qua tham số chất lượng của thiết bị bao gồm suy hao chèn lớn nhất và nhiễu xuyên kênh nhỏ nhất. Từ kết quả khảo sát, bài báo chọn độ rộng và chiều dài đầu vào ống dẫn sóng chữ Y lần lượt là $W_{in} = 1,5 \mu m$ và $L_{in} = 15 \mu m$. Độ rộng 2 nhánh nhỏ (2 nhánh ngoài cùng) của ống dẫn sóng chữ Y được chọn bằng nhau, mỗi nhánh có độ rộng là $W_s = 0,35 \mu m$. Độ rộng của 3 nhánh nhỏ trung tâm ống dẫn sóng chữ Y được chọn là $W_{center} = 0,8 \mu m$, trong đó độ rộng nhánh giữa bằng $0,3 \mu m$, 2 nhánh nhỏ 2 bên bằng $0,25 \mu m$. Bằng cách chọn độ rộng 5 nhánh của ống dẫn sóng chữ Y đều $\leq 0,35 \mu m$ như trên thì dựa vào đồ thị trong [14, Hình 3] có thể thấy 5 nhánh này chỉ cho 1

mode cơ bản TE_0 chạy qua nhằm thực hiện chuyển đổi các mode bậc cao TE_1 , TE_2 , TE_3 , TE_4 thành mode cơ bản TE_0 . Điều này cho phép đơn giản hóa việc chuyển đổi mode ngay từ khâu đầu tiên nhằm tăng hiệu suất truyền dẫn và giảm kích thước cho thiết bị. Ngoài ra, để thực hiện việc định tuyến mode ở 5 đầu ra, bài báo bố trí 2 bộ dịch pha 90° là PS_1 và PS_2 cùng kích thước, có chiều dài là $L_{ps} = 10 \mu m$ và chiều rộng là $W_{ps} = 0,56 \mu m$.

Bảng 1. Thông số thiết kế của thiết bị

STT	Ký hiệu	Kích thước	Ghi chú
1	L_{in}	$15 \mu m$	Chiều dài đầu vào của ống dẫn sóng (ODS)
2	W_{in}	$1,5 \mu m$	Độ rộng đầu vào của ODS
3	W_s	$0,35 \mu m$	Độ rộng mỗi nhánh nhỏ (2 nhánh ngoài cùng của ODS)
4	W_{center}	$0,8 \mu m$	Độ rộng đầu vào của 3 nhánh nhỏ trung tâm ODS
5	L_{mmi}	$138 \mu m$	Chiều dài bộ giao thoa đa mode MMI
6	W_{mmi}	$6 \mu m$	Độ rộng bộ giao thoa đa mode MMI
7	L_{ps}	$10 \mu m$	Chiều dài bộ dịch pha PS_1 và PS_2
8	W_{ps}	$0,56 \mu m$	Độ rộng ở giữa bộ dịch pha PS_1 và PS_2
9	L_s	$70 \mu m$	Chiều dài ODS
10	L_{tp}	$4 \mu m$	Chiều dài taper
11	W_{tp}	$0,95 \mu m$	Độ rộng taper

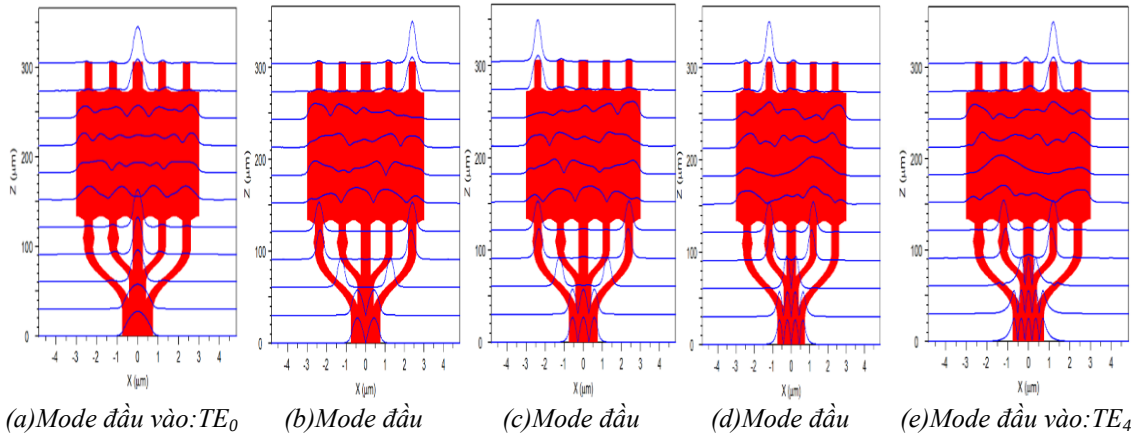
Bảng 1 trình bày giá trị các thông số của thiết bị dựa vào kết quả tính toán thiết kế và tối ưu bằng phần mềm Rsoft, BeamPROP [15].

3. Kết quả tính toán, đánh giá thiết bị thiết kế và bàn luận

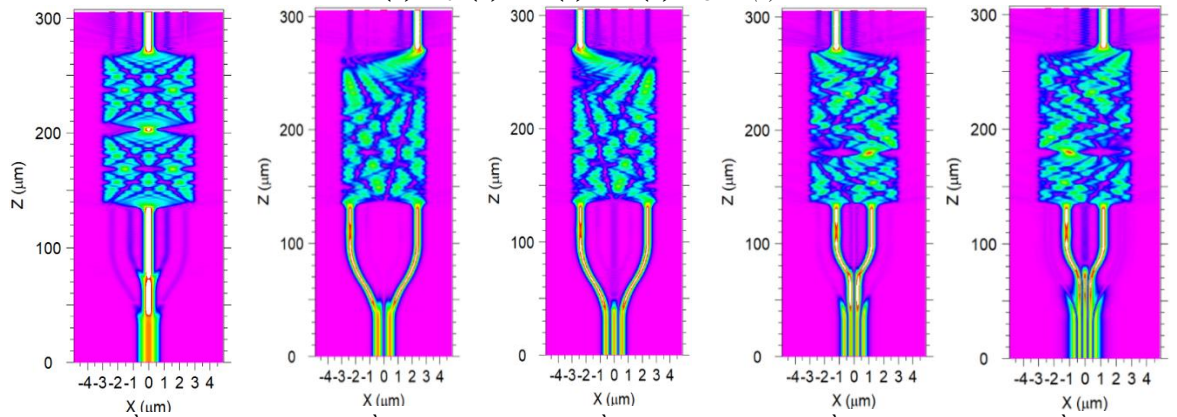
Hình 4 trình bày sự phân bố của trường quang trong các nhánh chữ Y và bộ giao thoa MMI để đến các đầu ra khác nhau khi đưa các tín hiệu ở đầu vào: TE_0 (Hình 4a); TE_1 (Hình 4b); TE_2 (Hình 4c); TE_3 (Hình 4d), TE_4 (Hình 4e) tương ứng với bước sóng hoạt động của thiết bị là: $\lambda = 1550 \text{ nm}$. Đường đi của các tín hiệu có thể được giải thích như sau: Khi tín hiệu mode TE_0 đến đầu vào, nó được đưa vào nhánh 3 của ống dẫn sóng chữ Y để đến bộ giao thoa đa mode MMI và đi thẳng đến đầu ra Out3. Vì các nhánh chữ Y đều có độ rộng $\leq 0,35 \mu m$ chỉ cho mode TE_0 đi qua như đã đề cập ở phần 2 nên khi 2 tín hiệu mode TE_1 và TE_2 đưa đến đầu vào thì thiết bị sẽ chuyển đổi chúng thành tín hiệu mode TE_0 đi vào nhánh 1 và nhánh 5 của Y. Trong nhánh 1, tín hiệu quang qua bộ dịch pha PS_1 làm dịch pha 90° trước khi đi vào bộ giao thoa MMI, còn trong nhánh 5, tín hiệu quang đi thẳng vào MMI. Tại đây, các tín hiệu quang giao thoa nhau và được định tuyến đến 2 đầu ra tương ứng là Out5 và Out1. Tương tự như trên, khi 2 tín hiệu mode TE_3 và TE_4 đưa đến đầu vào thì thiết bị cũng chuyển đổi thành mode TE_0 nhưng đi vào nhánh 2 và nhánh 3 của Y. Trong nhánh 2, tín hiệu quang qua bộ dịch pha PS_2 làm dịch pha 90° trước khi đi vào bộ giao thoa MMI, còn trong nhánh 3, tín hiệu quang đi thẳng vào MMI. Tại đây, các tín hiệu quang giao thoa nhau và được định tuyến đến 2 đầu ra tương ứng là Out2 và Out4.

Bảng 2. Kết quả chuyển đổi mode và định tuyến các mode ở 5 đầu ra

Mode đầu vào	Chuyển đổi và định tuyến các mode ở 5 đầu ra	Vị trí đầu ra
TE_0	Giữ nguyên mode TE_0 và qua nhánh 3 của ống dẫn sóng	Out3
TE_1	Chuyển thành mode TE_0 và qua nhánh 1 và nhánh 5 của ống dẫn sóng	Out5
TE_2	Chuyển thành mode TE_0 và qua nhánh 1 và nhánh 5 của ống dẫn sóng	Out1
TE_3	Chuyển thành mode TE_0 và qua nhánh 2 và nhánh 4 của ống dẫn sóng	Out2
TE_4	Chuyển thành mode TE_0 và qua nhánh 2 và nhánh 4 của ống dẫn sóng	Out4



Hình 4. Sự phân bố của trường quang trong thiết bị khi đưa các luồng tín hiệu ở đầu vào: (a) TE_0 ; (b) TE_1 ; (c) TE_2 ; (d) TE_3 và (e) TE_4



Hình 5. Sự thay đổi của trường quang trong thiết bị khi đưa các luồng tín hiệu ở đầu vào: (a) TE_0 ; (b) TE_1 ; (c) TE_2 ; (d) TE_3 và (e) TE_4
 $P_{out} = 97,7\% P_{in}$ $P_{out} = 97,7\% P_{in}$ $P_{out} = 97,7\% P_{in}$ $P_{out} = 95,5\% P_{in}$ $P_{out} = 94,4\% P_{in}$

Hình 5. Sự thay đổi của trường quang trong thiết bị khi đưa các luồng tín hiệu ở đầu vào: (a) TE_0 ; (b) TE_1 ; (c) TE_2 ; (d) TE_3 và (e) TE_4

Hình 5 trình bày sự thay đổi của trường quang qua các nhánh của chữ Y và qua bộ MMI để đến các đầu ra khi đưa các tín hiệu ở đầu vào: (Hình 5a) mode đầu vào là TE_0 ; (Hình 5b) mode đầu vào là TE_1 ; (Hình 5c) mode đầu vào là TE_2 ; (Hình 5d) mode đầu vào là TE_3 và (Hình 5e) mode đầu vào là TE_4 . Qua đó có thể thấy hình ảnh đường đi của trường quang khi đưa các tín hiệu 5 mode truyền dẫn khác nhau đến đầu vào. Trường quang lần lượt qua các bộ phận của thiết bị, từ đầu vào đến các nhánh của ống dẫn sóng chữ Y, qua bộ giao thoa MMI rồi được định tuyến ở 5 đầu ra. Trong đó cũng thể hiện hiệu suất truyền dẫn $P_{out}/P_{in} = 97,7\%; 97,7\%; 97,7\%; 95,5\%$ và $94,4\%$ tương ứng với 5 tín hiệu đầu vào lần lượt là $TE_0, TE_1, TE_2, TE_3, TE_4$.

+ **Đánh giá thiết bị thiết kế và bàn luận**

Chất lượng của thiết bị thiết kế được đánh giá qua 2 tham số chất lượng là suy hao chèn và nhiễu xuyên kênh.

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

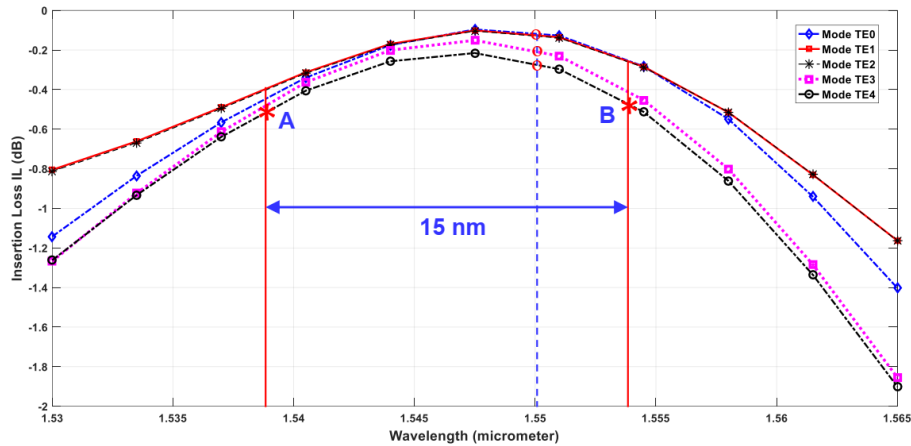
Suy hao chèn là tỉ số công suất trường điện từ ở đầu ra và công suất trường điện từ ở đầu vào của thiết bị, được biểu diễn trong đơn vị dB: $IL(dB) = 10 \lg \left(\frac{P_{out\text{ mong muốn } i}}{P_{in}} \right)$ (1)

Với $P_{out\text{ mong muốn } i}$ và P_{in} là công suất ra mong muốn ở đầu ra thứ i ($i=1; 2; 3; 4; 5$) và công suất ở đầu vào của thiết bị.

+ **Nhiều xuyên kênh: CrT (Crosstalk)**
$$\text{CrT(dB)} = 10\lg\left(\frac{p_{\text{out không mong muốn}_i}}{p_{\text{out mong muốn}_i}}\right) \quad (2)$$

Với $p_{\text{out không mong muốn}_i}$ là tổng công suất ra không mong muốn ở đầu ra thứ i của thiết bị.

+ **Kết quả tính toán suy hao chèn**



Hình 6. Sự biến thiên của suy hao chèn (IL) theo bước sóng tương ứng với 5 mode TE_0 , TE_1 , TE_2 , TE_3 và TE_4 đưa đến đầu vào của thiết bị

Hình 6 trình bày sự biến thiên của suy hao chèn (IL) theo bước sóng trong băng C (từ 1,530 μm đến 1,565 μm) tương ứng với các tín hiệu 5 mode khác nhau: TE_0 , TE_1 , TE_2 , TE_3 , TE_4 đưa đến đầu 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 5 trường hợp tín hiệu vào thì suy hao chèn $IL > -0,5 \text{ dB}$ nghĩa là $|IL| < 0,5 \text{ dB}$ trong dải rộng 15 nm từ bước sóng 1538 nm đến 1553 nm.

Từ biểu thức (1) ta có thể xác định được tỷ số công suất tín hiệu ở đầu ra và đầu vào (gọi tắt là hiệu suất truyền dẫn) của thiết bị như sau:

$$IL(\text{dB}) = 10\lg\left(\frac{p_{\text{out mong muốn}_i}}{p_{\text{in}}}\right) \Rightarrow \frac{p_{\text{out mong muốn}_i}}{p_{\text{in}}} = 10^{IL(\text{dB})/10} \quad (3)$$

Trong Hình 6, điểm A và B tương ứng với các bước sóng lần lượt là 1538 nm và 1553 nm biểu diễn dải rộng 15 nm thuộc băng C. Từ biểu thức (3), tại điểm A và B là 2 điểm có hiệu số truyền dẫn thấp nhất, tương ứng với $IL > -0,5 \text{ dB}$, ta tính được giá trị cụ thể của hiệu suất truyền dẫn của thiết bị như sau:

$$\frac{p_{\text{out mong muốn}_i}}{p_{\text{in}}} \times 100\% > 10^{-0,05} \times 100\% \approx 90\%.$$

Nghĩa là công suất mong muốn ở đầu ra bất kỳ thấp nhất (trong thiết kế này là Out4) cũng lớn hơn 90% công suất đưa đến đầu vào (suy hao chèn nhỏ hơn 10%). Còn tại bước sóng 1550 nm, suy hao chèn tương ứng với 5 mode đầu vào TE_0 , TE_1 , TE_2 , TE_3 , TE_4 lần lượt là -0,1 dB; -0,1 dB; -0,1 dB; -0,2 dB và -0,25 dB. Cũng từ biểu thức (3) ta có thể tính được hiệu suất truyền dẫn ở 5 đầu ra của thiết bị lần lượt là: 97,7%; 97,7%; 97,7%; 95,5% và 94,4%. Sở dĩ tại bước sóng 1550 nm suy hao chèn thấp hơn tại bước sóng 1538 nm và 1553 nm ở trên vì các thông số của thiết bị được tính toán theo bước sóng 1550 nm này.

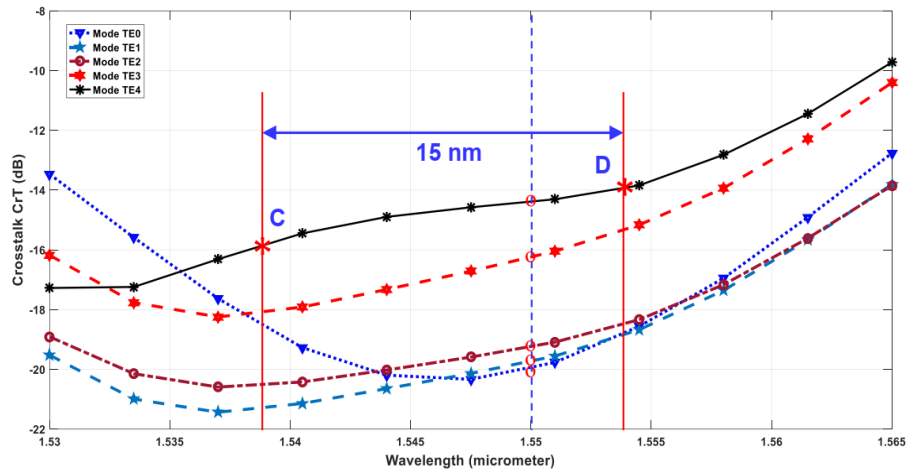
+ **Kết quả tính toán nhiễu xuyên kênh**

Hình 7 biểu diễn sự biến thiên của nhiễu xuyên kênh (CrT) theo bước sóng trong băng C (từ 1,530 μm đến 1,565 μm) tương ứng với 5 luồng tín hiệu mode TE_0 , TE_1 , TE_2 , TE_3 , TE_4 đưa đến đầu vào của thiết bị. Qua đó, tại C và D (tương ứng với các bước sóng lần lượt là 1538 nm và 1553 nm) biểu diễn nhiễu xuyên kênh lớn nhất tương ứng với mode đầu vào TE_4 cho giá trị nhiễu xuyên kênh CrT (dB) đều nhỏ hơn -14 dB.

$$CrT(dB) = 10 \lg \left(\frac{p_{out_{không mong muốn_i}}}{p_{out_{mong muốn_i}}} \right) \Rightarrow \frac{p_{out_{không mong muốn_i}}}{p_{out_{mong muốn_i}}} = 10^{CrT(dB)/10} \quad (4)$$

$$\frac{p_{out_{không mong muốn_i}}}{p_{out_{mong muốn_i}}} \times 100\% < 10^{-1,4} \times 100\% = 4\% .$$

Nghĩa là tại ở đầu ra có hiệu suất truyền dẫn thấp nhất (Out4) thì tổng công suất không mong muốn (xuyên vào kênh mong muốn) cũng nhỏ hơn 4% so với công suất ra mong muốn. Từ đó có thể thấy thiết bị tích hợp 2 chức năng chuyển đổi và định tuyến mode được thiết kế đã đạt được hiệu suất truyền dẫn cao và nhiễu xuyên kênh thấp.



Hình 7. Sự biến thiên của nhiễu xuyên kênh (CrT) theo bước sóng tương ứng với 5 mode TE_0 , TE_1 , TE_2 , TE_3 và TE_4 đưa đến đầu vào của thiết bị

4. Kết luận

Bài báo đã đề xuất mới một thiết bị sử dụng trong hệ thống ghép kênh theo mode (MDM), tích hợp 2 chức năng chuyển đổi và định tuyến mode quang 5 đầu ra khi xử lý tín hiệu có 5 mode khác nhau ở đầu vào. Thiết bị đã thực hiện được việc chuyển đổi các tín hiệu ở đầu vào tương ứng với các mode TE_0 , TE_1 , TE_2 , TE_3 , TE_4 thành 5 tín hiệu mode TE_0 , sau đó thực hiện định tuyến chúng ở 5 đầu ra khác nhau. Thiết bị đã đạt được hiệu suất truyền dẫn cao ($> 90\%$) tương ứng với mức hao chèn rất thấp, nhỏ hơn 0,5 dB và nhiễu xuyên kênh rất nhỏ, nhỏ hơn -14 dB ($< 4\%$) trong dải rộng 15 nm của băng tần C (1530 nm - 1565 nm). Thiết bị được thiết kế với cấu trúc đơn giản, gồm 1 ống dẫn sóng chữ Y 5 nhánh (1×5 -Y), 2 bộ dịch pha kết hợp với 1 bộ giao thoa đa mode 5 đầu vào và 5 đầu ra (5×5 -MMI) nên có thể giảm nhỏ kích thước ($W_{mmi} \times L_{mmi} \times H = 6 \mu m \times 138 \mu m \times 0,5 \mu m$), nâng cao hiệu suất truyền dẫn, thuận tiện trong việc chế tạo thiết bị và đưa vào ứng dụng trong thực tiễn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] X. Wang *et al.*, "High-Density MDM-WDM Silicon Photonic Transmitter Chiplet Based on MRMs and Dual-Mode GC for Single-Fiber 4×56-Gbps Signaling," *IEEE 2024 Asia Communications and Photonics Conference (ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications (IPOC)*, Nov. 2-5, 2024, doi: 10.1109/ACP/IPOC63121.2024.10809627.
- [2] S. A. Chanu and R. K. Sonkar, "Photonic-crystal-based hybrid wavelength-mode division multiplexer for SOI platforms," *Applied Optics*, vol. 63, no. 21, pp. 5728-5737, 2024, doi: 10.1364/AO.529016.
- [3] A. Sharma, S. Kaur, N. Nair, and K. S. Bhatia, "Investigation of WDM-MDM PON employing different modulation formats," *Elsevier, Optik*, vol. 257, May 2022, doi: 10.1016/j.ijleo.2022.168855.
- [4] 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, May 2019, pp. 20-24, doi: 10.1109/ICC.2019.8762082.
- [5] J. Du, W. Shen, J. Liu, Y. Chen, X. Chen, and Z. He, "Mode division multiplexing: from photonic integration to optical fiber transmission," *Chinese Optics Letters*, vol. 19, no. 9, 2021, doi: 10.1364/COL.19.091301.
- [6] M. Shuhrawardy *et al.*, "Reconfigurable Three-Mode Converter for Flexible Mode Division Multiplexing Optical Networks," *IEEE Photonics Journal*, vol. 16, no. 4, August 2024, doi: 10.1109/JPHOT.2024.3428912,
- [7] X. Zhao, Y. Huang, and Z. Xu, "High-Efficiency Silicon Optical Mode Converter Using an Asymmetric Tapered Waveguide Design," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 33, no. 10, pp. 543–546, May 2021.
- [8] M. Chen, S. Wang, and R. Guo, "Inverse Design of Compact Optical Mode Converters for Silicon Photonics," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 27, no. 1, pp. 140–147, Jan.–Feb. 2021.
- [9] Y. Asadi, "Optical network-on-chip (ONoC) architectures: a detailed analysis of optical router designs," *Journal of Semiconductors*, vol. 45, 2024, doi: 10.1088/1674-4926/24060006.
- [10] L. Kumar, P. Li, and D. K. Sharma, "Broadband Integrated Optical Mode Router for Multimode Photonic Networks," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 12, pp. 3700–3708, June 2021.
- [11] H. Lee, J. Park, and Y. Kim, "Demonstration of a Reconfigurable Optical Mode Router for On-Chip Communication," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 13, no. 4, pp. 304–311, April 2021.
- [12] T. X. Hop *et al.*, "Design of Silicon TE₀/TE₁ 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] C. Smith, A. Johnson, and M. Patel, "Multi-Functional Multi-Mode Waveguide Structures for Integrated Optical Mode Conversion and Routing," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 34, no. 8, pp. 1920–1925, Aug. 2022.
- [14] 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.
- [15] Rsoft, *BeamPROP*. Synopsys, Inc., Synopsys Optical Solutions Group, 2015.06 Version, 2015.