

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG



NGUYỄN VĂN TÀI

**NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ
ỐNG DẪN SÓNG PLASMONIC NANO TRONG GHÉP
KÊNH PHÂN CHIA THEO BƯỚC SÓNG**

Chuyên ngành: **Kỹ thuật Điện tử**

Mã số: **9.52.02.03**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ

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 được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án cấp Học viện họp 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.
2. Thư viện Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông.

MỞ ĐẦU

Tính cấp thiết của đề tài luận án

Với sự phát triển mạnh mẽ của khoa học và công nghệ, đáp ứng nhu cầu sử dụng dịch vụ viễn thông, internet như hiện nay, như truy nhập internet tốc độ cao, truy nhập video có độ phân giải cao hay các dịch vụ điện toán đám mây,... Do đó, yêu cầu nâng cấp tốc độ truyền dẫn trong các mạng thông tin cáp sợi quang là hết sức cần thiết.

Qua nghiên cứu, tổng hợp các kết quả nghiên cứu về cấu kiện quang tử xử lý ghép/phân kênh bước sóng dựa trên ống dẫn sóng sử dụng hiệu ứng plasmonic đã được chỉ ra ở trên vẫn còn một số vấn đề tồn tại cần khắc phục và cải thiện. Đó là: các cấu trúc đã đề xuất chỉ được nghiên cứu lý thuyết và mô phỏng số với ống dẫn sóng kim loại - điện môi - kim loại trong không gian hai chiều (2D) trong khi thực tế các cấu trúc đó là không gian ba chiều (3D), một số cấu trúc sử dụng bộ cộng hưởng vòng plasmonic lại chỉ hỗ trợ số ít các bước sóng, kích thước của cấu kiện còn tương đối lớn. Bên cạnh đó, một số vấn đề của đề tài nghiên cứu xử lý tín hiệu tách ghép các bước sóng sử dụng ống dẫn sóng plasmonic hoặc lai ghép plasmonic đã được nghiên cứu gần đây cũng không giải quyết triệt để các mặt còn hạn chế, như vấn đề về ghép nối giữa ống dẫn sóng silic và ống dẫn sóng plasmonic; vấn đề về chuyển đổi trạng thái phân cực và vấn đề về lọc trạng thái phân cực. Do đó, đề xuất này được xây dựng các tiếp cận mới để cải thiện các mặt còn hạn chế nêu trên.

Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu của luận án là: Thiết kế các công logic quang có chức năng ghép/tách tín hiệu quang lựa chọn bước sóng và cấu kiện có khả năng quay phân cực mode sóng dựa trên ống dẫn sóng plasmonic kích thước nano; Thiết kế cấu kiện ghép/tách kênh phân chia theo bước sóng dựa trên ống dẫn sóng plasmonic có kích thước nano mét với các bước sóng trong cửa sổ bước sóng viễn thông và trong thông tin ánh sáng khả kiến. Các cấu kiện đề xuất có ưu điểm về hiệu suất truyền cao, kích thước nhỏ gọn, nhiều xuyên kênh nhỏ, tầm truyền dài, cho phép dung sai chế tạo của bộ lọc bước sóng phù hợp. Các cấu trúc đề xuất có khả năng ứng dụng cho hệ thống WDM.

Ý nghĩa khoa học và đóng góp

Các đóng góp của luận án có tiềm năng ứng dụng trong các mạch tích hợp quang tử kích cỡ nano mét cũng như các thiết bị quang - điện tử. Luận án gồm có 02 đóng góp sau:

1) Đề xuất thiết kế ống dẫn sóng lai ghép plasmonic HPW có chức năng quay phân cực và các cổng logic XOR, OR, NOT, cổng Feynman quang thuận nghịch dựa trên ống dẫn sóng plasmonic kích thước nano mét theo cấu trúc MIM.

2) Đề xuất thiết kế các ống dẫn sóng plasmonic kích thước nano mét theo cấu trúc MIM để tạo ra các bộ lọc bước sóng quang có độ rộng băng thông lớn, hiệu suất truyền cao và cho phép dung sai chế tạo phù hợp.

Bố cục của luận án

Nội dung luận án được trình bày trong 3 chương. Chương 1 trình bày Cơ sở lý thuyết về ống dẫn sóng plasmonic. Chương 2 trình bày về Ống dẫn sóng lai ghép plasmonic - silic có chức

năng quay phân cực và các cổng logic toàn quang kích thước nano mét. Chương 3 trình bày thiết kế các bộ lọc bước sóng sử dụng ống dẫn sóng plasmonic kích thước nano mét.

CHƯƠNG 1. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VỀ ỐNG DẪN SÓNG PLASMONIC

1.1. Kỹ thuật ghép kênh theo bước sóng

Ghép kênh theo bước sóng (WDM) là công nghệ truyền dẫn nhiều bước sóng ánh sáng trên cùng một sợi quang. Ở đầu phát, nhiều tín hiệu quang có bước sóng ánh sáng khác nhau được tổ hợp lại (ghép kênh) để truyền đi trên một sợi quang. Ở đầu thu, tín hiệu tổ hợp đó được phân giải ra (tách kênh), khôi phục lại tín hiệu gốc rồi đưa vào các thiết bị đầu cuối.

Ưu điểm của WDM: Dung lượng truyền dẫn lớn; Tính trong suốt của mạng WDM; Việc nâng cấp dung lượng hệ thống thực hiện dễ dàng, linh hoạt: Kỹ thuật WDM cho phép tăng dung lượng mạng hiện có lên đến hàng Tbps, có thể đáp ứng nhu cầu mở rộng ở nhiều cấp độ khác nhau. Bên cạnh đó nó cũng mở ra một thị trường mới, đó là thuê kênh quang (hay bước sóng quang) ngoài việc sợi hay cáp quang, việc nâng cấp hệ thống đơn giản bởi cắm thêm các card mới trong khi hệ thống vẫn hoạt động (Plug and Play); Quản lý băng tần hiệu quả và cấu hình hệ thống mềm dẻo.

Với ưu điểm vượt trội của WDM như vậy, nó đóng vai trò hết sức quan trọng trong các mạng truyền thông quang tốc độ cao để đáp ứng yêu cầu ngày càng cao về tốc độ, dung lượng của hệ thống thông tin. Để đáp ứng được yêu cầu ngày càng cao này, đòi hỏi phải ứng dụng những công nghệ mới, có khả năng thu nhỏ các linh kiện quang điện tử nhằm tăng khả năng tích

hợp mạch điện tử, mà xu thế mới được các nhà khoa học quan tâm hiện nay đó là ứng dụng hiệu ứng plasmonic để chế tạo ống dẫn sóng cho hệ thống WDM.

1.2. Lý thuyết về plasmonic

1.2.1. Giới thiệu

Chương này trình bày và tổng hợp một cách hệ thống về plasmonic và ứng dụng của nó trong ghép kênh phân chia theo bước sóng, nhằm cung cấp kiến thức nền tảng cho những đề xuất nghiên cứu sau này của luận án. Trong đó tập trung trình bày cấu trúc của ống dẫn sóng plasmonic, truyền sóng trong ống dẫn sóng; mô hình tính toán tham số của sóng truyền lan trong ống dẫn sóng; các phương pháp phân tích và mô phỏng ống dẫn sóng.

1.2.2. Plasmonic

Plasmonic là sự cộng hưởng điện từ do sự dao động tập thể của các electron dẫn. Công nghệ thiết bị plasmonic tận dụng được đặc tính quang học duy nhất của cấu trúc kim loại cỡ nano (*cộng hưởng điện từ do sự dao động tập thể của các electron dẫn, làm tập trung ánh sáng có cấu trúc dưới bước sóng để tăng cường tính truyền dẫn thông qua chuỗi chu kỳ của bước sóng con trong các màng mỏng kim loại*) để định tuyến và điều khiển ánh sáng tại bước sóng cỡ nanomet.

1.2.3. Phân cực plasmon bề mặt

Phân cực plasmon bề mặt (SPPs) là các kích thích điện từ (EM) kết hợp với các dao động tập trung của các electron tự do ở bề mặt kim loại, được ràng buộc và truyền đi dọc theo giao diện kim loại - điện môi.

1.2.4. Cộng hưởng plasmon bề mặt

Là sự kích thích các electron tự do bên trong vùng dẫn, dẫn tới sự hình thành các dao động đồng pha. Khi kích thước của một tinh thể nano kim loại nhỏ hơn bước sóng của bức xạ tới, hiện tượng cộng hưởng plasmon bề mặt xuất hiện.

1.3. Ống dẫn sóng plasmonic

Vận tốc pha của phân cực plasmon bề mặt SPPs lan truyền trong khe hở kim loại kích thước nano phụ thuộc mạnh vào độ rộng của khe hở. Điều đó có nghĩa là có thể điều khiển được vận tốc pha của SPPs bằng cách thay đổi độ rộng của khe hở. Nhờ vào đặc điểm này mà có thể thực hiện được các mạch và các thiết bị ống dẫn sóng quang kích thước nano. Những ống dẫn sóng quang kích thước cỡ nano mét này được gọi là ống dẫn sóng khe hở plasmon bề mặt SPGWs.

1.4. Các phương pháp phân tích và mô phỏng sử dụng trong luận án

Quá trình thực hiện thiết kế, mô phỏng các linh kiện đề xuất, nghiên cứu sinh sử dụng công cụ mô phỏng đã được thương mại hóa của hãng Synopsys là hãng cung cấp các phần mềm mô phỏng về thiết kế vi mạch điện tử, quang tử và vật liệu tiên tiến. Các phương pháp mô phỏng số dựa trên việc nghiên cứu về trường điện từ, cách thức phân bố trường điện từ và các hành vi của quang sóng được dẫn trong các cấu trúc dẫn sóng. Các công cụ đó bao gồm: Phương pháp EME, Phương pháp FDTD.

1.5. Kết luận chương 1

Chương mở đầu của luận án đã giới thiệu cơ sở lý thuyết của hiện tượng plasmon bề mặt, sự cộng hưởng sóng ánh sáng plasmon bề mặt và cấu trúc, quá trình truyền lan và tăng cường

sóng plasmon trong ống dẫn sóng dưới bước sóng, đặc điểm của ống dẫn sóng plasmon dưới bước sóng là đối tượng chính được áp dụng để thiết kế các cấu trúc ống dẫn sóng plasmon kích thước nano mét trong những đóng góp của luận án này. Sau đó, luận án giới thiệu các phương pháp phân tích mà mô phỏng số phục vụ cho quá trình thiết kế và tối ưu các tham số của các ống dẫn sóng plasmon dưới bước sóng được đề xuất. Trong đó, phương pháp mô phỏng truyền mode riêng EME là phương pháp được sử dụng rộng rãi và hiệu quả trong toàn bộ các kết quả nghiên cứu, các đề xuất thiết kế mới của luận án.

Như đã phân tích, đánh giá các công trình nghiên cứu đã được công bố trên các kỷ yếu hội nghị, tạp chí khoa học uy tín trên thế giới về ống dẫn sóng plasmonic vẫn còn một số mặt hạn chế cần phải cải thiện như: kích thước cấu kiện, công suất suy hao do hấp thụ, do phản xạ, suy hao chèn còn tương đối lớn, băng thông hoạt động còn tương đối thấp. Do vậy, trong chương 2 và chương 3, NCS đề xuất, thiết kế cấu kiện có chức năng quay phân cực, các cổng logic toàn quang, một số bộ lọc bước sóng dựa trên ống dẫn sóng plasmonic cải thiện được các mặt hạn chế này để ứng dụng trong hệ thống WDM.

CHƯƠNG 2: ỐNG DẪN SÓNG LAI GHÉP PLASMONIC - SILIC CÓ CHỨC NĂNG QUAY PHÂN CỰC VÀ CÁC CỔNG LOGIC TOÀN QUANG KÍCH THƯỚC NANO MÉT

Các cấu kiện ống dẫn sóng có chức năng quay phân cực mode sóng và các cổng logic quang có vị trí cần thiết cho một số yêu cầu trong kỹ thuật WDM. Như việc phải quay các phân cực, việc chuyển đổi các mức logic các mode sóng trước khi

đưa vào thiết bị ghép kênh theo bước sóng trong các hệ thống thông tin quang.

Để đạt được các mạch tích hợp cực kỳ nhỏ gọn cần thiết phải đưa các cấu kiện về kích thước dưới bước sóng, muốn vậy việc chế tạo các cấu kiện cần phải ứng dụng các công nghệ mới, mà hiện nay xu hướng chủ yếu là dựa trên hiệu ứng plasmonic.

Bên cạnh đó, việc chuyển đổi tương tự - số hay lựa chọn tín hiệu đầu ra theo các trạng thái đầu vào để từ đó có thể thực hiện ghép kênh để truyền đồng thời nhiều tín hiệu trên một đường truyền thì cần có các công logic để thực hiện các yêu cầu cụ thể trong các hệ thống ghép kênh WDM thực tế.

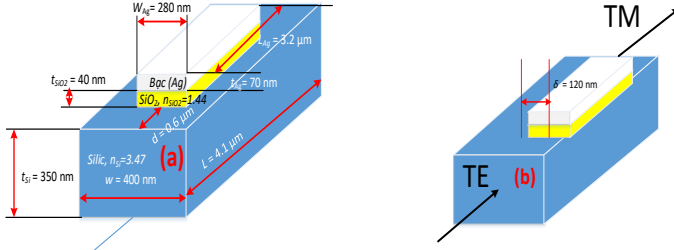
Do đó, Chương này đề xuất thiết kế hai cấu kiện là ⁽¹⁾ống dẫn sóng lai ghép plasmonic - silic có chức năng quay phân cực và ⁽²⁾các công logic toàn quang OR, XOR, NOT, Feynman quang kích thước nano mét để ứng dụng trong các hệ thống WDM.

2.1. Ống dẫn sóng lai ghép plasmonic - silic có chức năng quay phân cực kích thước nano mét

Đầu tiên, NCS đề xuất các cấu trúc ống dẫn sóng lai ghép plasmonic HPWs để bắt giữ ánh sáng trong một lớp giao diện điện môi cỡ vài chục nano mét và một ứng dụng xử lý quay trạng thái mode phân cực. Các cấu trúc này dựa trên kích thích ánh sáng ban đầu tại lõi ống dẫn sóng hình chữ nhật vật liệu silic, sự bắt giữ sau đó được xảy ra tại lớp giữa lõi silic và một lớp kim loại sử dụng vật liệu bạc. Việc nghiên cứu sự truyền mode sử dụng kỹ thuật mô phỏng số bằng các phương pháp FEM và EME.

2.1.1. Thiết kế cấu trúc và phân tích hoạt động

Hình 2.1(a) và hình 2.1(b) phân tích một cấu trúc ống dẫn sóng đề xuất. Bước sóng hoạt động ở cấu trúc thiết kế là $\lambda_0 = 1550nm$.



Hình 2. 1. Các cấu trúc ống dẫn sóng lai ghép plasmonic HPW: a) ống dẫn sóng HPW với nắp kim loại đặt đối xứng trục và b) ống dẫn sóng với nắp kim loại lệch $= 120 nm$ có tác dụng biến đổi và quay mode phân cực

Qua các bước khảo sát để lựa chọn được các tham số tối ưu cho cấu trúc đề xuất, cấu trúc gồm có một lõi silic có chiều dài $L = 4.1 \mu m$, chiều rộng $w = 400 nm$ và lớp trên là một lớp thủy tinh silic (SiO_2) dày $t_{SiO_2} = 40 nm$ và phía trên lớp SiO_2 này phủ một lớp kim loại bạc (Ag) mỏng có chiều dày $t_f = 70 nm$. Chiều dày lớp Silic được thiết kế là $t_{Si} = 350 nm$ để tối thiểu hóa suy hao do chuyển đổi mode phân cực riêng trước điểm cuối của ống dẫn sóng (giảm suy hao hấp thụ vào lớp kim loại cũng như tán xạ ra bên ngoài vỏ). Thiết kế kích thước như vậy đảm bảo được sự kích thích đơn mode trong lõi Si nhờ sử dụng công cụ giải mode bằng kỹ thuật FEM. Độ rộng lớp nắp bạc được thiết lập ban đầu là $w_{Ag} = 280 nm$. Chiết suất cho lõi Si và lớp vỏ thủy tinh Silic (SiO_2) lần lượt là 3.47 và 1.444 tại bước sóng 1550nm. Trong khi đó, hệ số chiết suất của kim loại bạc ở bước

sóng này được xác định bởi: $n_{Ag} = 0.1453 + 11.3587i$. Tất cả các cấu trúc được phủ bởi lớp vỏ thủy tinh silic SiO₂.

2.1.2. Kết quả mô phỏng và nhận xét

Hình 2.3 thể hiện kết quả mô phỏng FEM với ống dẫn sóng HPW với nắp kim loại bạc đặt ở chính giữa trục đối xứng của ống dẫn sóng. Các thành phần trường của trường điện (E-field) và trường từ (H-field) cùng véc tơ Poynting $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ tại tọa độ theo phương truyền của ống dẫn sóng là $z = 1\mu m$ (tại vị trí ứng với mặt cắt có nắp kim loại bạc). Các thành phần E_y và H_x liên hệ bởi quan hệ trong các phương trình của hệ Maxwell, các thành phần trường này thể hiện phân bố mode của các mode lai ghép plasmonic. Bằng cách khảo sát bề dày lớp ô xít silic SiO₂ bằng sử dụng mô phỏng FEM ta thấy tại chiều dày $t_{SiO_2} = 40nm$ thì phân bố mode của các mode HP nằm trọn trong một khe với kích thước nano với diện tích mode hiệu dụng là $A_{eff} = t_{SiO_2} \times w_{Ag}$.

Các kết quả cho thấy công suất hấp thụ dưới -7dB, phản xạ dưới -10dB và suy hao truyền nhỏ hơn -1.5dB trong dải 100nm. Thêm vào đó, kích thước thiết bị chỉ dài cỡ 4.1 μm và rộng 400nm là rất nhỏ, mật độ tích hợp rất cao. Hơn thế, suy hao do hấp thụ kim loại là nhỏ bởi phần ảo nhỏ nên mạch hỗ trợ cự ly truyền trường xa.

Bảng 2. 1. So sánh ống dẫn sóng HPW với các công trình đã được công bố trên các tạp chí chuyên ngành

| Tiêu chuẩn | Cấu trúc đề xuất [C1] | Tài liệu tham khảo [31] | Tài liệu tham khảo [36] |
|--------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| Chức năng cấu kiện | Quay mode TE sang TM | Quay mode TE sang HP | Quay mode TE sang TM |

| | | | |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Bước sóng | 1550nm | 1550nm | 1550nm |
| Băng thông | 100nm | 200nm | 104-108nm |
| Vật liệu | Ag, SiO ₂ , silicon | Ag, SiO ₂ , silicon | Ag, SiO ₂ , silicon |
| Suy hao hấp thụ | < -7dB | Không nhắc đến | Không nhắc đến |
| Suy hao phản xạ | < -10dB | Không nhắc đến | Không nhắc đến |
| Suy hao chèn I.L | < -1.5dB | Không nhắc đến | 0.5139dB |
| Kích thước cấu kiện | 4.1 μm x 400nm | 4.5 μm x 380nm | 7 μm x 400nm |

Từ bảng 2.1 có thể nhận thấy rằng, cấu trúc đề xuất có ưu điểm vượt trội về mặt kích thước nhỏ gọn, suy hao thấp so với các đề xuất đã được công bố. Tuy nhiên, về băng thông hoạt động của cấu trúc đề xuất nhỏ hơn cấu kiện có chức năng quay mode TE sang mode HP (Hybrid Plasmonic) và tương đương với cấu kiện có cùng chức năng quay mode TE sang mode TM.

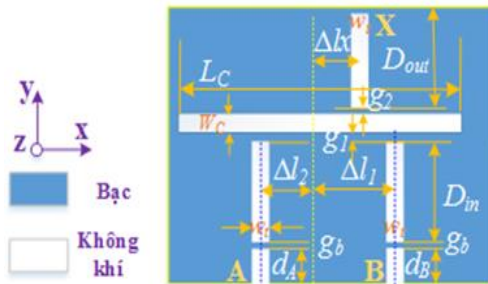
2.2. Các cổng logic toàn quang dựa trên ống dẫn sóng plasmonic MIM

Phần này đề xuất và khảo sát chi tiết một số thiết kế cổng logic plasmonic cơ bản trong ống dẫn sóng nano plasmonic hai chiều theo cấu trúc MIM bằng việc sử dụng phương pháp tính toán triển khai mode riêng. Những cổng logic bao gồm XOR, OR, NOT và cổng Feynman có thể được thực hiện bằng cách

thay đổi các thông số cấu trúc hình học một cách hợp lý. Ngoài ra, bằng cách xếp tầng và kết hợp các công logic cơ bản này, bất kỳ hàm logic phức tạp nào cũng có thể đạt được để cung cấp cho các mạch logic quang có mật độ tích hợp cao. Các công logic được đề xuất có băng thông rộng trên 300nm trong khi kích thước nhỏ gọn, cỡ $2\mu\text{m} \times 1.2\mu\text{m}$. Do đó, các thiết bị có thể được ứng dụng rộng rãi và có ý nghĩa lớn trong các thiết bị xử lý và tính toán quang học.

2.2.1. Nguyên lý thiết kế các công logic plasmonic

Cấu trúc được đề xuất như hình 2.8, dựa trên các ống dẫn sóng kim loại-điện môi-kim loại (MIM), trong đó chất cách điện trong các khe và lỗ kim loại ban đầu là các lớp không khí. Các lớp kim loại được sử dụng để thiết kế và xây dựng thiết bị dưới dạng kim loại bạc Ag. Trong đó, L_C và W_C lần lượt là chiều dài và chiều rộng của ống dẫn sóng khoang hẹp nằm ngang; D_{in} , w_i lần lượt là chiều dài và rộng của hai cổng vào ghép nối với khoang hẹp nằm ngang của ống dẫn sóng; g_1 , g_2 là chiều rộng của khoảng ghép nối giữa các cổng và khoang hẹp nằm ngang; Δl_1 , Δl_2 và Δl_x là khoảng cách của các cổng vào so với đường trục trung tâm của khoang hẹp (đường nét đứt); d_A , d_B lần lượt là chiều dài của cổng vào A và B; D_{out} là chiều dài của cổng ra ống dẫn sóng.



Hình 2. 2. Sơ đồ nguyên lý của cổng logic plasmon được đề xuất

2.2.2. Kết quả mô phỏng các cổng logic và nhận xét

Giả sử trường điện từ từ các nguồn đầu vào A, B truyền theo hướng z tại vị trí $\pm \Delta l$ theo hướng x . Các đặc tính mode sóng của trường điện từ này được tính toán bằng cách sử dụng giải mode theo phương pháp EME với bề rộng mode là $w_t = 50nm$.

Bằng cách thay đổi thông số hình học của các khoang, có thể đạt được mức hiệu suất truyền để thực hiện được một số chức năng khác nhau của cổng logic toàn quang. Một số tham số cấu trúc hình học ban đầu được chọn là $g_1 = g_2 = 0nm$; $g_b = 3nm$; $w_t = w_c = 50nm$; $\Delta l_1 = \Delta l_2 = \Delta l = L_c / 2$.

A) Cổng XOR

Thông qua công cụ mô phỏng, có thể giám sát hiệu suất truyền tại các cổng ra để cấu kiện hoạt động đúng theo bảng chân lý của cổng logic XOR bằng cách thay đổi thông số kích thước d_A , d_B , L_C , D_{in} . Qua đó, chọn được các kích thước $d_A = d_B = 240nm$, $\Delta l_1 = \Delta l_2 = \Delta l_x = \Delta l = L_c / 2 = 170nm$ và $D_{in} = 780nm$ để nhận được dạng phân bố cường độ từ trường $|H_y|$ tại cổng logic ra X.

Tại cổng ra X, ta phân biệt được các mức công suất để xác định trạng thái logic là mức 0 hay mức 1. Trạng thái logic được xác định là mức 1 hoặc 0 nếu công suất đầu ra lớn hơn hoặc nhỏ hơn công suất đầu vào 10%. Khi hai đầu vào đều có mức logic là 0 thì đầu ra có mức logic là 0.

B) Cổng NOT

Trong trường hợp cổng XOR, nếu ta cố định đầu vào A là một cổng điều khiển luôn giữ trạng thái ở mức 1, khi đầu vào B = 1 ta nhận được đầu ra $X = 0$, và ngược lại khi đầu vào B = 0 thì ta nhận được đầu ra $X = 1$. Do đó, cặp B và X hoạt động như một cổng NOT logic.

C) Cổng OR

Thực hiện tương tự như đối với cổng logic XOR, có thể chọn được các thông số kích thước $d_A = d_B = 240nm$, $\Delta l_1 = \Delta l_2 = \Delta l = L_C / 2 = 170nm$, $\Delta l_x = 0nm$ và $D_{in} = 780nm$ để nhận được dạng phân bố cường độ từ trường $|H_y|$ tại cổng logic ra X là một cổng logic OR bởi tất cả các trạng thái đầu ra là đúng với bảng chân lý của cổng OR. Trong trường hợp này, việc xác định các mức 0 hoặc 1 tương tự như trường hợp cổng XOR ở trên.

D) Cổng thuận nghịch Feynman

Ta điều chỉnh một số thông số hình học để thực hiện chức năng của một cổng thuận nghịch Feynman. Thông qua công cụ mô phỏng, có thể giám sát hiệu suất truyền tại các cổng ra để cấu kiện hoạt động đúng theo bảng chân lý của cổng logic Feynman bằng cách thay đổi thông số kích thước d_A , d_B , L_C , D_{in} thì chọn được các thông số kích thước $d_A = d_B = 180nm$, và $D_{in} = 780nm$ để nhận được dạng phân bố cường độ từ trường $|H_y|$ tại cổng logic đầu ra X.

Dữ liệu mô phỏng cho thấy băng thông bước sóng tương đối lớn từ 1300nm đến 1620nm để cấu trúc đã đề xuất hoạt động chính xác như bảng chân lý của cổng Feynman. Do đó, để không làm mất tính tổng quát, có thể rút ra một kết luận chung rằng tất cả các cổng logic plasmonic được đề xuất có dải bước sóng rộng.

Bảng 2. 2. So sánh các công logic đề xuất với các công trình đã được công bố trên các tạp chí chuyên ngành

| Tiêu chuẩn | Cấu trúc đề xuất [J1] | Tài liệu tham khảo [52] | Tài liệu tham khảo [53] | Tài liệu tham khảo [54] |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Cấu trúc | Ống dẫn sóng plasmonic MIM | Bộ cộng hưởng vòng | Ống dẫn sóng Lithium Niobate | Ống dẫn sóng plasmonic MIM |
| Vật liệu | Ag, SiO ₂ , silicon | Silic, SiO ₂ | LiNbO ₃ | Ag, GaAsInP |
| Cấu kiện đề xuất | OR, XOR, NOT, FEYNMAN | NOT, OR, AND | FEYNMAN | AND, OR, NOT |
| Kích thước cấu kiện | 340nm x 1,073μm (OR, XOR, NOT GATE); 1,25 μm x 963nm (Feynman Gate) | > 10μm (đường kính vòng cộng hưởng) | 23,8mm x 0,63mm | 38,4μm x 0,66 μm |
| Bước sóng | 1550nm | 1550nm | 1550nm | 632,8nm |
| Băng thông | >300nm | 35nm | Không nhắc đến | Không nhắc đến |

Từ bảng 2.2 có thể nhận thấy rằng, cấu trúc đề xuất có ưu điểm vượt trội về kích thước cực kỳ nhỏ gọn, băng thông hoạt động lớn hơn so với các cấu trúc đã được công bố.

2.3. Kết luận Chương 2

Như vậy, trong Chương 2 đã trình bày hai đề xuất, bao gồm: Một là đề xuất thiết kế ống dẫn sóng lai ghép plasmonic HPW với ống dẫn sóng silic. Khi dịch chuyển nắp kim loại bạc ra khỏi vị trí tâm để tạo ra cấu trúc bất đối xứng một cách thích hợp thì cấu trúc ống dẫn sóng là một thiết bị quay và biến đổi trạng thái phân cực. Trong dải băng thông 100nm ở vùng cửa sổ thông tin quang thứ ba cho thấy cấu trúc quay phân cực có suy hao nhỏ, tầm truyền dài và kích thước thiết bị là rất nhỏ. Các cấu trúc HPW đề xuất có thể sử dụng trong các mạch tích hợp quang tốc độ cao với kích thước cỡ nano mét.

Hai là đề xuất thiết kế các cổng logic XOR, OR, NOT, cổng Feynman quang. Các cổng logic plasmonic dựa trên ống dẫn sóng MIM kích thước nano mét có cấu trúc đơn giản, kích thước nhỏ gọn và băng thông rộng để xây dựng các mạch tích hợp quang tử ở kích thước nano mét và các hệ thống thông tin quang.

CHƯƠNG 3. THIẾT KẾ CÁC BỘ LỌC BƯỚC SÓNG SỬ DỤNG ỐNG DẪN SÓNG PLASMONIC KÍCH THƯỚC NANO MÉT

Chương này trình bày về các đề xuất tạo ra các bộ lọc bước sóng trong cửa sổ bước sóng viễn thông và thông tin ánh sáng khả kiến, sử dụng ống dẫn sóng plasmonic kích thước nano mét theo cấu trúc MIM có độ rộng băng thông lớn, hiệu suất truyền cao và dung sai chế tạo lớn. Bao gồm:

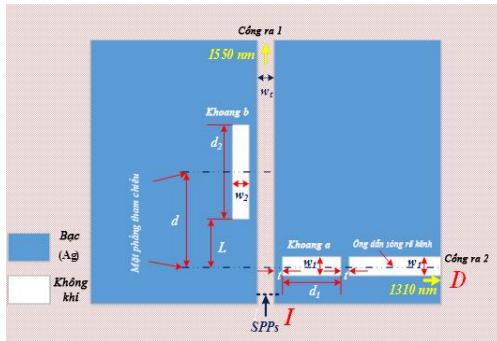
- a) Tạo ra một bộ lọc 2 băng 1310nm và 1550nm;
- b) Tạo ra bộ lọc 3 băng 1310nm, 1430nm và 1550nm;
- c) Tạo ra một bộ lọc bước sóng RGB cho thông tin VLC.

3.1. Thiết kế bộ lọc 2 băng sóng 1310nm và 1550nm dựa trên ống dẫn sóng nano plasmonic

Phần này đề xuất thiết kế bộ lọc bước sóng photonic nhỏ gọn dựa trên cấu trúc nanoplasmonic kim loại-điện môi-kim loại. Các kết quả nghiên cứu là chính xác bởi việc sử dụng thuyết ghép mode theo thời gian. Phương pháp mô phỏng số mô phỏng truyền mode riêng cũng được sử dụng cho quá trình thiết kế tổng thể. Các kết quả mô phỏng cho thấy hiệu quả truyền của bộ lọc tách sóng có hiệu quả đáng kể bởi việc lựa chọn chiều dài tối ưu của các khoang phản xạ hình chữ nhật. Cấu trúc đã đề xuất có tiềm năng lớn trong việc thiết kế các mạch tích hợp cực kỳ nhỏ gọn và có hiệu quả hoạt động cao trong các hệ thống thông tin quang.

3.1.1. Mô hình và nguyên lý thiết kế

3.1.1.1. Nguyên lý hoạt động và thiết kế cấu trúc hình học



Hình 3. 1 Sơ đồ bộ tách bước sóng plasmonic kích thước nano hai bước sóng dựa trên cấu trúc MIM

Hình 3.1 biểu diễn một bộ lọc bước sóng plasmonic hai cổng bao gồm một nanobus, hai ống dẫn sóng rẽ kênh kích thước

nano gọi là khoang a, khoang b và hai ống hình chữ nhật kích thước nano là các khoang kích thước cỡ nano.

Trong phương pháp mô phỏng EME, chế độ phân giải được thiết lập là $\Delta x = \Delta z = 5nm$ trong không gian hai chiều. Chiều rộng khe kim loại trong đường dẫn ống dẫn sóng được thiết lập là $w_1 = 50nm$; Chiều rộng của khoang a và khoang b được thiết lập ban đầu lần lượt là $w_1 = 60nm$ và $w_2 = 100nm$. Khoảng cách tham chiếu giữa khoang a và ống dẫn sóng rẽ kênh cũng như đường dẫn ống dẫn sóng được thiết lập là $t = 10nm$, khoảng cách giữa khoang b và đường dẫn ống dẫn sóng được thiết lập là $g = 20nm$ và khoảng cách tham chiếu $d = 490nm$. Sự tồn tại của sóng phân cực TM theo sự phân bố của mode plasmonic tại cổng đầu vào của đường dẫn ống dẫn sóng được làm rõ bằng phương pháp mô phỏng EME.

3.1.1.2. Tối ưu hóa các tham số cấu trúc

Quá trình thiết kế được thực hiện một cách chọn lọc để thấy rõ được hiệu suất truyền cao tại các khoang kích thước nano thông qua mô phỏng số. Bước đầu tiên, thiết kế khoang b theo chiều dọc với chiều dài d_2 sao cho bước sóng 1550nm cộng hưởng còn bước sóng 1310nm không cộng hưởng. Qua mô phỏng tìm được kích thước tối ưu là $d_2 = 0.68\mu m$, $d_1 = 0.82\mu m$

Như vậy, bộ lọc hai bước sóng 1310nm và 1550nm dựa trên cấu trúc ống dẫn sóng plasmonic MIM có kích thước nhỏ gọn, băng thông rộng, nhiễu xuyên âm thấp đã được đề xuất.

Bảng 3. 1. So sánh bộ tách kênh hai bước sóng với các công trình đã được công bố trên các tạp chí chuyên ngành

| Tiêu chuẩn | Cấu trúc đề xuất [C2] | Tài liệu tham khảo | Tài liệu tham khảo |
|------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
|------------|-----------------------|--------------------|--------------------|

| | | [76] | [77] |
|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Cấu trúc | Ống dẫn sóng plasmonic MIM | Ống dẫn sóng plasmonic MIM | Ống dẫn sóng lai ghép silicon |
| Vật liệu | Ag, không khí | Ag, không khí | Silicon, không khí |
| Cấu kiện đề xuất | Bộ tách kênh hai bước sóng | Bộ tách kênh hai bước sóng | Tách kênh hai bước sóng |
| Bước sóng làm việc | 1310nm, 1550nm | 700nm, 1800nm | 1310nm, 1550nm |
| Băng thông | 80nm - 100nm | Không nhắc đến | Không nhắc đến |
| Kích thước cấu kiện | 1,7 μm x 3,4 μm | 0,6 μm x 1,6 μm | 6 μm x 100 μm |
| Hiệu suất truyền tại cổng ra | -5dB (31,6%) | > 90% | Không nhắc đến |
| Suy hao hấp thụ | -1,8dB, -3,7dB | Không nhắc đến | Không nhắc đến |
| Nhiều xuyên âm | < -20dB | Không nhắc đến | -18dB |

Từ Bảng 3.1 có thể thấy rằng cấu trúc đề xuất khi so sánh với kết quả công bố ở tài liệu tham khảo [77] có cùng bước sóng hoạt động là 1310nm và 1550nm thì cấu trúc đề xuất có ưu điểm vượt trội về kích thước cực kỳ nhỏ gọn cũng như nhiều xuyên âm thấp hơn. Tuy nhiên, kết quả công bố ở tài liệu tham

khảo [76] có kích thước nhỏ gọn hơn, hiệu suất truyền cao hơn cấu trúc là do ống dẫn sóng được thiết kế cho dải sóng hoạt động tại 700nm và 1800nm. Điều này hoàn toàn dễ hiểu bởi vì hai dải bước sóng này cách xa nhau, do đó việc tách 2 dải này hoàn toàn không bị ảnh hưởng bởi nhiễu xuyên âm, chồng lẫn pha,... Bên cạnh đó, hai dải bước sóng này hoàn toàn không sử dụng phổ biến trong thông tin quang hiện nay.

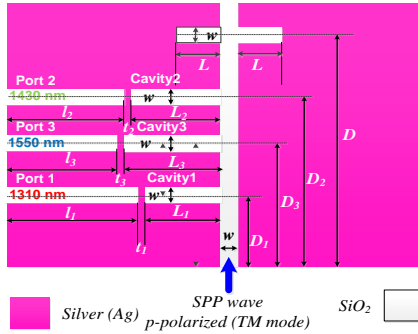
3.2. Bộ lọc 3 băng 1310nm, 1430nm và 1550nm dựa trên ống dẫn sóng nano plasmonic MIM

Phần này đề xuất thiết kế bộ lọc bước sóng nano plasmonic cho 3 dải bước sóng phổ biến trong của sổ viễn thông là 1310nm, 1430nm và 1550nm dựa trên các cấu trúc tách kênh trong ống dẫn sóng MIM sử dụng các bộ cộng hưởng Fabry-Perot hình chữ nhật và cặp ống dẫn sóng (double stub waveguide). Kết quả đã chứng minh rằng bộ lọc ba bước sóng plasmonic kích thước nano mét và bộ tách bước sóng 3dB này đã thực hiện hiệu quả các chức năng thêm/bớt/tách bước sóng trong các ứng dụng của thiết bị WDM, chẳng hạn như cho các mạng truy nhập quang hay các hệ thống tính toán quang có độ tin cậy cao ở chế độ viễn thông như mạng truy nhập quang và hệ thống tính toán quang.

3.2.1. Mô hình và nguyên lý thiết kế

Sơ đồ nguyên lý của bộ lọc 3 bước sóng đề xuất được mô tả trong hình 3.8. Cấu kiện bao gồm một ống dẫn sóng chính SiO₂ đặt theo phương thẳng đứng, một cặp ống dẫn sóng kích thước nano mét đối xứng được đặt theo phương nằm ngang và ba ống dẫn sóng SiO₂ hình chữ nhật kích thước nano mét đặt theo

phương nằm ngang được thiết kế để ghép nối có chọn lọc với từng dải bước sóng nhằm thực hiện chức năng tách kênh.



Hình 3. 2. Sơ đồ nguyên lý bộ lọc 3 bước sóng dựa trên cấu trúc ống dẫn sóng MIM. Tất cả ống dẫn sóng đều có chiều rộng w . Cặp ống dẫn sóng nano có chiều dài L cho mỗi nhánh. Ba khoang có tên là Cavity1, Cavity2, Cavity3 và 3 cổng ra có tên là port1, port2, port3

Bảng 3. 2. So sánh bộ tách kênh ba bước sóng với các công trình đã được công bố trên các tạp chí chuyên ngành

| Tiêu chuẩn | Cấu trúc đề xuất [J2] | Tài liệu tham khảo [92] | Tài liệu tham khảo [94] | Tài liệu tham khảo [97] |
|------------------|----------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Cấu trúc | Ống dẫn sóng plasmonic MIM | Ống dẫn sóng plasmonic MIM | Ống dẫn sóng plasmonic MIM | Ống dẫn sóng plasmonic MIM |
| Vật liệu | Ag, SiO_2 | Ag, SiO_2 | Ag, không khí | Ag, không khí |
| Cấu kiện đề xuất | Bộ tách kênh ba bước sóng và bộ chia bước sóng 3dB | Bộ tách kênh hai bước sóng | Bộ tách kênh ba bước sóng | Bộ tách kênh ba bước sóng |

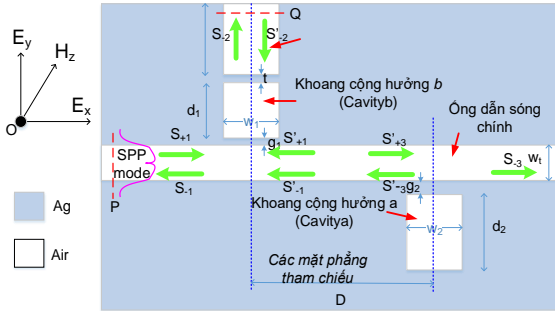
| | | | | |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Bước sóng làm việc | 1310nm, 1430nm và 1550nm | 1340nm, 1550nm | 712nm, 820nm và 928nm | 1220nm, 1281nm, 1389nm |
| Băng thông | 90nm, 80nm, 100nm | Không nhắc đến | Không nhắc đến | 54nm, 46nm, 53nm |
| Kích thước toàn cấu kiện | 1,77 μ m x 1,72 μ m | Chiều dài lớn hơn 2,25 μ m, chiều rộng không nhắc đến | 0,5 μ m x 0,9 μ m | > 3 μ m x 1,072 μ m |
| Hiệu suất truyền tại các cổng ra | -5.37dB (29%) (1310nm), -6.19dB (24%) (1430nm) và -5.68dB (27%) (1550nm) | - 4dB (1340nm), - 5dB (1550nm) | 70% | 26%, 25%, 31% |
| Suy hao hấp thụ | < -1dB | Không nhắc đến | Không nhắc đến | |
| Suy hao phản xạ | < - 10dB | Không nhắc đến | Không nhắc đến | |
| Nhiều xuyên âm | < -15dB | Không nhắc đến | Không nhắc đến | |
| Dung sai chế tạo | $\Delta w = \pm 2nm$ | Không nhắc đến | Không nhắc đến | Không nhắc đến |

Từ Bảng 3.2 cho thấy, cấu trúc đề xuất có ưu điểm vượt trội về kích thước nhỏ gọn, hiệu suất truyền đạt cao, suy hao do hấp thụ, phản xạ và nhiễu xuyên âm thấp. Đặc biệt là cấu trúc đề xuất có xem xét đến dung sai chế tạo cho phép, đây là yếu tố rất quan trọng trong quá trình chế tạo thực tế của cấu kiện. Tuy nhiên, khi so sánh với kết quả ở tài liệu tham khảo [94] thì cấu kiện đề xuất có kích thước lớn hơn, hiệu suất truyền đạt thấp hơn. Điều này là do ống dẫn sóng ở tài liệu tham khảo [94] được thiết kế hoạt động cho các dải bước sóng không được sử dụng phổ biến trong cửa sổ bước sóng viễn thông hiện nay, trong khi cấu trúc đề xuất được thiết kế hoạt động cho các dải bước sóng sử dụng phổ biến trong cửa sổ bước sóng viễn thông hiện nay.

3.3. Thiết kế bộ lọc bước sóng RGB để ứng dụng cho xử lý ảnh, trộn màu truyền hình, thông tin VLC

Trong phần này, một đề xuất về bộ lọc bước sóng RGB nhỏ gọn và thiết bị tách bước sóng plasmonic có kích thước nano mét dựa trên cấu trúc MIM. Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu suất truyền của bộ lọc rẽ kênh RGB có thể đạt hiệu quả đáng kể bằng cách áp dụng ống dẫn sóng khoang cộng hưởng Fabry-Perot kích thước nano được tối ưu hóa. Hiệu năng quang học là tương đối tốt với suy hao truyền $< -8\text{dB}$, mức tín hiệu trên nhiễu quang lớn hơn -10dB trong 30nm băng thông cho ba dải RGB. Cấu trúc được đề xuất có tiềm năng mạnh mẽ cho việc thiết kế các mạch tích hợp siêu nhỏ gọn hiệu quả cao cũng như các hệ thống thông tin quang ở kích thước nano.

3.3.1. Mô hình và nguyên lý thiết kế



Hình 3. 3. Sơ đồ của bộ lọc plasmonic dựa trên hiệu ứng đảo hầm cộng hưởng của khoang nano trong ống dẫn sóng MIM

Bảng 3. 3. So sánh bộ lọc bước sóng RGB với các công trình đã được công bố trên các tạp chí chuyên ngành

| Tiêu chuẩn | Cấu trúc đề xuất [J3] | Tài liệu tham khảo [122] | Tài liệu tham khảo [123] |
|--------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Cấu trúc | Ống dẫn sóng plasmonic MIM | Ống dẫn sóng polycarbonate | Sợi tinh thể quang tử PCF |
| Vật liệu | Ag, không khí | Polycarbonate, không khí | silicon-nitride (Si3N4) |
| Cấu kiện đề xuất | Bộ tách kênh ba bước sóng RGB | Bộ tách kênh ba bước sóng RGB | Bộ tách kênh ba bước sóng RGB |
| Kích thước toàn cấu kiện | 2,2 μm x 3,2 μm | 4 μm x 4 μm | 3 μm x 3 μm |
| Bước sóng làm việc | 465nm, 520nm và 640nm | 450nm, 530nm, 600nm | 450nm, 550nm, 650nm |

| | | | |
|-----------------------------|-------------------------|---------------------------|------------------------|
| Băng thông | 30nm cho cả 3 bước sóng | 11.3nm, 8.2nm, 5.6nm | 16.3nm, 6.1nm, 5.9nm |
| Suy hao truyền | -8dB | 0.901dB, 0.828dB, 1.246dB | 1.675dB, 1.7dB, 2.26dB |
| Tỷ số tín hiệu/nhiều | >10dB | Không nhắc đến | Không nhắc đến |

Từ Bảng 3.3 có thể thấy rằng, cấu trúc đề xuất có ưu điểm vượt trội về kích thước cực kỳ nhỏ gọn, băng thông hoạt động lớn, suy hao truyền dẫn thấp hơn nhiều so với các kết quả đã được công bố tại các tài liệu tham khảo [122] và [123].

3.4. Kết luận Chương 3

Chương 3 đã trình bày ba đề xuất, bao gồm: Một là, đề xuất cấu trúc bộ lọc hai bước sóng plasmonic trên cơ sở các bộ lọc rẽ kênh trong các ống dẫn sóng plasmonic MIM với sự có mặt của các khoang phản xạ ghép nối bề mặt. Mô phỏng EME cho thấy hiệu suất truyền của bộ tách kênh hai bước sóng 1310nm và 1550nm có thể đạt được hiệu quả tốt bằng cách chọn độ dài tối ưu đặc biệt của các khoang phản xạ.

Hai là, đề xuất một bộ lọc ba bước sóng sử dụng ống dẫn sóng MIM với các vách ngăn mỏng và một cặp ống kích thước nano mét đã thực hiện trong phần này giống như một bộ cộng hưởng FP và bộ lựa chọn bước sóng. Bộ lọc bước sóng có băng thông rộng và hiệu suất cao, kích thước nhỏ gọn cỡ nano mét và bộ chia bước sóng 3dB băng rộng đã được chứng minh chi tiết thông qua phương pháp mô phỏng EME. Để thiết bị đã đề xuất có băng thông hẹp hơn và khả năng chuyển đổi bước sóng cao thì dựa vào cơ chế cộng hưởng Fano dạng đường thẳng - đây là

phương pháp mới để thiết kế các phần tử có kích thước cỡ nano mét và khả năng chuyển đổi bước sóng cao trong thông tin quang và máy tính, đặc biệt là trong các hệ thống ghép kênh phân chia theo bước sóng và các hệ thống chuyển mạch.

Ba là, đề xuất bộ lọc bước sóng RGB dựa trên ống dẫn sóng plasmonic MIM có kích thước nano mét. Kết quả mô phỏng cho thấy bước sóng cộng hưởng của khoang hẹp có thể được điều khiển bằng cách điều chỉnh chiều dài của khoang. Hệ thống ống dẫn sóng plasmonic được đề xuất sẽ có những ứng dụng tiềm năng trong các thiết bị quang tích hợp cao, chẳng hạn như bộ lọc RGB, trong kỹ thuật WDM plasmonic đa kênh kích thước nano và trong hệ thống chuyển mạch quang.

Kết luận và hướng phát triển

Hai đóng góp khoa học của luận án:

1) Đề xuất thiết kế ống dẫn sóng lai ghép plasmonic HPW có chức năng quay phân cực và các cổng logic XOR, OR, NOT, cổng Feynman quang thuận nghịch dựa trên ống dẫn sóng plasmonic kích thước nano mét theo cấu trúc MIM.

2) Đề xuất thiết kế các ống dẫn sóng plasmonic kích thước nano mét theo cấu trúc MIM để tạo ra các bộ lọc bước sóng quang có độ rộng băng thông lớn, hiệu suất truyền cao và cho phép dung sai chế tạo phù hợp.

Hướng phát triển trong thời gian tới

Toàn bộ nội dung và các kết quả đạt được của luận án chỉ ra rằng hướng nghiên cứu ứng dụng ống dẫn sóng nano plasmonic trong ghép kênh phân chia theo bước sóng là khả thi và có tiềm năng cao. Hướng phát triển trong thời gian tới là triển khai thực hiện thử nghiệm các phương pháp đề xuất trên các mạch phần

cứng, từ đó có được các kết quả đo thực tế về hiệu suất làm việc, tỷ lệ suy hao do hấp thụ, do nhiễu xuyên âm cũng như kích thước thực tế của các mạch. So sánh giữa các kết quả đo đặc thực tế với kết quả lý thuyết và mô phỏng số ta sẽ có một đánh giá chính xác về các nội dung khoa học đã đề xuất cũng như khả năng áp dụng của các thiết bị đó vào các thiết bị hoặc các hệ thống thông tin liên lạc thực tế.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ

[C1] **Nguyễn Văn Tài**, Nguyễn Tấn Hưng, Đặng Hoài Bắc, Trương Cao Dũng, “Các cấu trúc ống dẫn sóng lai ghép Plasmonic - Silic sử dụng nắp kim loại bạc và quay phân cực cho mạch quang tử kích thước nano”, REV-ECIT 2017.

[C2] **Tai Nguyen Van**, Tuan Do Huu, Hung Nguyen Tan, Cao Dung Trung and Bac Dang Hoai, “Dualband-wavelength demultiplexer based on the nanoplasmonic MIM waveguides”, 2018 International Conference On Advanced Technologies For Communications, 2018, Ho Chi Minh City, Vietnam.

[J1] **Nguyen Van Tai**, Do Huu Tuan, Nguyen Tan Hung, Dang Hoai Bac and Trương Cao Dung, “All Optical logic gates base on nanoplasmonic MIM waveguides”, The University of Danang, Journal of Science and Technology: Issue on Information and Communications Technology, Vol.18, No.12.2, 2020.

[J2] **Nguyễn Văn Tài**, Trương Cao Dũng, Đặng Hoài Bắc, “Bộ tách ghép kênh RGB quang kích thước nano dựa trên các ống dẫn sóng MIM-Plasmonic”, Tạp chí Khoa học Công nghệ thông tin và Truyền thông, Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông, Số 4A.2020.

[J3] Cao Dung Trung, **Tai Nguyen Van**, Minh Tuan Trinh, Hoang Chu Manh, Hung Nguyen Tan and Bac Dang Hoai, “Triple-wavelength filter based on the nanoplasmonic metal-insulator-metal waveguides”, Optical and Quantum Electronics, Vol.53, No.223, 2021.