

THIẾT KẾ BỘ GHÉP KÊNH KẾT HỢP HAI BƯỚC SÓNG VÀ HAI MODE TRÊN CÙNG MỘT CHIP QUANG TỬ SILICON

Hồ Đức Tâm Linh*, Hồ Xuân Trường

Khoa Điện, Điện tử và Công nghệ vật liệu, Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế

*Email: hdtlinh@husc.edu.vn

Ngày nhận bài: 30/3/2023; ngày hoàn thành phản biện: 17/4/2023; ngày duyệt đăng: 4/12/2023

TÓM TẮT

Chúng tôi đề xuất một thiết bị có khả năng kết hợp đồng thời hai kỹ thuật ghép kênh theo bước sóng (WDM) và ghép kênh theo mode (MDM) dựa trên nền vật liệu SOI (Silicon on Insulator). Thiết kế gồm hai bộ giao thoa đa mode MMI cải tiến ghép nối với một bộ ghép nối định hướng hình chữ Y để tạo nên một bộ ghép kênh hai bước sóng (1310 nm và 1490 nm) và hai mode (TE₀ và TE₁). Thông qua phương pháp truyền chùm tia ba chiều 3D-BPM và phương pháp chỉ số hiệu dụng EIM, thiết bị đề xuất đã chứng minh được khả năng hoạt động trong độ rộng băng lên đến 40 nm với hiệu suất chuyển đổi quang luôn đạt gần 60%. Tại bước sóng trung tâm 1310 nm và 1490 nm, hiệu suất chuyển đổi quang luôn đạt trên 96% và nhiễu ảnh hưởng giữa các kênh luôn nhỏ hơn 1% ở tất cả các trường hợp được khảo sát. Cấu trúc thiết kế này mở ra một hướng nghiên cứu mới kết hợp giữa kỹ thuật WDM và MDM để tăng dung lượng kênh truyền cho hệ thống thông tin quang trên chip.

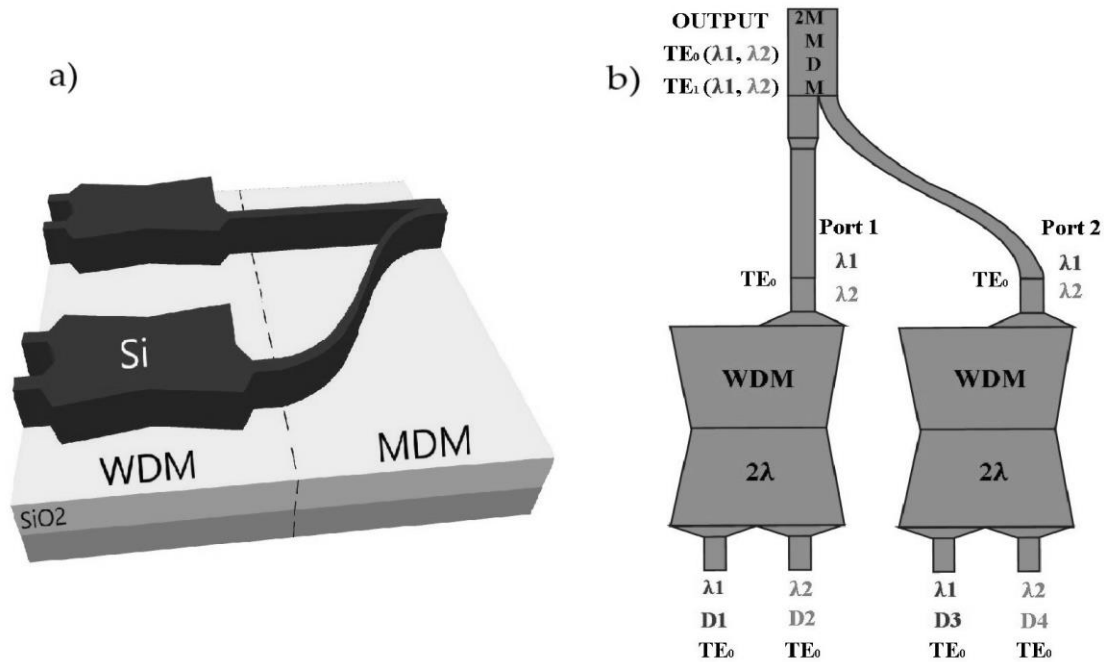
Từ khóa: SOI, WDM, MDM, PIC.

1. MỞ ĐẦU

Trong các hệ thống mạng truy nhập quang, bộ ghép kênh sử dụng hai bước sóng ở hai cửa sổ 1310 nm và 1490 nm đóng một vai trò quan trọng trong việc ghép kênh các tín hiệu ở các đầu vào khác nhau. Có nhiều loại bộ ghép kênh bước sóng sử dụng các cấu trúc hình học khác nhau đã được đề xuất như bộ ghép định hướng [1], cách tử Bragg [2], MMI [3], bộ cộng hưởng [4-5] và cấu trúc kẹp tóc [6]. Tuy nhiên, kỹ thuật ghép kênh phân chia theo bước sóng (WDM) được áp dụng trong các bộ ghép kênh thông thường có một giới hạn nhất định về tài nguyên bước sóng. Vì vậy, một khía cạnh khác đang thu hút các nhà khoa học tập trung nghiên cứu là phương thức ghép kênh phân chia theo mode (MDM). Kỹ thuật này được xem là một hướng phát triển đầy hứa hẹn để tăng đáng kể dung lượng của mạng viễn thông quang. Ngoài ra,

sự kết hợp của cả hai kỹ thuật WDM và MDM trong cùng một mạch quang tử (PIC) đang được nhiều nhóm nghiên cứu đặc biệt quan tâm. Trong khi kỹ thuật WDM ghép một số tín hiệu sóng mang quang vào một ống dẫn sóng duy nhất bằng cách sử dụng các bước sóng khác nhau [7–9], kỹ thuật MDM cho phép ghép các mode trực giao trong cùng một bước sóng mà không bị ảnh hưởng nhiễu giữa các kênh [10–14]. Trong các nghiên cứu trước đây [15–17], nhiều nghiên cứu tập trung vào việc kết hợp hai kỹ thuật MDM và WDM trong cùng một cửa sổ bước sóng, và chủ yếu tập trung vào dải băng tần C. Ngoài ra, một số công trình đã cải tiến thành công việc tích hợp hai kỹ thuật MDM và WDM trên một chip đơn ở các cửa sổ bước sóng khác nhau. Một đề xuất ban đầu có thể kể đến là công trình trong bài báo [18]. Thiết kế của thiết bị dựa trên bộ ghép hướng và bộ ghép giao thoa đa mode (MMI) để ghép hai mode TE₀ với hai bước sóng 1310nm / 1550nm. Tuy nhiên, hiệu suất chuyển đổi quang tương ứng với bốn dữ liệu đầu vào của phần ghép kênh theo bước sóng và theo mode là khá thấp. Suy hao chèn của bốn kênh ở hai bước sóng trung tâm 1310nm và 1550nm lần lượt là 1,2 dB (76%), 1,4 dB (72%), 1,9 dB (65%) và 2,1 dB (61%). Một nghiên cứu khác dựa trên công nghệ tinh thể quang tử có thể ghép hai mode TM₀ / TM₁ và hai bước sóng 1550 nm / 1300 nm [19]. Thiết bị được thiết kế từ tinh thể quang tử 2D dựa trên nền vật liệu SOI với cấu trúc nhỏ gọn 29 μm x 12 μm . Kết quả mô phỏng cho thấy suy hao chèn trong bốn kênh luôn nhỏ hơn -1,1 dB (77%) tại các bước sóng trung tâm.

Trong báo cáo này, chúng tôi đề xuất bộ ghép kênh kết hợp đồng thời hai bước sóng và hai mode trên cùng một chip đơn quang tử. Cấu trúc này nhằm hỗ trợ nhiều người dùng hơn ở phía thiết bị đầu cuối trong khi vẫn duy trì cơ sở hạ tầng mạng truy cập (Hình 1 (a)). Thiết kế được đề xuất bao gồm hai bộ ghép giao thoa đa mode hình cánh bướm và một bộ nối chữ Y không đối xứng xếp tầng dựa trên ống dẫn sóng kênh silicon. Cụ thể, thiết bị ghép kênh kết hợp này hỗ trợ bốn tín hiệu dữ liệu điều chế trên các mode TE₀. Các tín hiệu này được đánh số từ D1 đến D4 tương ứng với bốn đầu vào của hai bộ ghép kênh WDM hai bước sóng. Hai đầu ra của hai bộ ghép kênh WDM được kết nối với hai đầu vào bộ ghép kênh MDM hỗ trợ hai mode TE₀ và TE₁. Do đó, chúng tôi chỉ cần sử dụng hai bộ ghép kênh WDM hỗ trợ hai bước sóng ghép nối với một bộ ghép kênh MDM hỗ trợ hai mode thì thiết bị có thể ghép bốn tín hiệu đơn lẻ trên cùng một kênh truyền. Thông qua phương pháp lan truyền chùm tia ba chiều 3D-BPM và phương pháp chỉ số hiệu dụng EIM, thiết bị được đề xuất có thể hoạt động trong dải băng tần C, hiệu suất chuyển đổi quang luôn đạt trên 96% và nhiễu ảnh hưởng lên kênh mong muốn luôn nhỏ hơn 1% tại bước sóng trung tâm 1310 nm và 1490 nm.



Hình 1. Cấu trúc bộ ghép kênh kết hợp hai kỹ thuật WDM và MDM trên cùng một chip đơn:

(a) Cấu trúc 3D, (b) Cấu trúc 2D.

2. CẤU TRÚC BỘ GHÉP KÊNH KẾT HỢP HAI MODE VÀ HAI BƯỚC SÓNG

2.1. Cấu trúc chung

Hình 1 (b) chỉ ra cấu trúc và các tham số của thiết bị ghép kênh kết hợp giữa hai kỹ thuật WDM và MDM trên một chip đơn. Mỗi bộ ghép kênh WDM hỗ trợ hai bước sóng 1310 nm (λ_1), 1490 nm (λ_2), vì vậy trong trường hợp này hai bộ ghép kênh hoàn toàn giống nhau được sử dụng để ghép đồng thời bốn kênh tín hiệu mode TE₀ (từ D1 đến D4). Trong đó, các tín hiệu D1, D3 được điều chế trên bước sóng λ_1 , hai tín hiệu D2, D4 được điều chế trên bước sóng λ_2 . Sự kết hợp của bốn tín hiệu này sẽ tạo thành hai cặp tín hiệu ở các đầu ra với tất cả đều là mode TE₀. Hai cặp tín hiệu TE₀ này được dẫn vào bốn cổng đầu vào của bộ ghép kênh MDM, tại đó các tín hiệu đầu ra của mode TE₀ lần lượt được ghép kênh và chuyển đổi thành các mode TE₀ và TE₁. Toàn bộ thiết bị được chế tạo dựa trên ống dẫn sóng dạng kênh có chiều cao ống dẫn sóng $H = 0,22 \mu\text{m}$. Vật liệu của lớp lõi được làm bằng Si trong khi lớp phủ dưới và trên đều là SiO₂. Chiết suất của các lớp Si và SiO₂ được chọn lần lượt là $n_r = 3,45$, và $n_c = 1,46$.

2.2. Bộ ghép kênh hai bước sóng 1310 nm và 1490 nm (2λ - WDM)

Bộ ghép kênh 2λ - WDM là bộ ghép giao thoa hình cánh bướm có khả năng hỗ trợ ghép kênh hai tín hiệu ở hai bước sóng 1310 nm và 1490 nm (Hình 2 (a)). Bộ ghép kênh bước sóng này được thiết kế dựa trên cấu trúc giao thoa đa mode (MMI) nhưng

hình dạng được điều chỉnh để giảm phản xạ ở cuối cấu trúc giao thoa đa mode, đồng thời cải thiện khả năng thu nhận ánh sáng và tăng chất lượng hình ảnh giao thoa ở đầu ra. Cấu trúc này phụ thuộc vào độ dài nhịp $L_\pi(\lambda)$ và tính chất tự sao ảnh được tái tạo định kỳ dọc theo hướng lan truyền trong vùng MMI. Ở đây, độ dài nhịp $L_\pi(\lambda)$ được xác định bởi công thức (1):

$$L_{\pi(\lambda)} = \frac{4n_c W_e W_{eff}}{3\lambda} \quad (1)$$

trong đó W_{eff} là chiều rộng hiệu dụng nửa chiều dài phách, W_e là chiều rộng hiệu dụng của bộ giao thoa đa mode hình cánh bướm (tính cho mode TE) và được xác định theo công thức (2):

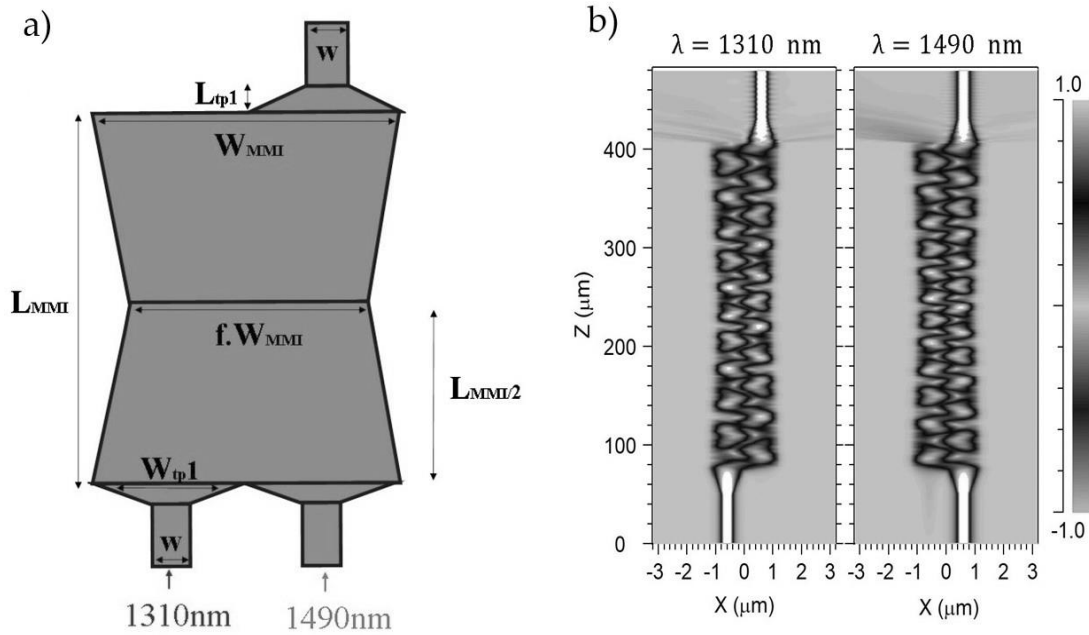
$$W_e = W_{MMI} + \frac{\lambda}{\pi} (n_r^2 - n_c^2)^{-0.5} \quad (2)$$

Với W_{MMI} là độ dài vật lý tại cạnh lớn nhất của bộ giao thoa hình cánh bướm, n_r và n_c lần lượt là chiết suất hiệu dụng của lớp lõi và lớp vỏ của thiết bị. Độ dài L_{MMI} của bộ giao thoa đa mode hình cánh bướm thỏa mãn điều kiện (3):

$$L_{MMI} = \frac{1}{2} (3mL_{\pi(1310nm)}) = \frac{1}{2} (3nL_{\pi(1490nm)}) \quad (3)$$

Trong đó m, n là các số nguyên dương. Nếu m, n cùng chẵn hoặc cùng lẻ, các bước sóng 1310 nm và 1490 nm sẽ được ghép vào cùng một cổng ở đầu ra. Trường hợp m chẵn, n lẻ hoặc ngược lại thì hai bước sóng 1310 nm và 1490 nm trong cùng một ống dẫn sóng sẽ được tách biệt thành hai tín hiệu trên hai ống dẫn sóng khác nhau, trường hợp này xảy ra đối với thiết bị là bộ giải ghép kênh.

Độ rộng tại vị trí nửa chiều dài của bộ ghép đa mode MMI hình cánh bướm được xác định bởi giá trị của $f.W_{MMI}$, với f là hệ số nhân dương và nhỏ hơn 1 ($0 < f < 1$). Dựa trên việc mô phỏng số để tối ưu hóa các thông số cấu trúc và đặc tính của thiết bị, tham số f được chọn $= 0,8$ và độ rộng $W_{MMI} = 2,4 \mu m$ và $L_{MMI} = 331 \mu m$. Hơn nữa, để nâng cao hiệu suất truyền của các mode, các ống dẫn sóng hình thang cân được sử dụng để liên kết giữa các ống dẫn sóng đầu vào / đầu ra với vùng giao thoa đa mode MMI. Trong thiết kế này, chiều rộng và chiều dài của hình thang cân lần lượt được chọn là $W_{tp1} = 1,2 \mu m$ và $L_{tp1} = 20 \mu m$. Ngoài ra, bộ ghép kênh 2λ - WDM này được thiết kế để hoạt động ở mode phân cực TE, vì vậy độ rộng của ống dẫn sóng đơn mode (ống dẫn sóng truy cập) được chọn $w = 0,3 \mu m$ để thỏa mãn chỉ hỗ trợ mode cơ bản TE₀ cho cả hai ống dẫn sóng vào và ra của MMI.

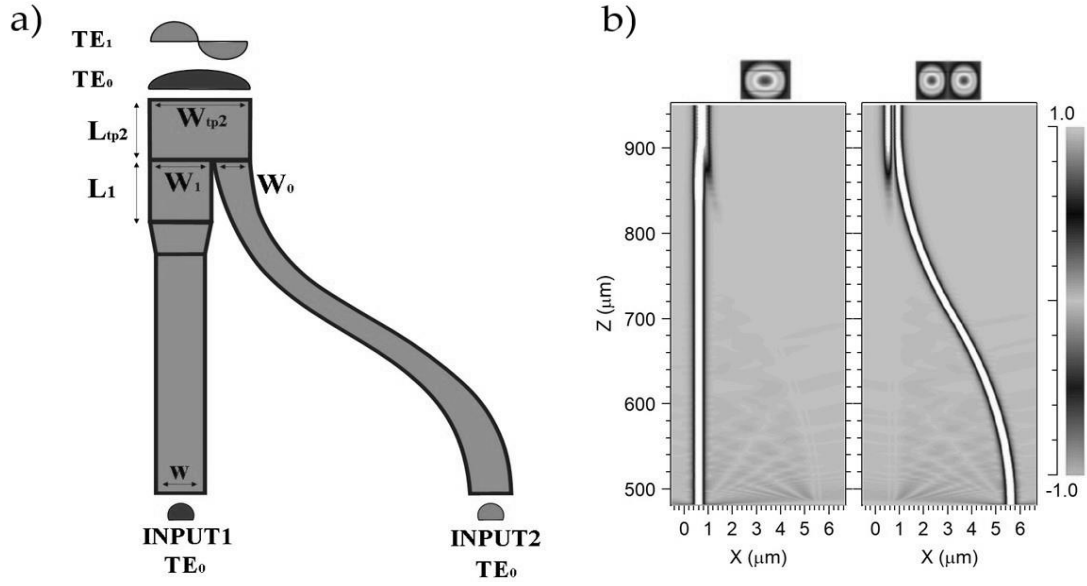


Hình 2. Bộ ghép kênh hai bước sóng 2λ – WDM: (a) Cấu trúc 2D và ký hiệu kích thước của thiết bị, (b) Hình ảnh phân bố trường điện bên trong bộ ghép kênh hai bước sóng.

Hình 2(b) cho thấy sự phân bố trường điện bên trong bộ ghép kênh hai bước sóng 1310 nm và 1490 nm. Thông qua các phân bố trường điện bị bức xạ ra bên ngoài ống dẫn sóng, chúng ta có thể nhận thấy một cách khái quát rằng tín hiệu ở cả hai bước sóng ghép vào có phần suy hao chủ yếu ở phần cuối của bộ giao thoa đa mode MMI.

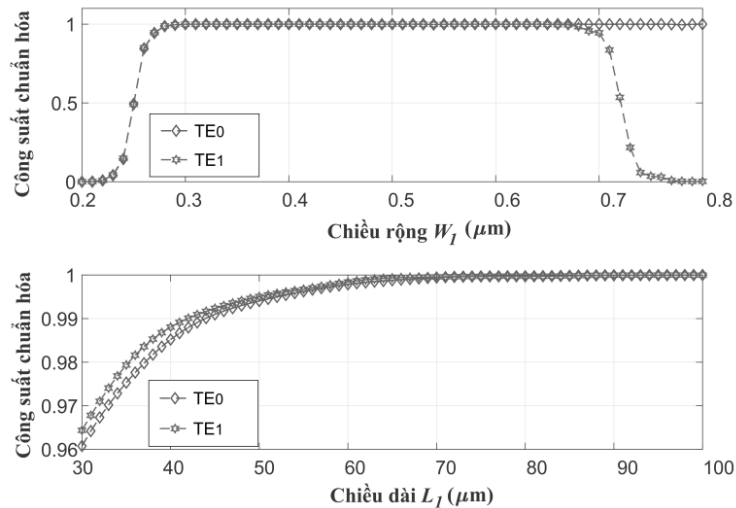
2.3. Bộ ghép kênh hai mode TE0 và TE1 (2M-MDM)

Bộ ghép kênh hai mode 2M-MDM được tạo thành từ cấu trúc hình chữ Y không đối xứng được chỉ ra trong Hình 3 (a). Cấu trúc chữ Y gồm một ống dẫn sóng vừa và một ống dẫn sóng hẹp hơn được ghép nối phần cuối với nhau bằng một ống dẫn sóng rộng khác. Ống dẫn sóng rộng này có chiều rộng bằng tổng chiều rộng của hai ống dẫn sóng đó cộng lại. Hai ống dẫn sóng hẹp đơn mode được đặt trên các cổng IN1 và IN2 với chiều rộng bằng độ rộng đầu ra của bộ ghép kênh 2λ - WDM. Chiều rộng, chiều dài và khoảng cách đặt giữa hai ống dẫn sóng của chữ Y được xác định bằng phương pháp mô phỏng truyền chùm BPM để tìm giá trị thích hợp cho việc ghép nối hình thành các mode TE0 và TE1.



Hình 3. Bộ ghép kênh hai mode 2M-MDM: (a) Cấu trúc 2D và ký hiệu kích thước của thiết bị, (b) Hình ảnh phân bố trường điện bên trong bộ ghép kênh hai mode.

Cụ thể, ống dẫn sóng hẹp ở cổng IN2 có chiều rộng $W_0 = 0,25 \mu\text{m}$ được đưa vào ống dẫn sóng W_1 ở cổng vào số 1. Từ kết quả mô phỏng trong Hình 4, chúng tôi nhận thấy rằng khi chiều rộng của W_1 từ $0,3 \mu\text{m}$ đến $0,65 \mu\text{m}$ và chiều dài của L_1 lớn hơn $70 \mu\text{m}$, hai mode TE0 ở hai cổng đầu vào riêng biệt sẽ ghép thành cùng một đầu ra của tầng thứ nhất, trong đó mode TE0 ở cổng số 2 sẽ chuyển đổi thành mode TE1 và mode TE0 tại cổng 1 sẽ giữ nguyên không đổi bậc mode. Trong trường hợp này ống dẫn sóng với chiều rộng $W_1 = 0,4 \mu\text{m}$ và chiều dài $L_1 = 80 \mu\text{m}$ được chọn để thu được công suất đầu ra tốt nhất và phù hợp với mode được ghép ở tầng tiếp theo.

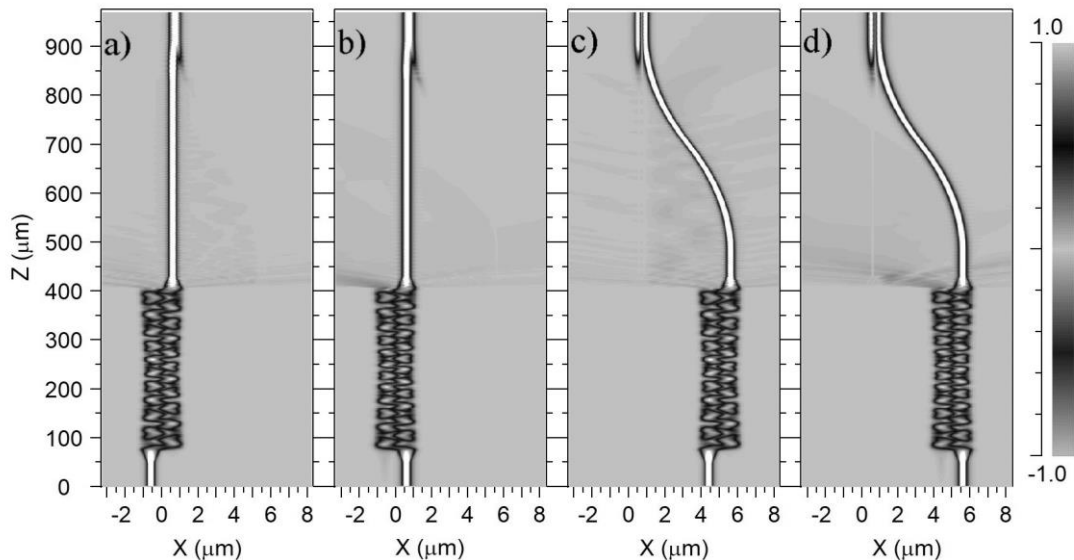


Hình 4. Khảo sát chiều dài và chiều rộng của ống dẫn sóng chính phụ thuộc vào công suất đầu ra của bộ ghép kênh mode MDM.

Ngoài ra, để tăng hiệu suất ghép nối và duy trì thứ tự chuyển đổi mode chính xác tại các vị trí đầu ra giữa các tầng, chúng tôi sử dụng một taper có chiều dài $L_{tp2} = 30 \mu\text{m}$ và chiều rộng $W_{tp2} = 0,65 \mu\text{m}$, độ rộng này đúng bằng độ rộng của ống dẫn sóng của tầng tiếp theo.

3. MÔ PHÒNG VÀ ĐÁNH GIÁ

Bằng phương pháp truyền chùm (3M-BPM) kết hợp với phương pháp chiết suất hiệu dụng (EIM), tín hiệu quang mode TE₀ được phát vào ở cả hai cổng đầu vào của thiết bị. Hình 5 (a) và Hình 5 (b) cho thấy kết quả mô phỏng khi phát tín hiệu mode TE₀ ở các bước sóng lần lượt là 1310nm, 1490nm và thu được tín hiệu mode TE₀ ở đầu ra. Tương tự, các Hình 5 (c) và Hình 5 (d) phát tín hiệu TE₀ ở cổng vào 2 và thu được tín hiệu TE₁ ở ngõ ra. Dựa trên hình ảnh phân bố trường của tín hiệu bên trong các ống dẫn sóng, chúng ta có thể thấy rằng các đường dẫn ánh sáng được dẫn qua thiết bị cũng tuân theo chính xác nguyên tắc hoạt động được trình bày trong phần lý thuyết ở trên. Những kết quả này cho thấy việc kết hợp giữa WDM và MDM trong cùng một chip duy nhất là khả thi. Ngoài ra, hình ảnh mô phỏng phân bố điện trường cũng cho thấy chất lượng truyền dẫn quang giữa đầu vào và đầu ra của thiết bị thay đổi như thế nào. Rõ ràng nhất là sự mất mát năng lượng bên ngoài (màu xanh dương) ở cuối bộ ghép kênh WDM xuất hiện nhiều hơn ở bộ ghép kênh MDM. Điều này cũng giúp dự đoán rằng sự suy giảm xảy ra ở bộ ghép kênh bước sóng WDM cao hơn bộ ghép kênh mode MDM.



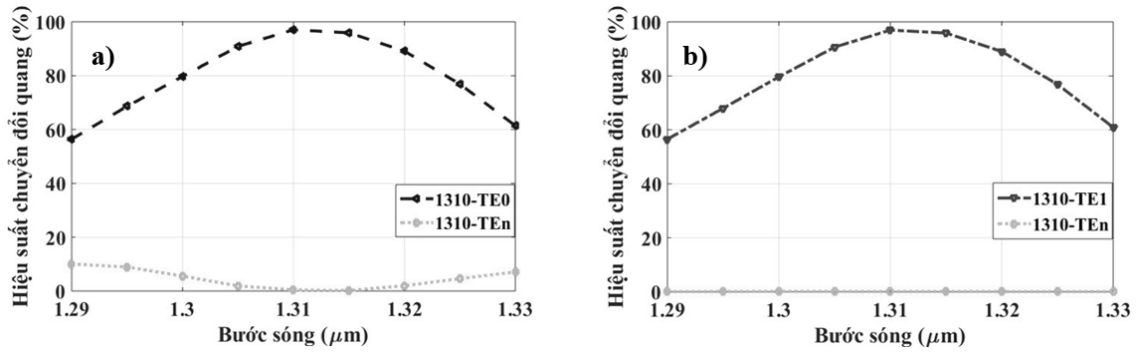
Hình 5. Hình ảnh phân bố trường điện ở đầu ra của bộ ghép kênh kết hợp WDM-MDM tương ứng với các mode (a) 1310 nm - TE₀, (b) 1490 nm - TE₀, (c) 1310 nm - TE₁, (d) 1490 nm - TE₁.

Để đánh giá một cách chính xác và rõ ràng hiệu suất chuyển đổi quang của bộ ghép kênh kết hợp được đề xuất này, chúng tôi đo công suất tín hiệu quang ở ngõ vào và công suất ở ngõ ra tương ứng với các mode nhận được. Từ đó, chúng tôi tính hiệu suất chuyển đổi quang theo công thức (4) và (5):

$$H_{\text{mong-muốn}} = \frac{P_{\text{TEi-out},\lambda_k}}{P_{\text{TE0-in},\lambda_k}} * 100\% \quad (4)$$

$$H_{\text{nhiều}} = \frac{\sum P_{\text{TEn-out},n \neq i,\lambda_k}}{P_{\text{TE0-in},\lambda_k}} * 100\% \quad (5)$$

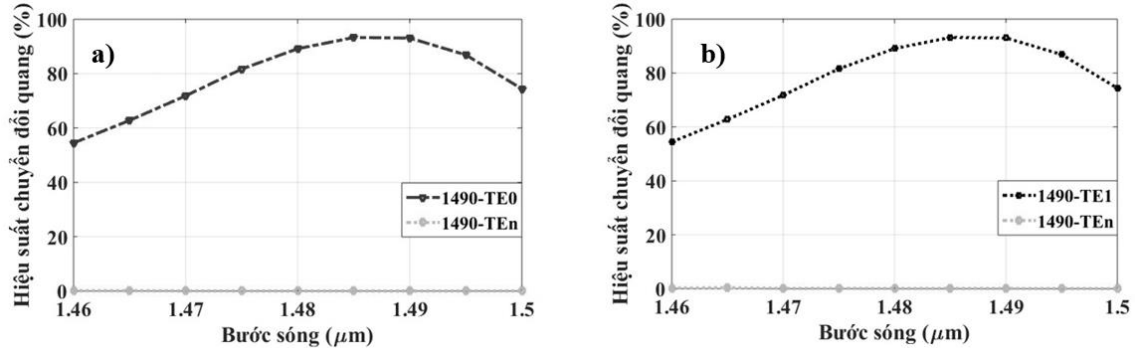
Trong đó, $i = 0, 1$; $\lambda_k = 1310 \text{ nm}, 1490 \text{ nm}$; $P_{\text{TE0-in},\lambda_k}$ là công suất tín hiệu đầu vào của mode TE0 tại bước sóng λ_k ; $P_{\text{TEi-out},\lambda_k}$ là công suất đầu ra mong muốn của mode TEi tại bước sóng λ_k và $\sum P_{\text{TEn-out},n \neq i,\lambda_k}$ là tổng công suất đầu ra của tất cả các mode không mong muốn TE n ở ngõ ra tại bước sóng λ_k .



Hình 6. Khảo sát hiệu suất chuyển đổi quang tương ứng với các mode đầu ra xung quanh cửa sổ bước sóng trung tâm 1310 nm.

Hình 6 (a), đường màu xanh dương chỉ ra hiệu suất chuyển đổi quang khi phát tín hiệu đầu vào và thu được tín hiệu TE0 tại bước sóng 1310 nm. Hiệu suất chuyển đổi quang trong trường hợp này đạt trên 96% tại bước sóng trung tâm 1310 nm, xét trên toàn bộ dải bước sóng từ 1290 nm đến 1330 nm thì hiệu suất luôn đạt gần 60% trở lên. Kết quả này cũng tương tự đối với hiệu suất chuyển đổi quang từ mode TE0 sang mode TE1 tại bước sóng 1310 nm (Hình 6 (b), đường màu nâu). Ngoài ra, chúng ta cũng có thể thấy rằng, từ Hình 6 (a), tỉ lệ nhiễu tác động của tất cả các mode TE n không mong muốn được sinh ra ở ngõ ra là rất thấp, kết quả này luôn nhỏ hơn 10% trong toàn bộ dải bước sóng khảo sát 1290 nm đến 1330 nm. Nếu so sánh tỉ lệ nhiễu giữa hai mode đầu ra thì chúng ta có thể thấy rõ ràng rằng, các mode đầu ra không mong muốn khi chuyển đổi thành mode đầu ra mong muốn TE1 ít bị nhiễu hơn mode đầu ra mong muốn TE0 (đường màu xanh lá). Đối với trường hợp phát tín hiệu vào ở dải bước sóng 1490 nm

thì cho kết quả tương tự tín hiệu dải bước sóng 1310 nm như được chỉ ra ở Hình 7 (a) và Hình 7 (b).



Hình 7. Khảo sát hiệu suất chuyển đổi quang tương ứng với các mode đầu ra xung quanh cửa sổ bước sóng trung tâm 1490 nm.

Kết quả từ Hình 6 và Hình 7 cho thấy hiệu suất chuyển đổi quang với chuyển đổi hai mode ngõ ra TE0 và TE1 là khá giống nhau, điều này chỉ ra rằng, thiết kế đáp ứng tốt với sự thay đổi dải bước sóng hoạt động ở ngõ vào. Một điều đáng chú ý khác là bộ ghép kênh MDM có băng thông rất rộng và suy hao chèn nhỏ, vì vậy chúng ta có thể tăng số lượng mode được ghép nối, có nghĩa là không chỉ dừng lại ở hai mode mà có thể mở rộng ra nhiều mode bậc cao hơn như TE2, TE3, TE4.... Do đó, khả năng mở rộng hiệu suất ghép nối của thiết bị ghép kênh kết hợp này là cao.

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, chúng tôi đã trình bày một thiết kế kết hợp kỹ thuật ghép kênh theo bước sóng và kỹ thuật ghép kênh theo mode dựa trên cấu trúc ống dẫn sóng dạng kênh silicon. Thiết bị được cấu tạo từ hai bộ ghép kênh theo bước sóng WDM và một bộ ghép kênh theo mode MDM chữ Y không đối xứng. Kết quả mô phỏng số cho thấy hiệu suất chuyển đổi quang của thiết bị ở cả bốn trường hợp đều đạt gần 60% trong dải băng thông 40 nm cho mỗi cửa sổ bước sóng. Với hiệu suất chuyển đổi quang cao và dải bước sóng hoạt động rộng, chúng tôi hy vọng thiết bị đã thiết kế có khả năng thích ứng với mạng băng thông rộng thế hệ mới.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Y. Shi, S. Anand, and S. He (2009). Design of a polarization insensitive triplexer using directional couplers based on submicron silicon rib waveguides, *J. Light. Technol.*, vol. 27, no. 11, pp. 1443-1447.
- [2]. J. Chen, Y. Zhang, and Y. Shi (2017). An on-chip triplexer based on silicon bragg grating-assisted multimode interference couplers, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 29, no. 1, pp. 63-65.
- [3]. J. Liu et al. (2018). New design of a compact 6-pole reconfigurable narrowband triplexer based on common net-type resonator, *Proc. 2018 IEEE Int. Conf. Appl. Supercond. Electromagn. Devices, ASEMD 2018*, no. 61461020, pp. 1-2.
- [4]. A. F. Tunc, C. Ulker, A. M. Mungan, O. Ceylan, and H. B. Yagci (2011). Triplexer design with hairpin structure, *2011 19th Telecommun. Forum, TELFOR 2011 - Proc. Pap.*, pp. 988-991.
- [5]. Y. Shi, D. Dai, and S. He (2006). Novel ultra-compact triplexer based on photonic crystal waveguides, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 18, no. 21, pp. 2293-2295.
- [6]. Y. Shi, S. Anand, and S. He (2009). Design of a polarization insensitive triplexer using directional couplers based on submicron silicon rib waveguides, *J. Light. Technol.*, vol. 27, no. 11, pp. 1443-1447.
- [7]. T. Mulugeta and M. Rasras (2015). Silicon hybrid (de)multiplexer enabling simultaneous mode and wavelength-division multiplexing, *Opt. Express*, vol. 23, no. 2, p. 943.
- [8]. Y. Yu, J. Yu, Z. Li, X. Xiao, and J. Xing (2013). Two-mode multiplexer and demultiplexer based on adiabatic couplers, *Opt. Lett.*, vol. 38, no. 17, p. 3468.
- [9]. S. Berdague and P. Facq (2009). Mode division multiplexing in optical fibers, *Appl. Opt.*, vol. 21, no. 11, p. 1950.
- [10]. W. Chen, P. Wang, and J. Yang (2013). Mode multi/demultiplexer based on cascaded asymmetric Y-junctions, *Opt. Express*, vol. 21, no. 21, p. 25113.
- [11]. D. E. Z. Hou, C. H. S. Un, Y. A. L. Ai, X. Inliang, and Z. Hang (2019). Integrated silicon multifunctional mode-division multiplexing system, *Optics Express*, vol. 27, no. 8, pp. 10798-10805.
- [12]. C. Dung Truong, T. Anh Tran, and D. Han Tran (2014). A design of triplexer based on a 2x2 butterfly MMI coupler and a directional coupler using silicon waveguides, *Opt. Commun.*, vol. 312, pp. 57-61.
- [13]. Y. D. Yang, Y. Li, Y. Z. Huang, and A. W. Poon (2014). Silicon nitride three mode division multiplexing and wavelength division multiplexing using asymmetrical directional couplers and microring resonators, *Opt. Express*, vol. 22, no. 18, p. 22172.
- [14]. L. W. Luo et al. (2014). WDM-compatible mode division multiplexing on a silicon chip, *Nat. Commun.*, vol. 5, pp. 1 - 8.
- [15]. N. Hanzawa et al. (2013). Two-mode PLC-based mode multi/demultiplexer for mode and wavelength division multiplexed transmission, *Opt. Express*, vol. 21, no. 22, p. 25752.

- [16]. Y. Tan, H. Wu, S. Wang, C. Li, and D. Dai (2018). Silicon-based hybrid demultiplexer for wavelength- and mode-division multiplexing, *Opt. Lett.*, vol. 43, no. 9, p. 1962.
- [17]. T. Mulugeta and M. Rasras (2015). Silicon hybrid (de)multiplexer enabling simultaneous mode and wavelength-division multiplexing, *Opt. Express*, vol.23, no.2, p.943.
- [18]. O. M. Nawwar, H. M. H. Shalaby, and R. K. Pokharel (2018). Photonic crystal-based compact hybrid WDM/MDM (De)multiplexer for SOI platforms, *Opt. Lett.*, vol. 43, no. 17, p. 4176.
- [19]. Xu Han et al. (2020). On-chip switchable and reconfigurable optical mode exchange device using cascaded three-waveguide-coupling switches, *Opt. Express*, 28, 9552-9562.

DESIGN A MULTIPLEXER COMBINING TWO WAVELENGTHS AND TWO MODES ON A SINGLE PHOTONIC INTEGRATED CIRCUIT

Ho Duc Tam Linh*, Ho Xuan Truong

Faculty of Electronics, Electrical Engineering and Material Technology,
University of Sciences, Hue University

*Email: hdtlinh@husc.edu.vn

ABSTRACT

We propose a device that is capable of simultaneously combining two wavelengths (WDM) and two modes (MDM) based on a silicon-on-insulator (SOI). The design consists of two innovative MMI multimode interferometers coupled with a Y-shaped directional coupler to create a multiplexer for two-wavelength (1310 nm and 1490 nm) and two-mode (TE₀ and TE₁). Through the three-dimensional beam propagation method (3D-BPM) and effective index method (EIM), the device has demonstrated its ability to operate in bandwidths up to 40 nm with an optical conversion efficiency of almost 60%. Moreover, at the center wavelengths of 1310 nm and 1490 nm, this efficiency is above 96%, and the noise is always less than 1% in all investigated cases. This design will open up a new research direction for the combination of WDM and MDM techniques to increase the channel capacity of optical communication systems on chip in the future.

Keywords: SOI, WDM, MDM, PIC.



Hồ Đức Tâm Linh sinh ngày 03/02/1986 tại Thừa Thiên Huế. Ông tốt nghiệp kỹ sư ngành Điện tử - Viễn thông năm 2009 và thạc sĩ chuyên ngành Kỹ thuật Điện tử tại Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội vào năm 2014. Ông nhận học vị tiến sĩ năm 2023 tại Trường Đại học Bách Khoa Đà Nẵng. Từ năm 2010 đến nay, ông công tác tại Khoa Điện, Điện tử và Công nghệ vật liệu, Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế.

Lĩnh vực nghiên cứu: Thông tin sợi quang, mạch tích hợp quang tử, mạng máy tính.



Hồ Xuân Trường sinh ngày 24/02/2000 tại Thừa Thiên Huế. Ông tốt nghiệp kỹ sư ngành Điện tử - Viễn thông tại trường Đại học Khoa học, Đại học Huế. Hiện tại ông đang tham gia công tác hỗ trợ nghiên cứu tại Khoa Điện, Điện tử và Công nghệ vật liệu tại Trường Đại Học Khoa Học, Đại Học Huế.

Lĩnh vực nghiên cứu: Mạch tích hợp quang tử, Mạng máy tính.