

THIẾT BỊ TÁCH GHÉP KÊNH MỚI PHÂN CHIA BA MODE SUY HAO THẤP SỬ DỤNG PHÂN TẦNG CÁC ỚNG DẪN SÓNG SOI GHÉP ĐỊNH HƯỚNG

A LOWLOSS MODE DIVISION (DE)MULTIPLEXING DEVICE BASED ON CASCADED SYMMETRICAL DIRECTIONAL COUPLER USING SILICON MATERIAL

Trương Cao Dũng¹, Vũ Anh Đào¹, Nguyễn Tấn Hưng², Nguyễn Hữu Long³

¹Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông – PTIT; dungtc@ptit.edu.vn

²Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng; hung.nguyen@dut.udn.vn

³Công ty Cổ phần Thương mại và Phát triển Công nghệ Kinh Bắc; longkgb@gmail.com

Tóm tắt - Chúng tôi đề xuất một thiết kế mới của thiết bị tách/ghép kênh phân chia ba mode dựa trên phân tầng của hai ống dẫn sóng silic ghép định hướng đối xứng. Các mode cơ bản, mode bậc nhất và bậc hai theo phân cực điện ngang (TE) được tách riêng ra ba 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) và phương pháp hệ số hiệu dụng (EIM). Các kết quả cho thấy tách ba kênh thành công trong một dải băng C của cửa sổ thông tin quang 1550 nm, với suy hao và xuyên nhiễu kênh thấp. Thiết bị đề xuất có diện tích tích hợp nhỏ, 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; bộ ghép định hướng đối xứng; ống dẫn sóng silic; phương pháp BPM; phương pháp EIM; mode TE.

1. Giới thiệu

Chúng ta đang sống trong kỷ nguyên bùng nổ thông tin các dịch vụ số liệu, điện toán đám mây (cloud computing), các dịch vụ xem truyền hình độ phân giải cao qua mạng Internet hay các dịch vụ theo yêu cầu, các dịch vụ truy nhập di động cá nhân, Internet vạn vật IoT (Internet of things)... 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 lên tới 100 Gb/s [1] cho mỗi bước sóng và sẽ còn không ngừng gia tăng, có thể lên tới 400 Gb/s và 1 Tb/s trong tương lai, nếu các dịch vụ di động thế hệ 5G tiếp tục hỗ trợ băng thông lớp truy nhập cực lớn, như các yêu cầu đặt ra của hiệp hội di động thế giới hay là Tổ chức các đối tác phát triển 3G (3GPP) được thỏa mãn. Do đó, cần một chiến lược nâng cao dung lượng cho các kênh WDM, chẳng hạn như sử dụng các dạng điều chế cao cấp đa mức [2], hay ghép kênh phân chia theo trạng thái phân cực PDM (polarization division multiplexing). Bởi cho đến nay, các hệ thống WDM là phổ biến, tuy nhiên, hiệu suất sử dụng phổ của công nghệ WDM đã đạt đến giới hạn mà hầu như không thể tăng được, do một số yếu tố chính: (a) hệ thống thông tin quang trong băng thông suy hao thấp của sợi là từ băng (C + L) từ dải 1.525 - 1.625 nm, hiện với công nghệ ghép kênh DWDM với 0,8 nm hoặc 0,4 nm đã bị giới hạn kênh do những vấn đề về tán sắc, ảnh hưởng rất mạnh của các hiệu ứng phi tuyến, đặc biệt trong các hệ thống tốc độ bit cao và có khuếch đại như điều chế pha chéo XPM, trộn bốn sóng FWM và tán xạ Raman được kích thích SRS. Ngược lại, các hệ thống thông tin quang sợi có thể kết hợp các hoạt động đa mode để nâng cao dung lượng cho kênh

Abstract - We propose a design of a low loss silicon three-mode (de)multiplexing device based on two cascaded symmetrically directional couplers. Input lights at fundamental, first-order, and second-order modes of transverse electric (TE) polarization are demultiplexed at three 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) and effective index method (EIM). The results show a successful three-mode multiplexing in the wavelength range of C band (1550 nm) with low insertion loss and crosstalk. The proposed device also exhibits a small footprint that makes it potential for not only wavelength-division multiplexing (WDM) and multimode-division multiplexing (MDM) transmission systems, but also for high bitrate and compact on-chip silicon photonics integrated circuits.

Key words - mode (de)multiplexer; symmetrical directional coupler; silicon waveguide; beam propagation method (BPM); effective index method (EIM); TE mode.

WDM, 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 và tán sắc, do các mode trực giao với cùng bước sóng nên có tương quan chéo là 0. 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 ghép kênh phân chia theo mode – MDM [6] được xem là con đường sáng sủa để phá vỡ giới hạn [5]. Trong phương pháp này, mỗi mode riêng của bước sóng mang một lưu lượng thông tin riêng. Do đó, một dung lượng lớn có thể được tạo ra nhờ kỹ thuật MDM kết hợp với kỹ thuật WDM [7].

Thông tin đa mode chịu tán sắc liên mode trong sợi với cự ly truyền dẫn xa. Dù vậy, các kỹ thuật bù tán sắc tốt giúp giảm đáng kể những ảnh hưởng của tán sắc với đa mode. Do vậy, các hệ thống thông tin đa mode được gia tăng cự ly truyền dẫn. 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 liền 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 hơn, do cần tạo ra các mask với kích thước khác nhau.

Trong bài báo này, chúng tôi trình bày về một cấu trúc sử dụng các bộ ghép định hướng DC (directional coupler) đối xứng (chiều rộng các ống dẫn sóng như nhau) được phân tầng hai chặng và sử dụng vật liệu SOI để tạo ra bộ tách ghép ba mode. Việc phân tích lý thuyết bằng sử dụng lý thuyết ghép mode trong những ống dẫn sóng ghép định hướng và thiết kế tối ưu thông qua mô phỏng số truyền chùm – BPM (beam propagation method) và phương pháp hệ số hiệu dụng EIM (effective index method) rất thích hợp cho ống dẫn sóng này. Các kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống có băng thông khá rộng trong một dải băng C dù số lượng mode hoạt động là khá lớn. Kích thước cấu kiến 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.

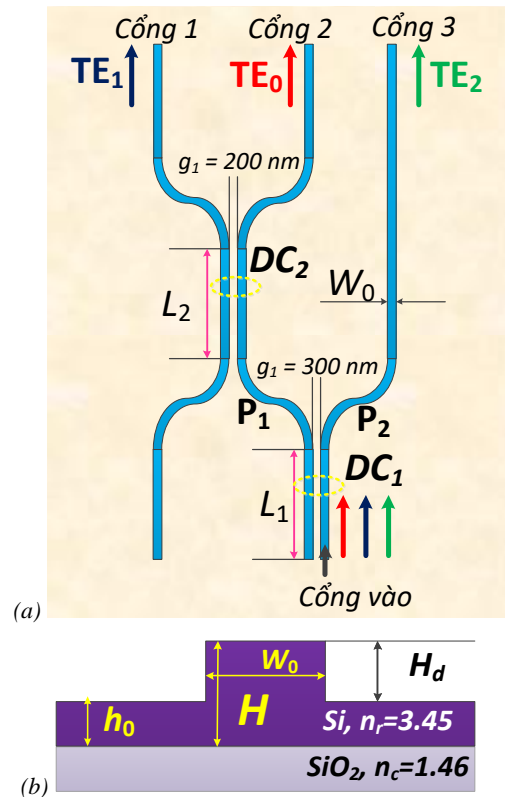
2. Nguyên lý thiết kế hoạt động và tối ưu cấu trúc

Sơ đồ cấu trúc của thiết bị phân chia theo bước sóng được mô tả như ở Hình 1. Thiết bị được phân tầng thành hai tầng ghép định hướng một cách đối xứng, theo đó các ống dẫn sóng sử dụng vật liệu silic (Si) trên nền lớp vỏ thủy tinh silic (SiO₂) có chiều rộng như nhau là W_0 . Thiết bị được thiết kế để hoạt động cho ba mode ở trạng thái phân cực điện ngang TE (transverse electric) ở bước sóng trung tâm hoạt động là 1.550 nm.

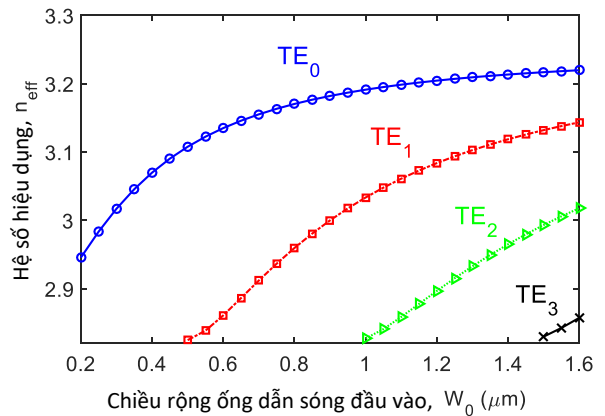
Các ống dẫn sóng SOI được thiết kế theo dạng ống dẫn sóng dạng sườn (rib/ridge waveguides), với lớp lõi silic có chiết suất $n_r = 3,45$ và chiết suất lớp vỏ thủy tinh silic $n_c = 1,46$ ở bước sóng 1.550 nm. Mô hình Seimeier được sử dụng để phân tích đặc tính chiết suất vật liệu silic và thủy tinh silic cho thấy rằng, trong vùng phổ bước sóng 1.550 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 sử dụng được chế tạo theo phương pháp quang khắc bằng chùm điện tử (Ebeam lithography hay Ebeam writing) và kỹ thuật ăn mòn khô 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 tổng 500 nm và chiều cao vùng tâm (slab height) là 220 nm theo tiêu chuẩn.

Đầu tiên, ta 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. Hình 2 mô phỏng kết quả phép giải mode (mode solver) sử dụng mô phỏng BPM kết hợp mô phỏng EIM để tìm ra mode hiệu dụng theo chiều rộng của các ống dẫn sóng đầu vào W_0 , với cấu trúc dạng sườn đã nói ở trên. Để hỗ trợ 3 mode theo phân cực TE hoạt động trong ống

dẫn sóng thì W_0 nằm trong khoảng từ 1 μm đến 1,5 μm . Do đó, trong thiết kế này chúng ta chọn $W_0 = 1,35 \mu\text{m}$ để hỗ trợ ba mode TE₀, TE₁ và TE₂.



Hình 1. Sơ đồ thiết kế đề xuất của thiết bị tách kênh ba mode dựa trên phân tầng các bộ ghép định hướng đối xứng sử dụng vật liệu: a) Sơ đồ mặt chiếu bằng và b) Sơ đồ mặt chiếu cạnh



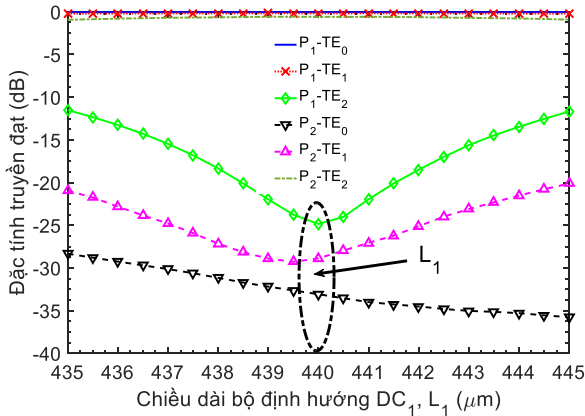
Hình 2. Hệ số hiệu dụng của ống dẫn sóng silic đầu vào của các mode như là phụ thuộc hàm của chiều rộng ống dẫn sóng đầu vào. Các màu sắc của các đường cong thể hiện tương ứng cho các bậc khác nhau của mode được hỗ trợ dẫn trong ống dẫn sóng

Ý tưởng của thiết kế này kế thừa tư tưởng thiết kế của Yaosheng Shi và các cộng sự [12], khi thiết kế thiết bị tách ghép ba bước sóng (triplexer) sử dụng ống dẫn sóng SOI bằng cách phân tầng các bộ ghép định hướng. Bởi vì, nếu coi các mode trực giao có hệ số mode hiệu dụng (n_{eff}) khác nhau cũng giống như các bước sóng khác nhau có hệ số mode khác nhau và như vậy là có chiều dài ghép nối L_c (coupling length) khác nhau. Trong phần này, nhiệm vụ đầu tiên là sử dụng tầng ghép định hướng thứ nhất DC₁ với khoảng hở

(gap) giữa hai ống dẫn sóng là $g_1 = 300$ nm để tách ra một mode tại ống dẫn sóng ở đầu ra và 2 mode còn lại ra chung một ống dẫn sóng còn lại ở đầu ra bộ ghép DC₁. Muốn vậy, theo lý thuyết ghép định hướng đối xứng, sự ghép mode do cảm ứng của các trường gần từ ống dẫn sóng nọ sang ống dẫn sóng kia của bộ ghép định hướng phải thỏa mãn phương trình ghép mode. Nghĩa là, chiều dài bộ ghép định hướng DC₁ là L_1 phải thỏa mãn điều kiện sau đây:

$$L_1 = mL_c(TE_0) = nL_c(TE_1) = pL_c(TE_2) \quad (1)$$

Ở đây, L_c là chiều dài ghép nối của các mode, m , n và p là các số nguyên dương. Muốn thỏa mãn điều kiện hai mode về cùng một phía thì các cặp m , n và p phải cùng tính chẵn lẻ.



Hình 3. Kết quả mô phỏng đặc tính truyền đạt của bộ ghép định hướng DC₁ theo chiều dài ngắn nhất L_1 thỏa mãn điểm tối ưu tách các cặp mode

Sử dụng kỹ thuật mô phỏng BPM một cách cẩn thận từng bước nhỏ một, chúng ta mô phỏng theo chiều dài của bộ ghép với chiều dài ghép của các mode được tính từ dữ liệu về hệ số mode hiệu dụng. Kết quả là trong vùng chiều dài ngắn nhất L_1 khoảng cỡ 440 μm như thể hiện trên Hình 3 thì thỏa mãn hệ thức sau đây:

$$L_1 = L_c(TE_0) = 5L_c(TE_1) = 16L_c(TE_2) \quad (2)$$

Như vậy, với lựa chọn ngắn nhất của chiều dài bộ ghép định hướng thứ nhất ở giá trị tối ưu là 440 μm (xem trên Hình 3) thì mode cơ bản TE_0 và mode bậc nhất TE_1 sẽ được tách chung cặp ra cổng ra chéo (P_1) của bộ ghép DC₁, trong khi đó mode TE_2 được tách riêng ra một cổng ra thẳng (P_2), như ký hiệu trên sơ đồ ở Hình 1.

Tiếp đến, nhiệm vụ còn lại là ta sử dụng một bộ ghép định hướng thứ hai DC₂ với khoảng hở (gap) giữa hai ống dẫn sóng là $g_2 = 200$ nm để tách riêng ra hai mode TE_0 và TE_1 một cách riêng rẽ. Để đạt được điều này thì chiều dài L_2 của bộ ghép DC₂ phải thỏa mãn đẳng thức sau đây:

$$L_2 = rL_c(TE_0) = sL_c(TE_1) \quad (3)$$

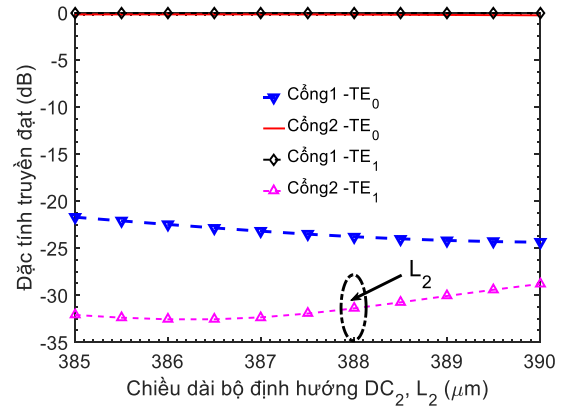
Trong đó, r , s là các số nguyên chẵn lẻ khác nhau, L_c là chiều dài ghép của đoạn ghép định hướng DC₂ này.

Kỹ thuật BPM được sử dụng để mô phỏng các đặc tính truyền đạt của hai mode này. Bằng cách sử dụng quy trình mô phỏng cẩn thận với các bước như vậy, ta tìm được chiều dài L_2 nằm trong khoảng từ 385 μm đến 390 μm thì đặc tính truyền đạt công suất (theo dB) ở các cổng ra mong

muốn và công còn lại có cách biệt lớn hơn 20 dB. Như được thấy ở trên Hình 4, chúng ta chọn giá trị $L_2 = 388$ μm trong thiết kế này thỏa mãn biểu thức:

$$L_2 = 2L_c(TE_0) = 9L_c(TE_1) \quad (4)$$

Như thế ta đã tách ra được mode TE_0 ra phía cổng ra thẳng (cổng 2) và mode TE_1 ra cổng ra thẳng chéo (cổng 1) của đầu ra thiết bị, do đó, nhiệm vụ tách riêng ba mode thành công.



Hình 4. Kết quả mô phỏng đặc tính truyền đạt của bộ ghép định hướng DC₂ theo chiều dài ngắn nhất L_2 thỏa mãn điểm tối ưu tách các cặp mode

3. Kết quả mô phỏng và thảo luận

Hình 5 thể hiện kết quả mô phỏng BPM bởi sự phân bố trường của lần lượt các mode TE_0 , TE_1 và TE_2 khi truyền từ đầu vào của thiết bị tại trung tâm của bước sóng hoạt động 1.550 nm. Kết quả mô phỏng cho thấy phù hợp với phân tích hoạt động của thiết bị ở trên. Kết quả mô phỏng cũng cho thấy một lượng rất nhỏ không đáng kể công suất phát ra từ thiết bị. Do đó, thiết bị đề xuất là có suy hao rất nhỏ.

Trong phần tiếp theo, chúng ta sẽ đánh giá hiệu năng quang học của thiết bị đề xuất. Chúng ta biết rằng, hai tham số quan trọng nhất về mặt hiệu năng quang học ảnh hưởng đến chất lượng hoạt động của thiết bị là suy hao chèn và xuyên nhiễu kênh. Ở đây, chúng ta ký hiệu suy hao chèn là I.L (insertion loss) và xuyên nhiễu kênh là Cr.T (crosstalk), được định nghĩa bởi các biểu thức sau đây:

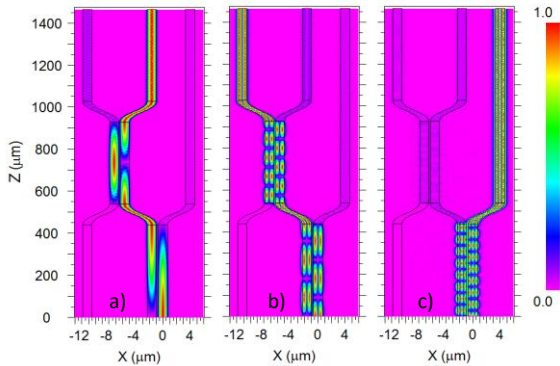
$$I.L = 10\log_{10}\left(\frac{P_o}{P_i}\right) \quad (5)$$

$$Cr.T = -10\log_{10}\left(\frac{P_o}{\sum P_{lk}}\right) \quad (6)$$

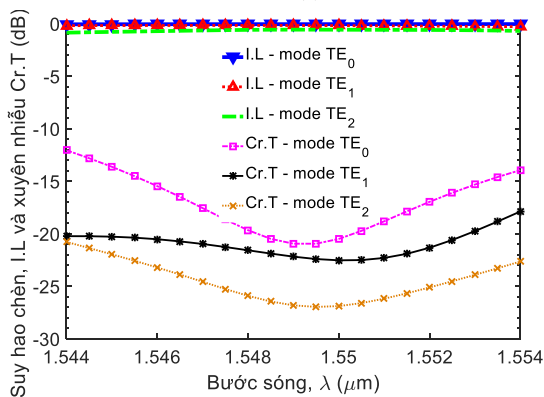
Ở đây, P_i là công suất kênh đầu vào của ống dẫn sóng, P_o là công suất kênh đầu ra của ống dẫn sóng, $\sum P_{lk}$ là tổng công suất không mong muốn tại đầu ra mong muốn từ các kênh liền bên cạnh.

Hình 6 thể hiện kết quả sự phụ thuộc hàm vào bước sóng của các tham số quang học I.L và Cr.T theo một dải bước sóng trong băng C, từ 1.544 nm đến 1.554 nm. Kết quả mô phỏng cho thấy rằng, suy hao chèn của cả ba mode là nhỏ hơn 0,9 dB về giá trị tuyệt đối trong khoảng 10 nm được khảo sát ở trên. Như vậy, hệ thống thiết kế là thiết bị có suy hao chèn tương đối nhỏ. Trong

khi đó, trong dải bước sóng này thì xuyên nhiễu kênh của ba mode là dưới -12 dB. Mặc dù thiết bị đề xuất có băng thông rộng so với các cấu trúc sử dụng ghép đa mode, tuy nhiên, thiết bị đề xuất trong bài báo này có cấu trúc hình học khá đơn giản, chỉ gồm hai ống dẫn sóng cỡ micromet ghép phần tầng kiểu định hướng, do đó có cấu trúc đơn giản, dễ dàng tạo các mask cho việc chế tạo. Băng thông 10 nm với suy hao thấp hỗ trợ dung lượng kênh khá lớn cho các hệ thống DWDM-MDM, với khoảng cách kênh cỡ 0,4 nm đến 0,8 nm.



Hình 5. Mẫu đường bao điện trường (contour map) cho bộ tách ghép kênh phân chia ba mode đề xuất cho (a) mode cơ bản, (b) mode bậc một và (c) mode bậc hai



Hình 6. Đặc tính hiệu năng quang học của thiết bị phụ thuộc vào bước sóng cho ba mode phân cực: (a) suy hao chèn và (b) xuyên nhiễu

4. Kết luận

Một thiết kế mới cho thiết bị tách/ghép kênh ba mode mà giữ nguyên các bậc mode ở đầu ra đã được chứng tỏ

bởi thiết kế mô phỏng dựa trên ống dẫn sóng SOI, và sự phân tầng hai bộ ghép định hướng với sự đơn giản trong cấu trúc hình học để tách riêng dần từng mode. Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu năng hoạt động của thiết bị trong băng thông 10 nm với suy hao chèn nhỏ không vượt quá 1 dB và xuyên nhiễu nhỏ hơn -12 dB. Thiết bị 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 tốc độ tín hiệu trong một mạch tích hợp cùng.

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, 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, pp. 1036–1044.
- [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, pp. 4709–4716.
- [7] B. Stern et al., "Integrated Switch for Mode-Division Multiplexing (MDM) and Wavelength-Division Multiplexing (WDM)", in *Cleo: 2015*, 2015, no. Mdm, 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, pp. 29321–29330.
- [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, pp. 1422–1424.
- [11] Z. Yang and S. Ramanathan, "Breakthroughs in photonics 2014: Phase change materials for photonics", *IEEE Photonics J.*, Vol. 7, No. 3, 2015.
- [12] 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, 2009, pp. 1443–1447.

(BBT nhận bài: 06/10/2017, hoàn tất thủ tục phản biện: 16/10/2017)