BỘ THÔNG TIN VÀ TRUYỀN THÔNG

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

DƯƠNG QUANG DUY

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ LINH KIỆN TÍCH HỢP QUANG TỬ TRÊN NỀN VẬT LIỆU SOI CHO HỆ THỐNG GHÉP KÊNH PHÂN CHIA THEO MODE

CHUYÊN NGÀNH: Kỹ thuật điện tử

Mã số: 9.52.02.03

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI - 2022

Công trình được hoàn thành tại:

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS. TS ĐẶNG HOÀI BẮC

2. TS TRƯƠNG CAO DŨNG

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước hội đồng chấm luận án tại:

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Vào hồi:….giờ….ngày….tháng….năm 2022

Có thể tìm hiểu luận án tại:

1. Thư viện Quốc gia Việt Nam

2. Thư viện Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

MỞ ĐẦU

Tính cấp thiết của đề tài luận án

Trong thời điểm bùng nổ của mạng thông tin dữ liệu hiện nay, khi mà kỹ thuật WDM/DWDM đã bão hòa về số lượng kênh ghép, tốc độ mỗi kênh truyền không thể tăng hơn được nữa. Bên cạnh đó, các thế hệ mạng mới đặt ra yêu cầu xử lý nguồn dữ liệu cực lớn (Bigdata) cho IoT, Blockchain và trí tuệ nhân tạo (AI) đang là các đề tài nổi bật để đáp ứng cho nhu cầu sử dụng dữ liệu của nhân loại ngày càng tăng..

Có nhiều hướng tiếp cận khác nhau để nâng cao dung lượng truyền dẫn đã bão hòa của hệ thống WDM. Trong đó, tạo ra một hệ thống ghép kênh phân chia theo mode (MDM) dựa trên các linh kiện quang tử MDM nền SOI là một hướng nghiên cứu tiềm năng để kết hợp và nâng cao dung lượng truyền dẫn của hệ thống WDM. Trong số các linh kiện quang tử MDM, thì linh kiện ghép/tách mode là nhân tố cơ bản và quan trọng nhất của một hệ thống MDM. Nhóm các tác giả trong nước gần đây đã công bố nhiều các linh kiện này với số lượng mode quang tăng theo thời gian, tuy nhiên các linh kiện hầu như chỉ dẫn các mode ở trạng thái phân cực TE, điều này sẽ cản trở việc kết nối các linh kiện quang tử MDM với sợi quang. Trong đó, các linh kiện ghép/tách mode sử dụng các linh kiện chữ Y bất đối xứng nhánh thẳng chưa thực sự tối ưu như các linh kiện sử dụng các nhánh cong, và có độ hở giữa các nhánh. Ngoài ra, các linh kiện quang tử MDM tạo đồng thời nhiều mode từ mode cơ bản (FM) cũng rất ít được công bố gần đây. Bên cạnh đó, các linh kiện quang tử định tuyến lựa chọn mode kênh ra (MSR) sử dụng các linh kiện dịch pha quang nhiệt (TOPS) được gia nhiệt bằng Titan (Ti) gây suy hao cho tín hiệu truyền qua lõi dẫn sóng và được điều khiển bởi nhiều mức công suất khác nhau là những vấn đề cần được cải thiện và tối ưu.

Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu của luận án là thiết kế các linh kiện quang tử MDM ghép/tách mode không phụ thuộc phân cực TE và TM với hiệu năng quang cao, băng thông rộng so với các cấu trúc tương tự đã được công bố. Các linh kiện MSR 1 × 3 với đề xuất các TOPS được điều khiển chỉ bởi hai trạng thái ON/OFF hay gia nhiệt bởi Oxit thiếc Indi (ITO) thay cho Titan (Ti) với công suất tiêu thụ và suy hao tín hiệu truyền qua lõi dẫn Silic thấp. Cuối cùng là các linh kiện tạo đồng thời nhiều mode từ mode cơ bản (FM) đáp ứng cho nhu cầu dung lượng dữ liệu ngày càng tăng cho các hệ thống kết hợp MDM-WDM.

Các kết quả đạt được

Trên cơ sở phương pháp nghiên cứu và mục tiêu đã đề ra, NCS và cộng sự đã thiết kế các linh kiện tích hợp quang tử kích cỡ micro được chia thành các nhóm cụ thể như sau:

1) Cấu trúc dẫn sóng nóc/đỉnh được tối ưu cho các linh kiện giao thoa đa mode MMI và chữ Y để tạo ra linh kiện ghép/tách hai và ba mode có thể dẫn được đồng thời cả hai phân cực TE và TM với hiệu năng quang cao.

2) Thực hiện các cơ chế giao thoa khác nhau trên các linh kiện MMI mắc phân tầng, kết hợp với linh kiện chữ Y tạo ra các linh kiện MSR 1 × 3 cho hai và ba mode, trong đó các TOPS

gia nhiệt bằng ITO với công suất tiêu thụ thấp và có khả năng điều khiển tối ưu chỉ bởi hai trạng thái điều khiển ON và OFF.

3) Ứng dụng cơ chế giao thoa tổng quát và đối xứng của linh kiện MMI cùng với khả năng chia đều công suất của linh kiện chữ Y đối xứng dưới điều kiện bắt chiết suất hiệu dụng MEI, thiết kế các linh kiện tạo đồng thời hai và ba mode từ mode cơ bản TE_0.

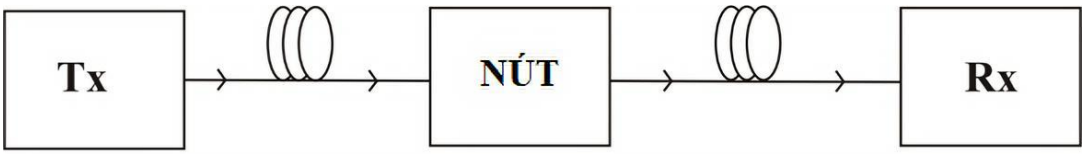
Bố cục của luận án

Luận án được chia thành bốn chương. Chương 1đầu tiên tổng quan về hệ thống MDM với các linh kiện quang tử cơ bản, là một hướng nghiên cứu tiềm năng để kết hợp và nâng cao dung lượng truyền dẫn WDM. Sau đó Chương trình bày nền tảng lý thuyết về sóng ánh sáng, các phương pháp mô phỏng sự truyền ánh sáng trong các dẫn sóng có cấu trúc. Tiếp theo là cấu trúc dẫn sóng SOI và hiệu ứng quang nhiệt, cuối cùng là các linh kiện quang tử nền SOI cơ bản dùng để thiết kế các linh kiện tích hợp quang tử MDM được đề xuất trong các Chương 2, 3 và 4.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ SỰ TRUYỀN SÓNG SÁNH SÁNG TRONG CÁC LINH KIỆN QUANG TỬ MDM NỀN SOI

1.1. Tổng quan về một hệ thống thông tin quang

Một hệ thống thông tin quang nói chung gồm các khối truyền tín hiệu quang T_X, các nút trung chuyển, các khối nhận tín hiệu R_X và đường truyền dẫn tín hiệu.



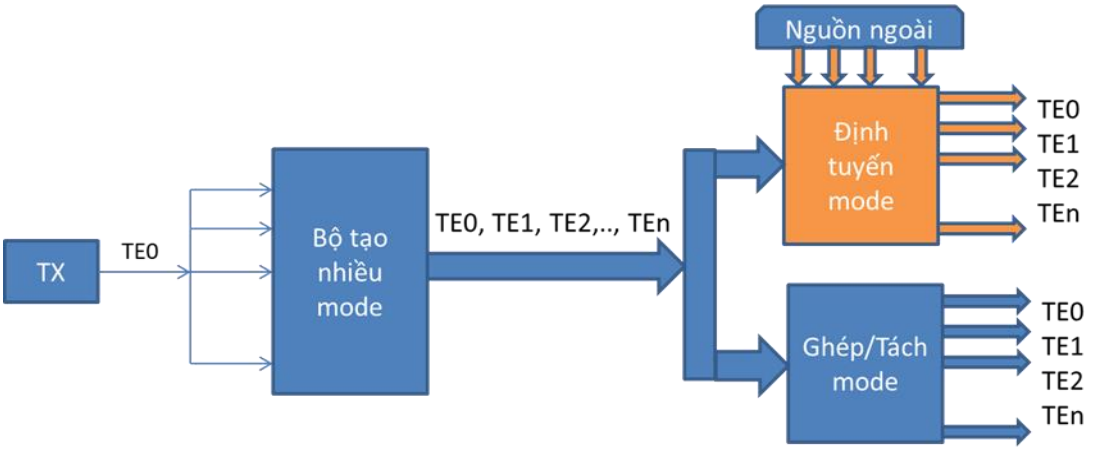
Hình 1.1 Khái quát một hệ thống thông tin quang.

1.1.1. Các kĩ thuật ghép kênh cơ bản trong thông tin quang

Như ta đã biết, các hệ thống thông tin quang cơ bản bao gồm TDM và WDM. Trong đó, hệ thống WDM chiếm lĩnh hàng thập kỉ qua với mỗi bước sóng mang một kênh dữ liệu TDM và một sợi quang đơn mode tiêu chuẩn có thể mang rất nhiều bước sóng mang. Tuy nhiên, dung lượng truyền dẫn quang của hệ thống WDM/DWDM hiện nay đã bị giới hạn bởi định luật Shannon.

1.1.2. Hệ thống thông tin quang MDM

Hệ thống thông tin quang MDM có nguyên lý hoạt động tương tự như hệ thống WDM với mỗi mode ánh sáng thay thế cho một bước sóng mang. Kĩ thuật MDM tận dụng sự trực giao của các mode dẫn trong mỗi bước sóng WDM. Do đó, với *n* mode tham gia vào quá trình truyền dẫn của hệ thống MDM thì dung lượng hệ thống kết hợp MDM-WDM sẽ tăng lên *n* lần. Một hệ thống MDM cơ bản gồm có các linh kiện quang tử ghép/tách mode, linh kiện MSR và linh kiện tạo nhiều mode từ mode cơ bản, các linh kiện này tạo nên một ứng dụng MDM như Hình 1.4. Đây cũng chính là các đối tượng nghiên cứu chính trong Luận án này.



Hình 1.4 Một ứng dụng của một hệ thống MDM sử dụng cho mô hình quảng bá thông tin.

1.2. Sự truyền sóng ánh sáng trong môi trường định hướng

Áp dụng các công thức vector cho điện trường và từ trường, chuyển hệ phương trình Maxwell từ miền thời gian về miền tần số ta tìm được phương trình điện trường E/H theo Helmholtz.

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \tag{1.5}$$

1.2.1. Sự tồn tại các phân cực của ánh sáng trong môi trường dẫn sóng

Sóng điện ngang TE là khi mà các nghiệm có thành phần $E_z = 0$ và thành phần $H_z \neq 0$. Sóng từ ngang TM là khi mà các nghiệm có thành phần $H_z = 0$ và thành phần $E_z \neq 0$. Các linh kiện quang tử được thiết kế trong luận án chỉ hỗ trợ các sóng ánh sáng phân cực TE và TM.

Khi ánh sáng tới lớn hơn các góc tới hạn tại hai giao diện. Các mode dẫn sẽ tồn tại ở điều kiện cộng hưởng, khi mà sóng tới và sóng phản xạ giao thoa và tạo ra hiện tượng sóng đứng.

$$2k_1 d\cos\theta + \varphi_2(\theta) + \varphi_3(\theta) = 2m\pi \tag{1.14}$$

1.2.2. Các phương pháp mô phỏng sự lan truyền của ánh sáng

Các phương pháp BPM và EIM được tích hợp vào trong phần mềm RSoft và được trang bị tại phòng thí nghiệm của Học Viện. Để đơn giản phần trình bày các phương pháp mô phỏng BPM và EIM, sự truyền sóng được lí tưởng bằng cách loại bỏ các yếu tố không mong muốn và được mô tả trong không gian *2D*. Phương pháp BPM chuyển phương trình truyền sóng Helmholtz về dạng sai phân hữu hạn, sau đó sắp xếp lại thành một phương trình ma trận tam giác, là một hệ phương trình tuyến tính với số phương trình bằng số mẫu cần tìm. Trong khi phương pháp EIM chuyển việc xác định chiết xuất hiệu dụng dạng 1D về dạng 2D để giải và tìm hằng số truyền β.

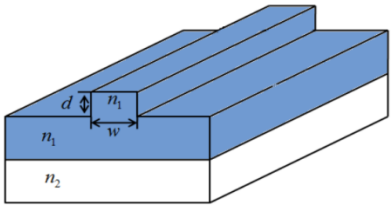
1.3. Linh kiện quang tử nền SOI

Các linh kiện quang tử được xây dựng trên bán dẫn SOI, sẽ có lợi thế so với các vật liệu khác nhờ khả năng sử dụng công nghệ chế tạo CMOS để tạo ra các linh kiện tích hợp quang tử với số lượng lớn và chi phí thấp. sự chênh lệch chiết suất tương đối lớn giữa Silic và sio_2 sẽ làm cho tia sáng với góc tới nhỏ vẫn có khả năng phản xạ hoàn toàn bên trong lõi dẫn Silic.

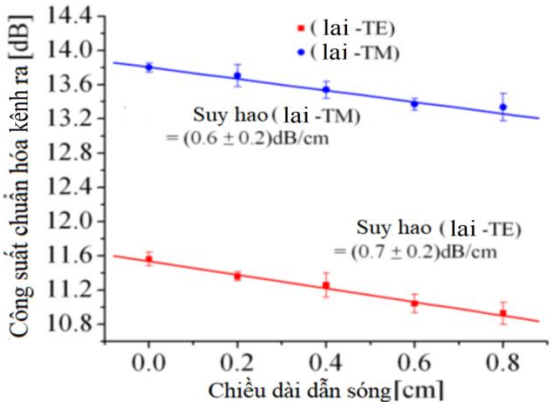
Hình 1.7 Minh họa mặt cắt của một bán dẫn SOI.

1.3.1. Cấu trúc dẫn sóng cho linh kiện quang tử

Các linh kiện quang tử MDM sử dụng các dẫn sóng được tạo ra từ bán dẫn SOI, dựa trên công nghệ chế tạo CMOS, từ đó tương thích với các mạch điện tử WDM. Từ bán dẫn SOI, công nghệ CMOS tạo ra các dẫn sóng với cấu trúc khác nhau, trong các cấu trúc này, thì cấu trúc dẫn sóng nóc/đỉnh được sử dụng phổ biến nhờ khả năng dẫn cả hai mode phân cực TE và TM với suy hao đường truyền là thấp tương đương nhau cho cả hai mode phân cực này.



Hình 1.8 Dẫn sóng nóc/đỉnh dạng 3D.



Hình 1.10 Suy hao truyền tương đương nhau của hai mode ánh sáng phân cực TE và TM được khảo sát trên dẫn sóng nóc/đỉnh.

1.3.2. Hiệu ứng quang-nhiệt trong dẫn sóng SOI

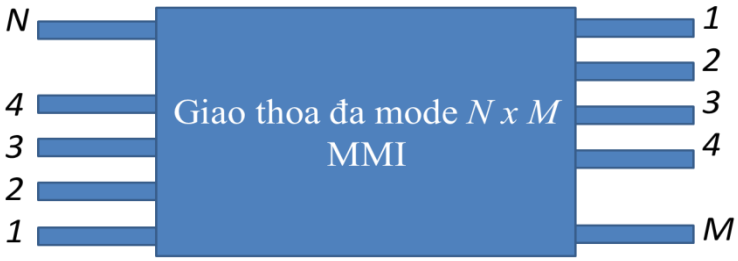
Sử dụng mô hình Sellmeier cải tiến sẽ cung cấp cho ta số liệu về sự phụ thuộc chiết suất của Silic vào nhiệt độ và bước sóng cho việc tính toán, tham chiếu hoặc lựa chọn các giá trị thích hợp tại nhiệt độ thí nghiệm, đặc biệt với các linh kiện quang tử sử dụng TOPS.

1.4 Một số linh kiện quang tử nền SOI cơ bản

Phần này sẽ trình bày nguyên lý hoạt động của hai linh kiện quang tử cơ bản là linh kiện giao thoa đa mode MMI và linh kiện chữ Y. Chúng là các thành phần quan trọng để tạo nên các linh kiện quang tử MDM trong Luận án. Việc phân tích dẫn sóng trong các cấu trúc này dựa vào hai phương pháp BPM và EIM.

1.4.1 Linh kiện giao thoa đa mode MMI

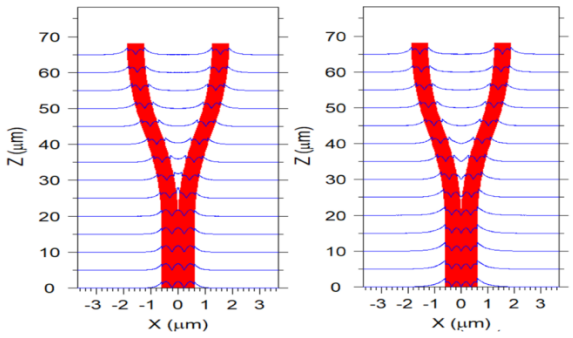
Được xây dựng từ cấu trúc dẫn sóng cơ bản như nóc/đỉnh, gồm các kênh vào/ra và bộ giao thoa đa mode MMI ở trung tâm. Mối liên hệ giữa ảnh kênh vào và kênh ra phụ thuộc vào các kích thước và cơ chế giao thoa của MMI. Trong giao thoa tổng quát, MMI đóng vai trò là một ma trận truyền đạt, mà các phần tử trong ma trận có quan hệ về pha theo thứ tự giữa các kênh vào/ra. Với giao thoa đối xứng, N ảnh được tạo dọc theo trục x với khoảng cách bằng nhau, và chỉ có mode chẵn được kích thích tại kênh vào.



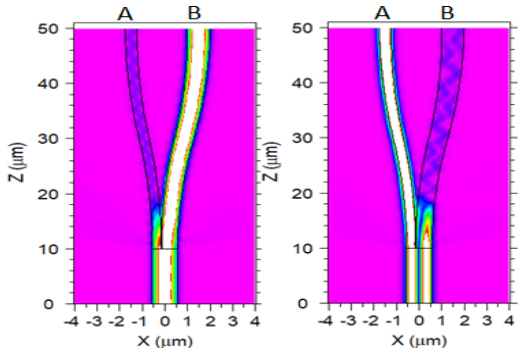
Hình 1.12 Biểu diễn hai chiều của ống dẫn sóng giao thoa đa mode.

1.4.2 Linh kiện chữ Y

Các linh kiện chữ Y cũng được xây dựng từ các cấu trúc dẫn sóng như nóc/đỉnh và có dạng chữ Y. Linh kiện chữ Y đối xứng hai nhánh có công suất của các mode kênh vào được chia đều sang hai nhánh và mode tạo thành thường có bậc thấp hơn bậc mode kênh vào. Với các linh kiện chữ Y đối xứng nhiều nhánh, các mode kênh vào khác nhau được thiết kế để phân vào các cặp nhánh đối xứng khác nhau, dựa vào điều kiện MEI, tương tự như các linh kiện chữ Y bất đối xứng. Hệ số kích thích công suất C_{mv} được sử dụng để xác định các kích thước nhánh cho linh kiện chữ Y với m là số thứ tự nhánh và v là bậc mode kênh vào.



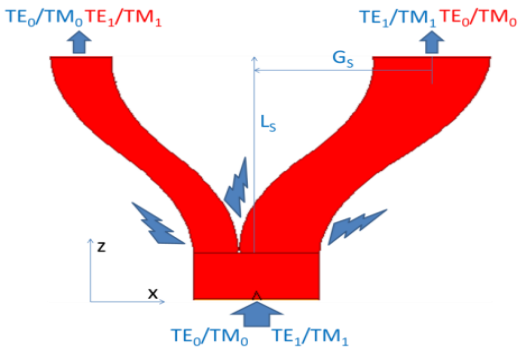
Hình 1.16 Sự tiến triển của (a) mode thứ ba và (b) mode thứ tư, từ thân của một linh kiện chữ Y đối xứng hai nhánh.



Hình 1.18 Sự phát triển của (a) mode cơ bản và (b) mode thứ hai giữa thân và các nhánh A và B của linh kiện chữ Y hai nhánh bất đối xứng.

1.4.3 Các thông số đánh giá hiệu năng của linh kiện quang tử

Suy hao chèn kênh I.L để đánh giá tổn hao của công suất kênh ra so với kênh vào. Nhiễu xuyên kênh Cr.T để đánh giá tỉ lệ giữa công suất của tín hiệu trên nhiễu. Suy hao phụ thuộc phân cực PDL đánh giá sự chênh lệch công suất giữa các cặp mode cùng bậc có phân cực khác nhau (TE và TM). Trong khi, độ cân bằng công suất kênh ra giữa hai mode có cùng trạng thái phân cực được kí hiệu là P.B.



Hình 1.21 Minh họa linh kiện quang tử ghép/tách hai cặp mode TE/TM thấp nhất, màu xanh chỉ tín hiệu truyền tại kênh vào và thu tại kênh ra, màu đỏ là nhiễu tại kênh ra.

$$\text{I.L } (dB) = 10\log_{10}(PR_{TE0}/\, PT_{TE0}) \tag{1.44}$$

$$\text{Cr.T } (dB) = -10\log10(PR_{TE0}/\, PN_{TE1} + PN_{TM1}) \tag{1.45}$$

$$\text{PDL } (dB) = |10\log_{10}(PR_{TEk}/\ PR_{TMk}) \quad (1.46)$$

1.5. Kết luận Chương 1

Một hệ thống MDM cơ bản bao gồm các linh kiện quang tử ghép/tách mode, định tuyến lựa chọn mode và tạo đồng thời nhiều mode được đề xuất như một giải pháp cần thiết, để kết hợp và nâng cao dung lượng truyền dẫn đã bão hòa của hệ thống WDM. Chương này là cơ sở lý thuyết về sự truyền sóng ánh sáng trong các ống dẫn sóng định hướng, được phát triển thành các phương pháp mô phỏng số như BPM và EIM, dùng để thiết kế và đánh giá các linh kiện quang tử MDM trong các chương tiếp theo. Các linh kiện được đề xuất dựa trên cấu trúc dẫn sóng nóc/đỉnh (rib/ridge) nền SOI, với các ưu điểm như suy hao đường truyền thấp và không phụ thuộc phân cực. Ngoài ra, Chương 1 cũng đã nêu rõ nguyên lý hoạt động của các linh kiện quang tử cơ bản MMI và chữ Y dùng cho các chương thiết kế, với mục tiêu tạo ra những linh kiện có hiệu năng quang được cải thiện so với các cấu trúc tương tự, đặc biệt với các cấu trúc đã được công bố của các tác giả trong nước. Cuối cùng là các thông số dùng trong thiết kế và đánh giá linh kiện quang tử MDM.

Trong các chương tiếp theo, NCS bố cục nội dung tương tự như cách trình bày một bài báo khoa học gồm có bốn phần, phần đầu là tổng quan về linh kiện, tiếp theo là thiết kế và tối ưu linh kiện, sau đó là đánh giá và thảo luận hiệu năng quang học cũng như sai số chế tạo của linh kiện, cuối cùng là kết luận. Do giới hạn của luận án, phần thiết kế tối ưu và khảo sát sai số chế tạo của linh kiện sẽ tập trung ở một số thông số chủ yếu, các thiết kế giống nhau giữa các chương sẽ được rút gọn, một số giá trị được lựa chọn có sự tham khảo ở các thiết kế đã được công bố trước đó. Ngoài ra, các linh kiện sau khi thiết kế sẽ được so sánh, đánh giá hiệu năng quang học với các linh kiện tương tự đã được công bố trước đây, trong đó, các công bố của các tác giả trong nước sẽ được in đậm để người đọc dễ dàng tham chiếu và theo dõi.

CHƯƠNG 2. THIẾT KẾ LINH KIỆN QUANG TỬ GHÉP/TÁCH NHIỀU MODE KHÔNG PHỤ THUỘC PHÂN CỰ

Trạng thái phân cực của ánh sáng thay đổi liên tục trong suốt quá trình chúng được truyền trong sợi quang hoặc trong các hệ thống trên chip. Do đó, việc tạo ra các linh kiện ghép/tách mode mà hỗ trợ cả hai trạng thái phân cực điện ngang TE và từ ngang TM là tất yếu cho các hệ thống thực tế. Điều này còn làm tăng dung lượng truyền dẫn quang cho các hệ thống kết hợp MDM-WDM.

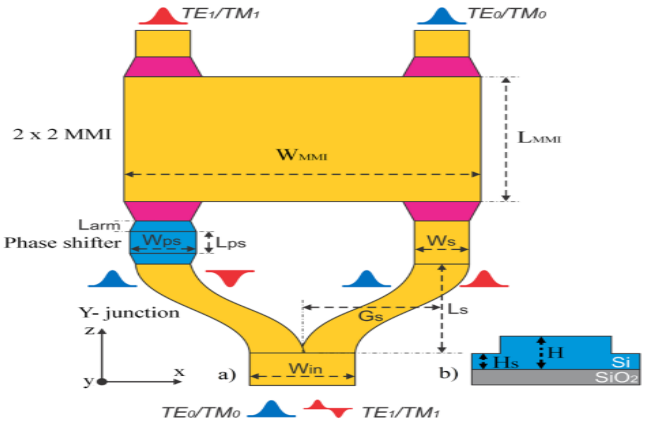
2.1 Linh kiện ghép/tách hai mode không phụ thuộc phân cực trên cơ sở các linh kiện giao thoa đa mode MMI và chữ Y đối xứng

2.1.1 Nguyên lý thiết kế

Thông qua cơ chế MEI, linh kiện chữ Y đối xứng tách các mode TE_0/TM_0 và TE_1/TM_1 thành các mode cơ bản (FM) trước khi kết hợp với linh kiện MMI thực hiện cơ chế giao thoa tổng quát. Một linh kiện dịch pha (PS) được đặt ở nhánh trái linh kiện chữ Y, dịch một góc pha $\pm\pi/2$ của tín hiệu vào linh kiện 2 × 2 MMI, là nhân tố quan trọng cho chức năng ghép/tách mode cho linh kiện. Trong khi linh kiện chữ Y bất đối xứng thực hiện quá trình chuyển đổi mode từ kênh vào đến các kênh ra.

2.1.2 Tổng quan về linh kiện

Linh kiện quang tử đề xuất được tạo thành từ linh kiện chữ Y đối xứng, linh kiện PS và linh kiện 2 × 2 MMI như ở Hình 2.1.



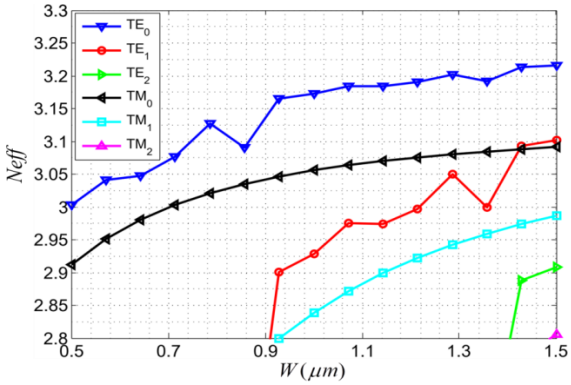
Hình 2.1 Sơ đồ minh họa cho linh kiện đề xuất.

2.1.3. Linh kiện chữ Y đối xứng không phụ thuộc phân cực

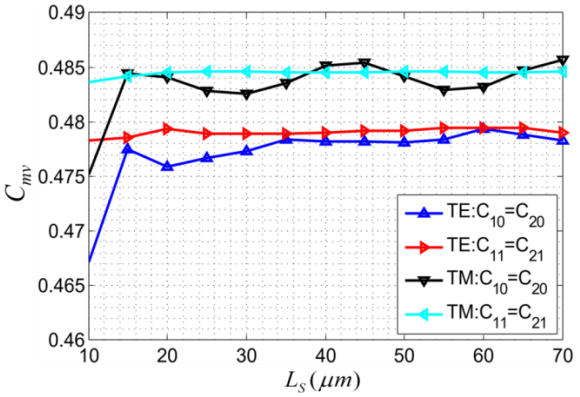
Trong thiết kế này W_{in} = 1,17 μm được chọn như một giá trị tối ưu. Đối với các nhánh của linh kiện chữ Y, độ rộng W_S được chọn là 0,6 μm để đảm bảo chỉ có cặp mode TE_0/TM_0 được dẫn. Kích thước L_S và G_S của linh kiện chữ Y lần lượt được tìm thấy là 50 μm và 1,57 μm, như các giá trị tốt nhất cho linh kiện.

2.1.4 Linh kiện giao thoa đa mode 2 × 2 MMI không phụ thuộc phân cực

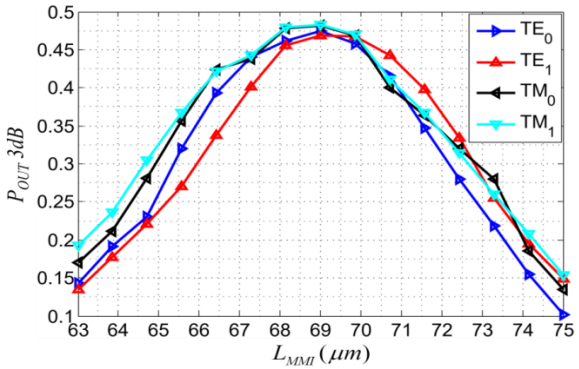
Kết quả mô phỏng tại chiều dài L_{MMI} = 69 μm và chiều rộng W_{MMI} = 4 μm, công suất truyền dẫn giữa các mode là cân bằng nhất khoảng 47,3 %.



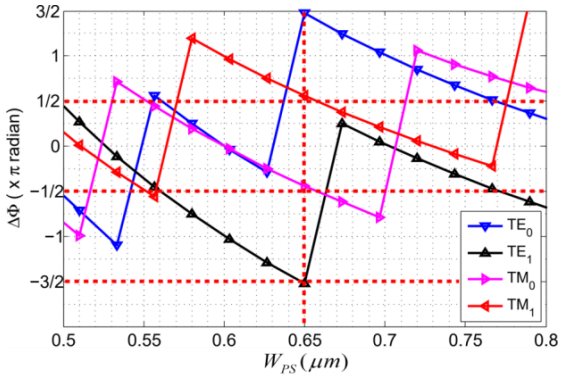
Hình 2.2 Chiết suất hiệu dụng của các mode dẫn phụ thuộc vào độ rộng dẫn sóng.



Hình 2.3 Hệ số kích thích công suất C_{mv} là hàm số của L_S.



Hình 2.4 Sự lan truyền các mode dẫn trong một linh kiện 3 dB kết hợp phụ thuộc vào chiều dài L_{MMI}.



Hình 2.5 Độ lệch pha giữa hai nhánh linh kiện chữ Y như một hàm số của W_{PS}.

2.1.5 Linh kiện dịch pha (PS) không phụ thuộc phân cực

Dịch pha Φ của PS sẽ phụ thuộc vào độ rộng W_{PS} (z) theo (2.4). Từ đó, khảo sát ở độ rộng tại W_{PS} = 0,65 μm, ứng với dịch pha $\Phi = \pi/2$ sẽ thực hiện chức năng ghép/tách các cặp mode TE_0/TM_0 và TE_1/TM_1 của linh kiện đề xuất. Bởi vì tại đó, cặp mode TE_0/TM_0 có cùng một pha dịch xấp xỉ $\pi/2$, trong khi cặp mode TE_1/TM_1 có điểm trùng tương tự nhưng xấp xỉ $-\pi/2$. Tín hiệu tách kênh ra của linh kiện được mô tả như (2.2) cho cặp mode TE_0/TM_0 và (2.3) cho cặp mode TE_1/TM_1.

$$X_0 = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} e^{j0} & e^{j\pi/2} \\ e^{j\pi/2} & e^{j0} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} e^{j\pi/2}e^{\Phi} \\ e^{j\pi/2} \end{bmatrix} e^{j\theta_0} \tag{2.2}$$

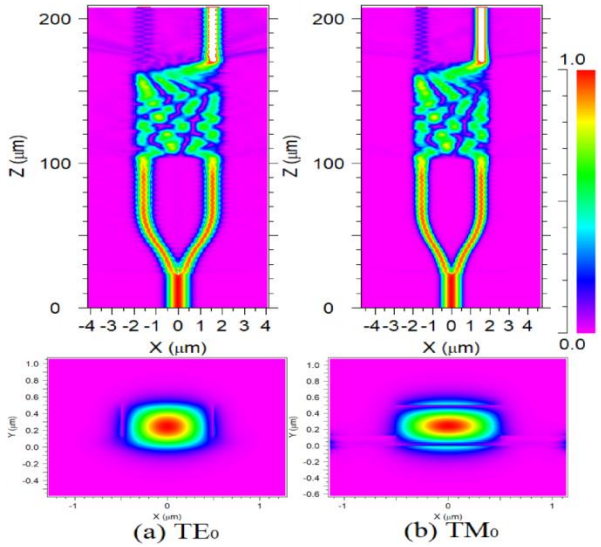
.

$$X_1 = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} e^{j0} & e^{j\pi/2} \\ e^{j\pi/2} & e^{j0} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} e^{j-\pi/2}e^{\Phi} \\ e^{j\pi/2} \end{bmatrix} e^{j\theta_1} \tag{2.3}$$

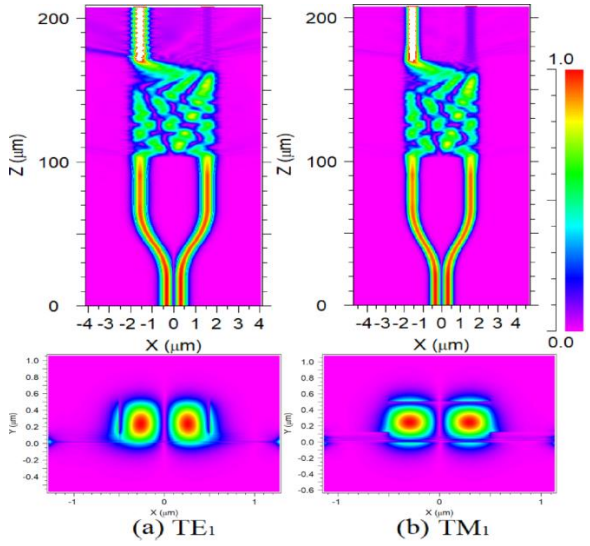
$$\Phi(0, L_{PS}) = \int_0^{L_{ps}} (\beta_0(z) - \beta_v(z))dz \approx \frac{3\pi\lambda}{4}\int_0^{Lps} \frac{dz}{n_e W_{ps}^2(z)} \tag{2.4}$$

2.1.6. Đánh giá hiệu năng quang

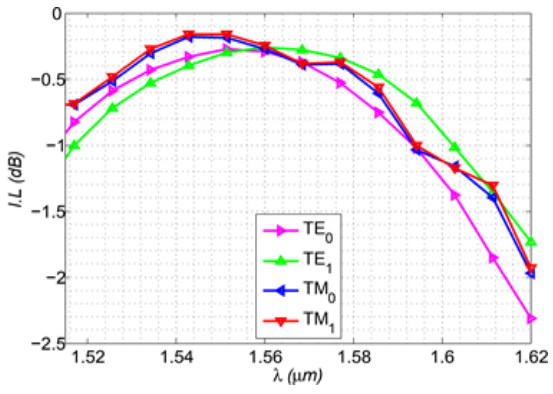
Phương pháp BPM tiếp tục được sử dụng để mô phỏng dạng trường cho các cặp mode TE_0/TM_0, TE_1/TM_1. Hình 2.6 và 2.7 mô tả dạng trường của các mode tại bước sóng trung tâm 1550 *nm*. Kết quả mô phỏng số cũng chỉ ra rằng, bên cạnh các công suất thu được tại kênh ra, vẫn có một ít phần công suất không mong muốn phát xạ ra ngoài linh kiện. Vì vậy, linh kiện cần được đánh giá chính xác hiệu năng hoạt động của nó thông qua hai thông số I.L và Cr.T, đã được định nghĩa ở (1.44) và (1.45), cùng với suy hao phụ thuộc trạng thái phân cực mode PDL (1.46). Khảo sát cho thấy, dải bước sóng hoạt động của linh kiện nằm trong khoảng 1515 *nm* đến 1610 *nm* (95 *nm*), phủ hoàn toàn băng *C* và băng *L*, trong vùng cửa sổ thứ ba của thông tin quang. Cụ thể, suy hao chèn kênh của cả hai cặp mode TE_0/TM_0 và TE_1/TM_1 dao động từ -1,74 *dB* đến -0,15 *dB*. Trong khi nhiễu xuyên kênh của chúng thay đổi từ -19,6 *dB* xuống đến -27,9 *dB*. Giá trị tuyệt đối của PDL giữa hai cặp mode nhỏ hơn 1 *dB* trong dải bước sóng từ 1515 *nm* đến 1610 *nm*. PDL không vượt quá 1 *dB* xung quanh sai số chiều dài ±1,8 μm của L_{MMI}. Tiếp đến, sai số độ rộng của dẫn sóng kênh vào



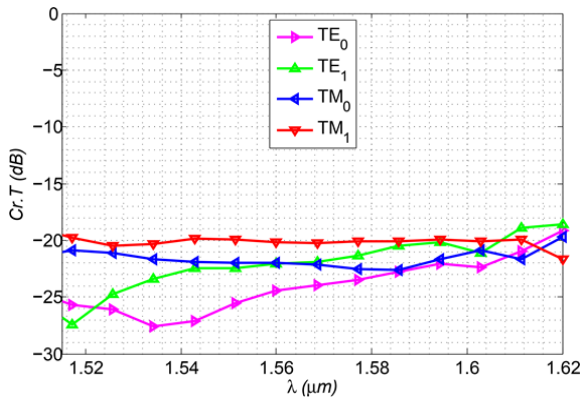
Hình 2.6 Mô hình trường của linh kiện khi kích thích các mode (a) TE_0, (b) TM_0.



Hình 2.7 Mô hình trường của linh kiện khi kích thích các mode (a) TE_1, (b) TM_1.

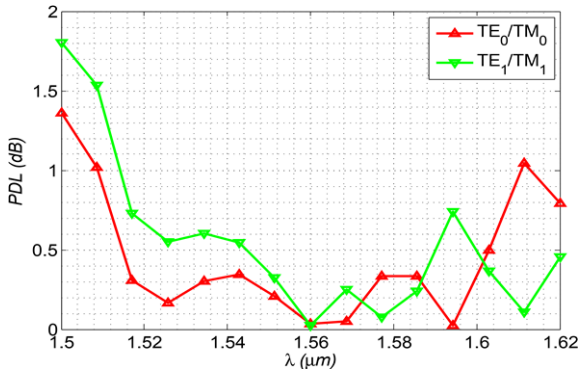


(a)

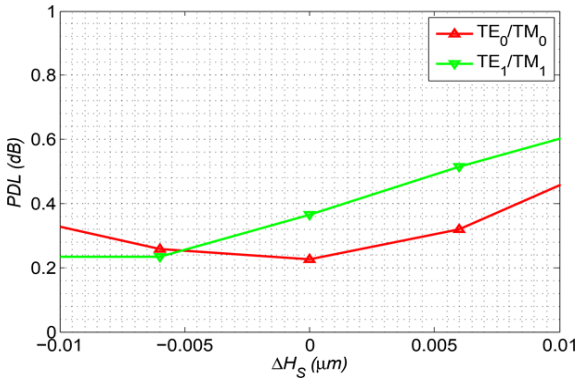


(b)

Hình 2.8 Đáp ứng bước sóng của các cặp mode TE_0/TM_0 và TE_1/TM_1 đối với a) I.L và b) Cr.T.



Hình 2.9 Đáp ứng bước sóng đối với PDL giữa các cặp mode TE_0/TM_0 và TE_1/TM_1.



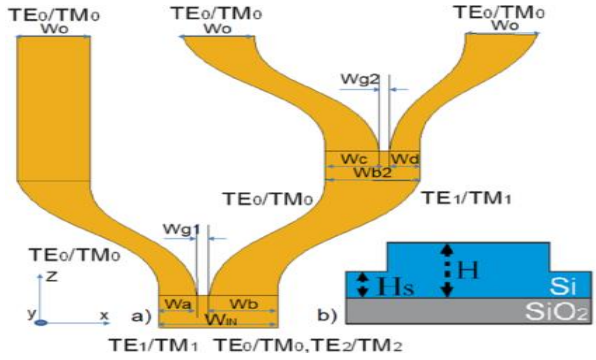
Hình 2.12 PDL là một hàm số của sai số chiều cao H_S giữa các cặp mode TE_0/TM_0 và TE_1/TM_1.

W_{in} dao động ±55 *nm* quanh giá trị W_{in} = 1,17 *μm*. Cuối cùng, PDL trong sai số chế tạo của phiến H_S của hai cặp mode đều nhỏ hơn 0,6 *dB*, dao động trong khoảng ±10 *nm* so với chiều cao của nó.

2.2. Linh kiện ghép/tách ba mode không phụ thuộc phân cực sử dụng hai linh kiện chữ Y bất đối xứng mắc phân tầng với nhau

2.2.1 Nguyên lý thiết kế và tổng quan về linh kiện

Đầu tiên, ta sẽ thiết kế chiều rộng kênh vào của linh kiện để dẫn tốt cả ba cặp mode TE_0/TM_0, TE_1/TM_1 và TE_2/TM_2. Chiều rộng nhánh của các linh kiện chữ Y được thiết kế bằng cách khảo sát hệ số kích thích công suất C_{mv}, dưới điều kiện MEI, để các trường được kích thích của cặp mode TE_1/TM_1 bắt chiết suất với cặp mode TE_0/TM_0 ở kênh ra bên trái của linh kiện. Trong khi các trường của các cặp mode TE_0/TM_0 và TE_2/TM_2, sẽ bắt chiết suất với các cặp mode TE_0/TM_0 và TE_1/TM_1 tương ứng, tại nhánh phải của linh kiện chữ Y đầu tiên, và tương tự với linh kiện chữ Y thứ hai (Hình 2.13).



Hình 2.13 Minh họa linh kiện đề xuất với (a) mô hình tổng quan và (b) dẫn sóng nóc/đỉnh.

2.2.2. Độ rộng dẫn sóng kênh vào

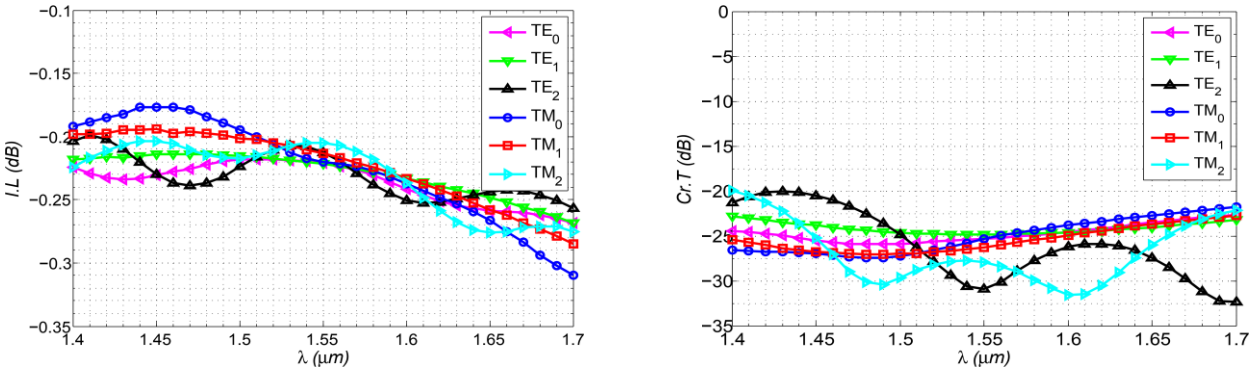
Chiều rộng W_{IN} được chọn là 1,075 *μm*, để đảm bảo linh kiện chỉ dẫn ba cặp mode TE_0/TM_0, TE_1/TM_1 và TE_2/TM_2. Chiều rộng này cũng chính là chiều rộng thân của linh kiện chữ Y đầu tiên, mà các nhánh của nó sẽ được thiết kế sau đây.

2.2.3 Các linh kiện chữ Y bất đối xứng không phụ thuộc phân cực

Từ các khảo sát các trường TE và TM, chiều rộng của W_a và W_b được chọn lần lượt là 0,390 μm và 0,685 μm để suy hao của các mode dẫn là tối thiểu. Sau khi đã xác định được W_a và W_b, chiều rộng của khe W_{g1} cũng được tìm thấy giá trị tốt nhất là 0,021 μm. Cách tìm W_c, W_d và W_{g2} cho linh kiện chữ Y thứ hai hoàn toàn giống như cách ta đã tìm ra W_a, W_b và W_{g1} cho linh kiện chữ Y thứ nhất. Từ đó, ta dễ dàng tìm ra các giá trị của W_c, W_d và W_{g2} lần lượt là 0,660 μm, 0,321 μm và 0,019 μm.

2.2.4 Đánh giá hiệu năng quang

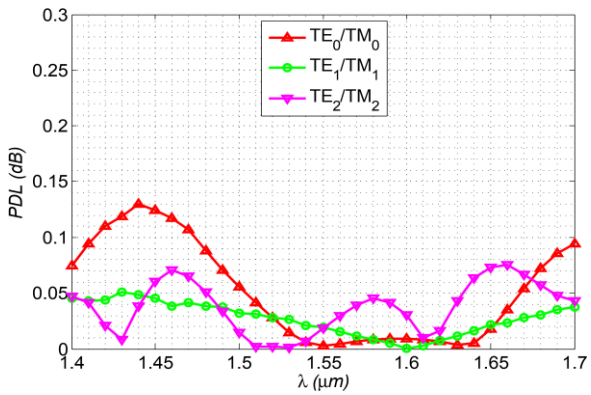
Linh kiện có thể hoạt động trong một dải bước sóng rất rộng từ 1400 *nm* đến hơn 1700 *nm*. I.L của tất cả các mode được dẫn dao động từ -0,31 *dB* đến -0,18 *dB*. Đối với Cr.T, cặp mode



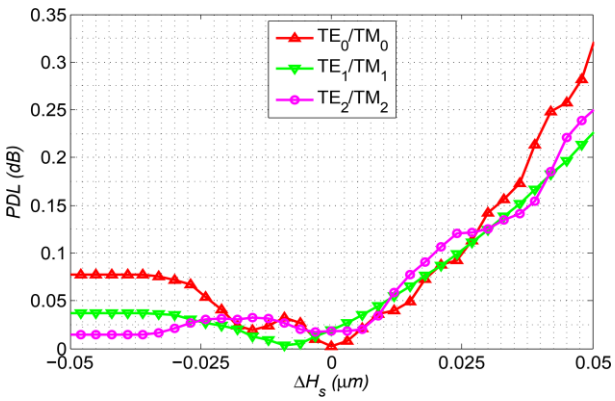
(a) (b)

Hình 2.19 Đáp ứng bước sóng của các mode TE_0 / TM_0, TE_1 / TM_1 và TE_2 / TM_2 cho a) I.L và b) Cr.T.

TE_2/TM_2 dao động riêng biệt từ -32,5 *dB* đến -20 *dB*, trong khi các cặp mode còn lại TE_0/TM_0 và TE_1/TM_1 dao động khá giống nhau từ -27,5 *dB* đến -21,8 *dB*. PDL không chỉ nhỏ hơn 1 *dB*, mà còn nhỏ hơn 0,13 *dB* trong toàn bộ dải bước sóng hoạt động của linh kiện. Trong thiết kế này, ba tham số được chọn để khảo sát sai số chế tạo bao gồm W_{IN} , W_O và chiều cao của phiến H_S. Hơn nữa, PDL trong các trường hợp này giống như PDL trong việc khảo sát sự phụ thuộc của linh kiện vào bước sóng, khi mà chúng nhỏ hơn nhiều so với 1 *dB*. Trong đó, PDL ở sai số chế tạo W_{IN} và W_O đều



Hình 2.20 Đáp ứng bước sóng đối với PDL giữa các mode TE_n/TM_n.



Hình 2.23 PDL như một hàm số của sai số chế tạo H_S cho cả ba cặp mode TE_0/TM_0 - TE_2/TM_2.

nhỏ hơn 0,06 dB. Trong khi PDL của sai số chế tạo H_S nhỏ hơn 0,32 dB, tuy nhiên cả ba cặp mode đều có PDL nhỏ hơn 0,1 dB trong phạm vi sai số ±20 nm.

Bảng 2.1 Sự khảo sát sai số chế tạo.

Thông số	W_{IN}	W_O	H_S
Cr.T (*dB*)	-31,2 ÷ -20	-34 ÷ -20	-31 ÷ -21
I.L (*dB*)	-0,27 ÷ -0,2	-0,36 ÷ -0,17	-0,36 ÷ -0,19
Sai số (*nm*)	±80	±104	±50

Bảng 2.3 Hiệu năng quang của linh kiện quang tử đề xuất so với các linh kiện ghép/tách hai mode phân cực TE.

Linh kiện	Số lượng mode	Vật liệu	Cấu trúc linh kiện	Dải bước sóng hoạt động	I.L (*dB*)	Cr.T (*dB*)	PDL (*dB*)
Linh kiện đề xuất	Ba mode không phụ thuộc phân cực	SOI	Phân tầng hai linh kiện chữ Y	> 300 *nm*	> -0,31 < -0,18	> -32,5 < -20	< 0,13
[42]	Ba mode phân cực TE	SOI	Phân tầng hai linh kiện chữ Y	150 *nm*	> -1,45	< -16	
[40]	Ba mode phân cực TE	SOI	Một chữ Y và một MMI	40 *nm*	> -0,9	< -17	
[39]	Ba mode phân cực TE	SOI	Một chữ Y và hai MMI	100 *nm*	> -0,71	< -18	
[29]	Bốn mode không phụ thuộc phân cực	SOI	ADC	100 *nm*	> 3,5	~ - 20	
[30]	Năm mode không phụ thuộc phân cực	SOI	ADC	35 *nm*	> -1	< -11,4	

Linh kiện	Số lượng mode	Vật liệu	Cấu trúc linh kiện	Dải bước sóng hoạt động	I.L (*dB*)	Cr.T (*dB*)	PDL (*dB*)
[87]	Năm mode không phụ thuộc phân cực	SOI	ADC	90 *nm*	> -1,8	< -15	

2.3 Kết luận Chương 2

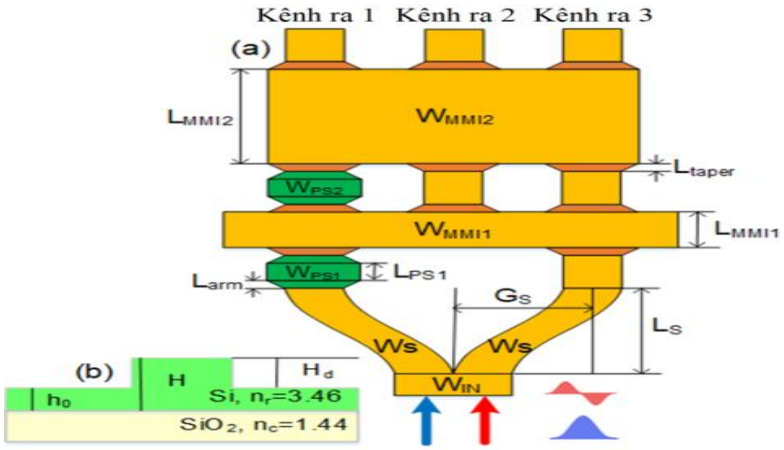
Chương này đã trình bày thiết kế các linh kiện quang tử ghép/tách cho hai và ba mode không phụ thuộc phân cực. Mô phỏng số cho thấy, hiệu năng quang của linh kiện ghép/tách cho hai cặp mode so với các linh kiện chỉ hỗ trợ ghép/tách cho hai mode đơn cực không chênh lệch đáng kể, như có thể thấy trong Bảng 2.1. Trong khi linh kiện đề xuất cho ba cặp mode có hiệu năng quang vượt trội so với một cấu trúc tương tự cho ba mode TE [42], hoặc hai cấu trúc ghép/tách cho ba mode TE khác [39], [40] như ở Bảng 2.3. Với kích thước 4 μm × 240 μm và sai số chế tạo ±10 *nm*, các linh kiện hoàn toàn có thể được chế tạo bởi các công nghệ CMOS hiện tại.

CHƯƠNG 3. THIẾT KẾ LINH KIỆN QUANG TỬ ĐỊNH TUYẾN LỰA CHỌN MODE MSR

Linh kiện định tuyến lựa chọn mode giúp nguồn dữ liệu được điều chuyển đến các điểm đích một cách hợp lí, trong các tình huống tắt nghẽn hoặc sự cố kênh truyền, đảm bảo tính liên tục dữ liệu cho khách hàng. Linh kiện được cải tiến từ các linh kiện ghép/tách mode sử dụng các linh kiện chữ Y và MMI, thông qua các linh kiện dịch pha (PS) được điều khiển chỉ bởi hai trạng thái ON/OFF, hay các TOPS công suất thấp điều khiển được bằng hiệu ứng quang nhiệt, hứa hẹn sẽ tạo ra các linh kiện định tuyến lựa chọn mode kênh ra (MSR) tiềm năng so với các linh kiện tương tự gần đây.

3.1 Nguyên lý thiết kế

Kênh vào của các linh kiện MSR sử dụng các linh kiện chữ Y đối xứng dưới cơ chế MEI để tách các mode thành các mode FM, trước khi chúng được dẫn vào linh kiện MMI. Ngoài cơ chế giao thoa tổng quát, các linh kiện MMI còn được thiết kế để thực hiện các cơ chế giao thoa đối xứng 1 × 1 và 1 × 2, với mục đích tạo ra các quang trình khác nhau cho các mode kênh vào. Cùng với các PS/TOPS được thiết lập các mức điều khiển khác nhau, các mode kênh vào được định tuyến đến một kênh ra bất kì của linh kiện MSR 1 × 3.



Hình 3.1 Sơ đồ khối của linh kiện đề xuất với a) mô hình tổng quan b) dẫn sóng nóc/đỉnh.

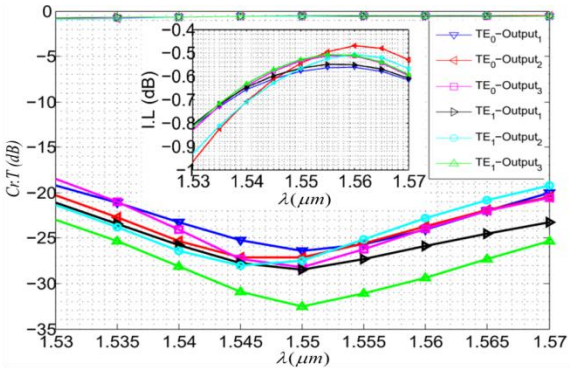
3.2 Linh kiện định tuyến 1 × 3 cho hai mode TE sử dụng hai linh kiện giao thoa đa mode và một linh kiện chữ Y

3.2.1 Tổng quan về linh kiện

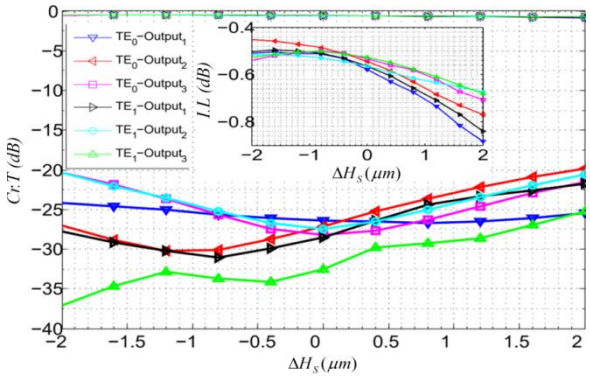
Linh kiện đề xuất được mô tả như trong Hình 3.1, tương tự như linh kiện ở 2.1.2 và có thêm một linh kiện MMI, một linh kiện PS và các dẫn sóng thẳng kết nối trung tâm của các linh kiện MMI.

3.2.2 Thiết kế và tối ưu

Linh kiện đề xuất chỉ dẫn hai mode TE_0 và TE_1 nên ta chọn độ rộng W_{IN} cho linh kiện là 1,2 μm, và độ rộng W_S = 0,6 μm. Linh kiện chữ Y trong thiết kế này có G_S = 1,74 μm, lớn hơn nhiều so với chữ Y ở 2.2.2. Hệ số C_{mv} của mode TE_0 dao động liên tục từ 44,46 % đến 44,62 %, trong khi, hệ



Hình 3.7 Đáp ứng bước sóng của TE_0 và TE_1 đối với từng kênh ra.



Hình 3.11 I.L và Cr.T là các hàm số của sai số chiều cao phiến H_S.

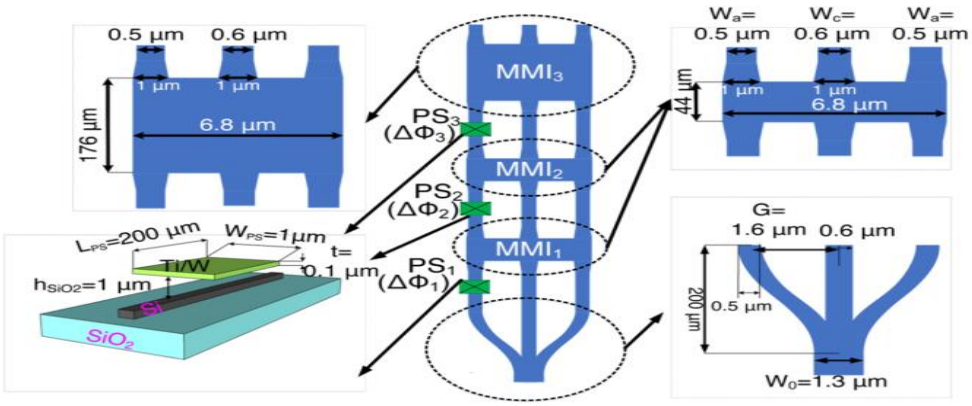
số này của mode TE_1 dao động nhẹ khoảng 44,58 %. Giá trị L_S = 187 μm được chọn để đảm bảo sự cân bằng công suất giữa các mode TE_0 và TE_1. Mô phỏng số BPM và EIM tối ưu cho cả hai cơ chế giao thoa, xác định được các giá trị thích hợp cho linh kiện 2 × 3 MMI là W_{MMI1} = 6,8 μm và L_{MMI1} = 43 μm. Bằng cách tương tự, chiều rộng và chiều dài tối ưu cho linh kiện MMI_2 lần lượt là W_{MMI2} = 5 μm và L_{MMI2} = 98 μm. Khảo sát ứng với hai trạng thái điều khiển pha ON/OFF của P_{S1}, ứng với các độ rộng W_{PS1} lần lượt là 0,9 μm và 1,16 μm. Mặt khác, PS_2 là linh kiện có nhiệm vụ dịch một góc pha $\pm\pi/2$. Để có thể điều khiển được PS_2 tương tự như PS_1, thì pha dịch của tín hiệu trước khi truyền qua PS_2 phải là $\pm\pi/2$ ứng với giá trị $W_{S'}$ = 0,657 μm thay vì W_S = 0,6 μm.

3.2.3 Đánh giá hiệu năng quang

Trong dải bước sóng từ 1530 *nm* đến 1570 *nm*, Cr.T của tất cả các trường hợp dao động tốt nhất trong khoảng 1545 *nm* đến 1555 *từ* -25 *dB* đến -32,5 *dB*. Đối với I.L, các đồ thị đều tăng tuyến tính từ -0,97 *dB* ở 1530 *nm*, sau đó đạt các giá trị tốt nhất, sấp xỉ -0,47 *dB* trong dải bước sóng 1555 *nm* đến 1565 *nm* và giảm dần xuống -0,62 *dB* ở 1570 *nm*. Trong số bốn thông số khảo sát, sai số chế tạo của H_S là nhỏ nhất, chỉ khoảng ±2 *nm*, với I.L và Cr.T lần lượt -0,88 *dB* < I.L < -0,45 *dB* và -37 *dB* < Cr.T < -20 *dB*, đòi đòi hỏi độ chính xác cao trong chế tạo.

3.3 Linh kiện định tuyến 1 × 3 cho ba mode sử dụng ba linh kiện giao thoa đa mode và một linh kiện chữ Y

3.3.1 Tổng quan về linh kiện



Hình 3.12 Minh họa cấu trúc linh kiện đề xuất và TOPS.

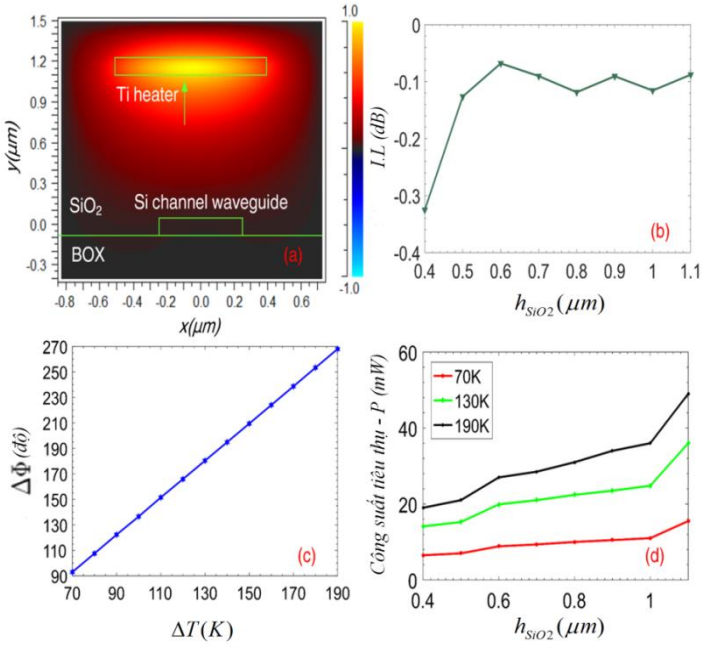
Tương tự như linh kiện ở 3.2, ở đây linh kiện định tuyến thêm cho mode TE_2. Như vậy cần phải có thêm một MMI_1 và một PS để đảm bảo cấu hình hoạt động đầy đủ của linh kiện. Tuy nhiên trong thiết kế này, các PS sẽ được thay thế bởi linh kiện dịch pha quang - nhiệt TOPS như Hình 3.12.

3.3.2 Thiết kế và tối ưu

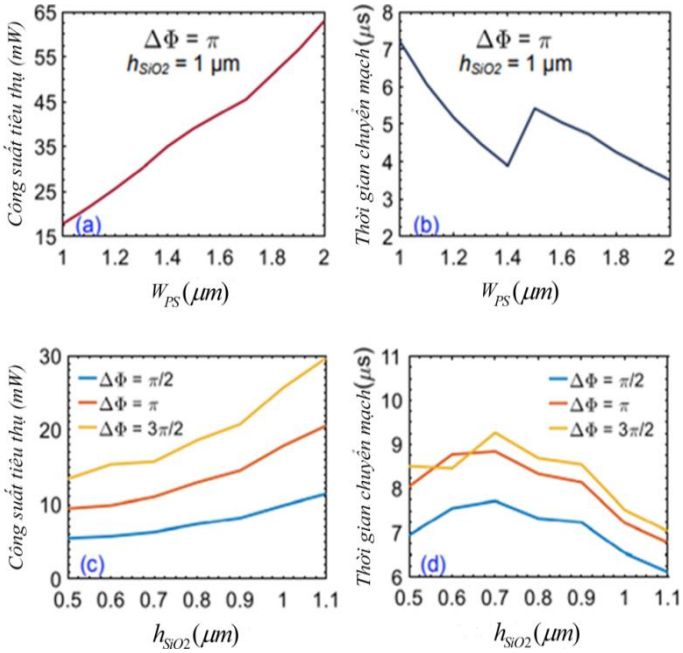
Đầu tiên, TOPS được thiết kế sử dụng một phiến Titan (Ti) mỏng có độ dày, chiều dài và chiều rộng lần lượt là δ_{Ti}, L_{PS} và W_{PS}. Chiều cao h_{SiO2} là khoảng cách từ phiến Ti đến dẫn sóng Silic. Ta có P_π (3.2) là công suất tiêu thụ cần thiết của TOPS để tín hiệu truyền qua lõi dẫn Silic đạt được sự thay đổi π pha, τ (3.3) là thời gian đáp ứng sự chuyển đổi pha, phụ thuộc vào điện trở và điện dung của Ti và dẫn sóng Silic.

$$P_\pi = \frac{\lambda \kappa_{SiO_2} \left(\frac{W_{PS}}{h_{SiO_2}} + 0.88\right)}{\left|\frac{d_n}{d_t}\right|} \tag{3.2}$$

$$\tau = \frac{\pi \lambda \rho_{SiO_2} C_{SiO_2} A}{e P_\pi \left|\frac{dn}{dT}\right|_{Si}} \tag{3.3}$$



Hình 3.13 Đặc điểm của linh kiện TOPS dựa trên phiến gia nhiệt Ti (a) Sự phân bố vùng nhiệt trên Ti tại h_{SiO2} = 1 μm ứng với pha dịch π; (b) suy hao truyền dẫn của tín hiệu phụ thuộc h_{SiO2}; (c) độ lệch pha ΔΦ là một hàm của sự biến thiên nhiệt độ ΔT; (d) Công suất tiêu thụ tỉ lệ thuận với h_{SiO2}.

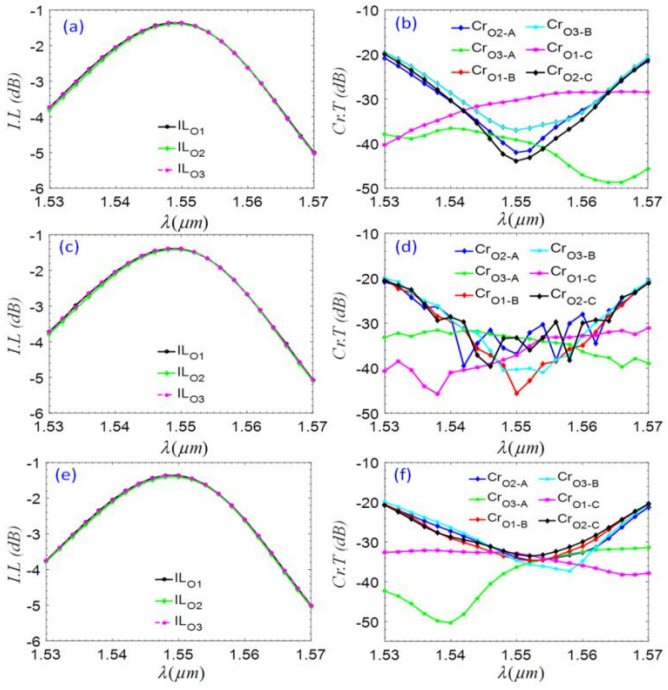


Hình 3.15 Đáp ứng của (a) P_π và (b) τ theo độ rộng W_{PS}. Đáp ứng của (c) công suất P và (d) τ ứng với ba mức điều khiển pha π/2, π và 3π/2.

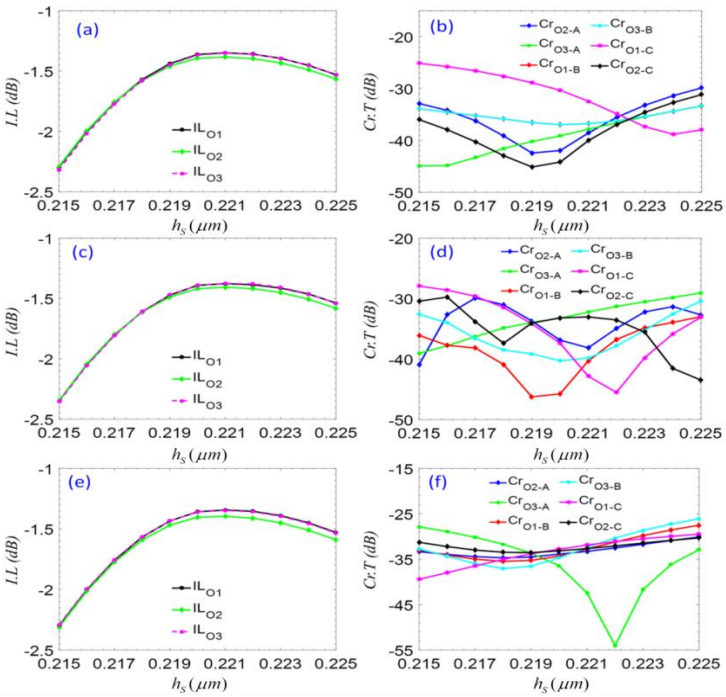
Các thông số của TOPS được lựa chọn sao cho tối ưu tích $P_\pi \times \tau$. Phiến Ti được gia nhiệt bởi nguồn công suất P_π, việc tính toán khoảng cách h_{SiO2} sao cho ánh sáng đi qua dẫn sóng sẽ lệnh pha π, sẽ đảm bảo hiệu năng làm việc cho TOPS. Bằng cách di chuyển phiến Ti theo hướng thẳng đứng, tại khoảng cách được lựa chọn $h_{SiO2} = 1\ \mu m$, $W_{PS} = 1\ \mu m$ và $L_{PS} = 200\ \mu m$, TOPS thỏa mãn cả hai điều kiện trên. Các mức công suất tiêu thụ của TOPS tương ứng với các góc dịch pha $\pi/2$, π, $3\pi/2$ lần lượt là 9 *mW*, 24 *mW* và 36 *mW*. So sánh suy hao đường truyền khi thay đổi khoảng cách h_{SiO2} của phiến ITO (so với Ti) hầu như không ảnh hưởng đến suy hao truyền dẫn trong khoảng $0{,}3\ \mu m < h_{SiO2} < 0{,}5\ \mu m$. Vì vậy công suất tiêu thụ và thời gian chuyển mạch của TOPS sử dụng ITO thực hiện các pha dịch $\pi/2$, π, $3\pi/2$ một cách tương ứng là (9,85 *mW*; 6,53 μs), (17,83 *mW*; 7,2 μs) và (25,69 *mW*; 7,51 μs), đã tốt hơn so với TOPS được gia nhiệt bằng Titan.

3.3.3 Đánh giá hiệu năng quang

Phổ của bước sóng 3 *dB* đối với I.L của cả chín trường hợp định tuyến rộng cỡ 40 *nm* (1530 *nm* – 1570 *nm*), trong khi Cr.T ở các tất cả trường hợp đều nhỏ hơn -20 *dB*. Với khảo sát W_{in}, I.L của mỗi kênh ra thay đổi không vượt quá 0,02 *dB* , trong khi đối với sai số h_S, các dữ liệu I.L được đo tại các kênh ra dao động trong một phạm vi từ -1,4 *dB* đến -2,3 *dB*, và Cr.T luôn thấp hơn -25 *dB* trong khoảng sai số ±5 *nm*.



Hình 3.17 Đáp ứng quang phổ của I.L và Cr.T cho từng mode dẫn tại ba kênh ra. (a-b) TE_0, (c-d) TE_1 và (e-f) TE_2.



Hình 3.19 I.L và Cr.T là các hàm số của sai số h_S .

3.4. Kết luận Chương 3

Các linh kiện quang tử MSR 1 × 3 cho hai và ba mode đã được trình bày thiết kế trong Chương này. Bên cạnh những ưu điểm của linh kiện MSR cho hai mode đã thiết kế khi so sánh với các linh kiện tương tự [23], [31], [32], [85] ở Bảng 3.3, vẫn tồn tại những hạn chế so với linh kiện MSR khác được chế tạo thực nghiệm [50], [96]. Các linh kiện MSR được đề xuất cũng đã chứng tỏ

hiệu năng quang hiệu quả trên toàn bộ dải băng *C*. Bên cạnh đó, với kích thước cỡ 5 μm × 475 μm, 8 μm × 2160 μm và sai số chế tạo cho phép, các linh kiện đề xuất có khả năng được tạo ra bởi công nghệ chế tạo CMOS hiện tại với sai số chế tạo đến ±1 *nm*, khi sử dụng quang khắc 193 nm trên bán dẫn SOI chuẩn đường kính 300 *mm*.

Bảng 3.3 Ưu điểm của linh kiện đề xuất so với các cấu trúc tương tự.

Linh kiện	Số lượng mode	Vật liệu	Cấu trúc linh kiện	Dải bước sóng hoạt động	I.L (*dB*)	Cr.T (*dB*)
Linh kiện đề xuất [J_2]	Hai mode TE	SOI	Phân tầng các linh kiện chữ Y và MMI	40 *nm* (1530 - 1570)	> -0,97 < -0,47	> -28,5 < -19
Linh kiện đề xuất [J_3]	Ba mode TE	SOI	Phân tầng các linh kiện chữ Y và MMI	40 *nm* (1530 - 1570)	> -5	> -50 < -20
[23]	Hai mode TE	InP	Ghép linh kiện chữ Y và MMI	100 *nm* (1500 - 1600)	> -1,6	< -18,2
[31]	Hai mode TE	SOI	Phân tầng các linh kiện MMI	60 *nm* (1520 *nm* - 1580 *nm*)	> -1	-
[32]	Hai mode TE	SOI	Phân tầng các linh kiện MMI	35 *nm* (1530 - 1565)	> -1	< -28
[50]	Ba mode TE	SOI	Phân tầng các linh kiện MMI	100 *nm* (1500 - 1600)	> -1,8	> -29
[85]	Hai mode TE	InP	Phân tầng các linh kiện MMI	35 *nm* (1530 - 1565)	> -1,2	< -18,4
[96]	Hai mode TE	SOI	Phân tầng các linh kiện MMI	100 *nm* (1500 - 1600)	> -2	< -30

CHƯƠNG 4. THIẾT KẾ LINH KIỆN QUANG TỬ TẠO ĐỒNG THỜI NHIỀU MODE QUANG

Linh kiện quang tử tạo được nhiều mode quang khác nhau cũng là một nhân tố cơ bản và quan trọng giúp tăng dung lượng truyền dẫn cho hệ thống WDM, với số lần tăng tương ứng với số lượng mode tham gia vào một kênh truyền dẫn. Có nghĩa là, một kênh truyền dẫn MDM gồm *n* mode trên một bước sóng nếu kết hợp với hệ thống WDM gồm *m* bước sóng thì hệ thống MDM-WDM sẽ có dung lượng tăng gấp *n* lần so với hệ thống WDM. Trong vai trò ứng dụng, các linh kiện này thực hiện chức năng quảng bá thông tin từ một nguồn thông tin ban đầu.

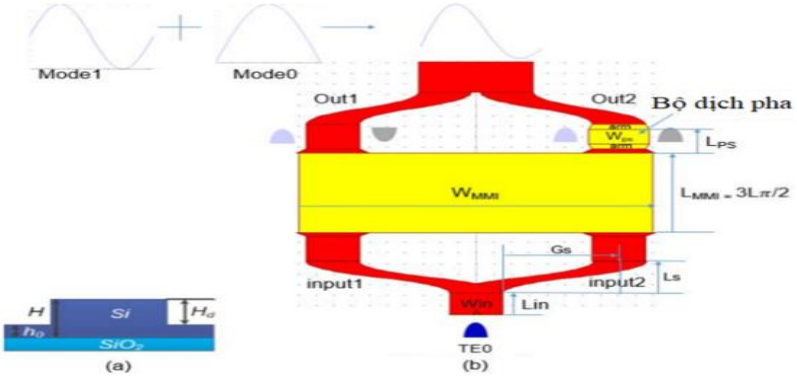
4.1 Nguyên lý thiết kế

Đầu tiên, các linh kiện chữ Y nhánh cong chia đều công suất của FM ở kênh vào, tiếp theo các linh kiện MMI dựa trên cơ chế giao thoa tổng quát đóng vai trò như các hàm chuyển đổi các tín hiệu từ kênh vào đến kênh ra của chúng. Các PS nằm trên các nhánh chữ Y, giúp điều chỉnh pha cho các tín hiệu đi qua nó. Các mode có thứ tự bậc khác nhau được tạo thành ở kênh ra của linh kiện, là sự tổng hợp của các FM từ các nhánh của linh kiện chữ Y dưới điều kiện MEI.

4.2 Linh kiện tạo đồng thời hai mode quang thấp nhất sử dụng các linh kiện giao thoa đa mode và chữ Y

4.2.1 Tổng quan về linh kiện

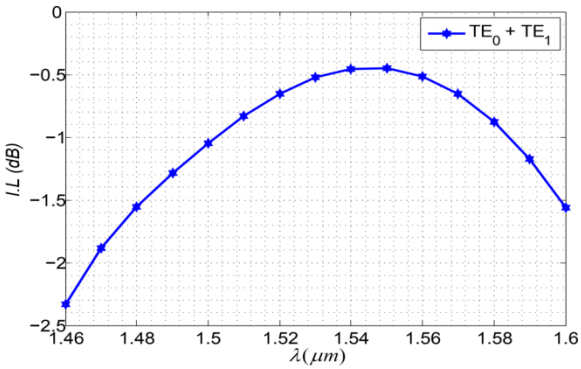
Linh kiện đề xuất như Hình 4.1 gồm hai linh kiện chữ Y đối xứng, một linh kiện 2 × 2 MMI và một linh kiện PS dịch pha ±π/2 (tương tự như PS ở 2.1.5).



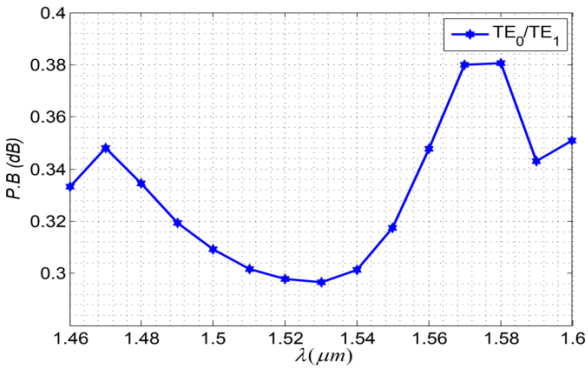
Hình 4.1 Minh họa linh kiện với (a) dẫn sóng nóc/đỉnh (b) tổng quan về linh kiện.

4.2.2 Thiết kế và tối ưu

Sử dụng điều kiện cắt mode, độ rộng được chọn cho dẫn sóng kênh vào W_{in} = 0,6 μm và kênh ra W_O = 1,3 μm. Dựa trên việc mô phỏng tương tự ở 2.2.2, các kích thước tối ưu nhất của linh kiện chữ Y được lựa chọn lần lượt là L_s = 30 μm và G_s = 1,6 μm. Độ rộng nhánh chữ Y W_s có kích thước bằng chiều rộng W_{in}, để chỉ dẫn được FM tại bước sóng 1550 *nm*. Linh kiện 2 × 2 MMI sử dụng cơ chế tự chụp ảnh trong giao thoa tổng quát. Thực hiện khảo sát như ở 2.2.3, ta tìm được chiều dài và chiều rộng tối ưu cho MMI là L_{MMI} = 75.4 μm và W_{MMI} = 4 μm. Như đã đề cập ở trên, tại một trong hai kênh ra của linh kiện 2 × 2 MMI phải đặt một PS để dịch một góc pha Φ = ±π/2,



Hình 4.6 Suy hao chèn kênh trong dải bước sóng hoạt động của linh kiện đề xuất.



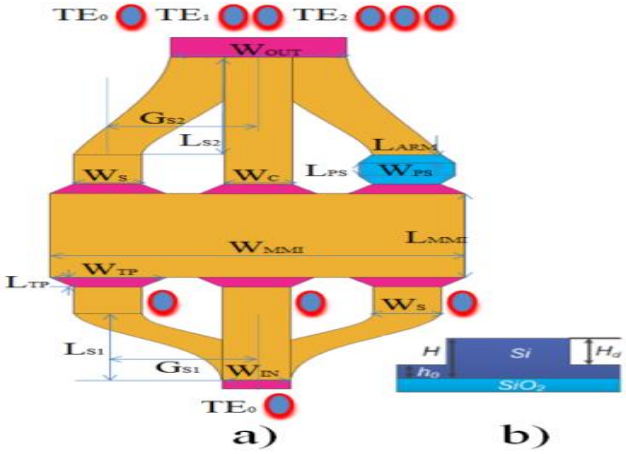
Hình 4.8 Yếu tố cân bằng công suất giữa 2 mode TE_0 và TE_1 là một hàm phụ thuộc

và đóng vai trò như bộ kết hợp hai mode tại kênh ra. Khảo sát tại độ rộng và độ dài được chọn W_{PS} = 0,68 μm và L_{PS} = 13,8 μm, góc dịch pha của tín hiệu sau khi qua PS là $\pi/2$ như yêu cầu của thiết kế.

4.2.3 Đánh giá hiệu năng quang

Khi kích thích kênh vào của linh kiện dải bước sóng hoạt động từ 1460 *nm* đến 1600 *nm*, I.L của linh kiện dao động trong phạm vi từ -2.3 *dB* đến -0,45 *dB*. Sự chênh lệch công suất giữa TE_0 và TE_1 thay đổi tại kênh ra của linh kiện là không đáng kể. B.P biến đổi từ xấp xỉ 0,3 *dB* đến 0,38 *dB* trong dải bước sóng hoạt động của linh kiện.

4.3 Linh kiện quang tử tạo đồng thời ba mode quang thấp nhất sử dụng các linh kiện giao thoa đa mode MMI và chữ Y



Hình 4.9 (a) Minh họa tổng quan của linh kiện (b) cấu trúc dẫn sóng nóc/đỉnh.

Phát triển từ linh kiện tạo đồng thời hai mode TE_0 và TE_1, bằng cách gắn thêm các dẫn sóng thẳng đến các kênh trung tâm của linh kiện 3 × 3 MMI như Hình 4.9.

4.3.1 Nguyên lý hoạt động

Cơ chế giao thoa tổng quát 2 × 2 MMI dùng để tạo hai mode đồng thời TE_0 và TE_1 như ở thiết kế trước, mode TE_2 sẽ được tạo thành nhờ cơ chế giao thoa đối xứng 1 × 1 MMI, dưới điều

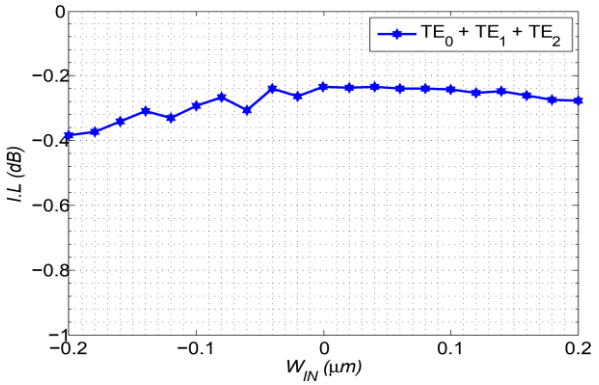
kiện bắt chiết suất hiệu dụng MEI. Khảo sát tại độ rộng W_O = 1,55 μm, điều kiện cắt mode được thỏa mãn. Khảo sát này cũng chứng tỏ, với độ rộng 0,6 μm, dẫn sóng chỉ dẫn được mode TE_0,

4.3.2 Thiết kế và tối ưu

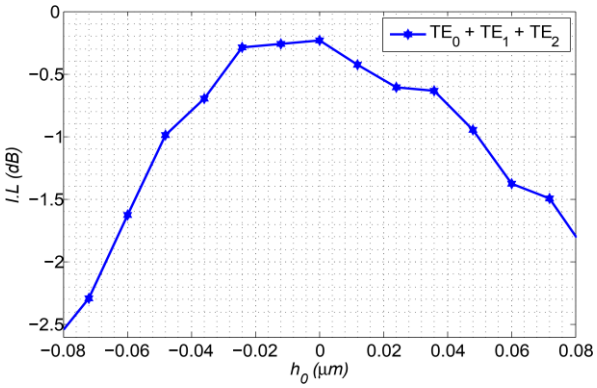
Bằng cách sử dụng mô phỏng 3D-BPM và EIM, các độ rộng và độ dài tối ưu của 3 × 3 MMI cần tìm lần lượt là W_{MMI} = 5 µm và L_{MMI} = 107 μm. Độ rộng dẫn sóng kênh vào cũng bằng với độ rộng nhánh của linh kiện chữ Y $W_{IN} = W_{S1} = W_{S2} = W_{C1}$ = 0,6 μm, với W_{C1} chính là độ rộng nhánh giữa, W_{S2} là độ rộng nhánh cong của linh kiện ghép chữ Y kênh ra. Hai linh kiện chữ Y có $G_{S1} = G_{S2}$ = 1.8 μm do tạo thêm mode TE_2. Dựa trên mô phỏng số, chiều dài tối ưu cho các nhánh lần lượt là L_{S1} = 100 μm, và L_{S2} = 180 μm. Từ kết quả khảo sát tối ưu cho W_{C2} = 0,515 μm, với công suất kênh ra của ba mode riêng lẻ TE_0 xấp xỉ 31,71%. Để độ lệch pha qua PS là 90^o (hay π/2), giá trị tối ưu được lựa chọn là W_{PS} = 0,575 μm.

4.3.3 Đánh giá hiệu năng quang

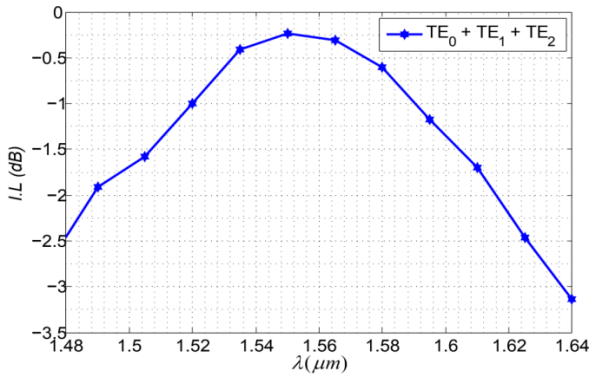
Bước sóng hoạt động ở băng C của linh kiện được mở rộng sang băng S và L từ 1480 nm đến 1620 nm với I.L ở bước sóng 1550 nm là tốt nhất và đạt -0,23 dB và ngưỡng -2.3 dB là mức thấp nhất. Với trường hợp tạo mode riêng lẻ, suy hao khi chuyển đổi các mode TE_0-TE_0, TE_0-TE_1 và TE_0-TE_2 lần lượt là -0,04 dB : -0,28 dB, -0,08 dB : -0,32 dB và -0,39 dB : -0,65 dB. Sai số chiều dài L_{MMI} đến ±4.5 μm với I.L đạt được bé hơn -2 dB. Tiếp theo, ±0,2 μm là sai số chế tạo của độ rộng



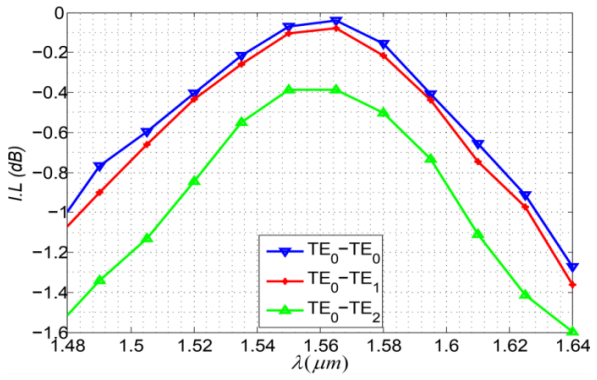
Hình 4.18 I.L là hàm số của sai số chế tạo W_{IN}.



Hình 4.20 I.L là hàm số của sai số chế tạo h_0,



Hình 4.16 Suy hao chèn kênh trong dải bước sóng hoạt động của linh kiện đề xuất.



Hình 4.17 Suy hao chèn kênh của quá trình tạo từng mode riêng lẻ.

Bảng 4.1 So sánh hiệu năng quang giữa linh kiện đề xuất và các linh kiện tương tự.

Linh kiện	Số lượng mode	Vật liệu	Cấu trúc linh kiện	Dải bước sóng hoạt động	I.L (*dB*)
Linh kiện đề xuất [C_2]	Ba mode phân cực TE	SOI	Ghép các linh kiện chữ Y và MMI	Băng C	TE_0-TE_0: -0,04 đến -0,28 TE_0-TE_1: -0,08 đến -0,32 TE_0-TE_2: -0,39 đến -0,65
[9]	Ba mode phân cực tuyến tính	SOI	ADC	Băng C	LP_{01}-LP_{01}: > -0,044 LP_{01}-LP_{11}a: > -0,088 LP_{01}-LP_{21}a: > -0,362
[23]	Hai mode phân cực TE	InP	Ghép các linh kiện chữ Y và MMI	Băng C	TE_0-TE_0: > -0,7 TE_0-TE_1: > -0,2

W_{IN}, với I.L dao động từ -0,39 *dB* đến -0,23 *dB*. Cuối cùng và thấp nhất là sai số chiều cao phiến h_0 = ±0,072 μm với I.L ≤ -2.3 *dB*.

4.4 Kết luận Chương 4

Chương đã trình bày thiết kế các linh kiện quang tử tạo đồng thời hai và ba mode từ mode cơ bản. Bằng các phương pháp số 3D-BPM và EIM, các cấu trúc được đề xuất đã chứng tỏ bước sóng hoạt động mở rộng đến 140 *nm* của, với I.L > -2.3 *dB*. Xét trong băng C, chỉ số I.L của linh kiện đề xuất dao động từ -0,04 *dB* đến -0,65 *dB* (Bảng 4.1). Hơn nữa, với sai số chế tạo tối thiểu ±20 *nm* (-0,6 *dB* < I.L < -0,25 *dB*) trong kích thước 5 μm × 506 μm, các linh kiện đề xuất có khả năng được chế tạo trên bán dẫn SOI chuẩn đường kính 200 *mm* với công nghệ chế tạo CMOS của hãng SOITEC..

Kết luận và hướng phát triển

Ba đóng góp khoa học của luận án:

1) Thiết kế các cấu trúc quang tử ghép/tách cho hai và ba mode có khả năng dẫn được cả hai trạng thái phân cực TE và TM [J_1], [J_6] với hiệu năng quang cao.

2) Thiết kế các cấu trúc quang tử định tuyến lựa chọn mode (MSR) 1 × 3 với đề xuất giải pháp điều khiển các MSR bởi hai trạng thái ON/OFF [J_2] cho linh kiện hai mode, và giải pháp sử dụng ITO thay Ti cho các linh kiện TOPS [J_5] cho linh kiện ba mode.

3) Thiết kế các cấu trúc quang tử tạo đồng thời hai và ba mode TE từ mode cơ bản TE_0 [C_1], [C_2].

Các mặt còn hạn chế

1. Bên cạnh các thiết kế được đề xuất với hiệu năng quang cao, đặc biệt các linh kiện quang tử ghép/tách mode không phụ thuộc phân cực sử dụng linh kiện chữ Y bất đối xứng, thì các linh kiện định tuyến lựa chọn mode (MSR) 1 × 3 có hiệu năng chưa thực sự tốt như các linh kiện tương tự [50], [96] (Bảng 3.3). Trong đó, linh kiện MSR thiết kế ở [96] sử dụng mô phỏng bằng phương pháp FDTD.

2. Các thiết kế mặc dù được công bố trên các tạp chí uy tín và được thực hiện trên phần mềm thương mại đã được kiểm chứng, nhưng chưa được áp dụng vào một quy trình chế tạo linh kiện quang tử thực tế nào, do trang thiết bị hiện tại về công nghệ quang khắc DUV-photolithography hay ebeam lithography ở trong nước chưa thể đáp ứng, một phần nữa là điều kiện kinh phí và dịch bệnh những năm gần đây. Điều này thực sự quan trọng, bởi vì rất khó để chế tạo một linh kiện quang tử hoàn chỉnh, có hiệu năng quang giống như linh kiện được tạo ra từ thiết kế mô phỏng.

Hướng phát triển trong thời gian tới

Nghiên cứu thiết kế các linh kiện quang tử MDM với số lượng mode dẫn nhiều hơn, các cấu trúc thiết kế bằng các phương pháp FDTD, FDFD. Hợp tác với các nhóm nghiên cứu và phòng thí nghiệm tiên tiến trên thế giới như Nhật Bản, Úc, Bỉ, Đài Loan… để có thể chế tạo, đo đạc và thử nghiệm các thiết kế đã nghiên cứu. Kết hợp dẫn sóng Silic với các vật liệu như polymer hay Si_3N_4 để tạo ra những cấu trúc dẫn sóng có suy hao thấp trên khoảng cách truyền lớn. Nghiên cứu khả năng thay đổi điện trở của VO_2 cho các linh kiện TOPS, hay khả năng thay đổi chiết suất và dịch chuyển trạng thái pha cách điện/dẫn điện của oxit này theo nhiệt độ cho các linh kiện quang tử ứng dụng hiệu ứng plasmon.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

[J_1] Duong Quang Duy, Ho Duc Tam Linh, Tang Tan Chien, Nguyen Tan Hung, Truong Cao Dung, Dang Hoai Bac, "Polarization-insensitive two-mode (de)multiplexer using silicon-on-insulator-based Y-junction and multimode interference couplers", *Optical Engineering*, 58(6), 067105, 2019.

[J_2] Duong Quang Duy, Truong Cao Dung, Dang Hoai Bac, Nguyen Binh, Nguyen Tan Hung, Tang Tan Chien, Le Thi Phuong Mai, Nguyen Vy Rin and Phan Thi Thanh Van, "A compact 1×3 two-mode selective silicon photonic router/switch using two tunable phase shifters", *Industrial Networks and Intelligent Systems*, 8, e4, 2021.

[J_3] Duong Quang Duy, Ta Duy Hai, Nguyen Thi Hang Duy, Tran Thi Thanh Thuy, Tran Tuan Anh, Ho Duc Tam Linh, Hung Nguyen Tan, Dang Hoai Bac and Truong Cao Dung, "1 × 3 simultaneous three-mode selective router based on silicon waveguide utilizing Ti thermo-optic phase shifters", *Microelectronics Journal*, 105278, 2021.

[C_1] Duong Quang Duy, Ho Duc Tam Linh, Nguyen Tan Hung, Nguyen Huu Long, Truong Cao Dung, Dang Hoai Bac, "Simultaneous Generation of Two Lowest Optical Modes Using Silicon MMI and Y-Junction Couplers", *IEEE ICCE*, Hue 2018.

[C_2] Duong Quang Duy, Ho Duc Tam Linh, Truong Cao Dung, Nguyen Tan Hung, Dang Hoai Bac, Luong Cong Duan, "Three Lowest Optical Modes Simultaneous Generator based on Silicon Multimode interference and Y-Junction Couplers", *IEEE NICS*, Ha Noi 2019.

Các công trình liên quan đến Luận án

[J_4] Dương Quang Duy, Hồ Đức Tâm Linh, Nguyễn Tấn Hưng, Trương Cao Dũng, Đặng Hoài Bắc, "Bộ định tuyến cho hai mode ánh sáng phân cực TM dùng vật liệu SOI", *Journal of Science and Technology on Information and Communications (JSTIC)*, 3 – 9, 2020.

[J_5] Ta Duy Hai, Nguyen Thi Hang Duy, Tran Thi Thanh Thuy, Duong Quang Duy, Chu Duc Hoang, Trinh Minh Tuan, Truong Cao Dung, "Numerical design and optimization of a high compact, broadband optical three-mode selective converter by manipulating ITO-based controllable phase shifters integrated on silicon-on-insulator waveguides", *Optical Engineering*, 60(11), 115104, 2021.

[J_6] Dương Quang Duy, Trương Cao Dũng, Chử Đức Hoàng, Nguyễn Trọng Các, Nguyễn Tuấn, "Linh kiện quang tử ghép/tách hai mode không phụ thuộc phân cực sử dụng linh kiện chữ Y bất đối xứng", *Tạp chí nghiên cứu khoa học Đại học sao đỏ*, Số 4(75), 20 – 26, 2021.