

THIẾT BỊ TÁCH GHÉP KÊNH PHÂN CHIA HAI MODE SUY HAO THẤP SỬ DỤNG ỐNG DẪN SÓNG SOI DẠNG BUS Rẽ NHÁNH

A LOW LOSS MODE DIVISION (DE)MULTIPLEXING DEVICE BASED ON SOI WAVEGUIDE IN THE FORM OF A BRANCHED BUS

Nguyễn Thị Hằng Duy^{1*}, Tuấn Anh Trần², Tạ Duy Hải¹, Bùi Phi Thường¹, Lê Như Quỳnh¹,
Nguyễn Mạnh Thắng¹, Trương Cao Dũng¹

¹Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông – PTIT;

duyhang2397@gmail.com, duyhang2397@gmail.com, taduyhaipit@gmail.com, bpthuong@gmail.com,

lequynhvt331@gmail.com, nmthang97@gmail.com, dungtc@ptit.edu.vn

²Trường Đại học Bách khoa Hà Nội; mrtran3233@gmail.com

Tóm tắt - Trong bài báo này, 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. Các mode cơ bản, mode bậc nhất được tách riêng ra hai cổng ở đầu ra. Thiết kế được thực hiện bởi phân tích lý thuyết và mô phỏng số sử dụng phương pháp mô phỏng truyền chùm ba chiều (3D-BPM). Các kết quả cho thấy tách hai kênh thành công với băng thông rộng 150 nm cửa sổ thông tin quang 1550 nm, trong đó suy hao thấp dưới 1 dB và xuyên nhiễu kênh nhỏ hơn -20 dB. Thiết bị đề xuất có diện tích tích hợp chỉ 8 μm x 200 μm , do đó nó không chỉ có tiềm năng trong các hệ thống truyền dẫn ghép kênh phân chia theo bước sóng và theo mode mà còn cho các mạch tích hợp quang tử silic mật độ cao.

Từ khóa - Bộ ghép (tách) kênh; kích thích chọn lọc mode; ống dẫn sóng SOI; phương pháp BPM; mô phỏng số; ống dẫn sóng bus; kích thích chọn lọc mode.

Abstract - In this paper, a new proposed design of dual-mode (de)multiplexer based on the bus structure of mode selective excitation. Input lights at fundamental and first-order modes are demultiplexed at two different ports at the outputs. The design is carried out through both theoretical analysis and numerical simulation using three dimensional - beam propagation method (3D-BPM). The results show a successful two-mode demultiplexing with the wavelengthband as wide as 150 nm in the window of 1550 nm region, in which, insertion loss is lower than 1dB and crosstalk is smaller than -20 dB. The proposed device also exhibits a small footprint as much as 8 μm x 200 μm , thus making it potential for not only wavelength-division multiplexing (WDM) and multimode-division multiplexing (MDM) transmission systems, but also high bitrate and compact on-chip silicon photonics integrated circuits.

Key words - Mode (de)multiplexer; SOI waveguide; beam propagation method (BPM), numerical simulation; bus waveguide; mode selective excitation.

1. Giới thiệu

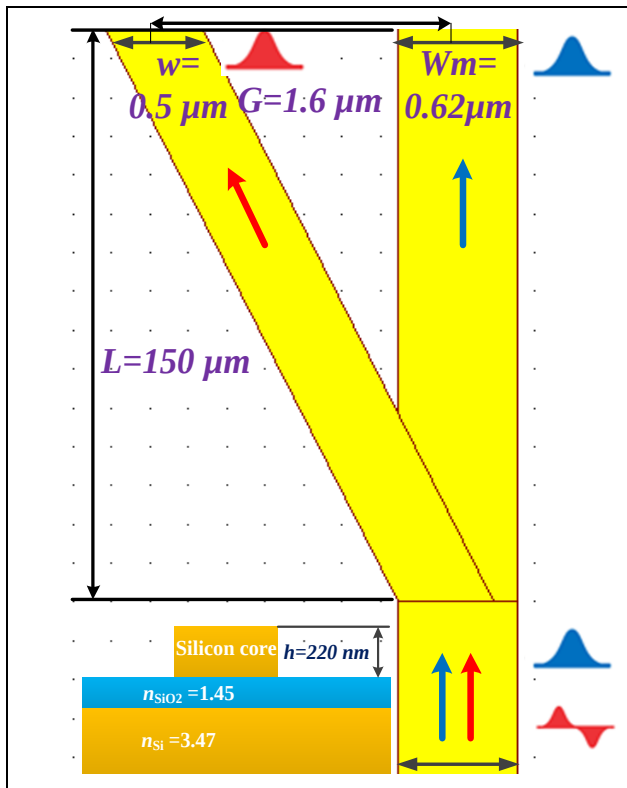
Thế giới đang sống trong kỷ nguyên của cách mạng công nghiệp 4.0, trong đó hạ tầng kết nối thông tin-truyền thông đóng vai trò then chốt cho sự thành công của cuộc cách mạng. Bên cạnh đó, một thời kỳ rực rỡ của của các dịch vụ thông tin di động thông minh đang nở rộ. Nhu cầu đòi hỏi của băng thông cho các dịch vụ số liệu đang gia tăng chóng mặt. Cho đến nay, công nghệ ghép kênh phân chia theo bước sóng để làm nhiệm vụ truyền tải tín hiệu thông tin quang tốc độ cao - hiện lên tới 400 Gb/s [1] cho mỗi bước sóng và sẽ 1 Tb/s nhằm đáp ứng các nhu cầu băng thông cho dịch vụ di động 5G và các trung tâm dữ liệu, các ứng dụng trí tuệ nhân tạo. Do đó, chiến lược nâng cao dung lượng cho các kênh quang ghép kênh theo bước sóng mật độ cao DWDM (dense wavelength division multiplexing) cần sử dụng kết hợp phổ bước sóng với các kỹ thuật tiên tiến khác. Chẳng hạn, có thể các dạng điều chế cao cấp đa mức [2] như điều chế biên độ trực giao QAM (quadrature amplitude modulation), hay ghép kênh phân chia theo trạng thái phân cực PDM (polarization division multiplexing). Gần đây, kỹ thuật ghép kênh phân chia theo mode MDM (mode division multiplexing) được nghiên cứu để kết hợp với các hệ thống DWDM, với cùng bước sóng có thể nâng cao dung lượng lên gấp số lần các mode. Kỹ thuật này không chịu ảnh hưởng tính phi tuyến do các mode trực giao với cùng bước sóng. Kỹ thuật này áp dụng rất tốt trong các hệ thống thông tin liên chip (intrachip communication) bởi khoảng cách rất ngắn trên một board

mạch quang tử. Thông tin này áp dụng cho hệ thống cự ly xa thì áp dụng kỹ thuật bù tán sắc, đã đạt được thành tựu rất tiến bộ hiện nay. Thông tin đa mode trong sợi đã được chứng tỏ trong thực tế bởi ghép kênh phân chia theo các mode không gian trong sợi nhiều [3] hoặc ghép mode trong sợi hỗ trợ ít mode (FMF) [4], [5]. Ngày nay, kỹ thuật MDM [6] được xem là con đường sáng sủa để phá vỡ giới hạn Shannon cho lý thuyết thông tin [5], nhờ kỹ thuật MDM kết hợp với kỹ thuật WDM [7].

Mặc dù có một số kỹ thuật ghép kênh phân chia theo mode được sử dụng kiểu ghép theo sợi để xử lý trực tiếp việc ghép kênh. Tuy nhiên, tính linh hoạt của việc xử lý trên sợi không được cao và cần quá trình chế tạo phức tạp. Ngược lại, sử dụng các chip quang tử để xử lý cho phép ghép/tách kênh phân chia theo mode linh hoạt hơn nhiều và tạo ra được nhiều mạch phức tạp, chẳng hạn nâng cao dung lượng các bus quang nối liên chip (intrachip communication systems), hay mạng truy nhập tốc độ cao ở cự ly ngắn và trung bình. Đặc biệt, các mạch quang phẳng -PLC (planar lightwave circuits) sử dụng vật liệu silicon có nhiều ưu điểm về suy hao thấp, băng thông rộng, nhất là sai khác chiết suất lõi-vỏ lớn nên cho phép bắt giữ ánh sáng trong lõi cực tốt với hiệu suất cao, do đó tạo ra các vi mạch quang tử tích hợp cao. Ưu điểm rất lớn nữa của công nghệ mạch quang phẳng bằng vật liệu silic SOI (silicon on insulator) là tương thích công nghệ bán dẫn chế tạo vi mạch điện tử CMOS, do đó giá thành sản xuất thấp và có tiềm năng sản xuất hàng loạt.

Một vài bộ tách ghép phân chia theo mode đã sử dụng một số kiểu ống dẫn sóng ghép định hướng bằng các ống dẫn sóng bất đối xứng [8], [9] hay đoạn nhiệt [10], [11] nhưng có sự phối ghép khó và chế tạo phức tạp.

Trong bài báo này, nhóm tác giả trình bày về một cấu trúc tách ghép kênh 2 mode sử dụng bus rẽ nhánh được chọn lọc mode, sử dụng vật liệu SOI. Việc phân tích lý thuyết bằng sử dụng lý thuyết ghép chọn lọc mode trong cấu trúc bus rẽ nhánh và thiết kế tối ưu thông qua mô phỏng số truyền chùm ba chiều 3D-BPM (three dimensional - beam propagation method) và phương pháp hệ số hiệu dụng EIM (effective index method). Các kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống có băng thông rất rộng 150 nm. Kích thước cấu kiện cho phép ứng dụng trong các mạch tích hợp quang tử xử lý tín hiệu MDM-WDM hoặc nâng cao dung lượng cho các hệ thống thông tin nối các chip.



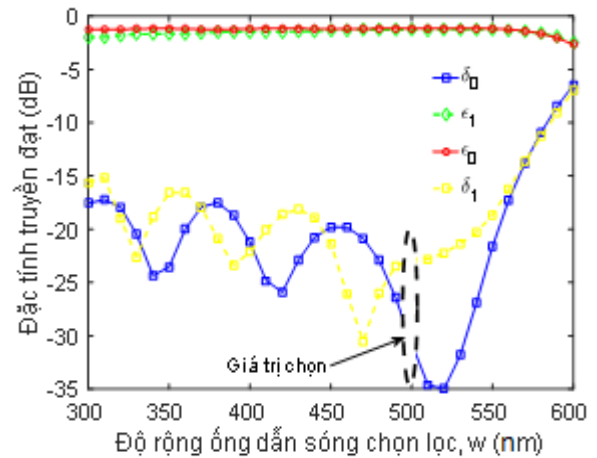
Hình 1. Sơ đồ thiết kế đề xuất của thiết bị tách kênh hai mode

2. Nguyên lý thiết kế hoạt động và tối ưu cấu trúc

Sơ đồ cấu trúc của thiết bị phân chia theo mode được mô tả như ở Hình 1. Thiết bị được thiết kế thành hai trục ống dẫn sóng, theo đó gồm một ống dẫn sóng chính đóng vai trò một bus chính, một ống dẫn sóng rẽ nhánh để chọn lọc mode nhằm tách riêng một mode. Lõi ống dẫn sóng sử dụng vật liệu silic (Si), lớp vỏ thủy tinh silic (SiO₂). Chiều rộng của ống dẫn sóng bus là W_m và chiều rộng ống dẫn sóng nhánh là w (như được thấy trên Hình 1). Thiết bị được thiết kế để hoạt động cho hai mode ở trạng thái không véc tơ (nonvectorial mode) với bước sóng trung tâm hoạt động là 1550 nm.

Các ống dẫn sóng SOI được thiết kế theo dạng ống dẫn sóng dạng kênh với lớp lõi silic có chiết suất $n_r = 3.465$ và chiết suất lớp vỏ thủy tinh silic $n_c = 1.445$ ở bước sóng 1550

nm. Mô hình Seimeier được sử dụng để phân tích đặc tính chiết suất vật liệu silic và thủy tinh silic cho thấy rằng trong vùng phổ bước sóng 1550 nm là biến đổi rất chậm nên ta coi chiết suất của ống dẫn sóng SOI là không đổi trong dải bước sóng của băng C. Toàn bộ các ống dẫn sóng có thể được chế tạo theo các phương pháp quang khắc hiện đại, chẳng hạn sử dụng chùm điện tử (Ebeam writing) và kỹ thuật ăn mòn khô (dry etching) sử dụng kỹ thuật plasma ghép cảm ứng ICP etching (inductively coupled plasma etching) [10] hoặc các kỹ thuật quang khắc bằng tia cực tím – DUV lithography (deep ultra violet photolithography) với chiều cao kênh là 220 nm từ một phiên SOI tiêu chuẩn (lớp kênh dẫn Silic cao 220 nm).



Hình 2. Kết quả mô phỏng đặc tính truyền đạt của bộ ghép theo độ rộng ống dẫn sóng phụ w (nm) thỏa mãn điểm tối ưu chọn lọc ghép mode

Đầu tiên, nhóm tác giả sử dụng kỹ thuật phân tích giải mode để tìm hệ số hiệu dụng nhằm xác định các mode làm việc trong ống dẫn sóng. Công cụ mô phỏng nhờ bộ giải mode (mode solver) bằng kỹ thuật mô phỏng BPM. Để hỗ trợ hai mode thì W_m nằm trong khoảng từ 0,56 μm đến 0,68 μm . Do đó, trong thiết kế này nhóm tác giả chọn $W_m = 0,62 \mu m$ cho hoạt động của hai mode.

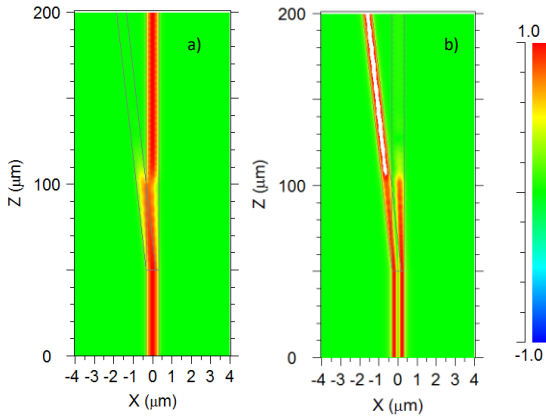
Thiết kế của nhóm tác giả tạo ra hai mode, hai mode đó sẽ tách ra đi hai hướng khác nhau và có sự biến đổi mode. Mode cơ bản (mode0) sẽ đi ra ống dẫn sóng chính, mode bậc một (mode1) sẽ đi ra ống dẫn sóng phụ, thiết kế. Tổng chiều dài ống dẫn sóng chính là 200 μm và chiều dài của ống dẫn sóng phụ theo phương truyền z là $L = 150 \mu m$. Khoảng cách từ nguồn đến điểm bắt đầu cấu ống dẫn sóng phụ ghép nối vào là 50 μm . Độ rộng giữa hai ống dẫn sóng chính và phụ tại đầu ra là $G = 1,6 \mu m$.

Sử dụng kỹ thuật mô phỏng BPM một cách cẩn thận từng bước nhỏ một, nhóm tác giả mô phỏng, khảo sát theo w trong khoảng từ 300nm-600nm. Nhóm tác giả sẽ dựa vào đặc tính truyền đạt để tìm ra độ rộng w mà tại đó ống dẫn sóng phụ coupling tốt với ống dẫn sóng chính. Nhóm tác giả sẽ dựa vào hai tham số δ gọi là hệ số không ghép nối (uncoupling coefficient) và ϵ là hệ số ghép nối (coupling coefficient) để khảo sát được tính như sau:

$$\epsilon = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_i} \right) \quad (1)$$

$$\delta = 10 \log_{10} \left(\frac{P'_{out}}{P_i} \right) \quad (2)$$

Trong đó P_{in} là công suất đầu vào của ống dẫn sóng được chuẩn hóa bằng 1 đơn vị công suất tại đầu vào, P_{out} là công suất mong muốn thu được tại cổng cần chọn lọc ghép nối, P'_{out} là công suất không mong muốn thu được.



Hình 3. Mẫu đường bao điện trường (contour map) cho bộ tách ghép kênh phân chia hai mode đề xuất cho (a) mode cơ bản, (b) mode bậc một

Ta khảo sát w trong khoảng từ $0.35 \mu\text{m}$ đến $0.55 \mu\text{m}$ để tìm ra các đặc tính δ và ε tại các đầu ra nhằm chọn lựa một cách thích hợp. Dựa trên Hình 2, nhóm tác giả đã chọn $w=0.5\mu\text{m}$ (tại điểm đánh dấu trong hình) sẽ tránh được xuyên nhiễu crosstalk giữa hai mode (nghĩa là công suất không mong muốn của mode này lại xuyên nhiễu vào cổng mong muốn của mode kia) và có khoảng băng rộng, ống dẫn phụ có khả năng ghép nối chọn lọc hiệu suất cao. Với cách chọn thích hợp này, mode cơ bản sẽ được tách ra theo đầu ra của ống dẫn sóng bus chính, trong khi mode bậc một sẽ được ghép nối chọn lọc theo điều kiện thích hợp pha (phase matching condition) tức tương thích hằng số truyền bậc một của ống dẫn sóng chính (độ rộng W_m) với hằng số truyền cơ bản của ống dẫn sóng rẽ (độ rộng w), thế là việc tách riêng rẽ kênh (demultiplexing) hai mode được hoàn tất. Cấu trúc ngược lại sẽ thực hiện chức năng ghép kênh hai mode (multiplexing).

3. Kết quả mô phỏng và thảo luận

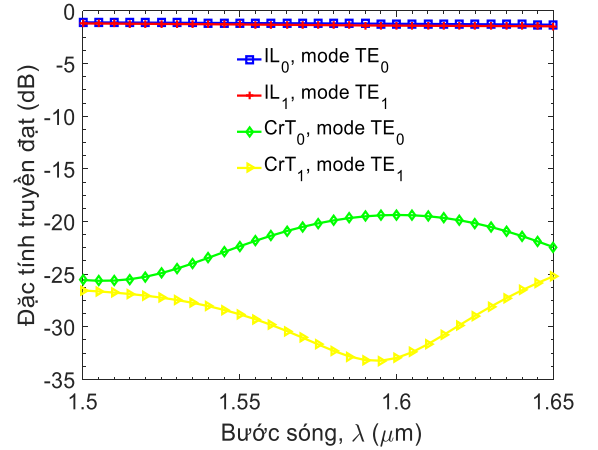
Đầu tiên, nhóm tác giả mô phỏng sự truyền mode của các mode đề xuất ra chức năng phân tách kênh của cấu kiện đề xuất thiết kế. Hình 3 thể hiện kết quả bằng mô phỏng BPM bởi sự phân bố trường của lần truyền các mode cơ bản và mode bậc một khi truyền từ đầu vào của thiết bị tại trung tâm của bước sóng hoạt động 1550 nm . Kết quả mô phỏng cho thấy phù hợp với phân tích hoạt động của thiết bị ở trên. Kết quả cũng cho thấy một lượng rất nhỏ công suất xuyên nhiễu không mong đợi từ mode này sang mode khác của thiết bị, cũng như phần nhỏ không đáng kể phát xạ từ lõi ra vào.

Để đánh giá được hiệu năng hoạt động của thiết bị về mặt quang học, nhóm tác giả đánh giá hai trong số những tham số quan trọng nhất là suy hao chèn IL (insertion loss) và mức xuyên nhiễu CrT (crosstalk) của thiết bị cấu kiện

quang tử. Hai tham số này được định nghĩa như sau:

$$IL = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (3)$$

$$CrT = -10 \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P'_{out}} \right) \quad (4)$$

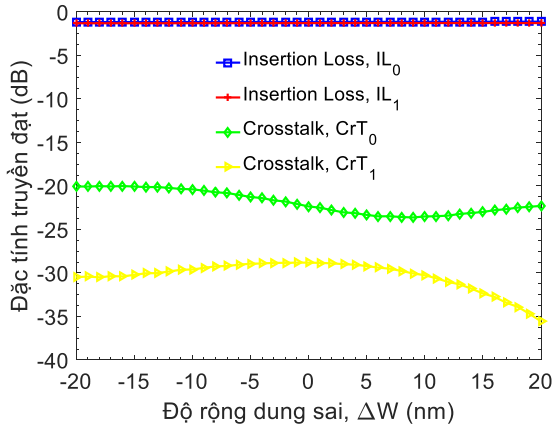


Hình 4. Đặc tính hiệu năng quang học của thiết bị phụ thuộc vào bước sóng cho hai mode theo suy hao chèn và xuyên nhiễu

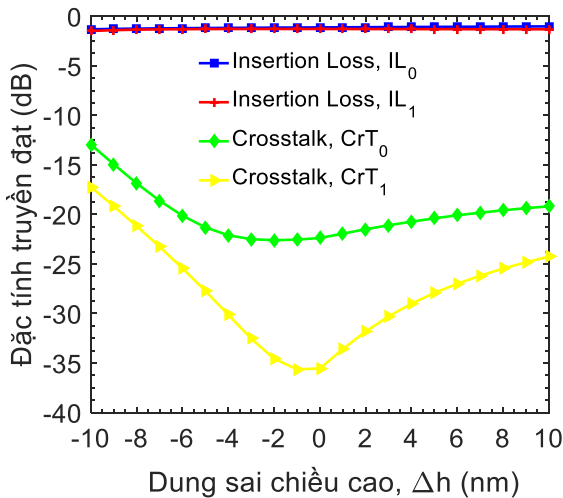
Tiếp theo nhóm tác giả đánh giá khoảng băng làm việc của thiết bị được đề xuất đối với hai tham số quan trọng IL và CrT kể trên. Mô phỏng BPM theo phổ bước sóng từ $1.5 \mu\text{m}$ đến $1.65 \mu\text{m}$ cho thấy thiết bị suy hao chèn IL không vượt quá 1 dB và xuyên nhiễu CrT nhỏ hơn -20 dB trong toàn bộ khảo sát của vùng cửa sổ 1550 nm . Do vậy, băng thông của thiết bị là rất rộng.

Tiếp theo, dung sai chế tạo là rất quan trọng đối với thiết bị vì mọi quy trình sản xuất đều có suy hao. Đối với nghiên cứu dựa trên mô phỏng cần đánh giá suy hao chế tạo để xem xét hiệu suất hệ thống. Nhóm tác giả biết rằng, chiều cao của ống dẫn sóng được thiết lập theo chiều cao kênh dẫn silic của ống dẫn sóng SOI tiêu chuẩn loại 220 nm . Trong thực tế, chất lượng phiên SOI sử dụng trong công nghệ chế tạo chip tích hợp cỡ lớn VLSI nói chung và chip quang tử nói riêng phụ thuộc vào mẫu cung cấp của nhà sản xuất phiên. Mặt khác, sự chính xác độ rộng ống dẫn sóng đạt được do phụ thuộc công nghệ chế tạo Ebeam hay DUV. Cũng vậy, độ chính xác thiết kế mô phỏng phụ thuộc độ chính xác của mô hình mô phỏng. Do vậy, ta phải khảo sát các dung sai chế tạo đối với thiết bị theo độ rộng và chiều cao ống dẫn sóng. Hình 5 khảo sát độ rộng của ống dẫn sóng chính, theo tham số dung sai độ rộng $\Delta W \text{ (nm)}$ bằng mô phỏng BPM. Kết quả từ Hình 4 cho ta thấy rằng, xung quanh giá trị dung sai $\Delta W = \pm 20 \text{ nm}$ thì các giá trị IL của hai mode hầu như không đổi (khoảng 1 dB) trong toàn bộ nhất, cũng như CrT của hai mode biến động nhưng không lớn hơn -20 dB . Tương tự Hình 6 thể hiện dung sai chế tạo theo chiều cao đối với IL và CrT của hai mode. Kết quả cho thấy rằng IL cũng hầu như không đổi với suy hao khoảng 1 dB và CrT $< -20 \text{ dB}$ trong khoảng biến động của chiều cao $\Delta h = \pm 5 \text{ nm}$, đây là dung sai hoàn toàn đạt được dễ dàng với công nghệ chế tạo hiện đại quang khắc bằng ebeam writing hay DUV-193 nm.

So sánh với các kết quả nghiên cứu gần đây của Chunlei Sun et al. [12] và Yunhong Ding et al. [13], nhóm tác giả thấy cấu trúc đề xuất có hiệu suất tương tự nhưng không cần cấu trúc bất đối xứng và ghép định hướng phức tạp. So sánh với Uematsu et al. [14] sử dụng cấu trúc MMI phức tạp và cần có bộ dịch pha, cấu trúc đề xuất trong bài báo này đơn giản hơn nhiều.



Hình 5. Kết quả mô phỏng đặc tính truyền đạt của bộ ghép theo dung sai độ rộng ống dẫn sóng chính ΔW (nm) thỏa mãn điểm tối ưu tách và biến đổi mode



Hình 6. Kết quả mô phỏng đặc tính truyền đạt của bộ ghép theo dung sai chiều cao Δh (nm) thỏa mãn điểm tối ưu tách và biến đổi mode

4. Kết luận

Một thiết kế mới cho thiết bị tách/ghép kênh hai mode đã được chứng tỏ bởi thiết kế mô phỏng dựa trên ống dẫn sóng SOI dạng bus có rẽ nhánh. Kết quả mô phỏng cho thấy

hiệu năng hoạt động của thiết bị trong băng thông rất rộng lên tới 150 nm trong vùng cửa sổ 1550 nm với suy hao chèn nhỏ không vượt quá 1 dB và xuyên nhiễu nhỏ rất nhỏ, nhỏ hơn -20 dB. Thiết bị có mật độ tích hợp cao, chỉ thiết kế trong diện tích $8 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ và tương thích CMOS. Thiết bị đề xuất rất thích hợp cho mạch tích hợp quang tử cỡ lớn để xử lý thông tin DWDM-MDM và các hệ thống thông tin toàn quang trên chip để dồn kênh tốc độ tín hiệu cao trong một mạch tích hợp trong cùng chip.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N. S. Bergano and C. R. Davidson, "Wavelength Division Multiplexing in Long-Haul Transmission Systems", *J. Light. Technol.*, vol. 14, no. 6, 1996, pp. 1299–1308.
- [2] N. Bozinovic et al., "Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers", *Science (80-.)*, vol. 340, no. 6140, 2013, pp. 1545–1548.
- [3] H. Kubota, M. Oguma, and H. Takara, "Three-mode multi/demultiplexing experiment using PLC mode multiplexer and its application to 2+1 mode bi-directional optical communication", *IEICE Electron. Express*, vol. 10, no. 12, 2013, pp. 1–6.
- [4] 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, 2014, p. 1036.
- [5] R. Ryf et al., "Mode-division multiplexing over 96 km of few-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing", *J. Light. Technol.*, vol. 30, no. 4, 2012, pp. 521–531.
- [6] 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, 2010, p. 4709.
- [7] B. Stern et al., "Integrated Switch for Mode-Division Multiplexing (MDM) and Wavelength-Division Multiplexing (WDM)", *Cleo 2015*, no. Mdm, 2015, p. STh1F.2.
- [8] N. Hanzawa et al., "Mode multi/demultiplexing with parallel waveguide for mode division multiplexed transmission", *Opt. Express*, vol. 22, no. 24, 2014, p. 29321.
- [9] C. Cheng et al., "Plasmon-Enhanced Emission From CMOS Compatible Si-LEDs With Gold Nanoparticles", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 27, no. 22, 2015, pp. 2414–2417.
- [10] D. Dai, J. Wang, and Y. Shi, "Silicon mode (de)multiplexer enabling high capacity photonic networks-on-chip with a single-wavelength-carrier light", *Opt. Lett.*, vol. 38, no. 9, 2013, p. 1422.
- [11] Z. Yang and S. Ramanathan, "Breakthroughs in photonics 2014: Phase change materials for photonics", *IEEE Photonics J.*, vol. 7, no. 3, 2015.
- [12] C. Sun, Y. Yu, G. Chen, and X. Zhang, "Silicon mode multiplexer processing dual-path mode-division multiplexing signals", *Opt. Lett.*, vol. 41, no. 23, 2016, p. 5511.
- [13] Y. Ding et al., "On-chip mode division multiplexing technologies", vol. 9774, 2016, p. 977407.
- [14] 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, 2012, pp. 2421–2426.