

**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**

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ**

**HÀ NỘI - 2022**

**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**

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ**

**NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC**

**PGS.TS. Đặng Hoài Bắc**

**TS. Trương Cao Dũng**

**HÀ NỘI - 2022**

## **LỜI CAM ĐOAN**

Tôi xin cam đoan rằng các kết quả khoa học được trình bày trong luận án này là thành quả nghiên cứu của tôi trong suốt thời gian làm nghiên cứu sinh và chưa từng xuất hiện trong các công bố của các tác giả khác. Các kết quả đạt được là hoàn toàn chính xác và trung thực.

**TÁC GIẢ LUẬN ÁN**

**Nguyễn Văn Tài**

## LỜI CẢM ƠN

Trước hết, tôi xin bày tỏ lời cảm ơn sâu sắc đến PGS. TS Đặng Hoài Bắc và TS. Trương Cao Dũng không những đã chỉ bảo nhiệt tình, tỉ mỉ về mặt khoa học mà còn luôn động viên, hỗ trợ tôi về mọi mặt để tôi có thể hoàn thành bản luận án này sau hơn 4 năm làm nghiên cứu sinh.

Qua đây, tôi cũng xin gửi lời cảm ơn đến Khoa Đào tạo Sau Đại học, Khoa Kỹ thuật Điện tử, Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông đã tạo mọi điều kiện thuận lợi cho tôi trong quá trình học tập và nghiên cứu.

Cuối cùng, tôi xin dành những lời yêu thương nhất đến gia đình tôi: bố mẹ, các em và đặc biệt là vợ và các con trai tôi. Sự động viên, giúp đỡ và sự hy sinh của họ là động lực giúp cho tôi vượt qua mọi khó khăn để hoàn thành luận án này.

## MỤC LỤC

|  |      |
|--|------|
| LỜI CAM ĐOAN .....   | i    |
| LỜI CẢM ƠN .....   | ii   |
| DANH MỤC CÁC THUẬT NGỮ VIẾT TẮT .....                                | vi   |
| CÁC KÝ HIỆU TOÁN HỌC.....  | viii |
| DANH MỤC BẢNG BIỂU .....   | ix   |
| DANH MỤC CÁC HÌNH.....   | x    |
| MỞ ĐẦU.....  | 1    |
| Tính cấp thiết của đề tài luận án .....                              | 1    |
| Mục tiêu nghiên cứu .....  | 3    |
| Nội dung nghiên cứu của luận án .....                                | 4    |
| Đối tượng, phạm vi nghiên cứu .....                                  | 4    |
| Phương pháp nghiên cứu .....   | 4    |
| Ý nghĩa khoa học và thực tiễn .....                                  | 4    |
| Bố cục của luận án .....   | 4    |
| CHƯƠNG 1. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VỀ ỐNG DẪN SÓNG PLASMONIC.....             | 6    |
| 1.1. Kỹ thuật ghép kênh theo bước sóng .....                         | 6    |
| 1.1.1. Một số cấu kiện ghép/tách kênh quang trong hệ thống WDM ..... | 7    |
| 1.1.2. Ưu điểm của WDM .....   | 8    |
| 1.2. Lý thuyết về plasmonic.....                                     | 9    |
| 1.2.1. Giới thiệu.....   | 9    |
| 1.2.2. Plasmonic .....   | 9    |
| 1.2.3. Phân cực plasmon bề mặt.....                                  | 11   |

|   |           |
|---|-----------|
| 1.2.4. Cộng hưởng plasmon bề mặt.....   | 14        |
| 1.3. Ống dẫn sóng plasmonic .....   | 14        |
| 1.3.1. Sơ đồ nguyên lý ống dẫn sóng khe hở .....  | 15        |
| 1.3.2. Ống dẫn sóng khe hở plasmonic 3D dưới bước sóng .....  | 16        |
| 1.3.3. Cấu trúc ống dẫn sóng plasmon IMI .....  | 19        |
| 1.3.4. Cấu trúc ống dẫn sóng plasmon MIM.....   | 20        |
| 1.4. Sự hình thành và truyền lan sóng plasmonic .....   | 20        |
| 1.5. Các phương pháp phân tích và mô phỏng sử dụng trong luận án .....  | 23        |
| 1.5.1. Phương pháp EME .....  | 23        |
| 1.5.2. Phương pháp FDTD .....   | 28        |
| Kết luận chương 1 .....   | 33        |
| <b>CHƯƠNG 2. ỐNG DẪN SÓNG LAI GHÉP PLASMONIC - SILIC CÓ CHỨC NẴNG QUAY PHÂN CỰC VÀ CÁC CỔNG LOGIC TOÀN QUANG KÍCH THƯỚC NANO MÉT.....</b> | <b>35</b> |
| 2.1. Ống dẫn sóng lai ghép plasmonic - silic có chức năng quay phân cực kích thước nano mét .....   | 35        |
| 2.1.1. Thiết kế cấu trúc và phân tích hoạt động .....   | 39        |
| 2.1.2. Kết quả mô phỏng và nhận xét.....  | 42        |
| 2.2. Các cổng logic toàn quang dựa trên ống dẫn sóng plasmonic MIM .....  | 48        |
| 2.2.1. Nguyên lý thiết kế các cổng logic plasmonic.....   | 50        |
| 2.2.2. Kết quả mô phỏng các cổng logic và nhận xét.....   | 52        |
| 2.3. Kết luận Chương 2 .....  | 58        |
| <b>CHƯƠNG 3. THIẾT KẾ CÁC BỘ LỌC BƯỚC SÓNG SỬ DỤNG ỐNG DẪN SÓNG PLASMONIC KÍCH THƯỚC NANO MÉT.....</b>                                    | <b>60</b> |

|  |     |
|--|-----|
| 3.1. Thiết kế bộ lọc 2 băng sóng 1310nm và 1550nm dựa trên ống dẫn sóng nano plasmonic .....           | 60  |
| 3.1.1. Mô hình và nguyên lý thiết kế.....  | 62  |
| 3.1.2. Mô phỏng số và phân tích đặc tính .....   | 67  |
| 3.2. Bộ lọc 3 băng 1310nm, 1430nm và 1550nm dựa trên ống dẫn sóng nano plasmonic MIM.....              | 70  |
| 3.2.1. Mô hình và nguyên lý thiết kế.....  | 72  |
| 3.2.3. Hiệu suất và đặc điểm của bộ chia ba băng sóng 3dB .....  | 80  |
| 3.3. Thiết kế bộ lọc bước sóng RGB để ứng dụng cho xử lý ảnh, trộn màu truyền hình, thông tin VLC..... | 86  |
| 3.3.1. Mô hình và nguyên lý thiết kế.....  | 90  |
| 3.3.2. Thiết kế tối ưu và mô phỏng .....   | 93  |
| 3.4. Kết luận Chương 3.....  | 97  |
| KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN .....   | 99  |
| ĐÓNG GÓP KHOA HỌC CỦA LUẬN ÁN.....   | 99  |
| HƯỚNG PHÁT TRIỂN TRONG THỜI GIAN TỚI.....  | 101 |
| DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ .....  | 102 |
| DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO .....  | 103 |

### DANH MỤC CÁC THUẬT NGỮ VIẾT TẮT

|         |   |   |
|---------|---|---|
| AWG     | Cách tử ống dẫn sóng được xếp mảng          | Arrayed Waveguide Grating                       |
| CMOS    | Bán dẫn ô xít kim loại bù                   | Complementary Metal Oxide Semiconductor         |
| EIT     | Hiệu ứng cảm ứng điện từ trong suốt         | electromagenically induced transparency         |
| EM      | Điện từ                                     | Electro Magnetic                                |
| EME     | Khai triển mode riêng                       | Eigen - Mode Expansion                          |
| FG      | Cổng Feynman                                | Feynman Gate                                    |
| FDTD    | Sai phân hữu hạn miền thời gian             | Finite Difference - Time Domain                 |
| FEM     | Phương pháp phần tử hữu hạn                 | Finite Element Method                           |
| FG      | Cổng Feynman                                | Feynman Gate                                    |
| FIB     | Chùm Ion hội tụ                             | Focused Ion-Beam                                |
| FP      | Giao thoa kế Fabry - Perot                  | Fabry-Perot                                     |
| FTTH    | Cáp quang đến tận nhà                       | Fiber to the home                               |
| HPW     | Ống dẫn sóng lai ghép plasmonic             | Hybrid Plasmonic Waveguide                      |
| IMI     | Điện môi - Kim loại - Điện môi              | Insulator - Metal - Insulator                   |
| LRHPICs | Các mạch tích hợp lai ghép plasmonic tầm xa | Long Range Hybrid Plasmonic Integrated Circuits |
| MGW     | Ống dẫn sóng khe hở kim loại                | Metal Gab Waveguide                             |
| MIM     | Kim loại - Điện môi - Kim loại              | Metal – Insulator - Metal                       |
| NSOM    | Kính hiển vi quang học quét trường gần      | Near-field Scanning Optical Microscope          |
| PML     | Lớp kết hợp hoàn hảo                        | Perfect-Matched Layer                           |
| RGB     | Đỏ - Xanh lam - Xanh lục                    | Red - Green - Blue                              |
| LR-SPP  | Phân cực plasmon bề mặt tầm xa              | Long Range SPP                                  |



|        |                                    |                                  |
|--------|------------------------------------|----------------------------------|
| SOI    | Silic trên nền chất cách điện      | Silicon On Insulator             |
| SP     |                                    | Surface Plasmon                  |
| SPGW   | Ống dẫn sóng khe hở plasmon bề mặt | Surface Plasmon Gap Waveguide    |
| SPP    | Phân cực plasmon bề mặt            | Surface Plasmon Polariton        |
| SR-SPP | Phân cực plasmon bề mặt tầm gần    | Short Range SPP                  |
| TE     | Sóng điện ngang                    | Transverse Electric              |
| TEM    | Sóng điện từ ngang                 | Transverse Electromagnetic       |
| TM     | Sóng từ ngang                      | Transverse Magnetic              |
| VCL    | Thông tin ánh sáng khả kiến        | Visible Light Communication      |
| WDM    | Ghép kênh phân chia bước sóng      | Wavelength Division Multiplexing |

## CÁC KÝ HIỆU TOÁN HỌC

| Ký hiệu           | Ý nghĩa                                   |
|-------------------|---|
| $\nabla$          | Toán tử Hamilton                          |
| $\nabla \times A$ | rotA                                      |
| $\nabla \cdot A$  | divA                                      |
| $\nabla^2$        | Toán tử Laplace                           |
| B                 | Cảm ứng từ                                |
| $c_0$             | Vận tốc của ánh sáng trong chân không     |
| D                 | Cảm ứng điện                              |
| E                 | Cường độ điện trường                      |
| H                 | Cường độ từ trường                        |
| J                 | Cường độ điện trường                      |
| k                 | Số sóng trong không gian tự do            |
| $k_0$             | Số sóng trong chân không                  |
| $k_x$             | Số sóng lan truyền theo chiều x           |
| $k_y$             | Số sóng lan truyền theo chiều y           |
| $k_z$             | Số sóng lan truyền theo chiều z           |
| L                 | Chiều dài ống dẫn sóng                    |
| $L_{Pro}$         | Chiều dài sóng lan truyền                 |
| n                 | Chỉ số chiết suất                         |
| $n_{eff}$         | Chỉ số chiết suất hiệu dụng               |
| Si                | Silic                                     |
| $SiO_2$           | Silic dioxit                              |
| $t_{Ag}$          | Chiều dày lớp kim loại bạc                |
| $t_{Si}$          | Chiều dày lớp silic                       |
| $t_{SiO_2}$       | Chiều dày lớp silic dioxit                |
| w                 | Chiều rộng ống dẫn sóng                   |
| $\beta$           | Hằng số truyền và thành phần theo hướng z |
| $\epsilon$        | Độ thẩm điện                              |
| $\lambda_0$       | bước sóng trong chân không                |
| $\mu$             | Độ thẩm từ                                |
| $\rho$            | Cường độ điện tích                        |
| $\sigma$          | Điện trở suất                             |
| $\omega$          | Tần số góc                                |

**DANH MỤC BẢNG BIỂU**

|  |    |
|--|----|
| Bảng 2. 1. So sánh ống dẫn sóng HPW với các công trình đã được công bố trên các tạp chí chuyên ngành.....            | 47 |
| Bảng 2. 2. So sánh các cổng logic đề xuất với các công trình đã được công bố trên các tạp chí chuyên ngành .....     | 57 |
| 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 ..... | 69 |
| 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 .....  | 85 |
| Bảng 3. 3. So sánh bộ lọc bước sóng RGB với các công trình đã được công bố trên các tạp chí chuyên ngành .....       | 96 |

## DANH MỤC CÁC HÌNH

|   |    |
|---|----|
| Hình 1. 1. Sơ đồ truyền dẫn quang.....  | 6  |
| Hình 1. 2. Bộ tách bước sóng dùng bộ lọc màng mỏng (a); Bộ tách bước sóng 2 kênh sử dụng bộ lọc giao thoa (b); Bộ tách nhiều bước sóng (c, d) .....   | 7  |
| Hình 1. 3. Hai môi trường bán vô hạn với hàm điện môi $\epsilon_1$ và $\epsilon_2$ phân cách nhau tại giao diện giữa hai mặt phẳng $z = 0$ .....  | 12 |
| Hình 1. 4. Nguyên lý kết hợp điện từ trường với phân cực plasmon bề mặt lan truyền dọc theo giao diện kim loại - điện môi. Điện trường $E_i$ suy giảm theo hàm mũ với khoảng cách $ z $ từ bề mặt. Dấu + và - lần lượt biểu diễn mật độ electron mức cao và mức thấp.....   | 13 |
| Hình 1. 5. Sơ đồ nguyên lý ống dẫn sóng khe hở .....  | 15 |
| Hình 1. 6. Sự phụ thuộc của (a) thành phần thực và (b) thành phần ảo của $\beta$ của SPPs vào chiều rộng khe hở $w$ và chỉ số khúc xạ $n_1$ ( $= 1.0; 1.5; 1.8$ ) của điện môi trong vùng dẫn.....  | 16 |
| Hình 1. 7. (a) Dạng hình học của ống dẫn sóng khe hở plasmonic 3D, mũi tên chỉ hướng lan truyền của mode sóng ánh sáng; (b) mặt cắt ngang của ống dẫn sóng khe hở plasmonic 3D; (c) - (e) tương ứng là các cấu trúc IMI, MIM và màng kim loại cắt ngang của ống dẫn sóng khe hở plasmonic 3D trong hình (b).....  | 18 |
| Hình 1. 8. (a) Chỉ số chiết suất hiệu dụng $n_{eff}$ của SR-SPP của cấu trúc ống dẫn sóng IMI (silic dioxit - bạc - silic dioxit) là một hàm của chiều rộng $h$ của vùng bạc ở giữa (đường nét liền), đường nét đứt biểu diễn chỉ số khúc xạ của silic dioxit. (b) Chỉ số chiết suất hiệu dụng $n_{eff}$ của G-SPP của cấu trúc ống dẫn sóng MIM (bạc - silic dioxit - bạc) là một hàm của chiều rộng $w$ của vùng bạc ở giữa (đường nét liền), đường nét đứt biểu diễn chỉ số khúc xạ của silic dioxit. (c) Chỉ số chiết suất hiệu dụng $n_{eff}$ của mode cạnh cơ sở của màng kim loại bạc cắt ngang được nhúng vào silic dioxit là một hàm của chiều dày $h$ của màng kim loại (đường nét liền), đường nét đứt biểu diễn chỉ số khúc xạ của silic dioxit ..... | 19 |
| Hình 1. 9. Nguyên lý tạo ra sóng tăng cường kích thích (a) trong điện môi do sự phản xạ toàn phần của ánh sáng (b) trong kim loại khi ánh sáng tới với góc bất kỳ   | 22 |

|  |    |
|--|----|
| Hình 1. 10. Các hệ số mode tại khớp nối .....  | 24 |
| Hình 1. 11. Cửa sổ mắt cáo Yee.....  | 29 |
| 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 $= 120 \text{ nm}$ có tác dụng biến đổi và quay mode phân cực .....   | 39 |
| Hình 2. 2. Hệ số chiết suất hiệu dụng $n_{eff}$ của mode lai ghép plasmonic tại lớp thủy tinh silic nằm ở giữa giao diện kim loại và lõi silic .....   | 40 |
| Hình 2. 3. Mô phỏng FEM các thành phần của trường điện từ của ống dẫn sóng lai ghép plasmonic với nắp kim loại bạc nằm đối xứng trên trục trung tâm của ống dẫn sóng tại vị trí truyền $z = 1 \mu\text{m}$ ứng với vị trí bắt đầu của nắp kim loại bạc.....  | 42 |
| Hình 2. 4. Mô phỏng FEM các thành phần của trường điện từ của ống dẫn sóng lai ghép plasmonic với nắp kim loại bạc nằm dịch phải $\delta = 120 \text{ nm}$ trên trục trung tâm của ống dẫn sóng tại vị trí truyền đầu vào .....  | 43 |
| Hình 2. 5. Mô phỏng FEM các thành phần của trường điện $E_x$ , $E_y$ của ống dẫn sóng lai ghép plasmonic với nắp kim loại bạc nằm dịch phải $\delta = 120 \text{ nm}$ trên trục trung tâm của ống dẫn sóng tại vị trí truyền đầu vào, giữa và cuối ống dẫn sóng silic .....  | 44 |
| Hình 2. 6. Mô phỏng EME sự truyền của các thành phần trường điện từ trong cấu trúc biến đổi trạng thái phân cực với dịch chuyển nắp một khoảng $\delta = 120 \text{ nm}$ trên trục trung tâm của ống dẫn sóng và tại tọa độ giữa chiều cao của ống dẫn sóng $Y = 0$ (theo trục chiều cao $y$ ): a) $E_x$ , b) $E_y$ , c) $H_x$ và d) $H_y$ ..... | 45 |
| Hình 2. 7. Đặc tính truyền phụ thuộc bước sóng trong dải $100 \text{ nm}$ của thiết bị quay phân cực .....   | 46 |
| Hình 2. 8. Sơ đồ nguyên lý của cổng logic plasmon được đề xuất.....  | 51 |
| Hình 2. 9. Phân phối mẫu từ trường của các mode SPP trong chế độ phân cực TM tại hai cổng vào A và B được giải theo phương pháp mô phỏng EME .....   | 52 |
| Hình 2. 10. Cổng logic XOR với một số trạng thái đầu vào (a) $A=0$ , $B=1$ ; (b) $A=1$ , $B=0$ ; (c) $A=B=1$ và (d) bảng chân lý .....   | 54 |
| Hình 2. 11. Cổng logic OR cho các trạng thái đầu vào (a) $A=0$ , $B=1$ ; (b) $A=1$ , $B=0$ ; (c) $A=B=1$ và (d) bảng chân lý .....   | 54 |

|  |    |
|--|----|
| Hình 2. 12. Cổng logic thuận nghịch Feynman với các trạng thái đầu vào (a) $A=0$ , $B=1$ ; (b) $A=1$ , $B=0$ ; (c) $A=1$ , $B=1$ và (d) bảng chân lý .....   | 55 |
| Hình 2. 13. Phổ bước sóng của quá trình truyền công suất đầu ra chuẩn hóa tại hai cổng ra X, Y của cổng logic Feynman được đề xuất trong cửa sổ bước sóng viễn thông với mọi trạng thái logic đầu vào .....  | 56 |
| Hình 3. 1 Sơ đồ bộ tách bước sóng plasmonic kích thước nano hai bước sóng dựa trên cấu trúc MIM .....  | 62 |
| Hình 3. 2. Phân bố mode plasmonic tại cổng vào được thực hiện bằng mô phỏng số .....   | 65 |
| Hình 3. 3. Mô phỏng EME về hiệu suất truyền phụ thuộc chiều dài của khoang b .   | 66 |
| Hình 3. 4. Mô phỏng EME về hiệu suất truyền phụ thuộc chiều dài của khoang a.  | 67 |
| Hình 3. 5. Phân bố trường điện của các mode plasmonic được mô phỏng đối với bộ tách kênh hai bước sóng 1310nm và 1550nm.....   | 68 |
| Hình 3. 6. Đáp ứng bước sóng hai cổng ra của bộ tách kênh plasmonic đã đề xuất   | 68 |
| Hình 3. 7. Hệ số hấp thụ phụ thuộc vào bước sóng .....   | 69 |
| Hình 3. 8. 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 .....  | 73 |
| Hình 3. 9. Đặc tính truyền của ống dẫn sóng chính được mô tả bởi mô phỏng số EME đối với các chiều rộng khác nhau của ống dẫn sóng tại bước sóng 1550nm ..   | 75 |
| Hình 3. 10. Đặc tính truyền của ống dẫn sóng chính thông qua mô phỏng số EME đối với ba băng sóng khi chiều rộng ống dẫn sóng chính $w = 50\text{nm}$ và phụ thuộc vào chiều dài của ống dẫn sóng chính: (a) ống dẫn sóng chính; (b) cặp ống dẫn sóng. Bên trong hình (b) là phân bố trường điện từ của ba băng sóng ..... | 76 |
| Hình 3. 11. Mô phỏng EME của phổ công suất truyền tại cổng ra Port2. Quá trình truyền được chuẩn hóa từ công suất vào. Hình ảnh lồng ghép trong hình là trường điện từ ở kích thước nano $50\text{nm} \times 210\text{nm}$ ở đầu ra Port2.....   | 78 |

|   |    |
|---|----|
| Hình 3. 12. Mô phỏng EME của các đường truyền chuẩn hóa là một hàm của bước sóng đối với ba cổng ra có sự đóng góp ( $P_1, P_2, P_3$ ) và không có sự đóng góp ( $P_1', P_2', P_3'$ ) của cặp ống dẫn.....  | 80 |
| Hình 3. 13. Phân bố biên độ từ trường $ H_y $ của các mode plasmonic được mô phỏng cho ba băng sóng (a) 1310nm, (b) 1430nm, (c) 1550nm đối với bộ lọc ống dẫn sóng plasmonic đề xuất. Hình (d), (e), (f) biểu diễn sự giam giữ ánh sáng tại khoang 1, khoang 2, khoang 3 tương ứng với các bước sóng 1200nm, 1650nm và 1800nm. Thang chia các trục đơn vị $\mu m$ ..... | 81 |
| Hình 3. 14. Phân bố biên độ từ trường $ H_y $ của các mode plasmonic được mô phỏng cho ba băng sóng (a) 1310nm, (b) 1430nm, (c) 1550nm và (d) sơ đồ cấu trúc của bộ chia bước sóng 3dB đề xuất. Thang chia các trục đơn vị $\mu m$ .....  | 81 |
| Hình 3. 15. Đáp ứng bước sóng của ba cổng ra đối với bộ lọc plasmonic đề xuất...82  |    |
| Hình 3. 16. Đặc tính truyền quang phụ thuộc vào dung sai chiều rộng bốn cổng ra (a) Port1 tại bước sóng 1310nm, Port2 tại bước sóng 1430nm, Port3 tại bước sóng 1550nm, và (d) hấp thụ và phản xạ toàn phần tại ba băng sóng đối với ba cổng ra.83  |    |
| Hình 3. 17. Các đặc tính truyền quang phụ thuộc vào các chỉ số khác nhau của vật liệu cách điện tại ba cổng ra: (a) bước sóng 1310nm, (b) bước sóng 1430nm, (c) bước sóng 1550nm và (d) hấp thụ toàn phần và công suất toàn phần tại ba băng sóng đối với ba cổng ra. $\Delta n = 0$ tương ứng với silica.....  | 84 |
| Hình 3. 18. Sơ đồ nguyên lý phía phát của hệ thống VCL .....  | 87 |
| Hình 3. 19. Sơ đồ nguyên lý phía thu của hệ thống VCL .....   | 87 |
| Hình 3. 20. Sơ đồ của bộ lọc plasmonic dựa trên hiệu ứng đảo hầm cộng hưởng của khoang nano trong ống dẫn sóng MIM .....  | 91 |
| Hình 3. 21. Phổ truyền qua của cấu trúc ống dẫn sóng MIM cho các chiều dài khoang $d$ khác nhau với $g = 10\text{nm}$ và $w = 50\text{nm}$ .....  | 93 |
| Hình 3. 22. (a) Quang phổ truyền qua với sự phân tách khoang-khoang khác nhau trong hệ thống ống dẫn sóng ghép đôi khoang với $d_1 = d_2 = 180\text{ nm}$ , $g = 10\text{ nm}$ và $w$   |    |

= 50 nm. (b) Hình ảnh mô phỏng sự phân bố trường của bước sóng đỉnh trong suốt trong ống dẫn sóng ghép khoang kép với  $D = 110$  nm .....94

Hình 3. 23. (a) Sơ đồ nguyên lý của một bộ tách kênh ba bước sóng plasmonic, các tham số được tối ưu  $D_1 = 209$  nm,  $D_2 = 241$  nm và  $D_3 = 304$  nm. (b,c,d) Phân bố trường của  $|H_y|$  tương ứng với các bước sóng 465 nm, 520 nm và 640 nm. (e) Đặc tính truyền dẫn của quang phổ truyền qua của ống dẫn sóng tách ba kênh .....95



## 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. Có một số phương pháp để nâng cao dung lượng của các lưu lượng sóng mang trong các mạng thông tin cáp sợi quang bởi các cấu trúc ghép kênh, chẳng hạn ghép kênh phân chia theo bước sóng (WDM) [1], điều chế đa mức [2], ghép kênh phân chia theo phân cực (PDM) [3]. Gần đây, một số cách tiếp cận mới đã được đề xuất bằng các hệ thống truyền dẫn đa sóng mang để nâng cao tốc độ lên cỡ Terabit/s [4], [5]. Tuy vậy, công nghệ WDM vẫn đóng vai trò quan trọng để nâng cao dung lượng truyền dẫn các kênh quang. Các lưu lượng sóng mang trong các hệ thống WDM cần được phối ghép và kết cuối tại các thiết bị đầu cuối như các điốt laser, các bộ tách sóng quang hoặc được xử lý tại các thiết bị chuyển mạch (như bộ ghép kênh xen kẽ quang và bộ chuyển mạch lựa chọn bước sóng). Một số cấu trúc quang tử silic được sử dụng để thiết kế các bộ ghép/phân kênh bước sóng gồm các bộ lọc màng mỏng, các bộ cộng hưởng vòng hay các cách tử ống dẫn sóng được xếp mảng (AWG). Tuy nhiên, những thiết bị như vậy không hỗ trợ hoạt động tại các cấu trúc cỡ nano, trong khi các mạch kích thước nano lại đang là một xu hướng đầy hứa hẹn và sẽ bùng nổ cho các mạch và cấu kiện quang tử tích hợp trong tương lai [6]. Để khắc phục nhược điểm này, một trong những phương pháp tối ưu và mới nhất hiện nay là dựa vào hiệu ứng plasmonic để tạo ra các ống dẫn sóng trong cấu kiện tách/ghép kênh quang tốc độ cao có kích cỡ dưới bước sóng để bắt giữ và dẫn các mode plasmonic [7], [8]. Plasmonic học giờ đang trở thành một chủ đề sôi động của các nghiên cứu liên ngành, tụ hợp vật lý, hóa học, khoa học vật liệu, khoa học năng lượng và hứa hẹn cho nhiều ứng dụng trong tương lai gần [9].

Trải qua hàng thập kỷ, quang tử học silic đã đóng vai trò chính trong các thiết bị xử lý thông tin và sự phát triển của các cấu kiện quan trọng nhằm khai thác

tính chất vật lý độc đáo của nó. Ngoài ra, cấu kiện chính trong điện tử học bán dẫn ô xít kim loại bù (CMOS) có vai trò lớn trong các cấu kiện quang tử silicon [10]. Tuy nhiên, kích thước tối thiểu của thiết bị quang tử silicon bị hạn chế bởi giới hạn nhiễu xạ sóng ánh sáng là lớn khi so sánh với các thiết bị CMOS. Để giảm kích thước của các thiết bị quang tử, cần quan tâm đến các cấu kiện dựa trên cấu trúc kim loại kích thước nano có khả năng hỗ trợ các mode plasmonic [10, 11, 12]. Khi thiết kế các cấu kiện quang, cụ thể ở đây là ống dẫn sóng quang có cấu trúc hình học và kích thước nano thì có một sự đánh đổi giữa việc bắt giữ mode và chiều dài truyền. Lưu ý rằng, sự phát triển của nền tảng plasmonic dựa trên lớp điện môi silic cho phép tích hợp hiệu quả công nghệ CMOS với các cấu kiện plasmonic kích cỡ nano. Nền tảng như vậy cho phép phát triển các chip xử lý gồm các ống dẫn sóng plasmonic có khả năng truyền đồng thời cả tín hiệu điện và quang. Hơn thế nữa, sự nâng cao đáng kể và định xứ của các trường điện từ trong các mode plasmonic cho phép tích hợp cực cao các mạch plasmonic lai ghép CMOS. Các mạch điện tử và quang tử silic dựa trên công nghệ chế tạo CMOS có thể được chế tạo tại các kích thước dưới 100nm. Ngược lại, bước sóng ánh sáng được sử dụng trong các mạch quang tử có kích thước cỡ 500nm đến 1000nm, chẳng hạn như các cửa sổ bước sóng của các hệ thống viễn thông quang 1310nm, 1550nm hoặc trong thông tin ánh sáng khả kiến (VLC).

Khi kích thước của một thành phần quang gần với bước sóng ánh sáng, sự truyền ánh sáng bị che khuất bởi hiện tượng nhiễu xạ sóng ánh sáng [13], do đó các cấu trúc quang gồm thấu kính, sợi quang, các mạch tích hợp quang bị giới hạn kích thước tối thiểu. Các mode plasmon bề mặt (SPs) cung cấp khả năng bắt giữ ánh sáng với kích thước rất nhỏ và nó được dẫn trong cấu kiện có cấu trúc cỡ nano. Tương tác cộng hưởng giữa điện từ - dao động điện tích gần bề mặt của kim loại và trường điện từ của ánh sáng tạo ra các plasmon bề mặt và kết quả thành các thuộc tính khá độc đáo. Các SP bị ràng buộc giữa bề mặt kim loại - điện môi, ở đó trường điện từ bị suy giảm theo hàm mũ trong cả môi trường xung quanh. Chiều dài suy giảm của các SP vào trong kim loại được xác định bởi độ sâu vỏ bề mặt (skin

depth). Tính chất này của các SP cung cấp khả năng định xứ và dẫn ánh sáng trong các cấu trúc kim loại dưới bước sóng và nó có thể được sử dụng để tạo ra các mạch quang - điện tử thu nhỏ với các cấu kiện dưới bước sóng [14]. Những mạch quang - điện tử như ống dẫn sóng [15], các bộ chuyển mạch [16], các bộ điều chế [17], các bộ phối ghép [18] có thể truyền các tín hiệu quang tới các phần khác nhau của mạch. Những đặc tính đáng quan tâm này làm cho plasmonic có tiềm năng ứng dụng lớn trong các mạch tích hợp quang tử kích cỡ nano cũng như các thiết bị quang - điện tử.

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. Điều này là do chỉ mode từ ngang TM được bắt giữ hiệu quả gần với giao diện kim loại/điện môi trong khi mode TE không được dẫn trong cơ chế giả hạt plasmon bề mặt SPP. 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 cổng 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.

### **Nội dung nghiên cứu của luận án**

Nghiên cứu mạch quang tử được phối ghép hiệu quả giữa một ống dẫn sóng silic và ống dẫn sóng lai ghép plasmonic, bộ phân cực thông mode TM và chặn mode TE; nghiên cứu các cổng logic quang sử dụng để tách/ghép bước sóng trong kỹ thuật WDM; nghiên cứu các cấu trúc mạch plasmonic lọc bước sóng ở cửa sổ bước sóng viễn thông và thông tin ánh sáng khả kiến.

### **Đối tượng, phạm vi nghiên cứu**

Nghiên cứu bộ quay phân cực dựa trên ống dẫn sóng plasmonic; các cổng logic quang XOR, OR, NOT và cổng Feynman quang; các bộ lọc bước sóng ở cửa sổ bước sóng viễn thông và thông tin ánh sáng khả kiến dựa trên ống dẫn sóng plasmonic có kích thước nano được ứng dụng trong kỹ thuật WDM.

### **Phương pháp nghiên cứu**

Nghiên cứu các công trình khoa học có liên quan đến nội dung, đối tượng nghiên cứu của luận án đã được công bố trên các tạp chí khoa học có uy tín trong nước và trên thế giới; sử dụng các công cụ phân tích và mô phỏng có độ chính xác cao, được cộng đồng khoa học trên thế giới sử dụng trong nghiên cứu và đã được thương mại hóa như FDTD, EME, FEM.

### **Ý nghĩa khoa học và thực tiễn**

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.

### **Bố cục của luận án**

Nội dung luận án được trình bày trong 3 chương. Các kiến thức cơ sở liên quan đến nội dung của luận án được trình bày trong Chương 1. Các đóng góp khoa học của luận án được trình bày trong Chương 2, Chương 3. Cụ thể:

**Chương 1.** Cơ sở lý thuyết về ống dẫn sóng plasmonic và công cụ thiết kế, mô phỏng ống dẫn sóng plasmonic. Chương này trình bày và tổng hợp một cách hệ thống, ngắn gọn về kỹ thuật WDM, plasmonic và ứng dụng của nó trong WDM. Các cấu trúc của ống dẫn sóng plasmonic và vấn đề truyền sóng trong ống dẫn sóng, các mô hình tính toán tham số của sóng truyền lan trong ống dẫn sóng. Các công cụ phân tích và mô phỏng ống dẫn sóng plasmonic được phân tích chi tiết.

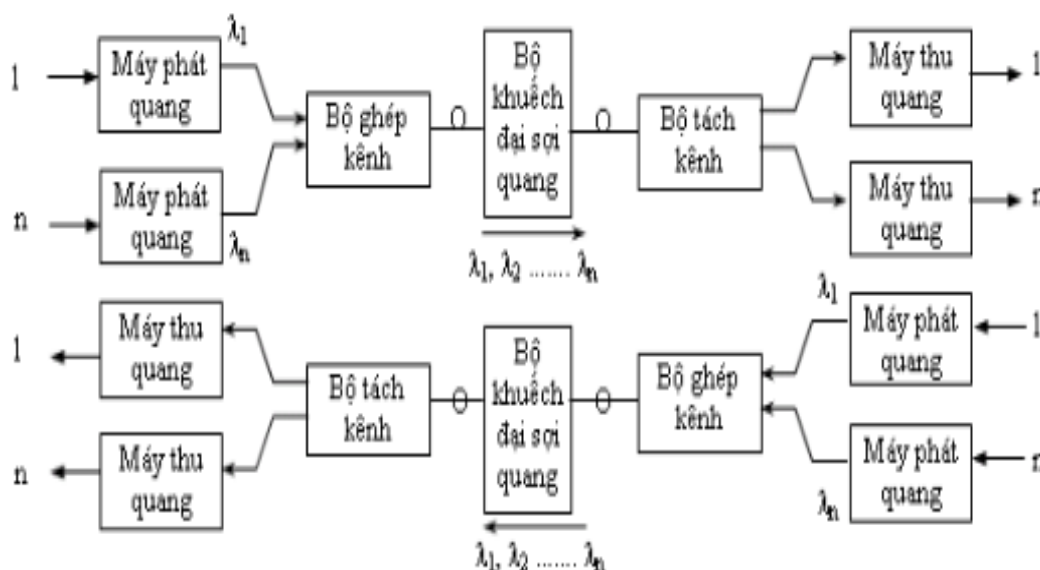
**Chương 2.** Ống dẫn sóng lai ghép plasmonic - silic có chức năng quay phân cực và các cổng logic toàn quang kích thước nano mét. Chương này đề xuất thiết kế và mô phỏng ống dẫn sóng lai ghép plasmonic và một ống dẫn sóng silic bởi phủ một lớp kim loại bạc lên trên ống dẫn sóng silic có chức năng quay phân cực mode plasmonic tại cửa sổ bước sóng 1550nm; các cổng logic plasmonic gồm XOR, OR, NOT, Feynman sử dụng phương pháp tính toán triển khai mode riêng EME để tối ưu tham số cấu trúc cũng như việc thực hiện các chức năng logic với hiệu suất truyền mode plasmonic cao. Bằng cách xếp tầng và kết hợp các cổng 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.

**Chương 3.** Thiết kế các bộ lọc bước sóng sử dụng ống dẫn sóng plasmonic kích thước nano mét. Chương này đề xuất các bộ lọc bước sóng dựa trên ống dẫn sóng plasmonic kích thước nano mét theo cấu trúc MIM để tạo ra các bộ lọc băng thông quang có độ rộng băng thông lớn, kích thước nhỏ gọn. Bao gồm: bộ lọc 2 băng 1310nm và 1550nm với chất lượng cao, kích thước nhỏ gọn; bộ lọc 3 băng 1310nm, 1430nm và 1550nm sử dụng ống dẫn sóng nanoplasmonic theo cấu trúc MIM với chất lượng cao nhờ bố trí thêm một màng chắn để nâng cao hiệu suất truyền, kích thước nhỏ gọn và cho phép dung sai chế tạo phù hợp; và bộ lọc RGB với ba băng bước sóng trong thông tin ánh sáng khả kiến, ứng dụng cho xử lý ảnh, trộn màu truyền hình, thông tin VLC.

## CHƯƠNG 1. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VỀ ỚNG 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.



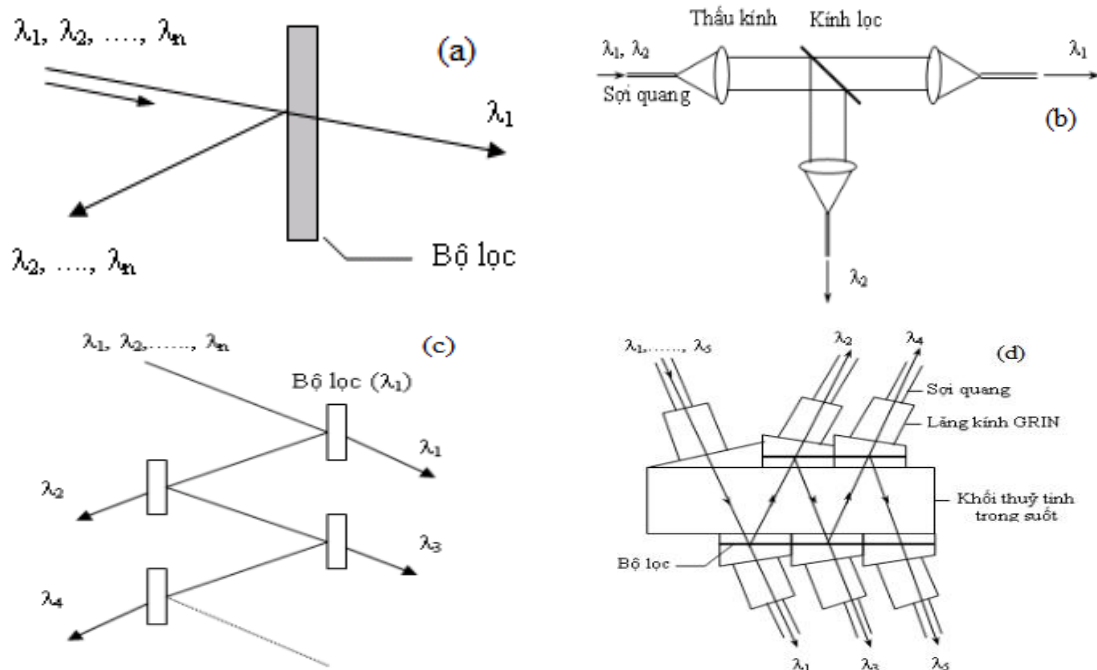
Hình 1. 1. Sơ đồ truyền dẫn quang

Đặc điểm nổi bật của hệ thống WDM là tận dụng hữu hiệu nguồn tài nguyên băng rộng trong khu vực tổn hao thấp của sợi quang đơn mode, nâng cao rõ rệt dung lượng truyền dẫn của hệ thống đồng thời hạ giá thành của kênh dịch vụ xuống mức thấp nhất. Ở đây việc thực hiện ghép kênh sẽ không có quá trình biến đổi điện nào. Mục tiêu của ghép kênh quang là nhằm để tăng dung lượng truyền dẫn. Ngoài ý nghĩa đó việc ghép kênh quang còn tạo ra khả năng xây dựng các tuyến thông tin quang có tốc độ rất cao. Khi tốc độ đạt tới hàng trăm Gbit/s, bản thân các mạch điện tử sẽ không thể đảm bảo đáp ứng được xung tín hiệu cực kỳ hẹp; thêm vào đó, chi phí cho các giải pháp trở nên tốn kém và cơ cấu hoạt động quá phức tạp đòi hỏi công nghệ rất cao. Kỹ thuật ghép kênh quang theo bước sóng ra đời đã khắc phục được những hạn chế này. Công nghệ WDM phát triển theo xu hướng mà sự riêng rẽ

bước sóng của kênh có thể là một phần rất nhỏ của 1nm, điều này dẫn đến các hệ thống ghép kênh theo bước sóng mật độ cao (DWDM). Các thành phần thiết bị trước đây chỉ có khả năng xử lý từ 4 đến 16 kênh, mỗi kênh hỗ trợ luồng dữ liệu đồng bộ tốc độ 2,5 Gbit/s cho tín hiệu mạng quang phân cấp số đồng bộ (SDH/SONET). Công nghệ DWDM đã sớm phát triển trong các thiết bị nhằm hỗ trợ cho việc truyền nhiều hơn các kênh quang. Các hệ thống với hàng trăm kênh giờ đây đã sẵn sàng được đưa vào sử dụng, cung cấp một tốc độ dữ liệu kết hợp hàng trăm Gbit/s và tiến tới đạt tốc độ Tbit/s truyền trên một sợi đơn. Nguyên lý truyền dẫn tín hiệu quang được mô tả trong hình 1.1.

### 1.1.1. Một số cấu kiện ghép/tách kênh quang trong hệ thống WDM

Các cấu kiện ghép/tách kênh quang trong hệ thống WDM (thể hiện trong hình 1.1) được chế tạo dựa trên hai phương pháp công nghệ khác nhau là: các thiết bị có bộ lọc và các thiết bị phân tán góc.



Hình 1. 2. Bộ tách bước sóng dùng bộ lọc màng mỏng (a); Bộ tách bước sóng 2 kênh sử dụng bộ lọc giao thoa (b); Bộ tách nhiều bước sóng (c, d)

Thiết bị phân tán góc đồng thời đưa ra tất cả các bước sóng.

Thiết bị lọc chỉ hoạt động mở cho một bước sóng (hoặc một nhóm các bước sóng) tại một thời điểm, nhằm để tách ra một bước sóng trong nhiều bước sóng. Để

thực hiện thiết bị hoàn chỉnh, ta phải tạo ra cấu trúc lọc theo tầng. Trong giới hạn của luận án, thực hiện nghiên cứu, đề xuất một số cấu kiện lọc bước sóng có kích thước nano mét dựa trên hiệu ứng plasmonic để ứng dụng trong kỹ thuật WDM. Một số cấu kiện tách/ghép kênh bước sóng được mô tả trong các hình 1.2.

Khi thực hiện tách kênh cần phải cách ly kênh quang thật tốt với các bước sóng khác bằng cách thiết kế các bộ tách kênh thật chính xác, các bộ lọc quang nếu được sử dụng phải có bước sóng cắt chính xác, dải làm việc ổn định; đảm bảo yêu cầu về công suất truyền, độ rộng kênh, nhiễu xuyên kênh và kích thước cực kỳ nhỏ gọn để tích hợp trong các mạch quang tử có kích thước nhỏ gọn.

### **1.1.2. Ưu điểm của WDM**

Trải qua quá trình nghiên cứu và triển khai trong thực tế, mạng thông tin quang cũng như mạng quang sử dụng công nghệ WDM đã cho thấy những ưu điểm:

- Dung lượng truyền dẫn lớn: Sử dụng công nghệ WDM có nghĩa là trong một sợi quang có thể ghép rất nhiều kênh quang (có bước sóng khác nhau) để truyền đi, mỗi kênh quang lại ứng với một tốc độ bit nào đó (TDM). Hiện nay đã thử nghiệm thành công hệ thống WDM 80 bước sóng với mỗi bước sóng mang tín hiệu TDM tốc độ 2,5Gbit/s, tổng dung lượng hệ thống là 200Gbit/s. Trong khi đó với hệ thống TDM, tốc độ bit mới chỉ đạt tới STM-256 (dung lượng 40 Gbit/s).

- Tính trong suốt của mạng WDM: Do công nghệ WDM thuộc kiến trúc lớp mạng vật lý nên có thể hỗ trợ các định dạng số liệu và thư thoại chuyên mạch kênh, ATM, Gigabit Ethernet, ESCON, IP... Trong một dải băng thông xác định, mạng có thể truyền các dịch vụ với bất kỳ tốc độ nào và với bất kỳ giao thức nào. Như vậy nhà cung cấp dịch vụ có thể đáp ứng nhiều dịch vụ khác nhau bằng cách sử dụng một cơ sở hạ tầng duy nhất. Như vậy sẽ rất có lợi về mặt kinh tế và vẫn có thể triển khai các dịch vụ mới một cách hiệu quả, nhanh chóng mà không làm ảnh hưởng gì đến các dịch vụ trước đó.

- 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: Bằng cách thay đổi phương thức định tuyến và phân bổ bước sóng trong mạng WDM, có thể dễ dàng quản lý và cấu hình lại hệ thống một cách linh hoạt. Hiện nay, WDM là công nghệ duy nhất cho phép xây dựng mô hình mạng truyền tải quang OTN (Optical Transport Network) cho phép xây dựng mạng quang trong suốt.

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 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 các cấu trúc của ống dẫn sóng plasmonic và vấn đề truyền sóng trong ống dẫn sóng; các mô hình tính toán tham số của sóng truyền lan trong ống dẫn sóng; trình bày các phương pháp phân tích và mô phỏng ống dẫn sóng.

### **1.2.2. Plasmonic**

Có nhiều cấu trúc cỡ nano mét, trong đó có các cấu trúc kim loại cỡ nano mét, nó biểu thị rất nhiều đặc tính quang tử hấp dẫn và phức tạp. Một trong những đặc tính hấp dẫn và mang lại nhiều hứa hẹn trong các cấu trúc này là cộng hưởng điện tử do sự dao động tập thể của các electron dẫn, **gọi là plasmon**.

Các mode plasmon tồn tại ở các cấu trúc hình học và trong các kim loại khác nhau, như trong các kim loại quý vàng và bạc. Trong trường hợp cụ thể, plasmon

được kích thích bởi ánh sáng, điều này dẫn đến sự hấp thụ và tán xạ ánh sáng mạnh lên và làm gia tăng trường điện từ trong một vùng xác định.

Plasmon đã bắt đầu được quan tâm nghiên cứu từ thế kỷ 20, đầu tiên là các nhà khoa học Zenneck (1907), Mie (1908), Sommerfeld (1909) và các nhà khoa học khác. Plasmonic học giờ đang trở thành một chủ đề sôi động của các nghiên cứu liên ngành, tụ hợp vật lý, hóa học, khoa học vật liệu, khoa học năng lượng và hứa hẹn cho nhiều ứng dụng trong tương lai gần [9].

Ngày nay, nhu cầu ngày càng tăng về tốc độ truyền tải và xử lý thông tin, do vậy đã thúc đẩy những tiến bộ to lớn ngành công nghiệp điện tử Silic. Đó là sự ra đời những thiết bị điện tử có tốc độ xử lý nhanh hơn, hiệu suất cao hơn và nhỏ gọn hơn. Hiện nay, có 2 vấn đề nan giải nhất cản trở đáng kể việc tăng tốc độ bộ xử lý là sinh nhiệt và thời gian trễ RC liên quan đến liên kết điện tử [19, 20]. Mặt khác, kết nối quang học có khả năng truyền tải một lượng dữ liệu lớn và cung cấp giải pháp mới hấp dẫn để tránh vấn đề về sinh nhiệt và thời gian trễ RC. Lựa chọn quang có thể đặc biệt hấp dẫn cho các chip trong tương lai với nhiều kiến trúc phân tán hơn trong đơn vị tính toán điện tử tốc độ cao kết nối với các đường truyền dẫn tốc độ cao. Tuy nhiên, với lựa chọn này là không khả thi do kích thước lớn, không phù hợp giữa các phần tử điện tử và quang tử điện môi. Các thiết bị quang tử điện môi bị giới hạn về kích thước do các định luật cơ bản của nhiễu xạ đối với nửa bước sóng ánh sáng và có xu hướng bậc 1 hoặc bậc 2 của cường độ lớn hơn bản sao điện tử kích thước nano của chính nó. Điều này rõ ràng là kích thước không phù hợp giữa các phần tử điện tử và quang tử điện môi, đây là thách thức chính mà công nghệ gặp phải. Tiến bộ của khoa học sẽ phát triển kỹ thuật tạo ra thiết bị mạch điện tử nhỏ gọn hoàn toàn mới, có thể dễ dàng truyền tải thông tin giữa các thiết bị có kích thước nano tại tần số quang học và thu hẹp khoảng cách giữa thế giới điện tử kích thước nano và quang tử kích thước micromet. Gần đây, công nghệ plasmonic nổi lên để giải quyết yêu cầu này. 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. Cấu trúc liên kết của bề mặt kim loại và điện môi xác định các đặc tính truyền dẫn các mode SPP tại các bề mặt phẳng, cong, bề mặt đơn và đa bề mặt, bao gồm cả các mode SPP của các chuỗi hạt phức tạp và các cấu trúc kim loại kích thước nano. Các mode SPP có khả năng tập trung các trường điện từ vượt quá giới hạn nhiễu xạ (trên phạm vi nano) đồng thời tăng cường trường cục bộ.

**Điều kiện để xảy ra plasmon bề mặt:** xem xét một mô hình cổ điển gồm hai môi trường không từ tính bán vô hạn có hằng số điện môi  $\epsilon_1$  và  $\epsilon_2$ , hai môi trường này phân cách nhau bởi mặt phân giới giữa hai mặt phẳng tại  $z = 0$  (Hình 1.3). Phương trình Maxwell đầy đủ trong trường hợp không có nguồn ngoài được viết như sau [21]:

$$\nabla \times \mathbf{H}_i = \epsilon_i \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E}_i \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}_i = -\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{H}_i \quad (1.2)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon_i \mathbf{E}_i) = 0 \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot \mu_i \mathbf{H}_i = 0 \quad (1.4)$$

Với  $i$  là chỉ số môi trường,  $i = 1$  khi  $z < 0$ ;  $i = 2$  khi  $z > 0$ .

Giải phương trình từ (1.1) đến (1.4) có thể phân loại được hai mode điện từ phân cực s (mode TE) và phân cực p (mode TM), điện trường E và từ trường H lần lượt song song với mặt phẳng truyền sóng. Trong trường hợp bề mặt lý tưởng, nếu sóng được hình thành và lan truyền dọc theo mặt phân giới, điều này có nghĩa là cần phải có một thành phần điện trường trên bề mặt. Do đó, dao động bề mặt phân cực s (điện trường TE song song với mặt phân giới) không tồn tại.



Hình 1. 3. Hai môi trường bán vô hạn với hàm điện môi  $\varepsilon_1$  và  $\varepsilon_2$  phân cách nhau tại giao diện giữa hai mặt phẳng  $z = 0$

Các điều kiện sóng di chuyển với từ trường H song song mặt phân giới (sóng phân cực p) có thể lan truyền dọc theo bề mặt ( $z = 0$ ), khi  $z > 0$  thì trường giảm dần theo chiều dương và khi  $z < 0$  thì trường giảm theo chiều âm. Chọn trục x dọc theo hướng truyền sóng, có thể viết các phương trình điện trường và từ trường như sau:

$$E_i = (E_{i_x}, 0, E_{i_z})e^{-k|z|}e^{i(q_{i_x} - \omega t)} \quad (1.5)$$

$$\text{Và } E_i = (0, E_{i_y}, 0)e^{-k|z|}e^{i(q_{i_x} - \omega t)} \quad (1.6)$$

Với  $q_i$  là độ lớn của vector sóng song song với bề mặt. Kết hợp các phương trình (1.5) - (1.6) với (1.1) - (1.4), tìm được:

$$ik_1 H_{1_y} = + \frac{\omega}{c} \varepsilon_1 E_{1_x} \quad (1.7)$$

$$ik_2 H_{2_y} = + \frac{\omega}{c} \varepsilon_2 E_{2_x} \quad (1.8)$$

$$\text{Và } k_i = \sqrt{q_i^2 - \varepsilon_i \frac{\omega^2}{c^2}} \quad (1.9)$$

Điều kiện bờ của thành phần điện trường và từ trường song song với bề mặt phải liên tục. Từ phương trình (1.7) và (1.8) có thể viết thành:

$$\frac{k_1}{\varepsilon_1} H_{1_y} + \frac{k_2}{\varepsilon_2} H_{2_y} = 0 \quad (1.10)$$

$$\text{Và } H_{1_y} - H_{2_y} = 0 \quad (1.11)$$

Từ phương trình (1.10) và (1.11) suy ra:

$$\frac{k_1}{\varepsilon_1} + \frac{k_2}{\varepsilon_2} = 0 \quad (1.12)$$

Trong đó, E và H lần lượt là cường độ điện trường và cường độ từ trường; k là số sóng trong không gian tự do;  $\omega$ , c lần lượt là tần số góc và vận tốc ánh sáng trong chân không;  $\varepsilon$  là độ thẩm điện.

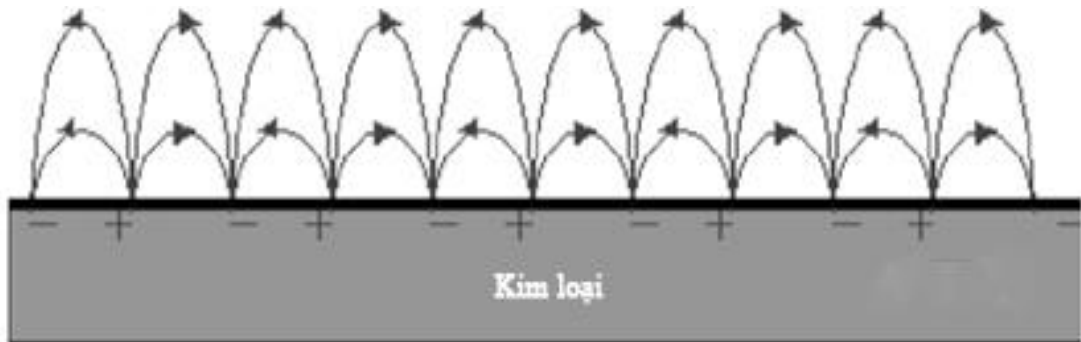
**Như vậy, phương trình (1.12) là điều kiện để có plasmon bề mặt.**

Trong trường hợp các véc tơ sóng  $q_1 = q_2 = q$ , từ các điều kiện bờ liên tục của véc tơ sóng  $q$  2D (2 chiều), phương trình (1.9) có thể biểu diễn điều kiện plasmon bề mặt như sau [22]:

$$q(\omega) = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}} \quad (1.13)$$

Với  $\frac{\omega}{c}$  biểu diễn độ lớn véc tơ sóng ánh sáng.

Đặc tính cơ bản của phân cực plasmon bề mặt (SPP) là các mode sóng lan truyền dọc theo giao diện giữa kim loại - điện môi, các mode sóng ánh sáng này có độ sâu thâm nhập (depth skin) tới giao diện kim loại - điện môi là khoảng 10nm đối với kim loại, và hơn 100nm đối với điện môi (phụ thuộc vào bước sóng). Độ sâu bề mặt được tính theo công thức (1.14).



Hình 1. 4. Nguyên lý kết hợp điện từ trường với phân cực plasmon bề mặt lan truyền dọc theo giao diện kim loại - điện môi. Điện trường  $E_i$  suy giảm theo hàm mũ với khoảng cách  $|z|$  từ bề mặt. Dấu + và - lần lượt biểu diễn mật độ electron mức cao và mức thấp

Từ phương trình (1.13) và phương trình (1.9) với  $q_1 = q_2$ , có thể biểu diễn hằng số suy hao plasmon bề mặt  $k_i$  trực giao với giao diện:

$$k_i = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{-\varepsilon_i^2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}} \quad (1.14)$$

Chiều dài suy hao  $l_i = 1/k_i$  tại điện từ trường suy giảm  $1/e$ . Trường hợp bề mặt giao diện là không khí ( $\varepsilon = 1$ ), chiều dài suy hao vượt quá bước sóng ( $l_2 > 1/q$ ), trái lại chiều dài suy hao ở phần kim loại phụ thuộc vào chiều dài bước sóng ( $q \rightarrow 0$ ) và được gọi là độ sâu bề mặt (Hình 1.4). Khi  $q$  lớn, độ sâu bề mặt là  $l_i \approx 1/q$  do đó dẫn đến sự tập trung mạnh mẽ điện từ trường plasmon bề mặt gần với giao diện.

#### 1.2.4. Cộng hưởng plasmon bề mặt

Hiện tượng 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) [23]. Các đặc trưng cơ bản của SPGWs được làm rõ bởi mô phỏng số không gian 3 chiều dựa vào phương pháp “phương trình tích phân thể tích” (volume integral equation method). SPGWs có thể được ứng dụng trong các mạch quang phẳng kích thước nano và các đầu dò quang cho kính hiển vi quang quét trường gần (NSOMs) bởi nó có một số đặc điểm thú vị sau:

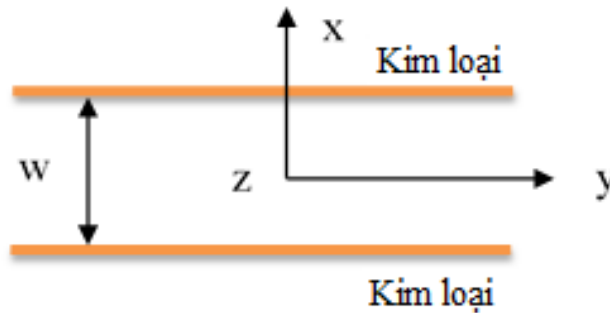
- Giam giữ (Confinement): trường quang bị giam giữ trong vùng khe hở kích thước nano. Kích thước phân bố trường quang giam giữ có thể giảm xuống nhỏ hơn nhiều kích thước của bước sóng.

- Tính dẫn (Guidance): trường quang có thể được dẫn dọc theo vùng khe hở kích thước nano của SPGW.

- Tăng cường (Enhancement): trường quang được tăng cường trong vùng khe hở kích thước nano của SPGW.

Khi sử dụng các ống dẫn sóng quang điện môi thông thường, kích thước và mật độ tích hợp bị giới hạn bởi giới hạn nhiễu xạ của ánh sáng. Tuy nhiên, ống dẫn sóng dựa trên SPP có thể vượt qua được giới hạn này. Các mạch quang sử dụng SPPs mang lại tiềm năng cho mạch điện kích thước nano trong tương lai.

### 1.3.1. Sơ đồ nguyên lý ống dẫn sóng khe hở



Hình 1. 5. Sơ đồ nguyên lý ống dẫn sóng khe hở

Ống dẫn sóng khe hở kim loại (MGW) ở hình 1.5 bao gồm 2 tấm kim loại song song. Khi chiều rộng khe hở của MGW nhỏ hơn giới hạn nhiễu xạ, các mode sóng của ánh sáng tới phân cực TM (trường từ song song với hướng y) trong ống dẫn sóng biến đổi thành các mode phân cực plasmon bề mặt trên bề mặt kim loại. Phương trình tán sắc của các mode phân cực plasmon bề mặt trong ống dẫn sóng có thể biểu diễn như sau [23]:

$$\frac{\varepsilon_1 p}{\varepsilon_m k} = \frac{1 - \exp(kw)}{1 + \exp(kw)}$$

$$\text{Với } k = k_0 \sqrt{\frac{\beta^2}{k_0^2} - \varepsilon_1}; \quad p = k_0 \sqrt{\frac{\beta^2}{k_0^2} - \varepsilon_m} \quad (1.15)$$

Trong đó, k là hằng số sóng của SPPs trong điện môi của vùng dẫn; p là hằng số sóng của SPPs trong kim loại.  $\beta = \beta_R + j\beta_I$  là hằng số lan truyền của SPPs, và  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$  (với  $\lambda$  là bước sóng của ánh sáng tới) là số sóng của ánh sáng trong không

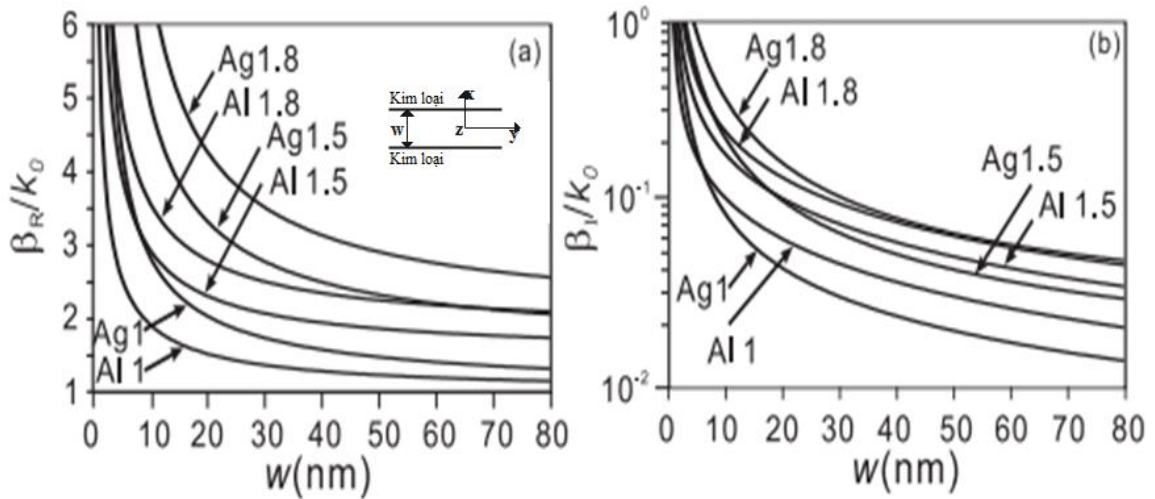
khí;  $\epsilon_1, \epsilon_m$  lần lượt là các hàm điện môi của chất điện môi trong vùng dẫn và bản kim loại.  $\epsilon_m$  được tính theo công thức Drude [24]:

$$\epsilon_m = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + j\gamma)}$$

Với  $\omega_p$  và  $\gamma$  lần lượt là tần số plasma và thành phần suy hao của kim loại;  $\omega_p = ck_0$  (c là vận tốc ánh sáng) là tần số của ánh sáng tới. Chỉ số chiết suất hiệu dụng của sự khúc xạ ống dẫn sóng đối với các mode plasmon bề mặt được định nghĩa như sau:

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k_0} = \frac{\beta_R + j\beta_i}{k_0} = n'_{eff} + jn''_{eff} \quad (1.16)$$

Từ phương trình (1.15) và (1.16) thấy rằng  $n_{eff}$  được quyết định đồng thời bởi độ rộng khe hở  $w$ , hằng số điện môi  $\epsilon_m$  của kim loại và hằng số điện môi  $\epsilon_1$  của chất điện môi trong vùng dẫn.



Hình 1. 6. Sự phụ thuộc của (a) thành phần thực và (b) thành phần ảo của  $\beta$  của SPPs vào chiều rộng khe hở  $w$  và chỉ số khúc xạ  $n_1$  ( $= 1.0; 1.5; 1.8$ ) của điện môi trong vùng dẫn

Hình 1.6 biểu diễn sự phụ thuộc của của SPPs trong ống dẫn sóng khe hở kim loại là nhôm Al và bạc Ag, với chiều rộng  $w$  của khe hở dẫn sóng là một hàm của chỉ số khúc xạ của chất điện môi trong vùng dẫn. Kết quả mô phỏng trong hình



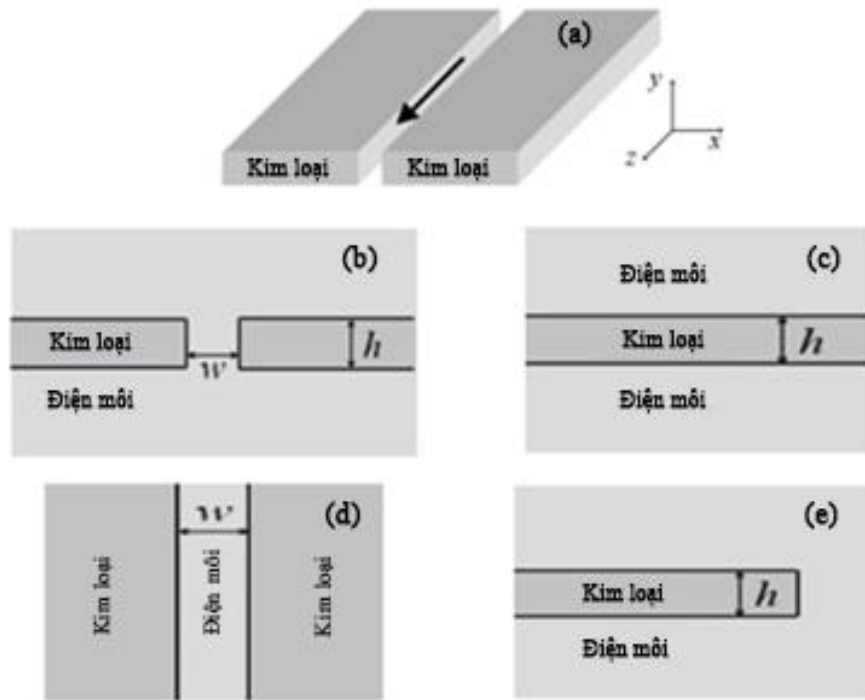
1.6 sử dụng các tham số để tính toán mô phỏng như sau:  $\lambda = 539.91nm$  ,  $\epsilon_2 = -42.13 + j11.96$  và  $\epsilon_3 = -10.55 + j0.84$

### 1.3.2. Ống dẫn sóng khe hở plasmonic 3D dưới bước sóng

Trong dải bước sóng ánh sáng nhìn thấy, cách thông thường để tạo ra ống dẫn sóng dưới bước sóng là dựa vào SPPs. SPPs bị ràng buộc bởi các mode lan truyền tại bề mặt giao diện kim loại - điện môi với các thành phần trường suy giảm hàm mũ theo khoảng cách [25]. Chiều dài suy giảm của trường có thể nhỏ hơn nhiều so với bước sóng cận tần số plasmon bề mặt. Đã có một số cấu trúc ống dẫn sóng plasmon khác nhau được đề xuất, ví dụ như ống dẫn sóng dây nano kim loại [26], ống dẫn sóng mảng hạt kim loại nano [13], ống dẫn sóng xẻ rãnh hình chữ V. Tuy nhiên, tất cả các cấu trúc ống dẫn sóng này đều có giới hạn là chỉ giam giữ mạnh các mode sóng cận tần số plasmon bề mặt, lúc này, các mode quang thông thường có vận tốc nhóm thấp và chiều dài truyền ngắn.

Tại tần số cực cao, kim loại không có đáp ứng plasmon, ống dẫn sóng 2 dây dẫn (two - conductor waveguides) được sử dụng để dẫn các mode dưới bước sóng. Cấu trúc ống dẫn sóng như vậy luôn hỗ trợ các mode sóng cơ bản TEM hoặc cận TEM (là mode dưới bước sóng và có băng thông dẫn rộng) và hỗ trợ dẫn các mode sóng dải hồng ngoại và dải ánh sáng nhìn thấy. Trong tất cả các loại ống dẫn sóng 2 dây dẫn, ống dẫn sóng plasmonic 3 chiều (3D) dựa trên một khe hở kích thước dưới bước sóng trong một màng kim loại mỏng để dẫn mode sóng dưới bước sóng đã được nghiên cứu gần đây [27] và có cấu trúc như hình 1.5a. Nó bao gồm một khe hở trong một màng kim loại mỏng, màng kim loại mỏng này được nhúng trong một chất điện môi. Cấu trúc ống dẫn sóng 3D này có khả năng định xứ cao các mode sóng ánh sáng trong khe hở và định hướng các mode sóng ánh sáng truyền đi song song với khe hở. Hình 1.5b biểu diễn mặt cắt ngang của cấu trúc hình học ống dẫn sóng. Ống dẫn sóng khe hở plasmon như vậy hỗ trợ các mode sóng riêng rẽ có dải tần số rộng. Kích thước của các mode này hoàn toàn bị chi phối bởi trường gần của khe hở và có thể nhỏ hơn nhiều so với bước sóng ngay cả khi chỉ số chiết suất hiệu dụng của mode sóng gần với chỉ số chiết suất hiệu dụng của chất nền. Hơn nữa, vận

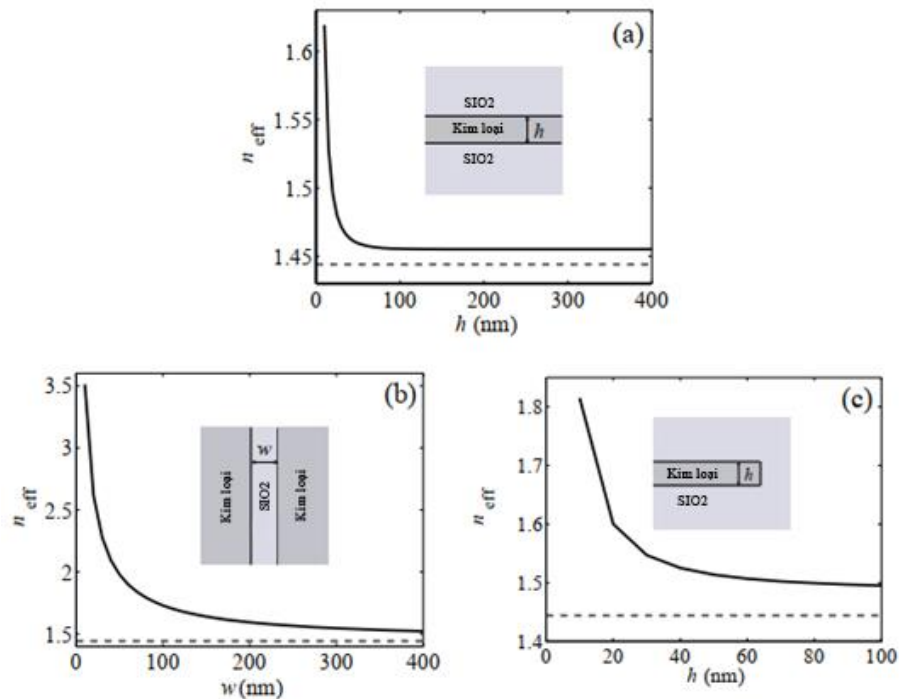
tốc nhóm của các mode sóng gần với vận tốc của ánh sáng trong chất nền, và chiều dài truyền của nó là  $10\mu\text{m}$  tại bước sóng  $\lambda_0 = 1550\text{nm}$ . Do đó, ống dẫn sóng khe hở plasmon có tiềm năng cho các thiết bị quang thông thường và các thiết bị quang điện tử có kích thước dưới bước sóng.



Hình 1. 7. (a) Dạng hình học của ống dẫn sóng khe hở plasmonic 3D, mũi tên chỉ hướng lan truyền của mode sóng ánh sáng; (b) mặt cắt ngang của ống dẫn sóng khe hở plasmonic 3D; (c) - (e) tương ứng là các cấu trúc IMI, MIM và màng kim loại cắt ngắn của ống dẫn sóng khe hở plasmonic 3D trong hình (b)

Để hiểu được mô hình cấu trúc của ống dẫn sóng khe hở thể hiện trong hình 1.7(a) và (b), trước hết nghiên cứu các dạng hình học đơn giản của ống dẫn sóng plasmonic 2D bao gồm: chất cách điện - kim loại - chất cách điện (IMI) tại hình 1.7(c); kim loại - chất cách điện - kim loại (MIM) tại hình 1.7(d), cũng như cạnh trên màng kim loại được cắt ngắn tại hình 1.7(e). Các thuộc tính của ống dẫn sóng khe hở plasmonic 3D có thể được giải thích dựa trên các đặc tính của các cấu trúc plasmon đơn giản này.

### 1.3.3. Cấu trúc ống dẫn sóng plasmon IMI



Hình 1. 8. (a) Chỉ số chiết suất hiệu dụng  $n_{eff}$  của SR-SPP của cấu trúc ống dẫn sóng IMI (silic dioxit - bạc - silic dioxit) là một hàm của chiều rộng  $h$  của vùng bạc ở giữa (đường nét liền), đường nét đứt biểu diễn chỉ số khúc xạ của silic dioxit. (b) Chỉ số chiết suất hiệu dụng  $n_{eff}$  của G-SPP của cấu trúc ống dẫn sóng MIM (bạc - silic dioxit - bạc) là một hàm của chiều rộng  $w$  của vùng bạc ở giữa (đường nét liền), đường nét đứt biểu diễn chỉ số khúc xạ của silic dioxit. (c) Chỉ số chiết suất hiệu dụng  $n_{eff}$  của mode cạnh cơ sở của màng kim loại bạc cất ngấn được nhúng vào silic dioxit là một hàm của chiều dày  $h$  của màng kim loại (đường nét liền), đường nét đứt biểu diễn chỉ số khúc xạ của silic dioxit

Cấu trúc ống dẫn sóng IMI tại hình 1.7(c) có màng kim loại mỏng giống với màng kim loại trong ống dẫn sóng khe hở ở hình 1.7(b), cấu trúc này hỗ trợ hai mode sóng dưới tần số plasmon bề mặt, đó là mode bậc cao còn được gọi là SPP tầm ngắn (SR-SPP) có sự phân bố điện tích đối xứng. Trong hình 1.8(a) biểu diễn chỉ số chiết suất hiệu dụng  $n_{eff}$  của SR-SPP trong cấu trúc ống dẫn sóng IMI (silic dioxit - bạc - silic dioxit) là một hàm của chiều rộng  $h$  của vùng bạc ở giữa (đường nét liền). Khi  $h$  giảm, một phần nhỏ công suất trong kim loại tăng lên do đó  $n_{eff}$  cũng tăng lên. Ngược lại, khi  $h \rightarrow \infty$ , liên kết giữa các chế độ plasmon bề mặt của hai giao diện kim loại - điện môi biến mất, do đó  $n_{eff}$  tiến gần với chỉ số chiết suất hiệu dụng của chế độ plasmon bề mặt của đơn giao diện kim loại - điện môi.

### 1.3.4. Cấu trúc ống dẫn sóng plasmon MIM

Cấu trúc ống dẫn sóng MIM trong hình 1.7(d) có chiều dày màng điện môi bằng với chiều rộng của khe ống dẫn sóng trong hình 1.7(b). Cấu trúc ống dẫn sóng như vậy được gọi là G-SPP (Gap-SPP), hỗ trợ một mode sóng cơ bản dưới tần số plasmon bề mặt, và có sự phân bố điện tích không đối xứng. Trong hình 1.8(b) biểu diễn chỉ số chiết suất hiệu dụng  $n_{\text{eff}}$  của G-SPP trong cấu trúc ống dẫn sóng MIM bạc - silic dioxide - bạc là hàm của chiều rộng  $w$  của lớp silic dioxide ở vùng trung tâm. Trường hợp  $w$  giảm, phần nhỏ công suất trong kim loại tăng lên do đó  $n_{\text{eff}}$  tăng lên. Trong trường hợp ngược lại, khi  $w \rightarrow \infty$ ,  $n_{\text{eff}}$  tiến gần với chỉ số chiết suất hiệu dụng của chế độ plasmon bề mặt của đơn giao diện kim loại - điện môi, giống với cấu trúc của IMI. Chú ý rằng, đối với một độ rộng nhất định của vùng trung tâm, sự ghép nối của các mode plasmon bề mặt đơn giao diện mạnh hơn đáng kể trong trường hợp MIM so với trường hợp IMI, bởi với cấu trúc MIM, sự ghép nối diễn ra thông qua chất điện môi, trong khi cấu trúc IMI, sự ghép nối diễn ra thông qua kim loại.

Cấu trúc màng kim loại cắt ngắn trong hình 1.7(e) có chiều dày giống với màng kim loại trong ống dẫn sóng khe hở hình 1.7(b). Cấu trúc này hỗ trợ cả mode cơ sở.

### 1.4. Sự hình thành và truyền lan sóng plasmonic

Như đã đề cập ở trên, phân cực plasmon bề mặt (SPPs) là sự 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. Cấu trúc liên kết của bề mặt kim loại và điện môi xác định các đặc tính truyền dẫn các mode SPP tại các bề mặt phẳng, cong, bề mặt đơn và đa bề mặt, bao gồm cả các mode SPP của các mảng hạt phức tạp và các cấu trúc kim loại kích cỡ nano. Các mode SPP có khả năng tập trung các trường điện từ vượt quá giới hạn nhiễu xạ (trên phạm vi nano) đồng thời tăng cường trường điện từ cục bộ.

Tương tác vật chất ánh sáng trong vật liệu cấu trúc nano dẫn đến tăng cường trường quang cấu trúc nano, điều đó có nghĩa là các trường EM của các mode SPP được hỗ trợ bởi các cấu trúc nano kim loại dưới bước sóng. Các mode SPP truyền

lan bị giam giữ trong mặt phẳng vuông góc với hướng truyền sóng bao gồm cả các trường được hình thành. Do đó, có thể xem xét ngắn gọn các đặc tính chính của quá trình hình thành và truyền lan sóng tại giao diện giữa các môi trường khác nhau [28]. Đầu tiên, xem xét phương trình sóng EM truyền trong một môi trường không từ tính ( $\mu = 1$ ) đẳng hướng và môi trường đồng nhất được đặc trưng bởi hằng số điện môi  $\varepsilon(\omega)$ . Theo đó, phương trình sóng đối với trường điện  $E(r; t)$  là:

$$\Delta E - \frac{\varepsilon(\omega)}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (1.17)$$

Trong đó:  $c$  là vận tốc ánh sáng; vecto truyền sóng  $k(\omega)$  cho bởi:

$$|k(\omega^2)| = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \varepsilon(\omega) \frac{\omega^2}{c^2} = \varepsilon k_0^2 \quad (1.18)$$

Xem xét mô hình hai chiều (2D) thể hiện sự bất biến dọc theo trục  $y$ , tức là hướng truyền sóng được giới hạn ở mặt phẳng  $x$ - $z$  ( $k_y = 0$ ). Mô hình 2D cho phép biểu diễn điện trường của sóng phẳng lan truyền tới nửa mặt phẳng  $z$  với  $z \geq 0$  như phương trình dưới đây:

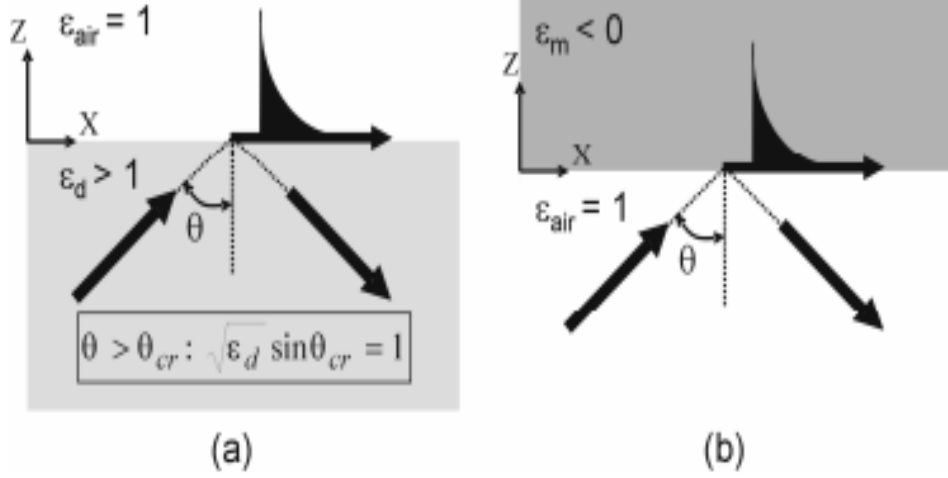
$$E(r, t) = E_0 e^{-i\omega t} \exp[i(k_x x + k_z z)] \quad (1.19)$$

$$\text{Với } k_x \in (-\infty, +\infty); k_z = \sqrt{\varepsilon k_0^2 - k_x^2} \quad (1.20)$$

Trong môi trường điện môi không tổn hao với  $\varepsilon = \varepsilon_d > 0$ , tất cả các sóng phẳng có thể được chia thành các sóng truyền (đồng nhất) với  $k_x \leq \varepsilon k_0$  và sóng được tăng cường (không đồng nhất) với  $k_x > \varepsilon k_0$ . Sóng truyền lan được đặc trưng bởi hướng truyền xác định thông qua véc tơ sóng thực  $k_x$  và  $k_z$  trong phương trình (1.19), và bước sóng được xác định bởi  $\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{\lambda_0}{n}$  với  $\lambda_0 = \frac{2\pi}{k_0}$  và  $n^2 = \varepsilon$ . Các

sóng truyền dọc theo trục  $x$  với bước sóng  $\lambda_x = \frac{2\pi}{|k_x|}$  và suy hao hàm mũ dọc theo

trục  $z$  với hằng số suy hao  $|k_z|^{-1} = (k_x^2 - \varepsilon k_0^2)^{-0.5}$ . Chu kỳ của sóng hình thành có thể rất nhỏ tương ứng với tần số rất lớn điều này mở ra rất nhiều ứng dụng cho việc ứng dụng trong các mạch nano và các bộ thu quang có kích thước nano.



Hình 1. 9. Nguyên lý tạo ra sóng tăng cường kích thích (a) trong điện môi do sự phản xạ toàn phần của ánh sáng (b) trong kim loại khi ánh sáng tới với góc bất kỳ

Sóng hình thành có thể được tạo ra trong nửa mặt phẳng  $z \geq 0$ , ví dụ trong quá trình phản xạ toàn phần (TIR), khi sóng lan truyền trong nửa mặt phẳng  $z < 0$  (có hằng số điện môi  $\varepsilon_d > 1$ ) tiếp xúc với giao diện tại  $z = 0$  giữa chất điện môi và không khí ( $\varepsilon_{air} = 1$ ) dưới một góc tới  $\theta$  lớn hơn góc tới hạn  $\theta_{cr}$  được xác định bởi  $\sqrt{\varepsilon_d} \sin \theta_{cr} = 1$ . Các điều kiện biên yêu cầu kết hợp pha của điện trường tổng trên cả hai mặt của giao diện của ống dẫn sóng, nghĩa là bảo toàn  $k_x$ , dẫn đến sự hình thành sóng (trong nửa không gian không khí) với  $k_x > \varepsilon_{air} k_0 = k_0$  (Hình 1.9a):

$$k_x = \sqrt{\varepsilon_d} k_0 \sin \theta \rightarrow E = E_0 e^{i(k_x x - \omega t)} e^{-z k_0 \sqrt{\sin^2 \theta - 1}} \quad (1.21)$$

Trái với trường hợp trên, trong các kim loại không có tổn hao với  $\varepsilon = \varepsilon_m < 0$  không có sóng lan truyền vì véc tơ sóng  $k$  là thuần ảo (phương trình (1.18)). Ví dụ, coi nửa mặt phẳng  $z > 0$  sử dụng bởi kim loại có giao diện tại  $z = 0$  với không khí, bất kỳ sóng lan truyền trong không khí (hướng tới kim loại) đều có sự hình thành sóng trong kim loại (Hình 1.9b):

$$k_x^2 + k_z^2 = \varepsilon_m k_0^2 < 0 \rightarrow E = E_0 e^{i(k_x x - \omega t)} e^{-z k_0 \sqrt{\sin^2 \theta - \varepsilon_m}} \quad (1.22)$$

Đối với 1 số kim loại điển hình có hằng số điện môi rất lớn  $|\varepsilon_m| \gg 1$ , điều đó dẫn đến sự thâm nhập trường trong kim loại,  $|k_z|^{-1} \approx \lambda_0 / (2\pi |\varepsilon_m|^{0.5})$  là rất nhỏ, thậm chí chỉ cỡ nano.

Mặc dù các biểu thức trường từ (1.19) đến (1.22) là đúng cho tất cả các thành phần điện trường nhưng bản thân các thành phần không độc lập vì chúng phải thỏa mãn các phương trình của Maxwell. Cụ thể hơn, trong môi trường đồng nhất (không suy hao), điện trường phải thỏa mãn định luật Coulomb  $\nabla \cdot E = 0$ . Ví dụ, có thể thấy rằng trái ngược với sóng lan truyền thì sóng hình thành (trong phương trình (1.21)) phân cực trong mặt phẳng lan truyền (p-polarized) đặc trưng cho thành phần khác 0 trong hướng lan truyền, nghĩa là  $E_x \neq 0$ .

### 1.5. 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:

#### 1.5.1. Phương pháp EME

Kỹ thuật EME đã được thành lập trong lĩnh vực nghiên cứu về các cấu trúc quang tử để mô phỏng hành vi hoạt động của phân bố trường điện từ. Về bản chất, nó là một kỹ thuật tính toán số để mô phỏng trường điện từ. Chúng ta phải bắt đầu với định nghĩa về “mode” hoặc “eigenmode” (tức mode riêng) của trường điện từ tồn tại trong ống dẫn sóng. Trong một cấu trúc mà chiết suất quang học không thay đổi theo hướng truyền z và trường điện từ dao động điều hòa theo thời gian một cách độc lập với không gian với tần số góc theo biểu diễn  $\exp(i\omega t)$ , chúng ta giả thiết tìm thấy các nghiệm của phương trình Maxwell có dạng:

$$E(x, y, z) = e_{-m}(x, y)e^{i\beta_m z} \quad (1.23)$$

Về mặt toán học,  $e_{-m}(x, y)$  và  $\beta_m$  là các mode riêng (eigenmode) và các nghiệm riêng (eigenvalue) trong lời giải của phương trình đại số. Do vậy, một mode có một dạng điều hòa theo trục z (phương truyền sóng) là chìa khóa chính để cho phép EME giải các cấu trúc biến đổi chậm của điện trường một cách nhanh chóng và hiệu quả.

Trong một ống dẫn sóng điển hình, có một số mode dẫn được (*guided modes*) tồn tại và truyền theo chiều dọc của ống dẫn sóng nhưng cũng tồn tại một số mode phát xạ (*radiation modes*) không xác định mang công suất quang phát xạ ra khỏi ống dẫn sóng. Các mode dẫn được và các mode phát xạ tạo nên một tập cơ bản đầy đủ, nói cách khác chúng ta có thể biểu diễn bất kỳ lời giải nào của hệ phương trình Maxwell trong vùng của ống dẫn sóng về phương diện của sự siêu xếp chồng trường điện từ của các mode truyền theo hướng thuận (*forward direction*) và hướng nghịch (*backward direction*), với dạng toán học biểu diễn như sau:

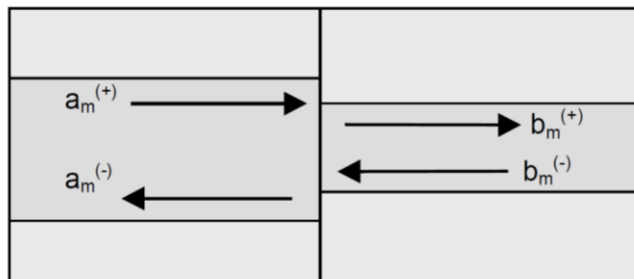
$$E(x, y, z) = \sum_{k=1}^M (a_k e^{i\beta_k z} + b_k e^{-i\beta_k z}) E_k(x, y) \text{ cho điện trường} \quad (1.24)$$

$$H(x, y, z) = \sum_{k=1}^M (a_k e^{i\beta_k z} + b_k e^{-i\beta_k z}) H_k(x, y) \text{ cho từ trường} \quad (1.25)$$

Ở đây,  $a_k$  và  $b_k$  lần lượt là các thành phần biên độ theo hướng thuận và nghịch,  $E_k(x, y)$  và  $H_k(x, y)$  gọi là hồ sơ mode (*mode profile*) của trường điện và từ một cách lần lượt,  $+\beta_k$  và  $-\beta_k$  là hằng số truyền (*propagation constant*) hay chính là đặc trưng cho số sóng riêng theo các hướng thuận và nghịch của hàm sóng. Chú ý tới tính tự nhiên theo hai hướng (*bidirectional*) của phương trình này. Phương trình này là một lời giải chính xác của hệ phương trình Maxwell trong môi trường tuyến tính.

Cho đến nay chúng ta có một kỹ thuật chỉ để phân tích các cấu trúc bất biến  $z$ . Tiếp theo, chúng tôi giới thiệu một khớp nối giữa hai ống dẫn sóng - xem Hình 1.10. Phương trình Maxwell cung cấp cho chúng ta các điều kiện liên tục cho các trường, ví dụ: các điện trường tiếp tuyến phải bằng nhau trên mỗi mặt của mặt phân cách:

$$\sum_{k=1}^N (a_k^{(+)} e^{i\beta_k z} - a_k^{(-)} e^{-i\beta_k z}) E_{k,t}^{(a)}(x, y) = \sum_{k=1}^N (b_k^{(+)} e^{i\beta_k z} - b_k^{(-)} e^{-i\beta_k z}) E_{k,t}^{(b)}(x, y) \quad (1.26)$$



Hình 1. 10. Các hệ số mode tại khớp nối



Áp dụng các điều kiện này, cũng như các điều kiện về điện trường dọc và các trường, và lưu ý rằng các chế độ là trục chuẩn:

$$\int (E_{x,j} \cdot H_{y,k} - E_{y,j} \cdot H_{x,k}) dS = \delta_{jk} \quad (1.27)$$

Ở đây,  $dS$  là vi phân của diện tích,  $\delta_{jk}$  là phần điện tích tích lũy trong toàn bộ cấu trúc dẫn sóng.

Sau đó, qua các bước biến đổi về mặt toán học, chúng ta có thể suy ra mối quan hệ giữa các hệ số có dạng:

$$\begin{pmatrix} \underline{a}^{(-)} \\ \underline{b}^{(+)} \end{pmatrix} = S_J \begin{pmatrix} \underline{a}^{(+)} \\ \underline{b}^{(-)} \end{pmatrix} \quad (1.28)$$

Ở đây,  $S_J$  là ma trận tán xạ cho khớp nối. Vì vậy, chúng ta đã thể hiện các trường sóng truyền đi khỏi khớp nối với các trường sóng tới khớp nối. Ma trận tán xạ SWG cho một phần thẳng chỉ đơn giản là:

$$\begin{pmatrix} e^{i\beta_1 z} & 0 \dots & 0 \\ 0 & e^{i\beta_m z} & 0 \\ 0 & 0 \dots & e^{i\beta_N z} \end{pmatrix} \quad (1.29)$$

Điều này rõ ràng là không đáng để tính toán một khi các mode riêng đã được tìm thấy.

Trong tính toán mô phỏng số, chúng ta tìm mode riêng và các hằng số riêng của cấu trúc bởi tìm các hệ số từ quan hệ ma trận tán xạ. Tính toán xấp xỉ cho cấu trúc plasmonics bằng cách lưới hóa các tọa độ trong không gian ba chiều và giám sát các giá trị riêng của các thành phần trường như  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ ,  $H_x$ ,  $H_y$  và  $H_z$ . Hệ tọa độ của vùng tính toán được lựa chọn trong vùng của ba trục cục bộ  $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'$  như sau:

$$X' \in \left[ \frac{-w}{2}, \frac{w}{2} \right], Y' \in \left[ \frac{-h}{2}, \frac{h}{2} \right] \text{ và } Z' \in \left[ \frac{-l}{2}, \frac{l}{2} \right] \quad (1.30)$$

Trong đó,  $w$ ,  $h$  và  $l$  lần lượt là chiều rộng, chiều cao và chiều dài của không gian tính toán ba chiều của cấu trúc ống dẫn sóng quang tử. Hệ tọa độ tại chỗ này có liên quan đến hệ tọa độ Decartes toàn cục  $(X, Y, Z)$  bởi ma trận quay (hệ quy chiếu tương đối):

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad (1.31)$$

Ở đây,  $X_0$ ,  $Y_0$  và  $Z_0$  lần lượt là độ lệch tương đối (tuyến tính) của gốc tọa độ cục bộ so với gốc tọa độ toàn cục, và lần lượt là góc phương vị (nằm trong mặt phẳng Oxy) và góc tà (lệch so với mặt phẳng Oxy).

Trong không gian hai chiều, quan hệ trường chỉ còn mặt phẳng OXZ và giá trị được giả thiết là  $=0$ .

Với điều kiện biên thích hợp bởi một lớp hấp thụ hoàn hảo PML (perfect matched layer) chúng ta tìm được các giá trị riêng giải gần đúng bằng phương pháp số (gọi là eigenvalue) từ đó tính ra được chiết suất hiệu dụng:

$$n_{eff} = \text{Re}(n_{eff}) + j\text{Im}(n_{eff}) \quad (1.32)$$

Công suất trường tại vùng giám sát được tính bởi tích phân của tích véc tơ:

$$S = \frac{1}{S_0} \text{Re} \left[ \int_A [\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] d\vec{A} \right] \quad (1.33)$$

Trong đó,  $S_0$  là công suất tại đầu vào,  $H^*$  biểu thị liên hợp phức của trường từ,  $A$  là diện tích vùng tính toán.

Mật độ điện trường được tính toán bởi công thức:

$$U_E = \frac{1}{2} \int_V \text{Re}[\varepsilon(r')] |\mathbf{E}|^2 dV \quad (1.34)$$

Ở đây,  $E$  là trường điện,  $\varepsilon$  là hằng số điện môi riêng và  $V$  là thể tích vùng tính toán bởi các giới hạn về chiều rộng, chiều cao và chiều dài ống dẫn sóng,  $r'$  là bán kính hệ tọa độ trụ tại điểm giám sát.

Tương tự, mật độ từ trường được tính toán bởi hệ thức:

$$U_H = \frac{1}{2} \int_V \mu |\mathbf{H}|^2 dV \quad (1.35)$$

Ở đây  $\mu$  là độ từ thẩm (không có thành phần ảo, chỉ là số thực)

Thành phần hấp thụ của sóng điện từ vào trong các vật liệu được xác định bởi công thức:

$$U_A = \omega \int_V \text{Im}[\varepsilon(\omega)] |E|^2 dV \quad (1.36)$$

Với  $\omega = 2\pi\nu = c/\lambda$  là tần số góc của trường sóng,  $\nu$  và  $\lambda$  là tần số và bước sóng của trường sóng quang.

Véc tơ Poynting tại đầu ra được tính bởi tích véc tơ:

$$S(\mathbf{r}') = \mathbf{E}(\mathbf{r}') \times \mathbf{H}^*(\mathbf{r}') = \sqrt{\text{Re}[S_x]^2 + \text{Re}[S_y]^2 + \text{Re}[S_z]^2} \quad (1.37)$$

Nếu biểu diễn bằng quan hệ ma trận tán xạ thì thành phần phản xạ dội lại cổng đầu vào được tính bởi:

$$U_{R,m} = S_{mm}^2 \quad (1.38)$$

Ở đây,  $S_{mm}$  là hệ số phản xạ tại cổng vào thứ  $m$ .

Với một ống dẫn sóng plasmonics, công suất trường đầu vào được phân chia thành các thành phần: thành phần chính là thành phần truyền đi, một phần thành phần sẽ bị hấp thụ trong các lớp vật liệu của ống dẫn sóng và một phần nhỏ là các thành phần phản xạ tại các cổng đầu vào.

Trong giới hạn luận án này, quá trình sử dụng EME để tính toán tối ưu các thông số cho cấu trúc mạch nanoplasmonics như sau:

a) Về kích thước chia vùng tính toán trong thuật toán truy hồi của các phương trình vi phân đạo hàm riêng:

Vùng tính toán phải chứa toàn bộ phạm vi của vi mạch.

$$-\frac{W}{2} \leq x \leq \frac{W}{2} \text{ với } W \text{ là chiều rộng của vi mạch.}$$

$$0 \leq z \leq L \text{ với } L \text{ là chiều dài của vi mạch.}$$

$$0 \leq y \leq H \text{ với } H \text{ là chiều cao của vi mạch.}$$

Trong đó,  $W \geq$  bề rộng thật của vi mạch;  $L \geq$  chiều dài thật của vi mạch;  $H \geq$  chiều cao thật của vi mạch.

b) Độ phân giải mode và phân giải chiết suất (Mode resolution và Index resolution) đều chọn là 0,005 là rất nhỏ so với giá trị Delta là hiệu chiết suất của vật liệu so với background (không khí hoặc SiO<sub>2</sub>).

c) Sai số mỗi tính toán khi giải giá trị riêng là không vượt quá  $10^{-7}$ .

d) Độ rộng lớp hấp thụ hoàn hảo (PML width) trong các phép tính toán là 0.08 (giả thiết trường giảm nhanh ngoài phạm vi tính toán để đảm bảo các mode phân bố chủ yếu trong phần tính toán).

e) Công suất đầu vào chuẩn hóa là 1 đơn vị công suất (1 uW)

Giải thuật dựa trên biến đổi Fourier với việc chia lưới thành 8 lưới con nhỏ hơn và bậc FEM là 1 (xấp xỉ tuyến tính) và độ rộng lớp hấp thụ hoàn hảo PML cùng giống như EME. Đây là các thông số mô phỏng được khuyến nghị bởi nhóm phát triển sản phẩm phần mềm của Rsoft - Synopsys cho kết quả giữa mô phỏng và thực nghiệm rất sát nhau.

### 1.5.2. Phương pháp FDTD

Phương pháp miền thời gian chênh lệch hữu hạn (FDTD) được phát triển bởi nhà khoa học Yee, được sử dụng để giải các phương trình Maxwell phụ thuộc vào thời gian. FDTD ban đầu được đề xuất cho sóng điện từ với các bước sóng dài bởi vì yêu cầu rời rạc hóa không gian của nó là nhỏ ( $1/10 - 1/20$  của bước sóng). FDTD là một thiết kế hoàn hảo, bước thời gian trong tính toán được định nghĩa bởi độ rộng rời rạc hóa không gian. Vì vậy, bước thời gian trong phân tích ống dẫn sóng quang là cực kỳ ngắn khi bước sóng cỡ  $\mu m$ . Yêu cầu dung lượng bộ nhớ là khổng lồ đối với cấu trúc không gian ba chiều (3D), nhưng FDTD lại ứng dụng được cho cấu trúc không gian hai chiều (2D). Phương pháp FDTD phù hợp để ứng dụng phân tích, mô phỏng cho bước sóng cực ngắn như bước sóng quang.

Sự rời rạc hóa sóng điện từ được thực hiện theo mô hình 3D bởi nó đầy đủ hơn 2D và từ 3D có thể dễ dàng suy ra mô hình 2D.

Phương trình Maxwell phụ thuộc thời gian như sau:

$$-\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \times E, \quad (1.26)$$

$$-\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial E}{\partial t} = \nabla \times H, \quad (1.27)$$

Áp dụng các phương trình Maxwell đầy đủ, có thể biểu diễn lại các thành phần điện trường và từ trường như sau:

$$-\mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}, \quad (1.28)$$

$$-\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}, \quad (1.29)$$

$$-\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}, \quad (1.30)$$

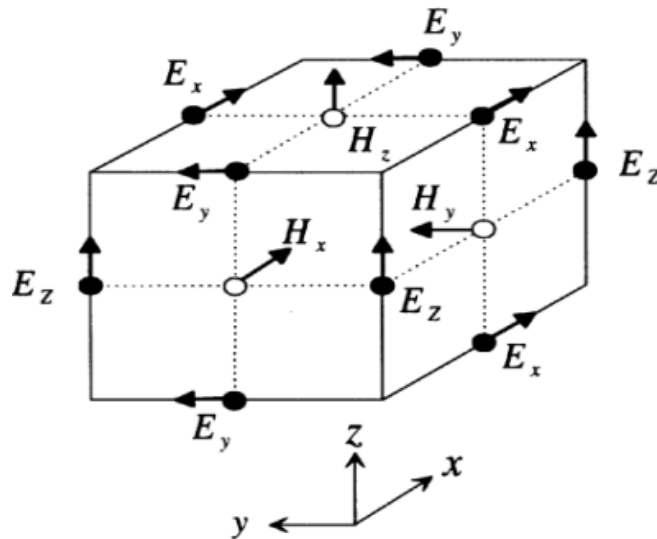
$$-\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}, \quad (1.31)$$

$$-\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x}, \quad (1.32)$$

$$-\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}, \quad (1.33)$$

Giả sử  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  là các tùy biến không gian với bước thời gian  $\Delta t$ , hàm  $F(x, y, z, t)$  được biến đổi như sau:

$$F^n(i, j, k) = F(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = F(x, y, z, t) \quad (1.34)$$



Hình 1.11. Cửa sổ mắt cáo Yee

Hình 1.8 được gọi là cửa sổ mắt cáo Yee, sử dụng  $\alpha$  để biểu diễn tọa độ không gian chẳng hạn như  $x, y, z$ , ta xác định như sau:

$$E_\alpha = \begin{cases} \text{Quỹ đạo không gian } \alpha: \text{nửa số nguyên,} \\ \text{Không gian khác: số nguyên,} \\ \text{Thời gian: số nguyên,} \end{cases} \quad (1.35)$$

$$H_\alpha = \begin{cases} \text{Quỹ đạo không gian } \alpha: \text{số nguyên,} \\ \text{Không gian khác: nửa số nguyên,} \\ \text{Thời gian: nửa số nguyên,} \end{cases} \quad (1.36)$$

Độ chênh lệch phần không gian trung tâm đóng vai trò quan trọng khi phương trình (1.28) đến (1.33) được biến đổi, ví dụ ở đây ta biến đổi một phương trình (1.28) như sau: Độ chênh lệch phần không gian trung tâm của vế trái phương trình (1.28) giống với  $H_x$ , độ chênh lệch phần không gian trung tâm theo hướng  $x, y, z$  tìm được lần lượt là  $x = i\Delta x, y = (j+1/2)\Delta y$  và  $z = (k+1/2)\Delta z$ . Khi độ chênh lệch thời gian trung tâm của vế phải phương trình (1.28) giống với điện trường  $E_y, E_z$ , ta có thể viết  $t = n\Delta t$ . Ở đây,  $i, j, k$  và  $n$  là các số nguyên. Theo cách tương tự, ta có thể nhận được chênh lệch trung tâm quỹ đạo không gian và thời gian của các biểu thức từ (1.29) đến (1.33) như sau:

$$\text{Phương trình (1.28): } x = i\Delta x, y = (j+1/2)\Delta y, z = (k+1/2)\Delta z, t = n\Delta t \quad (1.37)$$

$$\text{Phương trình (1.29): } x = (i+1/2)\Delta x, y = j\Delta y, z = (k+1/2)\Delta z, t = n\Delta t \quad (1.38)$$

$$\text{Phương trình (1.30): } x = (i+1/2)\Delta x, y = (j+1/2)\Delta y, z = k\Delta z, t = n\Delta t \quad (1.39)$$

$$\text{Phương trình (1.31): } x = (i+1/2)\Delta x, y = j\Delta y, z = k\Delta z, t = (n+1/2)\Delta t \quad (1.40)$$

$$\text{Phương trình (1.32): } x = i\Delta x, y = (j+1/2)\Delta y, z = k\Delta z, t = (n+1/2)\Delta t \quad (1.41)$$

$$\text{Phương trình (1.33): } x = i\Delta x, y = j\Delta y, z = (k+1/2)\Delta z, t = (n+1/2)\Delta t \quad (1.42)$$

Biểu diễn 3D FDTD cho các biểu thức từ (1.28) đến (1.33) có thể nhận được bằng cách biến đổi chúng dựa vào chênh lệch trung tâm biểu thức (1.37) đến (1.42). trở lại với ví dụ khảo sát biểu thức (1.28), chênh lệch trung tâm  $x$  và  $t$  là các số nguyên, chênh lệch trung tâm  $y$  và  $z$  là các nửa số nguyên, vì vậy vế trái phương trình (1.28) nhận được:

$$-\frac{\mu_0}{\Delta t} \left[ H_x^{n+1/2}(i, j+1/2, k+1/2) - H_x^{n-1/2}(i, j+1/2, k+1/2) \right] \quad (1.43)$$

Vế phải phương trình (1.28) nhận được:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta y} \left[ E_z^n(i, j+1, k+1/2) - E_z^n(i, j, k+1/2) \right] \\ & - \frac{1}{\Delta z} \left[ E_y^n(i, j+1/2, k+1) - E_y^n(i, j+1/2, k) \right] \end{aligned} \quad (1.44)$$

Sử dụng biểu thức (1.43) và (1.44), ta nhận được biểu thức miền thời gian chênh lệch hữu hạn cho phương trình (1.28)

$$\begin{aligned} H_x^{n+1/2}(i, j+1/2, k+1/2) &= H_x^{n-1/2}(i, j+1/2, k+1/2) \\ & - \frac{\Delta t}{\mu_0} \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{\Delta y} \left[ E_z^n(i, j+1, k+1/2) - E_z^n(i, j, k+1/2) \right] \\ & - \frac{1}{\Delta z} \left[ E_y^n(i, j+1/2, k+1) - E_y^n(i, j+1/2, k) \right] \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (1.45)$$

Bằng cách xử lý tương tự, ta có thể thu được biểu thức miền thời gian chênh lệch hữu hạn cho thành phần y và z của từ trường như sau:

$$\begin{aligned} H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k+1/2) &= H_y^{n-1/2}(i+1/2, j, k+1/2) \\ & - \frac{\Delta t}{\mu_0} \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{\Delta z} \left[ E_x^n(i+1, j, k+1) - E_x^n(i+1/2, j, k) \right] \\ & - \frac{1}{\Delta x} \left[ E_z^n(i+1, j, k+1/2) - E_z^n(i, j, k+1/2) \right] \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (1.46)$$

$$\begin{aligned} H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2, k) &= H_z^{n-1/2}(i+1/2, j+1/2, k) \\ \text{Và} \quad & - \frac{\Delta t}{\mu_0} \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{\Delta x} \left[ E_y^n(i+1, j+1/2, k) - E_y^n(i, j+1/2, k) \right] \\ & - \frac{1}{\Delta y} \left[ E_x^n(i+1/2, j+1, k) - E_x^n(i+1/2, j, k) \right] \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (1.47)$$

Tiếp theo, ta biến đổi biểu thức (1.31). Theo phương trình (1.40), trung tâm chênh lệch của  $x, t$  đều là nửa số nguyên và của  $y, z$  đều là số nguyên. Vì vậy, vế trái của biểu thức (1.31) nhận được:

$$- \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\Delta t} \left[ E_x^{n+1}(i+1/2, j, k) - E_x^n(i+1/2, j, k) \right] \quad (1.48)$$

Và vế phải của (1.31) nhận được:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta y} \left[ H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2, k) - H_z^{n+1/2}(i+1/2, j-1/2, k) \right] \\ & - \frac{1}{\Delta z} \left[ H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k+1/2) - H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k-1/2) \right] \end{aligned} \quad (1.49)$$

Biến đổi biểu thức (1.48) và (1.49) ta nhận được biểu thức miền thời gian chênh lệch hữu hạn cho biểu thức (1.31) như sau:

$$\begin{aligned} E_x^{n+1}(i+1/2, j, k) &= E_x^n(i+1/2, j, k) \\ &+ \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{\Delta y} \left[ H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2, k) - H_z^{n+1/2}(i+1/2, j-1/2, k) \right] \\ & - \frac{1}{\Delta z} \left[ H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k+1/2) - H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k-1/2) \right] \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (1.50)$$

Bằng cách xử lý tương tự, ta có thể thu được biểu thức miền thời gian chênh lệch hữu hạn cho thành phần  $y$  và  $z$  của điện trường như sau:

$$\begin{aligned} E_y^{n+1}(i, j+1/2, k) &= E_y^n(i, j+1/2, k) \\ &+ \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{\Delta z} \left[ H_x^{n+1/2}(i, j+1/2, k+1/2) - H_x^{n+1/2}(i, j+1/2, k-1/2) \right] \\ & - \frac{1}{\Delta x} \left[ H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2, k) - H_z^{n+1/2}(i-1/2, j+1/2, k) \right] \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (1.51)$$

$$\begin{aligned} E_z^{n+1}(i, j, k+1/2) &= E_z^n(i, j, k+1/2) \\ \text{Và} \quad & - \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{\Delta x} \left[ H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k+1/2) - H_y^{n+1/2}(i-1/2, j, k+1/2) \right] \\ & - \frac{1}{\Delta y} \left[ H_x^{n+1/2}(i, j+1/2, k+1/2) - H_x^{n+1/2}(i, j-1/2, k+1/2) \right] \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (1.52)$$

Từ trường  $H_\alpha^{n+1/2}$  với bước thời gian nửa số nguyên  $(n+1/2)\Delta t$  được tính toán đầu tiên từ các biểu thức (1.35) đến (1.47) bằng cách sử dụng điện trường với bước thời gian số nguyên  $n\Delta t$ . Do đó, những trường này được sử dụng để tính toán điện trường  $E_\alpha^{n+1}$  với bước thời gian số nguyên  $(n+1)\Delta t$  bằng cách sử dụng các biểu thức từ (1.50) đến (1.52). Lặp lại hai bước này, ta có thể tính toán được sự phát triển theo thời gian của điện trường và từ trường.



Chú ý rằng hằng số điện môi tương đối tại giao diện giữa hai môi trường khi sử dụng  $(\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2})/2$  cho kết quả tính toán tốt hơn là chỉ sử dụng  $\epsilon_{r1}$  hoặc  $\epsilon_{r2}$ .

### **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 hấp thụ, công suất suy hao phản xạ, suy hao chèn còn tương đối lớn [31, 36, 92, 94], băng thông hoạt động còn tương đối thấp [52, 97], [122-123]. 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.

Quá trình thực hiện tính toán thiết kế ống dẫn sóng plasmonic trong hai chương tiếp theo được kết hợp giữa các phương pháp mô phỏng có độ tin cậy cao, đang được cộng đồng plasmonic circuits sử dụng hiện nay như EIM, EME, FDTD, FEM. Quy trình thiết kế, mô phỏng được thực hiện qua ba bước chính sau:

1. Dựa vào việc giải mode để chọn chiều rộng ống dẫn sóng ( $W_{in}$ ) hợp lý trên cơ sở số mode đầu vào yêu cầu.
2. Tính toán các thông số kích thước của ống dẫn sóng theo các công thức toán học nếu có.

3. Mô phỏng số thông qua các phương pháp mô phỏng số như EME, FEM, FDTD thông qua công cụ tối ưu bằng quét các tham số trong một dải khảo sát phù hợp và giám sát đặc tính quang và hành vi biểu diễn trường điện từ bằng công cụ mô phỏng thương mại hóa Rsoft. Tiến trình khảo sát theo các tham số là hàm đa biến. Tuy nhiên, trong một số trường hợp, việc tối ưu đa biến dẫn đến số bước chạy lớn và dữ liệu lớn mà tài nguyên tính toán có hạn. Do vậy, chạy tiến trình đơn trong các khoảng xác định của từng tham số để tìm giá trị tối ưu cục bộ của tham số.

## **CHƯƠNG 2. ỚNG 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, hay 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. Trong trường hợp này, mode plasmonic phân cực TE không thể dẫn mà chỉ mode TM được dẫn trong cơ chế plasmonic. Do vậy, cần phải có một cấu kiện để quay phân cực mode TE sang mode TM, từ đây các mode TM được đưa vào bộ ghép kênh bước sóng để thực hiện ghép kênh.

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 dẫn thì cần có các cổng 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 <sup>(1)</sup>ống dẫn sóng lai ghép plasmonic - silic có chức năng quay phân cực và <sup>(2)</sup>các cổng 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**

Phần này nghiên cứu lý thuyết và mô phỏng dạng ống dẫn sóng lai ghép plasmonic và một ống dẫn sóng silic bởi phủ một lớp kim loại bạc lên trên ống dẫn sóng silic. Đặc tính truyền và hệ số mode hiệu dụng được nghiên cứu bởi sử dụng kỹ thuật mô phỏng phần tử hữu hạn FEM (finite element method) và đặc tính quay trạng thái phân cực của cấu trúc nắp kim loại bạc đặt lệch trục để tạo ra sự bất đối xứng. Kỹ thuật mô phỏng triển khai mode riêng EME được sử dụng bên cạnh mô phỏng FEM để mô phỏng sự truyền trường và đặc tính quang học của thiết bị biến

đôi phân cực. Các kết quả mô phỏng cho thấy cấu trúc quay phân cực có chiều dài truyền lớn, suy hao, hấp thụ thấp trong khoảng băng rộng 100nm của cửa sổ thông tin quang thứ ba. Hơn thế, cấu trúc đề xuất có kích thước nhỏ và khả năng bắt giữ ánh sáng kích thước nano mét, nên thích hợp để xây dựng các mạch quang tích hợp kích thước nano trong tương lai.

Tối thiểu hóa kích thước của các thiết bị quang tử để dẫn và giam giữ năng lượng sóng điện từ để co giãn kích thước tương thích với các mạch điện tử tích hợp cao hiện nay đang là một trong những thách thức lớn nhất. Trong lĩnh vực mạch điện tử và xử lý thông tin, chuyển mạch điện tử từ các mạch tích hợp kích thước micro tới nano đang được tiến hành: các thành phần mạch logic theo công nghệ chế tạo CMOS bắt đầu kích thước cỡ 100nm [8] và các hiệu ứng lượng tử (quantum effects) bắt đầu chi phối chức năng điện tử của thiết bị trong cả lĩnh vực điện tử nano và phân tử nano dựa trên vật liệu bán dẫn. Một phần thách thức đáng quan tâm là giảm kích cỡ hơn của các mạch điện tử sẽ bị chi phối bởi những khó khăn khi chuyển mạch sang xử lý thông tin lượng tử và kết thúc bởi các giới hạn tính toán vật lý bị áp đặt bởi sự quan tâm đến năng lượng và entropy (những đại lượng nhiệt động của tính không sẵn sàng của hệ thống).

Tuy nhiên, sự tối thiểu hóa của các thiết bị quang tử chẳng hạn như ống dẫn sóng và các buồng cộng hưởng để dẫn và bắt giữ năng lượng sóng điện từ (ánh sáng) tại các bước sóng trong vùng nhìn thấy và gần hồng ngoại hướng tới kích thước nhỏ hơn 100nm bị giới hạn bởi một giới hạn nhiễu xạ (diffraction limit) của ánh sáng. Rào cản cơ bản để kết quả trực tiếp của tính tự nhiên trong không gian ba chiều (3D) của các sóng truyền trong vật liệu điện môi (hoặc bán dẫn trong công nghệ quang tử silic) thường được xây dựng các khối mạch tích hợp quang. Kết quả này nhận được từ một nguyên lý sơ cấp như sau: với một lõi ống dẫn sóng vật liệu phi điện từ (như tinh thể silic hay germani, vật liệu thủy tinh silic...) với hằng số điện môi  $\epsilon_{core} > 0$  của ống dẫn sóng điện môi (là một số thực dương, không có phần ảo), quan hệ tán sắc liên quan đến hằng số truyền theo phương truyền sóng  $z$  là

$\beta = k_z$  và các hằng số pha ngang  $k_x, k_y$  của véc tơ sóng của chùm truyền với tần số có thể được viết lại là:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k_0^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \quad (2.1)$$

Hay là 
$$\beta^2 + k_x^2 + k_y^2 = \varepsilon_{core} \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \quad (2.2)$$

Trong đó,  $\omega, \lambda$  lần lượt là bước sóng và tần số ánh sáng trong không gian tự do và  $c$  là vận tốc ánh sáng trong chân không.

Với một sóng ánh sáng trong không gian 3D, cả  $k_x, k_y$  đều là các số thực, do vậy (2.2) ngụ ý một giới hạn trên của các hằng số pha ngang thông qua bất đẳng thức  $k_x, k_y \leq \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_{core}} = 2\pi n_{core} / \lambda_0$  với  $n_{core} = \sqrt{\varepsilon_{core}}$  là hệ số chiết suất của lõi ống dẫn sóng điện môi. Thông qua sự biến đổi Fourier (biến đổi tương hỗ hai chiều), giới hạn trên cho các hằng số pha ngang dẫn đến một giới hạn bên dưới của kích thước các mode ngang trong không gian truyền sóng ba chiều trong ống dẫn sóng là [6]:

$$d_x, d_y \geq \frac{\lambda_0}{2n_{core}} \quad (2.3)$$

Đây là giới hạn cơ sở cho kích thước của truyền mode quang trong các ống dẫn sóng khoảng nửa bước sóng không chỉ trong môi trường đồng nhất mà còn với truyền chùm trong các ống dẫn sóng truyền thẳng trong các tinh thể quang tử.

Tương tự như kích thước mode ngang trong các ống dẫn sóng, thể tích mode hiệu dụng của các khoang cộng hưởng quang cũng bị giới hạn bởi các nhiễu xạ, và do đó, những nỗ lực đáng kể ở hiện tại trong các nguyên lý thiết kế để tạo ra các thiết bị quang tử với thể tích mode đạt được tiếp cận rào cản cơ sở như sau:

$$V \geq \left(\frac{\lambda_0}{2n_{core}}\right)^3 \quad (2.4)$$

Để phá vỡ giới hạn nhiễu xạ, rõ ràng là một tiếp cận khác từ việc giảm kích cỡ đơn giản của ống dẫn sóng và buồng cộng hưởng quang tử kích thước micro vật liệu điện môi là cần thiết. Điều cốt yếu trong việc giảm kích thước với các mode

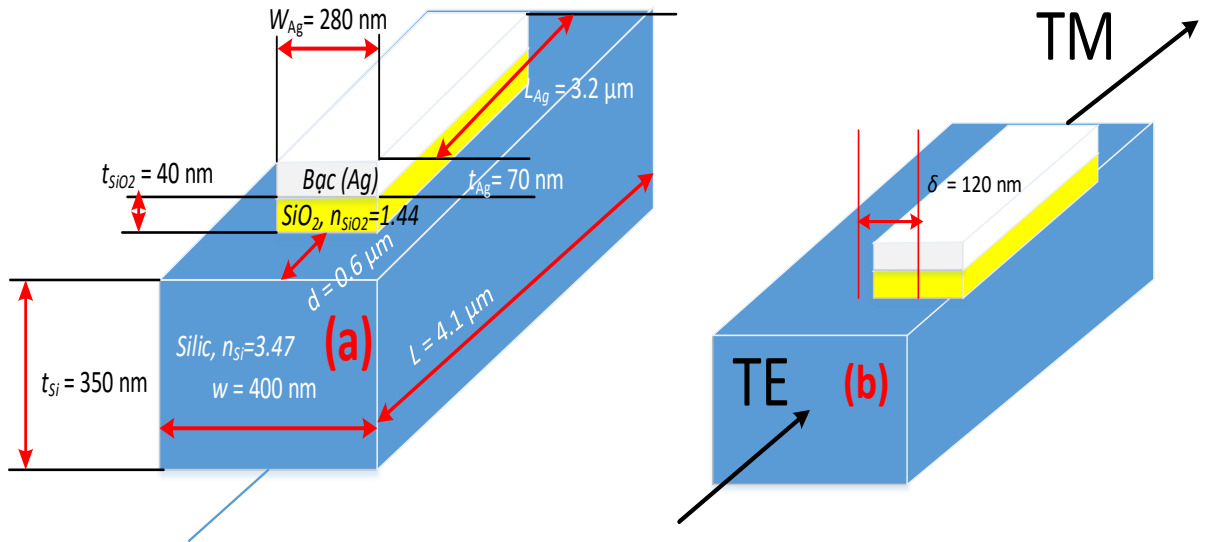
quang với kích thước ngang trong cơ chế dưới bước sóng, các sóng quang chiều thấp hơn mà ở đó các hằng số pha ngang cả  $k_x, k_y$  là các số ảo phải được thực hiện. Như đã phân tích, những sóng bậc thấp có thể đạt được với vật liệu lõi mà ở đó  $\epsilon_{core} < 0$ , ví dụ như lõi vật liệu kim loại phía trên tần số cực tím. Trong trường hợp này thì giới hạn trên (2.3) không được áp dụng, các ống dẫn sóng cũng như buồng cộng hưởng với diện tích và thể tích mode hiệu dụng trên một kích cỡ dưới bước sóng để phá vỡ giới hạn nhiễu xạ có thể được nhận ra. Các mode tương ứng xảy ra tại giao diện giữa kim loại và một điện môi được gọi là các giả hạt plasmon bề mặt SPPs hoặc các plasmon bề mặt trong những năm gần đây đang được nghiên cứu rộng rãi.

Những năm gần đây, nghiên cứu về các mạch quang tử tích hợp kích thước nano ứng dụng để tạo ra các vi mạch quang xử lý tín hiệu được phát triển nhanh chóng [29]. Đặc biệt nghiên cứu các mạch lai ghép giữa quang tử silic (silicon photonics) và nano-plasmonics để tạo ra các ống dẫn sóng lai ghép plasmonic - HPW (hybrid plasmonic waveguide) với băng rộng, cự ly truyền lớn (long range propagation) [15] tức là suy hao nhỏ để bắt giữ các mode ánh sáng kích thước nano tại một lớp giao diện điện môi vài chục nano (thường là lớp thủy tinh oxít silic-SiO<sub>2</sub>) nằm giữa lớp lõi silic (Si) và lớp kim loại mỏng (thin film metal) hoặc là ống dẫn sóng kim loại - điện môi - kim loại MIM (metal - insulator - metal) [30] [31] với các kỹ thuật mô phỏng số [32].

Đầu tiên, NCS đề xuất các cấu trúc ống dẫn sóng lai ghép plasmonic HPWs (hybrid plasmonic waveguides) 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 (polarization rotator). 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 (Ag). Việc nghiên cứu sự truyền mode sử dụng kỹ thuật mô phỏng số bằng các phương pháp phân tử hữu hạn FEM và mở rộng mode riêng EME.

### 2.1.1. Thiết kế cấu trúc và phân tích hoạt động

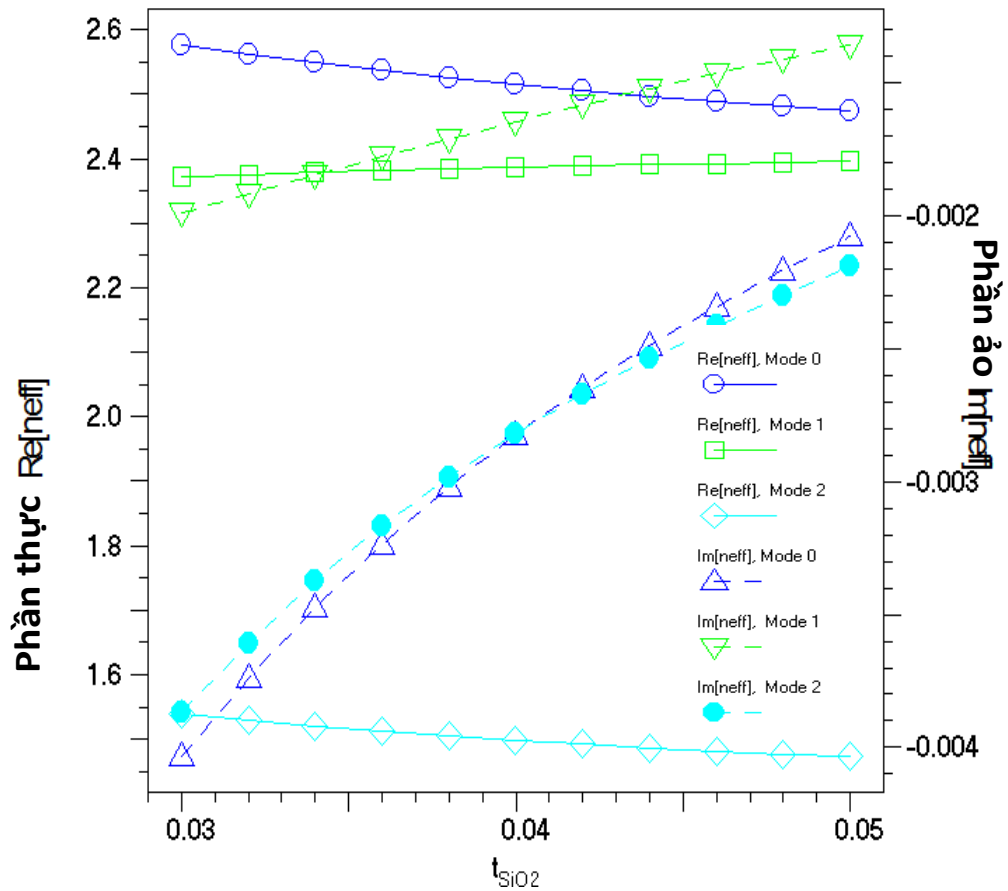
Hình 2.1(a) và hình 2.1(b) phân tích một cấu trúc ống dẫn sóng đề xuất.



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

Bước sóng hoạt động cho cấu trúc này được thiết kế tại bước sóng trong cửa sổ thông tin quang thứ ba  $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ . 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  $L = 4.1 \mu\text{m}$ , chiều rộng  $w = 400 \text{ nm}$  và lớp trên là một lớp thủy tinh silic ( $\text{SiO}_2$ ) dày  $t_{\text{SiO}_2} = 40 \text{ nm}$  và phía trên lớp  $\text{SiO}_2$  này phủ một lớp kim loại bạc (Ag) mỏng có chiều dày  $t_{\text{Ag}} = 70 \text{ nm}$ . Chiều dày lớp Silic được thiết kế là  $t_{\text{Si}} = 350 \text{ nm}$  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  $w_{\text{Ag}} = 280 \text{ nm}$ . Chiết suất cho lõi Si và lớp vỏ thủy tinh Silic ( $\text{SiO}_2$ ) lần lượt là 3.47 và 1.444 tại bước sóng  $1550 \text{ nm}$ . Trong khi đó, hệ số chiết suất của kim loại bạc ở bước sóng này được xác định bởi:  $n_{\text{Ag}} = 0.1453 + 11.3587i$  [33]. Tất cả các cấu trúc được phủ bởi lớp vỏ thủy tinh silic  $\text{SiO}_2$ .

Với ống dẫn sóng lai ghép plasmonic như Hình 2.1, mode kích thích ban đầu vào lõi Silic là mode cận TE (quasi TE). Khi truyền sóng trong ống dẫn sóng, để tối thiểu hóa suy hao truyền thì ta cần phải: <sup>(1)</sup>tối thiểu hóa được sai khác của phần thực giữa các hệ số mode ở đầu vào và đầu ra và <sup>(2)</sup>làm mode cận TE sẽ biến mất hay gần điều kiện “cutoff” khi truyền qua ống dẫn sóng lai ghép plasmonic HPW, do đó tối đa hóa sự lưỡng chiết mode của nó.



Hình 2. 2. Hệ số chiết suất hiệu dụng  $n_{eff}$  của mode lai ghép plasmonic tại lớp thủy tinh silic nằm ở giữa giao diện kim loại và lõi silic

Tính chất đặc trưng cho việc nghiên cứu những ống dẫn sóng lai ghép plasmonic nói riêng và các ống dẫn sóng nói chung là phải tìm hiểu được sự phân bố năng lượng của trường điện từ, cụ thể là các thành phần điện trường và từ trường phân bố trong cấu trúc ống dẫn sóng với tính chất riêng độc lập với sự truyền sóng. Đặc trưng ấy được biểu diễn thông qua hệ số mode hiệu dụng  $n_{eff}$  (effective index). Sử dụng kỹ thuật mô phỏng số FEM giải mode để tìm các hệ số hiệu dụng. Hình 2.2



thể hiện sự phụ thuộc của hệ số hiệu dụng vào độ dày của lớp điện môi thủy tinh silic ( $\text{SiO}_2$ ) giữa lớp lõi silic và nắp kim loại bạc.

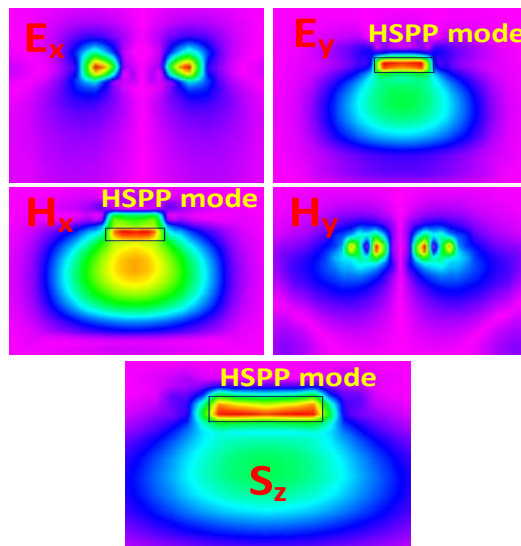
Cột bên trái thể hiện phần thực ký hiệu là  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  và cột bên phải thể hiện phần ảo ký hiệu  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  của các mode. Công cụ mô phỏng FEM giúp tìm tất cả các mode được dẫn trong ống dẫn sóng với các mode cơ bản (mode 0) và các mode bậc 1 (mode 1) và mode bậc 2 (mode 2). Trong quá trình thực hiện, sử dụng kỹ thuật mô phỏng FEM và kỹ thuật mô phỏng EME trong một không gian 3D với việc phân chia lưới có kích thước  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 5\text{nm}$  và độ phân giải 1nm trong các lưới theo các trục  $x$ ,  $y$  và  $z$  (chiều rộng, chiều cao của ống dẫn sóng và phương truyền). Bên cạnh đó, phương pháp mô phỏng sử dụng điều kiện biên của vùng tính toán là lớp hấp thụ hoàn hảo PML (perfectly matched layer) dài  $3\mu\text{m}$  theo trục  $x$  và  $2\mu\text{m}$  theo trục  $y$  để ngăn cản các thành phần xuất hiện do mô phỏng số [32]. Hệ số chiết suất của kim loại bạc được tuân theo mô hình Lorentz - Drude [34]. Một trường phân cực TE được tạo ra bởi sử dụng một lưỡng cực theo thành phần trường  $H_z$  theo một xung dạng Gaussian ở đầu vào để kích thích cấu trúc lai ghép. Do sự truyền của trường quang trong ống dẫn sóng, trường quang này sẽ tạo ra phân cực giữa lớp giao diện của kim loại bạc với lớp ô xít silic ( $\text{SiO}_2$ ) và lớp ô xít silic với lớp lõi silic. Kết quả là có sự xuất hiện một thành phần trường lan truyền giữa lớp thủy tinh silic, đó chính là thành phần mode lai ghép plasmonic (SPP). Chúng ta biết rằng: do thuộc tính tự nhiên của plasmonic, các sóng phân cực TE (s-polarized wave) sẽ biến mất tại giao diện kim loại - điện môi mà chỉ có sóng phân cực TM (p-polarized wave) mới lan truyền theo bề mặt giao diện kim loại - điện môi. Do đó, sóng lai ghép gọi là cận TM (quasi TM) mới tồn tại và bị bắt giữ giữa lớp giao diện điện môi kích thước nano. Sự bắt giữ này đạt hiệu suất tối đa khi mà có sự cộng hưởng, theo đó, hằng số truyền của mode cận TM phải bằng với số sóng của dao động plasmon bề mặt (surface plasmon) nội tại ở lớp ô xít silic giữa kim loại bạc và lớp lõi silic. Véc tơ Poiting cũng cho thấy độ lớn của trường ánh sáng được giam giữ (confinement of light) tại khe kích thước nano là lớp ô xít giữa lớp nắp kim loại

bạc và lõi silic. Kết quả mô phỏng hệ số chiết suất hiệu dụng từ Hình 2.2 cho thấy phân ảo của hệ số chiết suất hiệu dụng  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  này là rất nhỏ, do vậy khoảng cách truyền của ống dẫn sóng này lớn. Điều này là do chiều dài truyền được xác định theo định nghĩa là [35]:

$$L_{\text{prop}} = \frac{\lambda_0}{4\pi \text{Im}(n_{\text{eff}})} \quad (2.5)$$

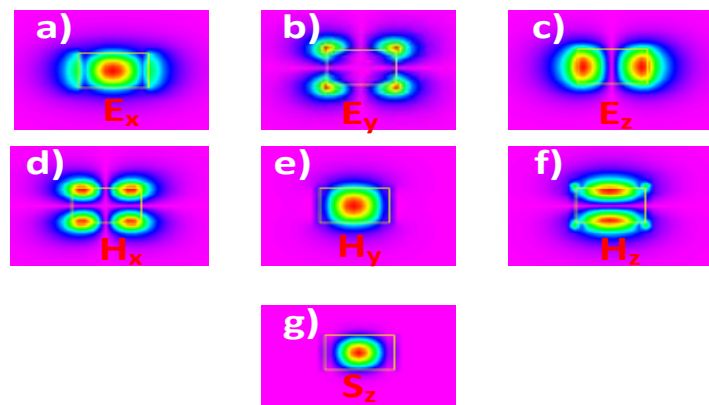
### 2.1.2. Kết quả mô phỏng và nhận xét

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 Poiting  $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$  tại tọa độ theo phương truyền của ống dẫn sóng là  $z = 1\mu\text{m}$  (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  $\text{SiO}_2$  bằng sử dụng mô phỏng FEM ta thấy tại chiều dày  $t_{\text{SiO}_2} = 40\text{nm}$  thì phân bố mode của các mode HP (hybrid plasmonic mode) nằm trọn trong một khe với kích thước nano với diện tích mode hiệu dụng là  $A_{\text{eff}} = t_{\text{SiO}_2} \times w_{\text{Ag}}$ .



Hình 2. 3. Mô phỏng FEM các thành phần của trường điện từ của ống dẫn sóng lai ghép plasmonic với nắp kim loại bạc nằm đối xứng trên trục trung tâm của ống dẫn sóng tại vị trí truyền  $z = 1\mu\text{m}$  ứng với vị trí bắt đầu của nắp kim loại bạc

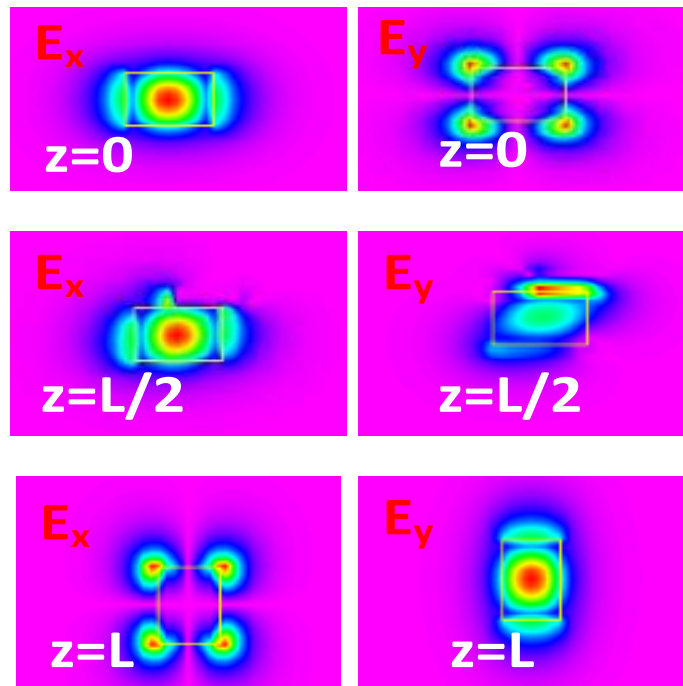
Tiếp theo, nghiên cứu tính chất của các ống dẫn sóng plasmonic khi “dịch chuyển” nắp kim loại lệch khỏi trục đối xứng một khoảng cách nhỏ  $\delta$ , như vậy cấu trúc không còn đối xứng. Với những cấu trúc không đối xứng, véc tơ của các thành phần trường sẽ biến đổi dần theo phương truyền sóng  $z$ . Điều này là do mặt cắt hình chéo ống dẫn sóng có sự biến đổi của phân bố chiết suất (hay hằng số điện môi) của ống dẫn sóng thay đổi. Kết hợp với véc tơ sóng biến đổi, sự phối ghép (coupling) giữa các thành phần điện và từ sẽ làm cho điện trường hoặc từ trường sẽ được tăng cường hay giảm đi tại các vị trí trên hướng truyền. Do vậy, cần có cơ chế thay đổi mặt cắt dạng hình học của ống dẫn sóng để sao cho thay đổi phân bố của hằng số điện môi và thay đổi sự phân bố mode của các thành phần trường điện từ. Khi sự phối ghép chéo giữa các trường được thực hiện tối thiểu, các thành phần của trường điện và trường từ biến đổi cho nhau, đó là lúc quay của trạng thái phân cực [36]. Trong thiết kế của cấu trúc quay phân cực, ống dẫn sóng silic như được thể hiện trên Hình 2.1(b) với chiều dài lớp lõi silic được chọn là  $L = 4.1\mu m$ , nắp bạc dày (theo phương độ cao  $y$ ) là 70nm. Khi mô phỏng hai biến theo chiều dài tấm kim loại bạc này và khoảng cách dịch  $\delta$ , chúng ta khảo sát sự biến đổi của trường  $E_x, E_y$  theo phương pháp FEM, kết quả tại vị trí lệch  $\delta = 120nm$ , chiều dài nắp kim loại bạc  $L_{Ag} = 3.2nm$  bắt đầu tại vị trí trên phương  $z = 0.6\mu m$  thì sự ghép phần chéo của các trường  $E_x, E_y$  là tối thiểu hóa.



Hình 2. 4. Mô phỏng FEM các thành phần của trường điện từ của ống dẫn sóng lai ghép plasmonic với nắp kim loại bạc nằm dịch phải  $\delta = 120nm$  trên trục trung tâm của ống dẫn sóng tại vị trí truyền đầu vào

Hình 2.4 thể hiện kết quả mô phỏng FEM của các thành phần trường tại đầu vào cấu trúc quay mode phân cực khi nắp kim loại bạc lệch  $\delta = 120nm$ . Trường đầu vào do kích thích của xung quang dạng Gaussian ở mode phân cực cận TE. Tiếp đến Hình 2.5 là kết quả mô phỏng cho chỉ các thành phần  $E_x, E_y$  của trường điện tại các vị trí truyền lần lượt ứng với  $z=0, z=L/2$  và  $z=L$  (điểm cuối ống dẫn sóng) thì có sự biến đổi dần và quay của các thành phần này. Kết quả có sự quay góc  $90^\circ$  giữa  $E_x, E_y$  khi truyền từ đầu đến cuối của lõi silic bởi sự kích thích các mode lai ghép plasmonic.

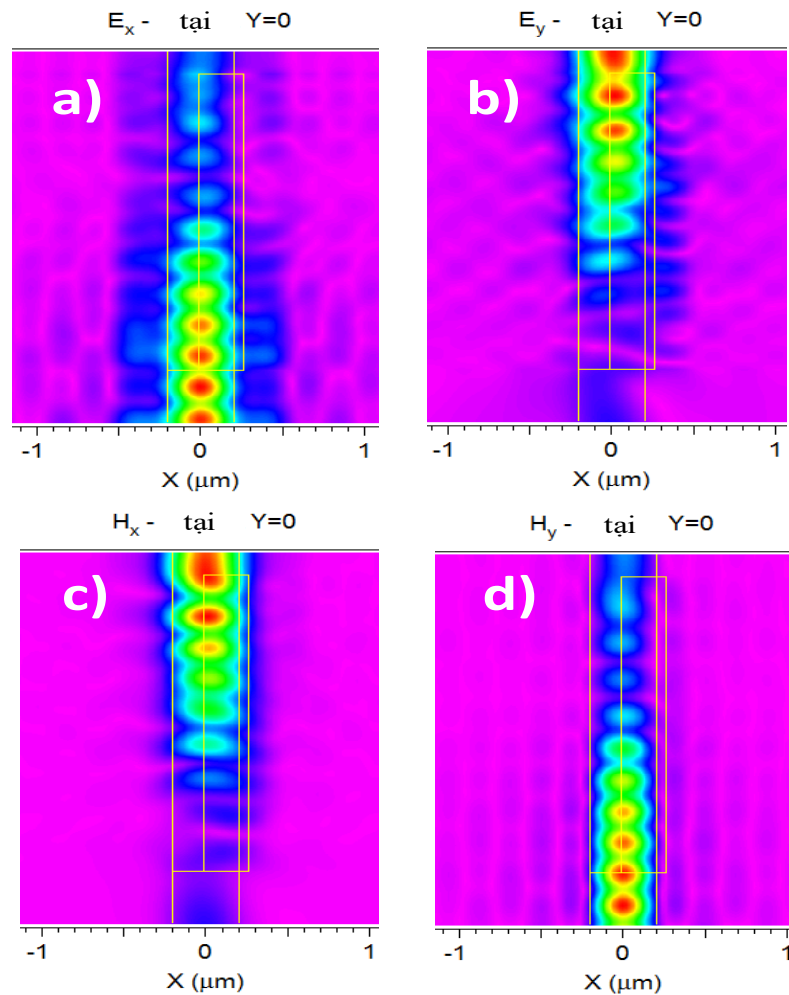
Bước tiếp theo, bằng việc sử dụng mô phỏng bằng phương pháp mở rộng mode riêng EME để khảo sát sự truyền của trường trong ống dẫn sóng và khảo sát đặc tính truyền, phản xạ, hấp thụ của trường quang khi truyền qua ống dẫn sóng HPW và để so sánh với mô phỏng sử dụng kỹ thuật FEM.



Hình 2. 5. Mô phỏng FEM các thành phần của trường điện  $E_x, E_y$  của ống dẫn sóng lai ghép plasmonic với nắp kim loại bạc nằm dịch phải  $\delta = 120nm$  trên trục trung tâm của ống dẫn sóng tại vị trí truyền đầu vào, giữa và cuối ống dẫn sóng silic

Hình 2.6 thể hiện kết quả mô phỏng sử dụng kỹ thuật EME với các thành phần trường điện  $E_x, E_y$  và các thành phần trường từ  $H_x, H_y$ . Kết quả mô phỏng

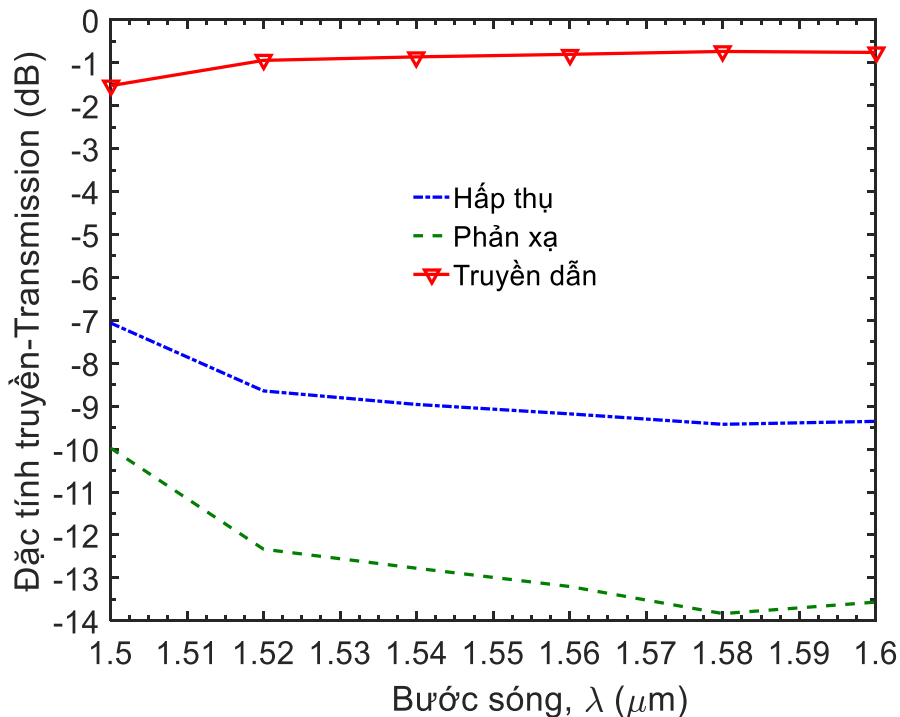
cho thấy biên độ trường  $E_x(H_y)$  giảm dần đến gần giá trị 0 theo phương truyền, trong khi biên độ trường  $E_y(H_x)$  tăng dần từ giá trị 0 đến giá trị cực đại tại đầu ra ống dẫn sóng, hơn nữa dạng phân bố trường của các thành phần này là trái ngược nhau. Như vậy, cấu trúc cho phép quay các thành phần trường một góc quay  $90^\circ$ , do đó cấu trúc là một thiết bị biến đổi và quay trạng thái phân cực: đầu vào mode TE sẽ được biến đổi thành mode TM ở đầu ra và ngược lại. Cấu trúc này có nhiều ứng dụng trong các mạch xử lý tín hiệu quang và các thiết bị quang, ví dụ như: mạch biến đổi phân cực cho xử lý điều chế dịch pha hai trạng thái phân cực DP-QPSK (dual polarization - quadrature phase shift keying).



Hình 2. 6. Mô phỏng EME sự truyền của các thành phần trường điện từ trong cấu trúc biến đổi trạng thái phân cực với dịch chuyển nắp một khoảng  $\delta = 120nm$  trên trục trung tâm của ống dẫn sóng và tại tọa độ giữa chiều cao của ống dẫn sóng  $Y = 0$  (theo trục chiều cao y): a)  $E_x$ , b)  $E_y$ , c)  $H_x$  và d)  $H_y$

Cuối cùng, khảo sát đặc tuyến phổ bước sóng (wavelength dependency) của thiết bị thiết kế biến đổi trạng thái phân cực. Bằng việc sử dụng mô phỏng EME để đo lường các thành phần đặc trưng của truyền sóng trong một ống dẫn sóng HPW là: hấp thụ, phản xạ và truyền dẫn. Phần hấp thụ do thành phần ảo của hệ số mode (bởi hấp thụ vào lớp kim loại bạc) và hấp thụ tinh thể silic kết hợp với tần số sóng ánh sáng. Phần phản xạ do đặc tính phản xạ của sóng khi truyền trong môi trường và phản xạ tại vỏ. Phần truyền qua thể hiện đặc tính truyền dẫn (guiding) của sóng ánh sáng qua ống dẫn sóng HPW, đó là đặc tính quan trọng. Coi như lớp hấp thụ là hoàn hảo của vùng tính toán mô phỏng là lý tưởng thì đặc tính truyền qua được coi như là suy hao chèn  $I.L$  (insertion loss) của cấu trúc được thiết kế, đặc tính này được xác định bởi biểu thức sau:

$$I.L = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (2.6)$$



Hình 2. 7. Đặc tính truyền phụ thuộc bước sóng trong dải 100nm của thiết bị quay phân cực

Suy hao chèn được tính toán nhờ quan hệ giữa biểu thức năng lượng của trường điện từ tại đầu ra của thiết bị so với năng lượng của trường đầu vào thiết bị,

tính theo công thức tích phân của điện trường và từ trường trong không gian diện tích mặt cắt phần chéo của ống dẫn sóng HPW. Hình 2.7 là kết quả mô phỏng EME của các thành phần hấp thụ, phản xạ và truyền dẫn của thiết bị theo đáp ứng phổ bước sóng trong dải cửa sổ thứ ba, từ 1500nm đến 1600nm. Các kết quả cho thấy rằng phần công suất hấp thụ và phản xạ của thiết bị nhỏ (hấp thụ dưới -7dB và phản xạ dưới -10dB) và suy hao truyền thấp, nhỏ hơn -1.5dB trong dải 100nm ở bước sóng từ 1500nm đến 1600nm. Thêm vào đó, ta thấy rằng kích thước thiết bị chỉ dài cỡ 4.1 $\mu$ m và rộng 400nm là rất nhỏ, mật độ tích hợp rất cao. Hơn thế, suy hao do hấp thụ kim loại của cấu trúc là nhỏ bởi phần ảo nhỏ nên mạch hỗ trợ cự ly truyền trường xa LRHPICs (long range hybrid plasmonic integrated circuits). Kết quả của đề xuất này cũng được so sánh với một số kết quả của các công bố tương tự theo bảng 2.1 dưới đây.

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

| <b>Tiêu chuẩn</b>             | <b>Cấu trúc đề xuất [C1]</b>   | <b>Tài liệu tham khảo [31]</b> | <b>Tài liệu tham khảo [36]</b> |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| <b>Chức năng của cấu kiện</b> | Quay mode TE sang mode TM      | Quay mode TE sang mode HP      | Quay mode TE sang mode TM      |
| <b>Bước sóng</b>              | 1550nm                         | 1550nm                         | 1550nm                         |
| <b>Băng thông</b>             | 100nm                          | 200nm                          | 104-108nm                      |
| <b>Vật liệu</b>               | Ag, SiO <sub>2</sub> , silicon | Ag, SiO <sub>2</sub> , silicon | Ag, SiO <sub>2</sub> , silicon |
| <b>Suy hao hấp thụ</b>        | < -7dB                         | Không nhắc đến                 | Không nhắc đến                 |
| <b>Suy hao phản xạ</b>        | < -10dB                        | Không nhắc đến                 | Không nhắc đến                 |
| <b>Suy hao chèn I.L</b>       | < -1.5dB                       | Không nhắc đến                 | 0.5139dB                       |
| <b>Kích thước cấu kiện</b>    | 4.1 $\mu$ m x 400nm            | 4.5 $\mu$ m x 380nm            | 7 $\mu$ m 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 cổng 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 cổng 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.

Triển vọng của các bộ xử lý quang học đã thúc đẩy trong các hoạt động nghiên cứu gần đây để khắc phục những hạn chế về hiệu suất tất yếu của các thiết bị điện tử bán dẫn bị giới hạn và chậm trễ vốn có và sinh nhiệt cao [37]. Các thiết bị quang điện sử dụng các photon ánh sáng làm vật mang thông tin có thể cung cấp tốc độ truyền thông cao, công suất cao và tổn thất thấp. Tuy nhiên, giới hạn nhiễu xạ của ánh sáng là một trở ngại cơ bản để giảm kích thước của các thành phần logic quang học xuống thang đo của các thiết bị điện tử trong các mạch tích hợp [38].

Sóng điện từ bị mắc kẹt trên các giao diện điện môi kim loại và kết hợp với việc truyền dao động điện tử tự do trên bề mặt kim loại được gọi là các phân cực plasmon bề mặt [39], được coi là có tiềm năng nhất để thực hiện các mạch quang kích thước nano mét [40]. Các mạch và thiết bị quang hiệu suất cao dựa vào SPPs hiện nay có kích thước cực kỳ nhỏ gọn để tích hợp do đặc tính truyền dẫn của ánh sáng trong miền nano và vượt qua giới hạn nhiễu xạ cổ điển. Một lượng lớn các



thiết bị dựa trên SPPs, chẳng hạn như chẳng hạn như bộ điều chế dựa trên giao thoa kế Mach Zehnder [41], chuyển mạch toàn quang [42], bộ chia công suất [43], cảm biến, bộ quay phân cực [44], siêu vật liệu [45], bộ tách bước sóng [46], thông tin plasmonic [47], bộ đệm quang [48], và bộ phản xạ Bragg [49] đã được chứng minh bằng thực nghiệm và mô phỏng bằng số đã nêu trong một số báo cáo khoa học.

Các mạch logic số đã được thiết kế và ứng dụng trong thực tế từ lâu dựa vào nền tảng công nghệ điện tử, đặc biệt là trong sự phát triển của công nghệ vi điện tử VLSI hiện đại ngày nay nhưng bị giới hạn về tốc độ và kích thước micromet do đặc tính tắt yếu của điện tử là gần bằng với giới hạn bước sóng hoạt động. Công logic quang học được coi là nền tảng để tạo ra các mạch tích hợp quang tử trong ngành công nghiệp điện tử thế hệ mới, đặc biệt các cổng logic quang thuận nghịch hiện đang trở nên rất quan trọng trong lĩnh vực tính toán lượng tử [50, 51]. Một số cổng logic và mạch tích hợp quang dựa trên công nghệ quang tử silicon (SiP) [52, 53] và hiệu ứng plasmonics [54] sử dụng ống dẫn sóng đang được nghiên cứu và công bố trong thời gian gần đây. Tuy nhiên, kích thước tích hợp vẫn còn lớn, mạch tích hợp chưa đạt được kích thước dưới bước sóng hoặc vài trăm nano mét. Ví dụ như một số cổng logic khác nhau dựa trên các bộ cộng hưởng vòng silicon siêu nhỏ, điều chế pha chéo và bộ khuếch đại quang bán dẫn đơn đã được nghiên cứu [55, 56]. Một số thiết bị quang học khác sử dụng hiệu ứng quang điện hoặc từ trường bằng cách áp dụng điện trường hoặc từ trường tương ứng có nhược điểm là thời gian chuyển đổi cao, suy hao cao và cấu trúc phức tạp [57].

Trong phần này đề xuất một số cổng logic plasmonic thuận nghịch XOR, OR, NOT, Feynman trong cấu trúc ống dẫn sóng plasmonic MIM đơn giản với bộ cộng hưởng được hình thành từ các khoang Fabry-Perot bằng cách sử dụng các phân tích lý thuyết thông qua thuyết ghép mode theo thời gian và mô phỏng số thông qua phương pháp khai triển mode riêng EME [58]. Phương pháp EME có thể tối ưu hóa các tham số cấu trúc và hiệu suất quang đặc trưng của các cổng logic được đề xuất. 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 cổng 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 cổng logic được đề xuất có băng thông rộng trên 300nm

trong khi kích thước nhỏ gọn, cỡ  $2\mu m \times 1.2\mu m$ . 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. Các thiết bị được thiết kế và chế tạo với kích cỡ là 10nm với công nghệ chế tạo CMOS hiện đại nhất như khắc chùm electron [59] hoặc khắc chùm ion hội tụ [60].

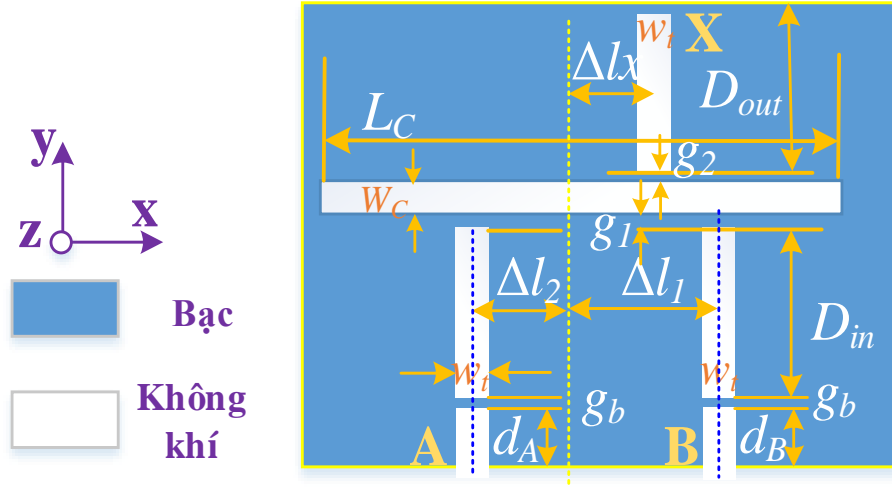
### 2.2.1. Nguyên lý thiết kế các cổng logic plasmonic

Cấu trúc được đề xuất 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, có độ thẩm tương đối được mô tả bằng cách sử dụng mô hình Drude:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + j\gamma)} \quad (2.7)$$

Trong đó  $\varepsilon_\infty$  là hằng số điện môi tại tần số tới hạn của Ag,  $\omega_p$  là tần số plasma lớn,  $\omega$  là tần số góc của ánh sáng tới trong chân không và  $\gamma$  là tần số va chạm của electron. Các tham số mặc định được cho như sau:  $\varepsilon_\infty = 3.7$ ,  $\omega_p = 9.1eV$ , và  $\gamma = 0.018eV$  [61]. Kim loại bạc Ag được chọn để thiết kế trong mạch này là do phần ảo của nó rất nhỏ trong dải bước sóng của cửa sổ viễn thông, do đó, tổn hao do hấp thụ độ sâu bề mặt thấp nên cho phép truyền sóng SPP với tầm truyền dài. Chiết xuất của vật liệu thủy tinh dioxit nóng chảy được mô tả bằng phương trình Sellmeier [62] là giá trị của nó trong dải bước sóng cửa sổ viễn thông của thông tin quang thay đổi trong phạm vi ngắn từ 1.44 đến 1.46 tại nhiệt độ phòng 300<sup>0</sup>K [63].

Các cổng logic plasmonic được đề xuất bao gồm ống dẫn sóng theo cấu trúc MIM được đặt theo hướng thẳng đứng và một khoang hẹp kích thước nano mét hình chữ nhật được đặt theo hướng nằm ngang như trong hình 2.8. Trong đó,  $L_C$  và  $W_C$  lần lượt là chiều dài và chiều rộng của ống dẫn sóng khoang hẹp nằm ngang;  $D_{in}$ ,  $w_t$  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;  $\Delta l_1$ ,  $\Delta l_2$  và  $\Delta l_x$  là khoảng cách của các cổng vào ống dẫn sóng 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. 8. Sơ đồ nguyên lý của cổng logic plasmon được đề xuất

Theo lý thuyết về phân cực plasmon bề mặt, sóng phân cực  $s$  (phân cực TE) không tồn tại trong cơ chế của mode sóng SPP và chỉ có thể tồn tại sóng phân cực  $p$  (sóng phân cực TM) và được dẫn trong mode sóng SPP, hiện tượng này được tạo nên từ nhiều phương pháp khác nhau, như cấu hình Otto [64], cấu hình Kretschmann [65], chế độ ống dẫn sóng plasmonic lai ghép silicon. Do đó, trong thiết kế này, sóng ánh sáng phân cực TM được phát ra từ hai cổng đầu vào và lan truyền trong ống dẫn sóng MIM, hằng số lan truyền phức  $\beta$  có thể nhận được bằng cách giải phương trình phân tán như sau [66]:

$$\tanh\left(\frac{k_d}{2} w\right) = -\frac{\varepsilon_d k_m}{\varepsilon_m k_d} \quad (2.8)$$

Với  $\varepsilon_d$  và  $\varepsilon_m$  là hằng số điện môi của lớp cách điện (không khí) và kim loại bạc Ag;  $k_d$  và  $k_m$  là số sóng trong lớp điện môi và lớp kim loại được xác định bởi  $k_d = \sqrt{\beta^2 - \varepsilon_d k_0^2}$  và  $k_m = \sqrt{\beta^2 - \varepsilon_m k_0^2}$ . Ở đây,  $k_0 = 2\pi / \lambda$  là số sóng của sóng lan truyền trong chân không. Quan hệ giữa chiết suất hiệu dụng của ống dẫn sóng MIM và hằng số lan truyền được định nghĩa là  $n_{eff} = \beta / k_0$ .

Trong cấu trúc plasmonic giống với ống dẫn sóng MIM đề xuất, độ lớn của sóng tới và ống dẫn sóng phụ thuộc vào thời gian được mô tả bằng sự giao thoa giữa sóng tới và sóng phản xạ liên quan đến hệ số phẩm chất của khoang bởi suy

hao tự nhiên của sự giao thoa ánh sáng khi truyền xung quanh khoang. Độ dịch pha tổng  $\Delta\varphi$  giữa hai mặt phẳng giao diện trong sự giao thoa ánh sáng phải thỏa mãn mối quan hệ về điều kiện cộng hưởng của sóng dừng sau đây:

$$\Delta\varphi = \beta_m 2L_C + \varphi_r = 2\pi m \quad (2.9)$$

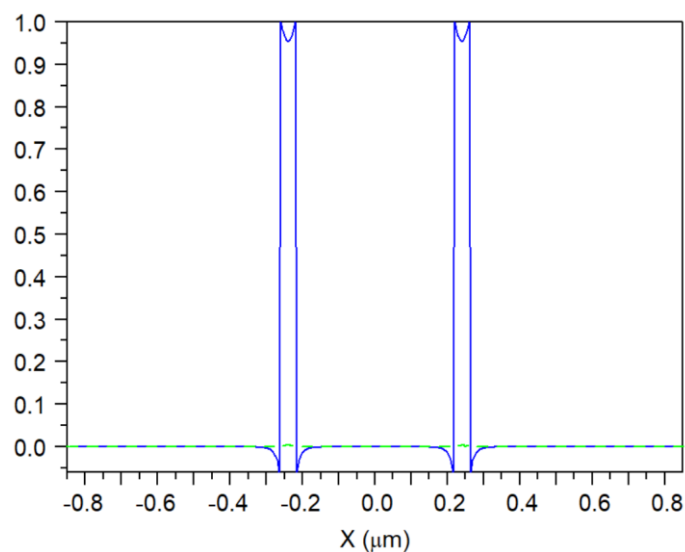
Với  $L_C$  là chiều dài của khoang hẹp,  $\varphi_r$  là độ dịch pha do sóng lan truyền ở ranh giới bên trái và bên phải của ống dẫn sóng khe hẹp,  $m$  là số nguyên xác định bậc của mode sóng cộng hưởng được kích thích trong khe hẹp,  $\beta_m$  là hằng số lan truyền của mode sóng bậc thứ  $m$ . Thông thường,  $\varphi_r$  là rất nhỏ, có thể bỏ qua nó trong các kết quả phân tích. Do đó, bước sóng cộng hưởng có thể được viết như sau:

$$\lambda_m = 2n_{eff}L_C / m \quad (2.10)$$

Với  $n_{eff}$  là chỉ số chiết suất hiệu dụng của ống dẫn sóng khe hẹp nano mét.

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

Giả sử rằng trường điện từ từ các nguồn đầu vào A, B lan truyền theo hướng  $z$  tại các 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 mô phỏng EME thể hiện trong hình 2.9 với bề rộng mode là  $w_t = 50nm$ .



Hình 2. 9. Phân phối mẫu từ trường của các mode SPP trong chế độ phân cực TM tại hai cổng vào A và B được giải theo phương pháp mô phỏng EME

Biểu thức trường từ của sóng phân cực TM có thể được viết như sau:

$$H^A = a_z a_n^A \exp(jk_m x) = a_z \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n^A j^n J_n(k_m \rho) \exp(jn\varphi) \quad (2.11)$$

$$H^B = a_z a_n^B \exp(jk_m x) = a_z \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n^B j^n J_n(k_m \rho) \exp\left[jn\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)\right] \quad (2.12)$$

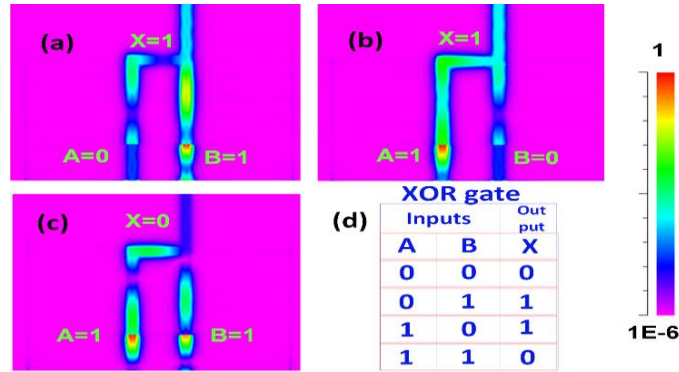
Với  $a_n^A$  và  $a_n^B$  là biên độ sóng đầu vào cổng A và B;  $\rho$  và  $\varphi$  tương ứng là khoảng cách xuyên tâm và góc phương vị;  $a_z$  là biên độ tại điểm z và  $J_n(k_m \rho)$  là biểu diễn của hàm Bessel với bậc thứ n. Trong quá trình thiết kế coi hai đầu vào A và B có cùng biên độ và góc pha.

Bên trong các ống dẫn sóng kích thước nano mét, sự kết hợp của các trường quang từ các cổng đầu vào có cùng bước sóng sẽ tạo ra hiệu ứng giao thoa với nhau để tạo thành sóng đứng bởi các giá trị nút sóng và đỉnh sóng, ở đó trường điện từ bị triệt tiêu hoặc là cực đại, các trường cực đại này từ các cổng đầu vào đi vào khe hở hẹp giữa ống dẫn sóng và chiều rộng của ống dẫn sóng kích thước nano mét. 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 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. Hình 2.10 mô tả thành phần trường  $|H_y|$  tại cổng ra X trong tất cả các trường hợp hai cổng vào có các mức 0 hoặc 1. Tại cổng ra X, ta phân biệt được các mức công suất để xác định trạng thái logic là mức 0 hay mức 1. Theo đó, trạng thái logic được xác định là mức 1 nếu công suất đầu ra lớn hơn công suất đầu vào 10%, ngược lại trạng thái logic được

xác định là 0 nếu công suất đầu ra nhỏ hơn công suất đầu vào 10%. Chú ý rằng, khi hai mức đầu vào tại cả hai cổng đều là mức 0 thì đầu ra có mức logic là 0. Bảng chân lý của cổng XOR thể hiện tất cả các trạng thái của đầu ra theo đầu vào tương ứng tại hình 2.10(d).

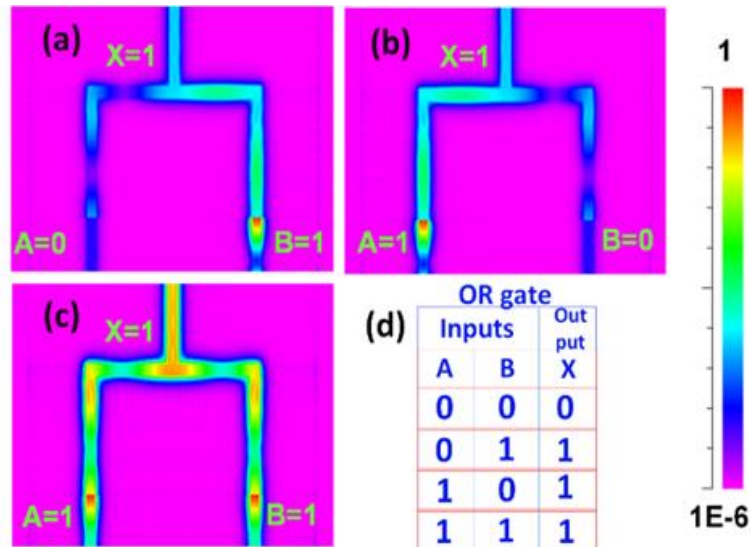


Hình 2. 10. Cổng logic XOR với một số trạng thái đầu vào (a)  $A=0$ ,  $B=1$ ; (b)  $A=1$ ,  $B=0$ ; (c)  $A=B=1$  và (d) bảng chân lý

### B) Cổng NOT

Có thể thấy rằng, trong hình 2.10 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

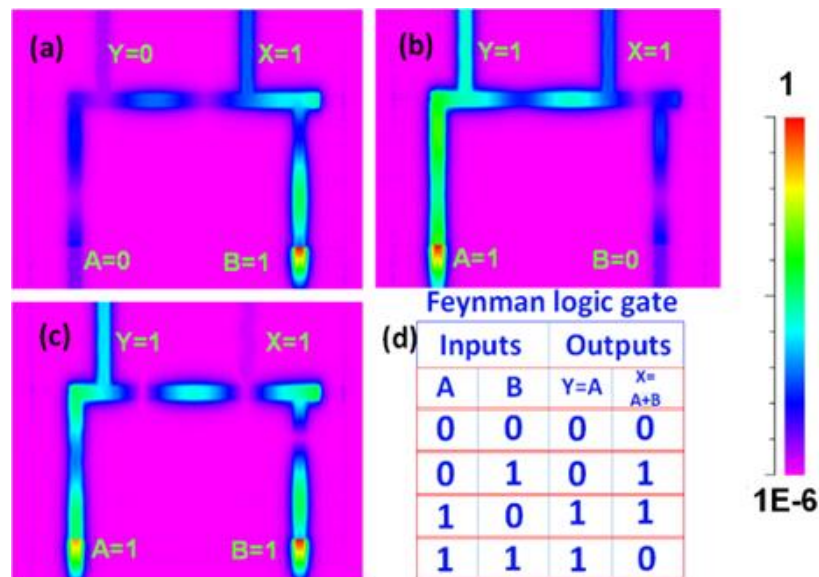


Hình 2. 11. Cổng logic OR cho các trạng thái đầu vào (a)  $A=0$ ,  $B=1$ ; (b)  $A=1$ ,  $B=0$ ; (c)  $A=B=1$  và (d) bảng chân lý

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. Hình 2.11 mô tả biên độ của cổng vào và ra khi biên độ được chuẩn hóa theo đầu vào tương ứng với các mức logic 0 hoặc 1.

#### D) Cổng thuận nghịch Feynman

Logic thuận nghịch đã được chú ý rất nhiều trong những năm gần đây và nó là một giải pháp đáng tin cậy trong tính toán quang học, CMOS công suất thấp, điện toán lượng tử và công nghệ nano [67]. Đối với logic thuận nghịch, việc ánh xạ 1-1 giữa đầu vào và đầu ra có thể gây ra sự mất mát thông tin tối thiểu. Trong thực tế, một trong nhiều loại cổng logic thuận nghịch thì cổng Feynman quang là một loại có tiềm năng cho việc hiện thực hóa các mạch tính toán quang công suất thấp [53].

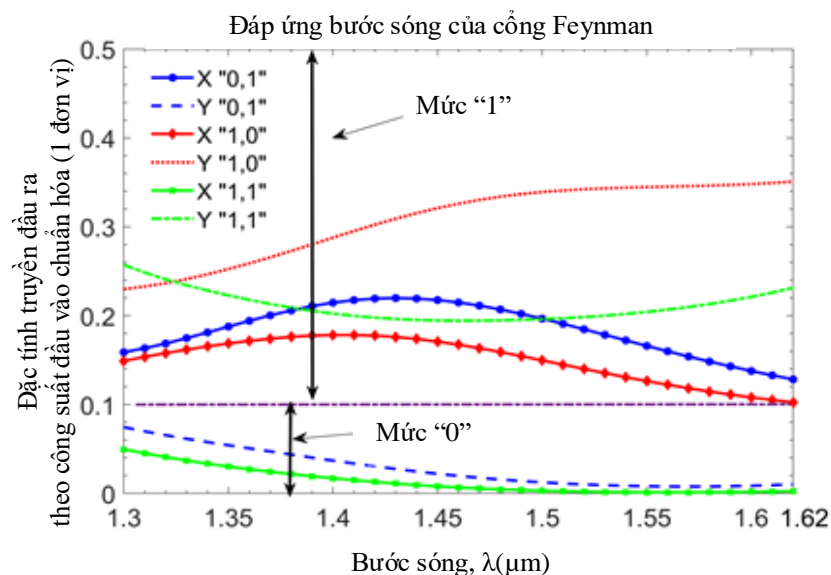


Hình 2. 12. Cổng logic thuận nghịch Feynman với các trạng thái đầu vào (a) A=0, B=1; (b) A=1, B=0; (c) A=1, B=1 và (d) bảng chân lý

Trong phần này, 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. Ở đây,  $\Delta l_y$  là khoảng cách bên trái từ cổng ra phụ Y (là một trong hai cổng ra của cổng Feynman) so với đường trục trung tâm của cấu trúc đề xuất. Hình 2.12(a, b, c) cho thấy các phần tử của  $|H_y|$  tại các cổng ra X, Y trong mọi trường hợp đầu vào khi hai biên độ tại hai cổng đầu vào tương ứng với các mức logic “0,1”, “1, 0” và “1, 1”. Chú ý rằng khi các cổng đầu vào có trạng thái mức 0 thì đương nhiên các cổng ra X, Y cũng có trạng thái là mức 0. Hình 2.12(d) biểu diễn bảng chân lý của cổng Feynman (FG). Có thể thấy rằng, kết quả mô phỏng từ sự phân bố từ trường tại hai cổng đầu ra tuân theo bảng chân lý của FG, và do đó ta đã hoàn thành thiết kế FG trong đề xuất này.

Có thể thấy rằng, đối với trường hợp các cổng XOR, OR, NOT được thể hiện trong Hình 2.10 và Hình 2.11, các thanh màu biểu thị sự khác biệt giữa các mức logic “0” và “1” là lớn hơn trong Hình 2.12. Do đó, với đề xuất trong chương này, ta coi đáp ứng bước sóng của cổng Feynman như một hiệu suất đặc trưng cho các cổng logic được đề xuất.



Hình 2. 13. Phổ bước sóng của quá trình truyền công suất đầu ra chuẩn hóa tại hai cổng ra X, Y của cổng logic Feynman được đề xuất trong cửa sổ bước sóng viễn thông với mọi trạng thái logic đầu vào



Hình 2.13 cho thấy kết quả mô phỏng phổ bước sóng của quá trình truyền công suất đầu ra tại hai cổng ra X, Y của cổng logic Feynman với mọi trạng thái logic đầu vào trong cửa sổ bước sóng viễn thông. Ở đây, ta giả định rằng mức công suất đầu ra của các bit 0 nhỏ hơn 10% mức công suất chuẩn hóa đầu vào và ngược lại đối với bit 1, mức công suất đầu ra lớn hơn 10% mức công suất chuẩn hóa đầu vào. 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, ta có thể rút ra một kết luận chung rằng tất cả các cổng logic plasmonic được đề xuất có dải bước sóng rộng.

Bên cạnh đó, việc thiết kế và thực hiện các cổng logic phức tạp hơn hoàn toàn có thể được thực hiện bằng cách kết hợp và xếp tầng các cổng logic này một cách hợp lý. Hiệu suất của chúng có thể được điều chỉnh bằng cách thay đổi các thông số cấu trúc để đạt được hoạt động mong muốn. Cổng logic plasmonic có thể giảm đáng kể kích thước và do đó giảm tán xạ, giảm ngưỡng tín hiệu cho các hoạt động logic và có thể cung cấp các thiết bị quang chuyển mạch tốc độ cao. Ưu điểm cũng như hạn chế của đề xuất này so với một số công trình đã được công bố trên tạp chí chuyên ngành theo bảng 2.2 dưới đây.

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

| <b>Tiêu chuẩn</b>          | <b>Cấu trúc đề xuất [J1]</b>   | <b>Tài liệu tham khảo [52]</b> | <b>Tài liệu tham khảo [53]</b> | <b>Tài liệu tham khảo [54]</b> |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| <b>Cấu trúc</b>            | Ống dẫn sóng plasmonic MIM     | Bộ cộng hưởng vòng             | Ống dẫn sóng Lithium Niobate   | Ống dẫn sóng plasmonic MIM     |
| <b>Vật liệu</b>            | Ag, SiO <sub>2</sub> , silicon | Silic, SiO <sub>2</sub>        | LiNbO <sub>3</sub>             | Ag, GaAsInP                    |
| <b>Cấu kiện đề xuất</b>    | OR, XOR, NOT, FEYNMAN          | NOT, OR, AND                   | FEYNMAN                        | AND, OR, NOT                   |
| <b>Kích thước cấu kiện</b> | 340nm x 1,073μm (OR, XOR, NOT) | > 10μm (đường kính vòng cộng)  | 23,8mm x 0,63mm                | 38,4μm x 0,66 μm               |

|                               |   |        |                   |                   |
|-------------------------------|---|--------|-------------------|-------------------|
|                               | GATE);1,25 $\mu$ m<br>x 963nm<br>(Feynman Gate) | hường) |                   |                   |
| <b>Bước sóng<br/>làm việc</b> | 1550nm  | 1550nm | 1550nm            | 632,8nm           |
| <b>Băng thông</b>             | >300nm  | 35nm   | Không nhắc<br>đến | Không nhắc<br>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 bằng cách phủ một nắp kim loại (metal cap) mỏng lên một ống dẫn sóng SOI (silicon on insulator) truyền thống. Phương pháp mô phỏng FEM được sử dụng để nghiên cứu sự bất giữ mode lai ghép của một sóng kích thích dạng xung Gaussian đầu vào trong một kích thước cỡ nano mét. 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. Phương pháp mô phỏng FEM nghiên cứu đặc tính quay của trường và phương pháp mô phỏng EME khảo sát sự truyền trường và các đặc tính quang học theo bước sóng trong một dải 100nm ở vùng cửa sổ thông tin quang thứ ba cho thấy cấu trúc quay phân cực có suy hao nhỏ, chiều dài truyền dài trong băng thông rộng 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.

Kết quả này được công bố trên kỷ yếu của Hội nghị REV-ECIT 2017: “*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*”

Hai là đề xuất thiết kế các cổng logic XOR, OR, NOT, cổng Feynman quang thuận nghịch được đề xuất và nghiên cứu tỉ mỉ bằng việc sử dụng phương pháp mô phỏng số EME. Bằng việc lựa chọn các tham số cấu trúc phù hợp, các cổng logic có chức năng khác nhau đã được thiết kế thành công trong chế độ plasmonic. 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.

Kết quả này được công bố trên Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng: “*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.

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

Các mode sóng sau khi được quay phân cực cũng như chuyển đổi trạng thái các mức logic nhờ vào các cấu kiện đã được đề xuất ở Chương 2, sẽ được đưa vào các cấu kiện tách/ghép kênh để thu được tín hiệu mong muốn. Các cấu kiện tách/ghép kênh sẽ được đề xuất để ứng dụng trong kỹ thuật WDM cho mạng toàn quang tốc độ cao. Do vậy, 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 ánh sáng khả kiến.

#### **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.

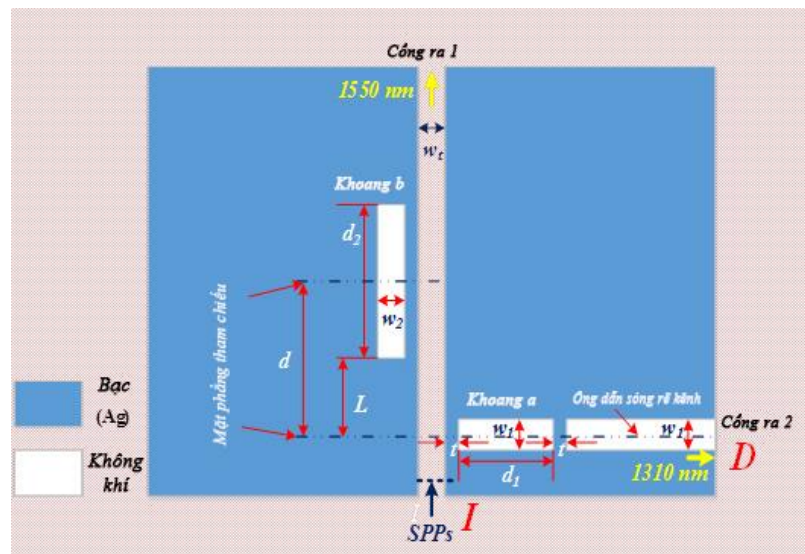
Như đã đề cập, sóng điện từ bị giam giữ trong giao diện giữa lớp kim loại - điện môi và kết hợp để truyền điện tích có giao động tự do trong kim loại, được gọi là các phân cực plasmon bề mặt SPPs, được xem là phương pháp tiên tiến nhất để thực hiện các mạch quang tử tích hợp cao bởi chúng có thể vượt qua đáng kể giới hạn nhiễu xạ cổ hữu của ánh sáng và xử lý ánh sáng kích thước bước sóng con. Chẳng hạn, kết quả nghiên cứu thực nghiệm của Miyazaki và cộng sự [68] cho thấy

ánh sáng có thể bị mắc kẹt trong một thể tích có kích thước cỡ  $10^{-3}\lambda^3$  (trong đó,  $\lambda$  là bước sóng của ánh sáng trong chân không) với một plasmonic kích thước nano dày 3nm. Một số cấu trúc cho các ống dẫn sóng plasmonic đã được đề xuất như các dây kim loại kích thước nano [69] cũng như các rãnh hình chữ V trong các đế kim loại [70], các ống dẫn sóng tròn plasmonic [71] và các bộ cộng hưởng hình đĩa [72] và nệm kim loại [97]. Trong các cấu trúc này, ánh sáng được tập trung ở lõi trong cấu trúc ống dẫn sóng kim loại - điện môi - kim loại cho phép xử lý và truyền tín hiệu ở kích thước nano. Do đó, các ống dẫn sóng khe hẹp plasmon dựa trên cấu trúc MIM đã được sử dụng để truyền dẫn tín hiệu tầm xa và giam giữ các mode sóng dưới bước sóng cho các mạch tích hợp quang tử. Ngoài ra, các ống dẫn sóng MIM có tiềm năng để thiết kế các thiết bị quang học cỡ nano vì khả năng định xứ cao và tổn thất uốn cong bằng không với việc chế tạo tương đối dễ dàng theo các công nghệ sản xuất hiện đại. Các cấu trúc nano plasmon này được áp dụng để thiết kế nhiều thiết bị, ví dụ như thiết bị chuyển mạch, các hệ thống hình ảnh bước sóng dưới bước sóng, các cảm biến sinh học. Hơn nữa, các ống dẫn sóng MIM băng thông rộng với các thùy bên thấp được đề xuất như là một giải pháp thay thế để tạo ra các cách tử Bragg cho việc ghép nối với các hệ thống viễn thông cáp quang [73]. Các khe kim loại plasmonic được sử dụng để thiết kế các thiết bị Terahertz với các ứng dụng cho trường gần [74]. Với sự phát triển của việc chế tạo hiện đại, các thiết bị này có thể được chế tạo và ứng dụng trong các mạch quang tích hợp và thông tin quang trong tương lai. Vì ống dẫn sóng MIM có khả năng giam giữ ánh sáng mạnh mẽ với chiều dài truyền plasmon bề mặt SPP chấp nhận được [75]. Dựa trên ống dẫn sóng MIM, gần đây, một số cấu trúc chọn lọc bước sóng đơn giản đã được nghiên cứu và đề xuất, chẳng hạn như các bộ lọc hình răng plasmonic [76] với bước sóng hoạt động không phổ biến trong cửa sổ bước sóng viễn thông. Đóng vai trò quan trọng trong các thiết bị này, các bộ cộng hưởng quang học sử dụng các ống nano sẽ là các phần tử quan trọng cấu thành các cấu trúc ghép kênh bước sóng plasmon do tính đối xứng, đơn giản và chế tạo dễ dàng. Các bộ phân tách bước sóng plasmonic có thể lọc ra từng bước sóng trong các kênh khác nhau, nó giữ vị trí rất quan trọng trong các mạch xử lý bước sóng ánh sáng kích thước nano.

Phần này đề xuất thiết kế và mô phỏng tối ưu bộ lọc bước sóng nano plasmonic cho hai dải bước sóng 1310nm và 1550nm dựa trên cấu trúc rẽ kênh trong ống dẫn sóng MIM sử dụng các khoang phản xạ kích thước nano mét, cấu kiện đề xuất có một số ưu điểm nổi trội hơn so với [76, 77]. Phương pháp mô phỏng triển khai mode riêng (EME) dựa trên thuyết đường truyền có ổn định cao [78] đã chứng minh rằng hiệu suất truyền và suy hao của ống dẫn sóng rẽ kênh đảm bảo khi thiết lập khoảng cách thích hợp giữa các khoang phản xạ và điểm rẽ. Các kết quả được phân tích chính xác bằng thuyết ghép mode theo thời gian và được tối ưu hóa đáng kể bằng phương pháp mô phỏng EME. Bộ tách kênh hai bước sóng plasmonic kích thước nano với hiệu suất tách/ghép cao đã cải tiến đáng kể để ứng dụng trong các thiết bị WDM.

### 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.

Cấu trúc được đề xuất dựa trên các ống dẫn sóng MIM, trong đó các chất cách điện trong khe kim loại và các khoang được thiết lập ban đầu là các lớp không khí.

Các lớp kim loại được sử dụng để thiết kế và chế tạo thiết bị là kim loại bạc, có hằng số điện môi tương đối dựa trên mô hình Drude theo công thức (2.7).

Với  $\varepsilon_\infty$  là hằng số điện môi tại tần số vô hạn của bạc,  $\omega_p$  là tần số plasma;  $\omega$  và  $\gamma$  lần lượt là tần số góc của ánh sáng tới trong chân không và tần số dao động của electron. Các thông số này được tham khảo từ [79, 80] như sau:  $\varepsilon_\infty = 3.7, \omega_p = 9.1eV, \gamma = 0.018eV$ . Theo thuyết phân cực plasmon bề mặt SPP, sóng phân cực s (sóng phân cực TE) không tồn tại được trong cơ chế phân cực plasmon bề mặt mà chỉ có sóng phân cực p (sóng phân cực TM) có thể tồn tại và “dẫn” trong cơ chế phân cực plasmon bề mặt. Do đó, trong thiết kế này sóng ánh sáng phân cực TM được đưa tới cổng vào và được truyền đến hai cổng đầu ra mong muốn ở hai dải bước sóng là 1310nm và 1550nm. Giả sử rằng I và D biểu thị cổng đầu vào và cổng rẽ,  $P_I$  và  $P_D$  lần lượt là công suất tại cổng vào và cổng rẽ. Sự truyền rẽ nhánh được đặc trưng bởi thông số truyền  $T_d$  được xác định:

$$T_d = \frac{P_D}{P_I}$$

Sự thay đổi về thời gian của biên độ sóng vào và sóng ra trong ống dẫn sóng được mô tả bởi nhiễu giao thoa giữa sóng tới và sóng phản xạ, yếu tố này liên quan tới hệ số phẩm chất  $Q_a$  và  $Q_b$  của khoang a và khoang b bởi suy hao đặc trưng của ánh sáng khi lan truyền qua các khoang [81]. Giả sử rằng  $\theta_1$  và  $\theta_2$  là các pha liên kết từ khoang a và khoang b tới đường dẫn ống dẫn sóng, và  $\theta_3$  là pha liên kết giữa khoang a tới ống dẫn sóng rẽ kênh, và  $d$  là khoảng cách tham chiếu giữa khoang a và khoang b (trong hình 4.1). Sự dòn pha giữa hai mặt phẳng tham chiếu được biểu diễn:

$$\varphi = d\beta_{spp} = dn_{eff}k_0 \quad (3.1)$$

Với  $n_{eff}$  là chỉ số khúc xạ ảnh hưởng của truyền mode SPP tới đường dẫn ống dẫn sóng ( $n_{eff}$  phụ thuộc vào bước sóng  $\lambda$  và độ rộng của đường dẫn ống dẫn

sóng),  $k_0$  là số sóng của ánh sáng tới trong chân không,  $\beta_{SPP}$  biểu diễn hằng số lan truyền của mode SPP trong ống dẫn sóng MIM.

Biểu thức (3.1) chỉ ra điều kiện pha cân bằng của tán sắc tương đối trong ống dẫn sóng plasmonic tuân theo biểu thức sau:

$$\varepsilon_m \sqrt{n_{eff}^2 - \varepsilon_d} \tanh \left( \frac{w_t k_0 \sqrt{n_{eff}^2 - \varepsilon_d}}{2} \right) + \varepsilon_d \sqrt{n_{eff}^2 - \varepsilon_m} = 0 \quad (3.2)$$

Với  $\varepsilon_m$  và  $\varepsilon_d$  là hằng số điện môi của lớp mạ bạc và lớp cách điện không khí. Hiệu suất truyền của cổng rẽ được biểu diễn theo lý thuyết:

$$T_d = \left| \frac{[1 - r \exp^{-2j\varphi}]^2 / (2Q_1 Q_2)}{[\omega / \omega_b - 1 + r \sin 2\varphi / (2Q_1)]^2 + [1 / Q_b + 1 / (2Q_2) + (1 - r \cos 2\varphi) / (2Q_1)]^2} \right| \quad (3.3)$$

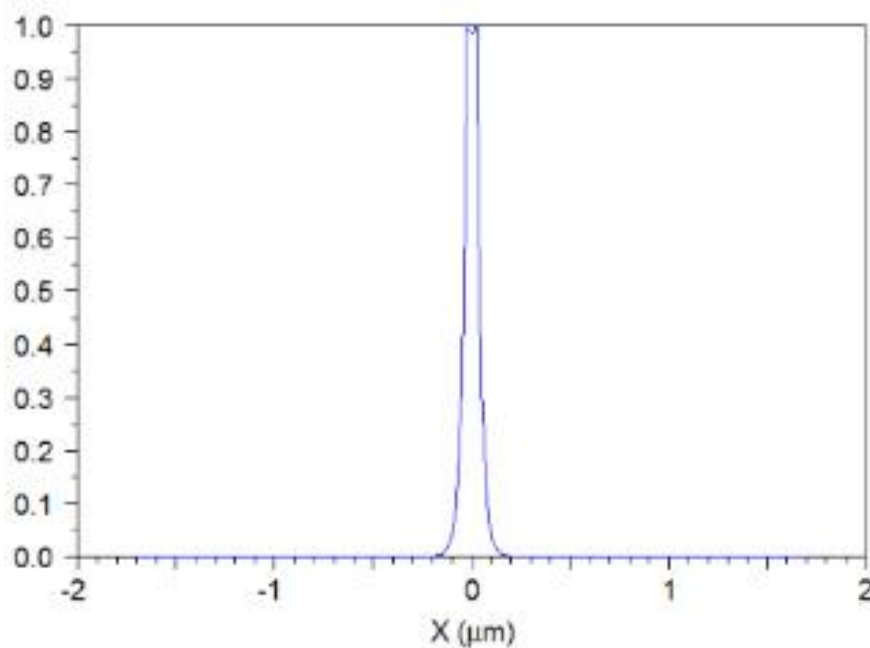
Với  $Q_1$  và  $Q_3$  lần lượt là hệ số phẩm chất của khoang a, khoang b do giảm công suất tới đường dẫn ống dẫn sóng,  $Q_2$  là hệ số phẩm chất do sự sụt giảm công suất vào ống dẫn sóng rẽ kênh;  $\omega_a$  và  $\omega_b$  tương ứng với tần số cộng hưởng của khoang a cũng như khoang b;  $r = [1 / 2Q_3] / [j(\omega / \omega_a - 1) + 1 / (2Q_2) + 1 / Q_a]$  là hệ số suy giảm.

Biểu thức (3.3) biểu diễn quá trình lan truyền của cổng rẽ đầu ra phụ thuộc hệ số pha  $\varphi$ .

Để tách thành công hai bước sóng 1310nm và 1550nm, cần phải thiết kế khoang a và khoang b sao cho khoang a cộng hưởng với bước sóng 1310nm nhưng không cộng hưởng với bước sóng 1550nm và ngược lại, khoang b cộng hưởng với bước sóng 1550nm nhưng không cộng hưởng với bước sóng 1310nm. Không tồn tại một phương pháp tường minh để nghiên cứu các hiệu ứng cộng hưởng trong các ống dẫn sóng plasmonic bằng phương pháp phân tích lý thuyết mà cần phải sử dụng phương pháp mô phỏng số để nghiên cứu. Phương pháp EME được sử dụng để nghiên cứu và tối ưu hóa quy trình thiết kế. 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  $w_t = 50nm$ ; 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 rãnh 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 như trong Hình 3.2 dưới đây.



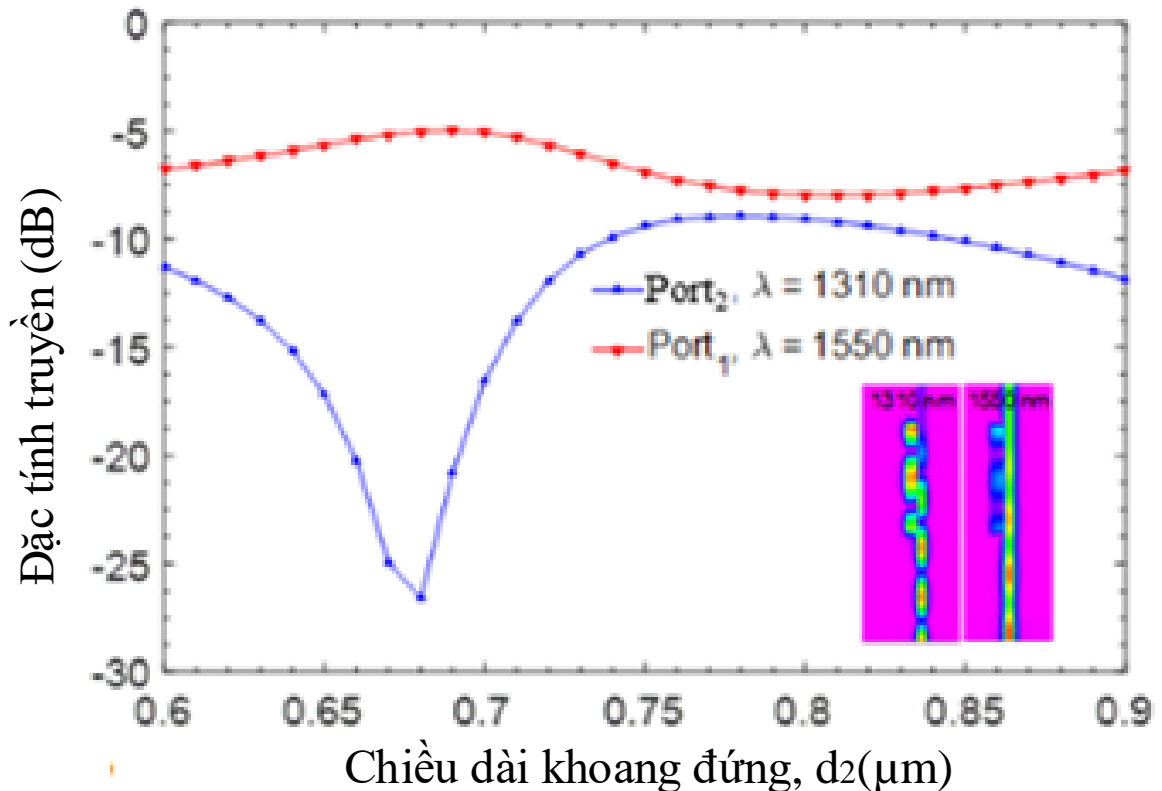
Hình 3. 2. Phân bố mode plasmonic tại cổng vào được thực hiện bằng mô phỏng số

### 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. Quá trình này được thực hiện bằng cách điều chỉnh hiệu suất truyền dẫn sao cho pha thỏa mãn điều kiện  $\varphi = (2m+1)\pi/2$  đối với bước sóng 1550nm cũng như  $\varphi = \pi n$  đối với bước sóng 1310nm, với  $m, n$  là các số nguyên.

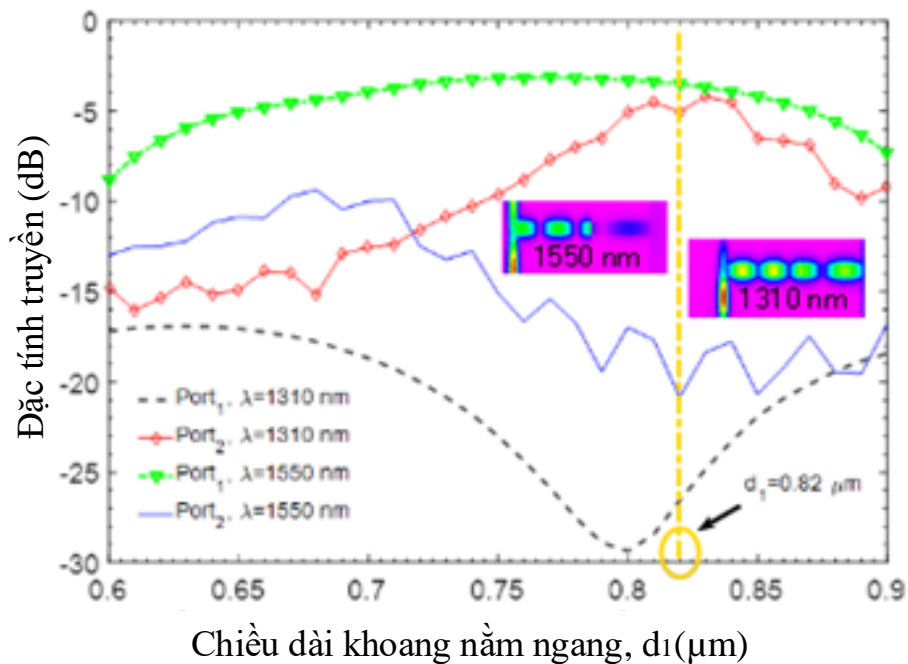
Hình 3.3 biểu diễn sự phụ thuộc của hiệu suất truyền dẫn tại cổng ra của đường dẫn ống dẫn sóng (cổng P1) trên khoang b có chiều dài  $d_2$  bằng mô phỏng số

khi thay đổi  $d_2$  từ  $0.6\mu m$  đến  $0.9\mu m$ . Từ hình 3.3 thấy rằng, tại chiều dài khoảng  $0.68\mu m$ , hiệu suất truyền tại cổng ra  $P1$  đạt được giá trị lớn nhất (khoảng  $-5dB$ ) ở bước sóng  $1550nm$  và đạt giá trị nhỏ nhất (khoảng  $-27dB$ ) ở bước sóng  $1310nm$  (điều này thể hiện khoảng b không cộng hưởng với bước sóng  $1310nm$ ). Do đó, trong thiết kế này ta chọn  $d_2 = 0.68\mu m$ .



Hình 3. 3. Mô phỏng EME về hiệu suất truyền phụ thuộc chiều dài của khoang b

Trong bước tiếp theo, bằng cách hoàn toàn tương tự, ta khảo sát sự thay đổi hiệu suất truyền tại cổng ra của ống dẫn sóng rẽ kênh (cổng  $P2$ ) bởi sự phụ thuộc chiều dài  $d_1$  của khoang a. Hình 3.4 biểu diễn hiệu suất truyền tại hai cổng ra khi  $d_1$  thay đổi từ  $0.6\mu m$  đến  $0.9\mu m$  bằng cách sử dụng mô phỏng số. Từ kết quả mô phỏng trong hình 3.4 cho thấy, để đạt được giá trị tối ưu cho cả suy hao thấp và nhiễu xuyên âm thấp tại bước sóng  $1310nm$  và  $1550nm$ , ta chọn giá trị phù hợp cho  $d_1 = 0.82\mu m$  (tại điểm đánh dấu trong hình 3.4). Trong hình 3.4 thể hiện trực quan trường điện thay đổi cho cả hai băng sóng tại chiều dài đã chọn  $d_1$  của khoang a.

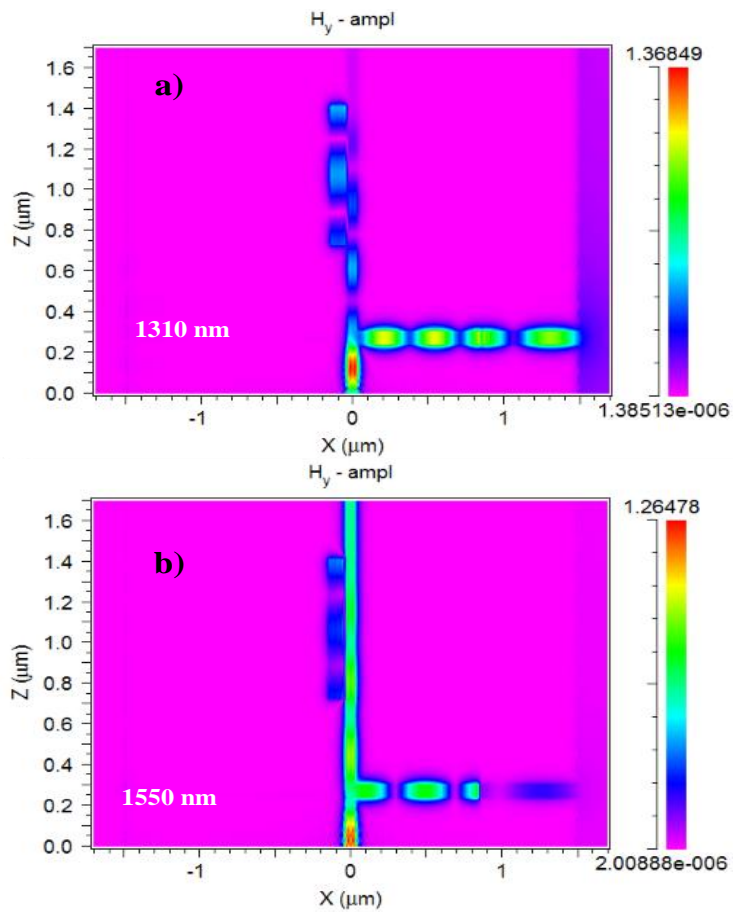


Hình 3. 4. Mô phỏng EME về hiệu suất truyền phụ thuộc chiều dài của khoang  $a$

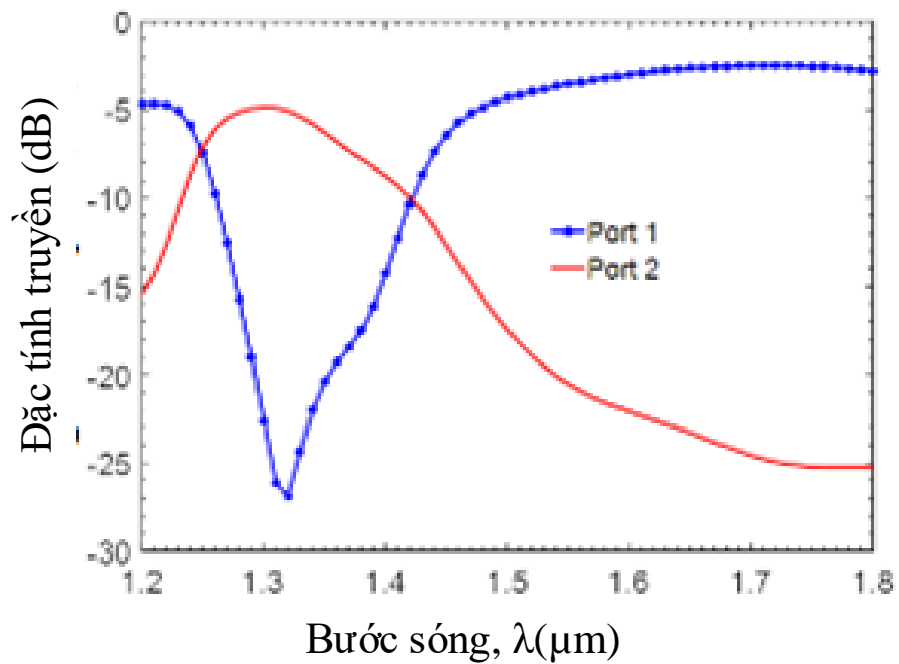
### 3.1.2. Mô phỏng số và phân tích đặc tính

Để làm rõ chức năng tách kênh bước sóng cho hai băng tần cũng như mô tả hiệu suất quang học của thiết bị được đề xuất, ta sử dụng phương pháp mô phỏng số theo phương pháp EME. Hình 3.5 cho thấy sự phân bố điện trường của các mode plasmon ở hai bước sóng riêng biệt. Hình ảnh quan sát trực quan về sự biến đổi mode ở hai bước sóng chứng tỏ chức năng tách kênh rõ ràng của thiết bị được đề xuất đạt hiệu suất cao vì có rất ít năng lượng nhiễu xuyên âm giữa hai bước sóng.

Băng thông bước sóng đóng một vai trò đặc biệt quan trọng đối với hoạt động của một thiết bị quang tử, chẳng hạn như bộ lọc bước sóng plasmonic. Trong thiết kế này đã nghiên cứu đáp ứng bước sóng cho cả băng tần 1310nm và băng tần 1550nm bằng cách quét phổ bước sóng từ 1200nm đến 1800nm thông qua mô phỏng số. Hình 3.6 mô tả các tính năng truyền của hai cổng đầu ra ở dải bước sóng được xem xét. Kết quả đo được bằng dữ liệu mô phỏng cho thấy, khi nhiễu xuyên âm được giữ dưới -20dB, băng thông khoảng 80nm trong cửa sổ băng tần 1310nm (1290nm đến 1370nm) và băng thông bao phủ toàn bộ dải  $C + L$  (1525nm đến 1625nm) trong cửa sổ băng tần 1550nm. Do đó, bộ tách kênh plasmonic được đề xuất có băng thông lớn cho cả hai băng sóng 1310nm và 1550nm.

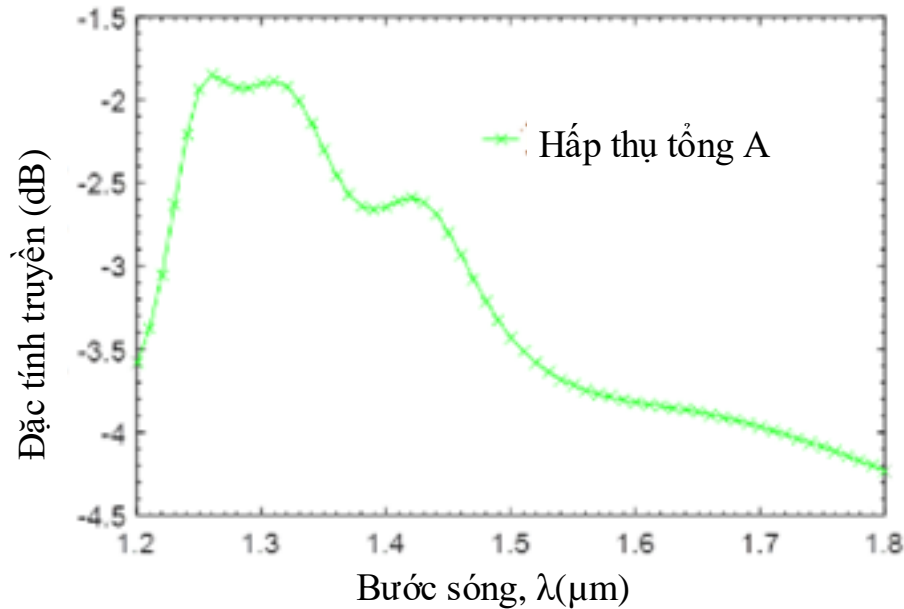


Hình 3. 5. Phân bố trường điện của các mode plasmonic được mô phỏng đối với bộ tách kênh hai bước sóng 1310nm và 1550nm



Hình 3. 6. Đáp ứng bước sóng hai cổng ra của bộ tách kênh plasmonic đã đề xuất

Cuối cùng, NCS nghiên cứu về đặc tính hấp thụ, đây là một trong những đặc điểm quan trọng nhất của thiết bị quang tử trong dải bước sóng được xem xét.



Hình 3. 7. Hệ số hấp thụ phụ thuộc vào bước sóng

Hình 3.7 biểu diễn hệ số hấp thụ  $A$  vào khoảng  $-1.8\text{dB}$  ở bước sóng  $1310\text{nm}$  trong khi đó hệ số hấp thụ  $A$  nhỏ hơn  $-3,7\text{dB}$  trong toàn bộ dải  $C + L$ . Lý do này có thể được giải thích là do kim loại bạc  $\text{Ag}$  có thành phần ảo thấp trong cửa sổ bước sóng  $1550\text{nm}$ .

Như vậy, bộ lọc hai bước sóng  $1310\text{nm}$  và  $1550\text{nm}$  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. Các ưu và nhược điểm của cấu kiện này được so sánh với một số kết quả đã được công bố trên các tạp chí theo bảng 3.1 dưới đây.

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 [76]    | Tài liệu tham khảo [77]       |
|------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Cấu trúc         | Ống dẫn sóng plasmonic MIM | Ống dẫn sóng plasmonic MIM | Ống dẫn sóng lai ghép silicon |
| Vật liệu         | $\text{Ag}$ , không khí    | $\text{Ag}$ , 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       |

|                                     |  |  |  |
|-------------------------------------|--|--|--|
| <b>Bước sóng làm việc</b>           | <i>1310nm, 1550nm</i>                              | <i>700nm, 1800nm</i>                               | <i>1310nm, 1550nm</i>                            |
| <b>Băng thông</b>                   | <i>80nm - 100nm</i>                                | <i>Không nhắc đến</i>                              | <i>Không nhắc đến</i>                            |
| <b>Kích thước cấu kiện</b>          | <i>1,7<math>\mu</math>m x 3,4<math>\mu</math>m</i> | <i>0,6<math>\mu</math>m x 1,6<math>\mu</math>m</i> | <i>6<math>\mu</math>m x 100<math>\mu</math>m</i> |
| <b>Hiệu suất truyền tại cổng ra</b> | <i>-5dB (31,6%)</i>                                | <i>&gt; 90%</i>                                    | <i>Không nhắc đến</i>                            |
| <b>Suy hao hấp thụ</b>              | <i>-1,8dB, -3,7dB</i>                              | <i>Không nhắc đến</i>                              | <i>Không nhắc đến</i>                            |
| <b>Nhiều xuyên âm</b>               | <i>&lt; -20dB</i>                                  | <i>Không nhắc đến</i>                              | <i>-18dB</i>                                     |

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 nhiễu 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 lấn 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 một bộ lọc bước sóng quang nhỏ gọn và thiết bị chia bước sóng 3dB dựa trên cấu trúc ống dẫn sóng plasmonic MIM kích thước nano mét. Hiệu suất làm việc của thiết bị được mô phỏng chính xác bằng việc sử dụng thuyết ghép mode theo thời gian. Phương pháp mô phỏng số dựa vào khai triển mode riêng cho toàn bộ quá trình xử lý thiết kế. Kết quả chỉ ra được hiệu suất truyền của bộ tách kênh được nâng cao đáng kể bằng cách tối ưu hóa các tham số đặc biệt của ống dẫn sóng plasmonic MIM kích thước nano mét. Cấu trúc được đề xuất có tiềm năng ứng dụng cao trong các mạch tích hợp siêu nhỏ gọn với hiệu suất cao cũng như trong các hệ thống thông tin quang ở kích thước nano.

Gần đây, phân cực plasmon bề mặt (SPPs) đã chứng tỏ rằng khả năng giam giữ ánh sáng ở bước sóng kích thước nano hay còn gọi là giới hạn nhiễu xạ, điều này có nghĩa là ánh sáng không có khả năng vượt qua ống dẫn sóng ánh sáng bằng vật liệu silicon. SPPs đã và đang được quan tâm bởi nó hứa hẹn giải pháp cho cấu trúc các mạch quang tích hợp cao [38, 25], hơn nữa phân cực plasmon bề mặt tầm xa (LR-SPPs) có thể được triển khai cho ống dẫn sóng lai ghép plasmonic - silicon [82, 83]. Trong các cấu trúc SPP, ống dẫn sóng dựa trên plasmon sử dụng cấu trúc MIM được triển khai trong cả truyền dẫn với khoảng cách dài và bắt giữ mode SPP dưới bước sóng cho các mạch tích hợp quang [84]. Hơn nữa, ống dẫn sóng MIM được ứng dụng rộng rãi trong việc thiết kế các thiết bị tích hợp kích thước nano bởi nó có tính định xứ cao và suy hao uốn cong thấp với việc dễ dàng sản xuất nhờ vào các công nghệ chế tạo tiên tiến hiện nay. Những cấu trúc plasmonic nano mét này đã được ứng dụng để thiết kế các thiết bị khác nhau như thiết bị chuyển mạch, hệ thống ảnh dưới bước sóng [85], biosensor [86, 87]. Hơn nữa, các ống dẫn sóng MIM thùỳ bên thấp đã được đề xuất là một giải pháp thay thế việc tạo ra cách tử Bragg để ghép nối các sợi quang trong các hệ thống thông tin viễn thông [88]. Các khe hở plasmonic kim loại được sử dụng để thiết kế các thiết bị kích thước nano mét với các ứng dụng trường gần đã được chỉ ra trong thực tế [89] bởi vì ống dẫn sóng MIM có khả năng bẫy ánh sáng với chiều dài chấp nhận được cho truyền sóng phân cực plasmon bề mặt [90]. Dựa vào cấu trúc ống dẫn sóng MIM, gần đây có một số thiết bị lựa chọn bước sóng đã được quan tâm và đề xuất, ví dụ như các bộ lọc plasmonic hình răng và các bộ cộng hưởng hình đĩa kích thước nanomet [91]. Trong các loại ống dẫn sóng MIM, bộ cộng hưởng quang được sử dụng ống nano là yếu tố quan trọng của các cấu trúc ghép bước sóng plasmonic do chúng có tính đối xứng, đơn giản và dễ chế tạo [71].

Bộ tách bước sóng plasmonic cho phép lọc các bước sóng riêng biệt trong các kênh đóng vai trò quan trọng trong các mạch xử lý bước sóng toàn quang kích thước nano mét. Tác giả Noual và cộng sự [92] đã đề xuất bộ ghép kênh plasmonic sử dụng ống dẫn sóng plasmonic kiểu chữ Y. Tuy nhiên, bộ ghép kênh này có

khoảng cách giữa các khoang cộng hưởng tới đầu nối chữ Y tối thiểu là  $1.5\mu\text{m}$  để đảm bảo hiệu suất truyền tối thiểu của cấu kiện, với kích thước này là không phù hợp đối với các thiết bị có kích thước nhỏ gọn cỡ nano mét. Bên cạnh đó, bộ ghép kênh này cũng chỉ được thiết kế để tách/ghép cho 2 bước sóng. Bộ tách kênh plasmonic tương tự khác dựa trên lưới kim loại trong không gian 3 chiều cũng đã được đề xuất [93] nhưng kích thước của nó không phù hợp cho các thiết bị tích hợp và kích thước cực nhỏ gọn bởi vì cấu trúc của nó ở dạng mảng tuần hoàn và 3D. Để các bộ tách/ghép bước sóng plasmonic nhỏ gọn hơn, Hua Lu và cộng sự [94, 95] đã giới thiệu bộ tách 3 bước sóng plasmonic tại các bước sóng không phổ biến trong dải cửa sổ bước sóng viễn thông. Một vài đề xuất về bộ tách bước sóng đã được đưa ra trước đó dựa trên các khoang kích thước nanomet (nanocavities) hoặc kết hợp các bộ cộng hưởng [96]. Ngoài ra, có các đề xuất về bộ tách kênh 3 bước sóng sử dụng khoang cộng hưởng hình đĩa tròn [97] nhưng băng thông hẹp và kích thước toàn cấu kiện lớn.

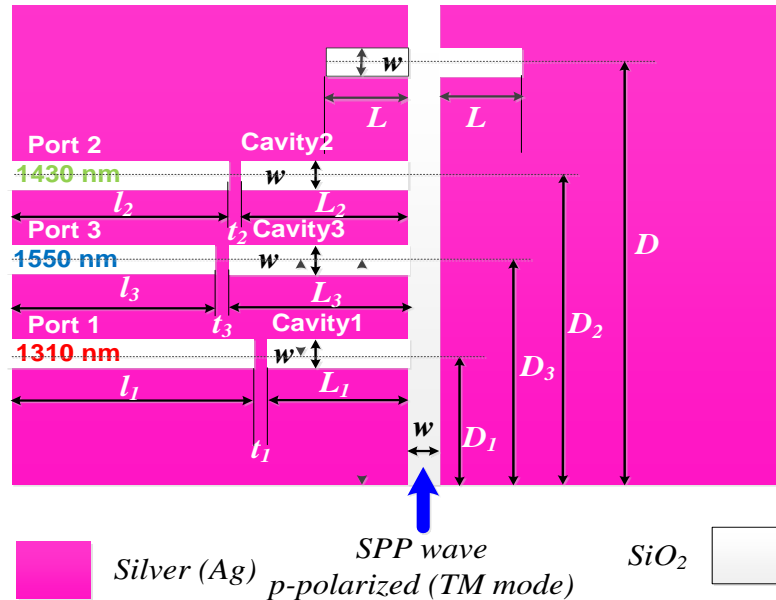
Phần này đề xuất thiết kế bộ lọc bước sóng nano plasmonic cho 3 dải bước sóng phổ biến trong cửa sổ viễn thông là 1310nm, 1430nm và 1550nm dựa trên các cấu trúc tách kênh trong ống dẫn sóng MIM sử dụng các bộ cộng hưởng Fabry-Perot hình chữ nhật và cặp ống dẫn sóng (double stub waveguide). Kỹ thuật mô phỏng EME dựa trên mô hình lý thuyết đường truyền độ ổn định cao đã chứng minh khả năng truyền dẫn hiệu quả và suy hao tương đối thấp của ống dẫn sóng rẽ nhánh khi đưa vào ống dẫn sóng lưỡng nhánh kích thước nano mét. 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  $\text{SiO}_2$  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 SiO<sub>2</sub> 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. 8. 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

Mục đích của việc bố trí cặp ống dẫn sóng kích thước nano mét đối xứng là tạo ra khả năng chặn dải bước sóng cho ba dải 1310nm, 1430nm và 1550nm. Nguyên lý làm việc của ống dẫn sóng chính dựa trên nguyên lý của thuyết ghép mode theo thời gian. Trong khi đó, các ống dẫn sóng plasmonic hình chữ nhật kích thước nano mét thực hiện chức năng của các khoang Fabry-Perot kích thước nano và cũng hoạt động theo nguyên lý của thuyết ghép mode theo thời gian [98], để ghép các dải bước sóng một cách có chọn lọc tùy thuộc vào chiều dài phù hợp của khoang. Như biểu diễn ở sơ đồ nguyên lý hình 3.8, ba khoang có tên là Cavity1, Cavity2, Cavity3 tương ứng với ba cổng ra Port1 với bước sóng 1310nm, Port2 với bước sóng 1430nm và Port3 với bước sóng 1550nm. Cấu trúc đề xuất dựa trên ống dẫn sóng MIM, trong đó vật liệu cách điện trong các khe kim loại và các khoang là

silica SiO<sub>2</sub>. Lớp kim loại trong thiết bị này là bạc Ag có hằng số điện môi được xác định theo mô hình Drude [24]:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)} \quad (3.4)$$

Với  $\varepsilon_\infty$  là hằng số điện môi tại tần số vô hạn của bạc,  $\omega_p$  là tần số plasma;  $\omega$  và  $\gamma$  lần lượt là tần số góc của ánh sáng tới trong chân không và tần số dao động của electron. Các thông số này có giá trị như sau:  $\varepsilon_\infty = 3.7, \omega_p = 9.1eV, \gamma = 0.018eV$ . Kim loại bạc được sử dụng trong thiết bị này là do thành phần ảo của nó rất nhỏ trong dải bước sóng cửa sổ viễn thông, do đó suy hao do hấp thụ độ sâu bề mặt thấp cho phép sóng SPP lan truyền được khoảng cách dài. Chiết suất của vật liệu thủy tinh silica nung chảy được mô tả bằng phương trình Sellmeier [99] trong đó giá trị của nó trong dải bước sóng cửa sổ viễn thông thay đổi trong phạm vi nhỏ từ 1.44 đến 1.46 tại nhiệt độ phòng 300<sup>0</sup>K [100]. Trong thiết kế này, vật liệu cách điện được sử dụng là SiO<sub>2</sub> thay vì không khí vì chỉ số khúc xạ cao của SiO<sub>2</sub> cho phép ống dẫn sóng MIM giam giữ sóng ánh sáng ở kích thước nano dễ dàng hơn không khí.

Như đã biết, theo thuyết phân cực plasmon bề mặt SPP, sóng phân cực s (sóng phân cực TE) không tồn tại được trong cơ chế phân cực plasmon bề mặt mà chỉ có sóng phân cực p (sóng phân cực TM) có thể tồn tại và “dẫn” trong cơ chế phân cực plasmon bề mặt. Do đó, trong thiết kế này sóng ánh sáng phân cực TM được đưa tới cổng vào và lan truyền đến ba cổng ra mong muốn ở ba dải bước sóng là 1310nm, 1430nm và 1550nm.

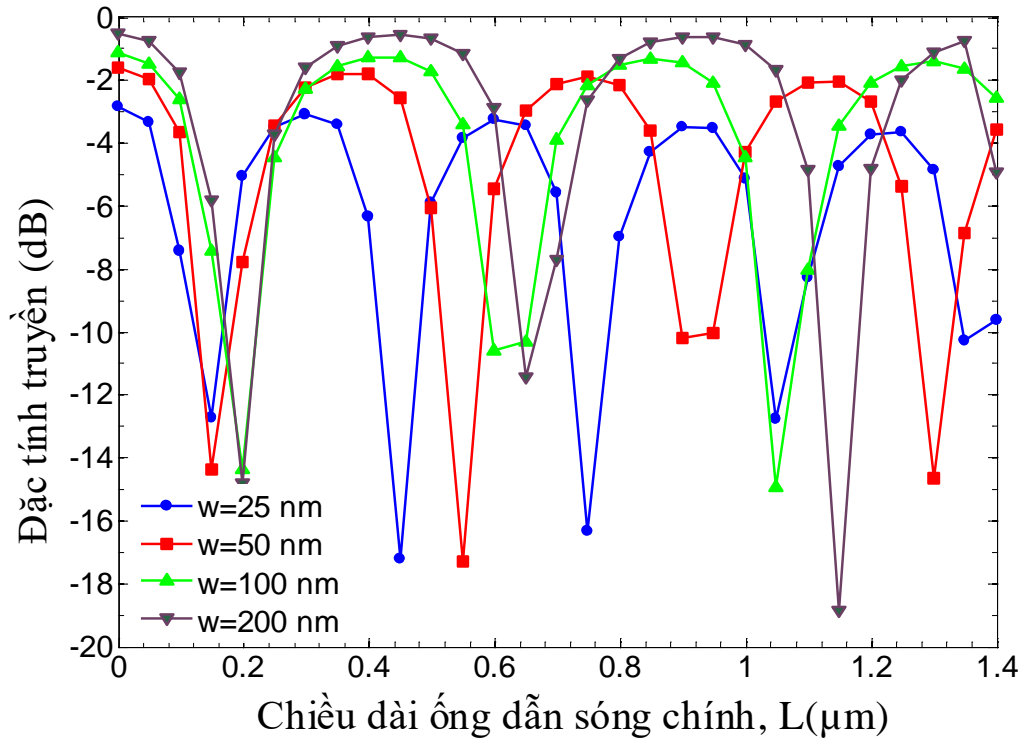
Đặc tính truyền của ống dẫn sóng chính kích thước nano mét được phân tích dựa trên quá trình sử dụng thuyết ghép mode theo thời gian kết hợp với các sóng plasmon đã truyền qua và quay trở lại ống dẫn sóng chính (nhờ vào cặp ống dẫn sóng đối xứng), các sóng truyền qua và quay trở lại này là đồng pha. Trong trường hợp đó, biểu thức truyền của ống dẫn sóng đơn đối xứng ( $T_s$ ) và cặp ống dẫn sóng đối xứng ( $T_d$ ) có thể được biểu thị bằng [101]:

$$T_s = \frac{1}{1 + \tan^2\left(\frac{2\pi L}{\lambda_{sp}}\right)} \quad (3.5)$$

$$T_d = \frac{4}{4 + \tan^2\left(\frac{2\pi L}{\lambda_{gp}}\right)} \quad (3.6)$$

Với  $\lambda_{gp}$  là bước sóng của sóng plasmon truyền trong ống dẫn sóng MIM,  $L$  là chiều dài của ống dẫn sóng chính.

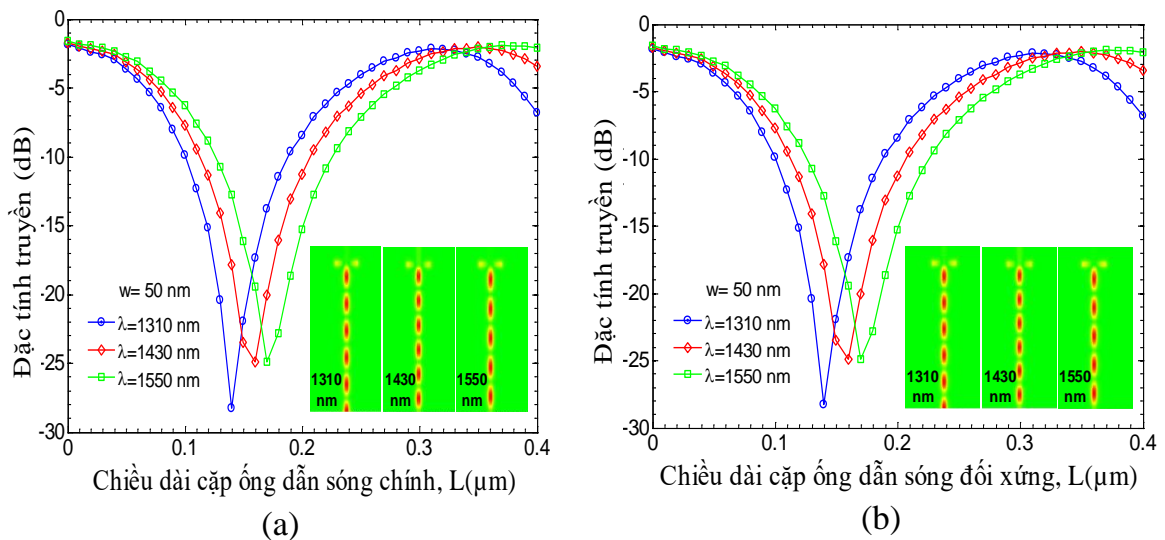
Đặc tính quang học được chỉ ra bằng cách sử dụng mô phỏng EME với kích thước lưới trong không gian hai chiều là  $\Delta x = \Delta z = 5nm$  áp dụng cho tổng diện tích của thiết bị đề xuất. Trong thiết kế này, tất cả ống dẫn sóng đều có chiều rộng bằng nhau và bằng  $w$ .



Hình 3. 9. Đặc tính truyền của ống dẫn sóng chính được mô tả bởi mô phỏng số EME đối với các chiều rộng khác nhau của ống dẫn sóng tại bước sóng 1550nm

Hình 3.9 biểu diễn biểu đồ truyền của ống dẫn sóng chính tại cổng ra phụ thuộc vào chiều dài  $L$  của ống dẫn sóng đơn chính theo các kích thước chiều rộng của ống dẫn sóng  $w = 25nm, 50nm, 100nm, 200nm$  và bước sóng hoạt động trong ống dẫn sóng là 1550nm. Trong trường hợp này, ống dẫn sóng chính được đặt cách đầu vào  $1.9\mu m$ .

Quan sát trong kết quả mô phỏng trong hình 3.9 có thể thấy rằng, chiều rộng của ống dẫn sóng chính càng tăng lên thì hiệu suất truyền của ống dẫn sóng cũng tăng lên. Ngoài ra, để đạt được sự cộng hưởng cao nhất khi chiều rộng của ống dẫn sóng chính tăng thì chiều dài của nó cũng phải tăng lên. Do vậy, để thực hiện được mạch tích hợp ở kích thước nano mét trong thiết kế này, ta chọn chiều rộng của ống dẫn sóng chính là  $w = 50nm$ .



Hình 3. 10. Đặc tính truyền của ống dẫn sóng chính thông qua mô phỏng số EME đối với ba băng sóng khi chiều rộng ống dẫn sóng chính  $w = 50nm$  và phụ thuộc vào chiều dài của ống dẫn sóng chính: (a) ống dẫn sóng chính; (b) cặp ống dẫn sóng. Bên trong hình (b) là phân bố trường điện từ của ba băng sóng

Trong hình 3.10, đặc tính phổ truyền được minh họa là một hàm phụ thuộc chiều dài  $L$  của ống dẫn sóng trong khoảng từ  $0\mu m$  đến  $0.4\mu m$  đối với ba băng sóng 1310nm (xanh lam), 1430nm (đỏ) và 1550nm (xanh lục) trong ống dẫn sóng đơn (a) và cặp ống dẫn sóng (b) có chiều rộng  $w = 50nm$ . Cả hai mặt của cặp ống dẫn sóng có cùng chiều dài là  $L = 160nm$ . Đỉnh cộng hưởng của cả ba băng sóng này là khi chiều dài của cả ống dẫn sóng đơn và cặp ống dẫn sóng là 140nm, 160nm và 170nm. Hơn nữa, hiệu suất truyền cực đại đạt được khi chiều dài ống dẫn sóng vào khoảng 330nm với suy hao -1.5dB. Tuy nhiên, các đỉnh cộng hưởng trong toàn bộ chiều rộng ở phần nửa cực đại (full width at half maximum FWHM) của cặp ống dẫn sóng lớn hơn của ống dẫn sóng đơn cho mỗi bước sóng tương ứng. Hơn nữa, độ sâu của các đỉnh cộng hưởng tương ứng với mức truyền tối thiểu trong trường hợp

của cặp ống dẫn sóng lớn hơn đáng kể so với của ống dẫn sóng đơn. Các kết quả mô phỏng là hoàn toàn phù hợp với các đặc điểm phân tích đã được chỉ ra tại các phương trình (3.5) và (3.6). Hình ảnh trong hình 3.10(b) mô tả sự phân bố trường điện từ được thực hiện theo phương pháp mô phỏng truyền mode riêng cho cả ba băng sóng. Nó cho thấy rằng cặp ống dẫn sóng đóng vai trò bắt giữ cả ba băng sóng, điều này góp phần nâng cao hiệu quả tách bước sóng trong các khoang kích thước nano mét.

Trong phần này, ta thiết kế các kênh rẽ bằng việc sử dụng các ống nano hoạt động giống như các khoang Fabry-Perot để ghép nối có chọn lọc các dải bước sóng thích hợp. Đầu tiên, giả sử các sóng phân cực TM được đưa vào thiết bị từ đầu vào ống dẫn sóng chính với công suất tới là  $P_1$ .  $O_1, O_2, O_3$  là các ký hiệu cho các cổng rẽ với công suất ra tương ứng là  $P_{O1}, P_{O2}, P_{O3}$ . Đặc tính truyền của các kênh rẽ được định nghĩa là  $T_{d1} = \frac{P_{O1}}{P_1}, T_{d2} = \frac{P_{O2}}{P_1}, T_{d3} = \frac{P_{O3}}{P_1}$ . Đối với cấu trúc plasmonic trong ống dẫn sóng MIM được đề xuất, sự biến đổi theo thời gian của biên độ sóng vào và ra được mô tả bằng sự giao thoa giữa sóng tới và sóng phản xạ. Những sóng này phụ thuộc vào hệ số phẩm chất của ba khoang kích thước nano mét được xác định bởi suy hao nguyên thủy của ánh sáng truyền qua các khoang. Pha chồng chất giữa hai mặt phẳng tham chiếu thỏa mãn điều kiện đồng pha được biểu diễn bởi phương trình sau:

$$\varphi = d\beta_{SPP} = dn_{eff}k_0 \quad (3.7)$$

Với  $n_{eff}$  là chỉ số khúc xạ hiệu dụng của mode SPP truyền tới ống dẫn sóng chính,  $n_{eff}$  phụ thuộc vào bước sóng và chiều rộng  $w$  của ống dẫn sóng chính;  $k_0$  là số sóng của ánh sáng tới trong chân không; và  $\beta_{SPP}$  biểu diễn hằng số lan truyền của mode SPP trong ống dẫn sóng MIM. Phương trình (3.7) thể hiện điều kiện đồng pha của quan hệ tán sắc trong ống dẫn sóng plasmonic được chi phối bởi [102]:

$$\varepsilon_m \sqrt{n_{eff}^2 - \varepsilon_d} \tanh\left(\frac{w_1 k_0 \sqrt{n_{eff}^2 - \varepsilon_d}}{2}\right) + \varepsilon_d \sqrt{n_{eff}^2 - \varepsilon_m} = 0 \quad (3.8)$$

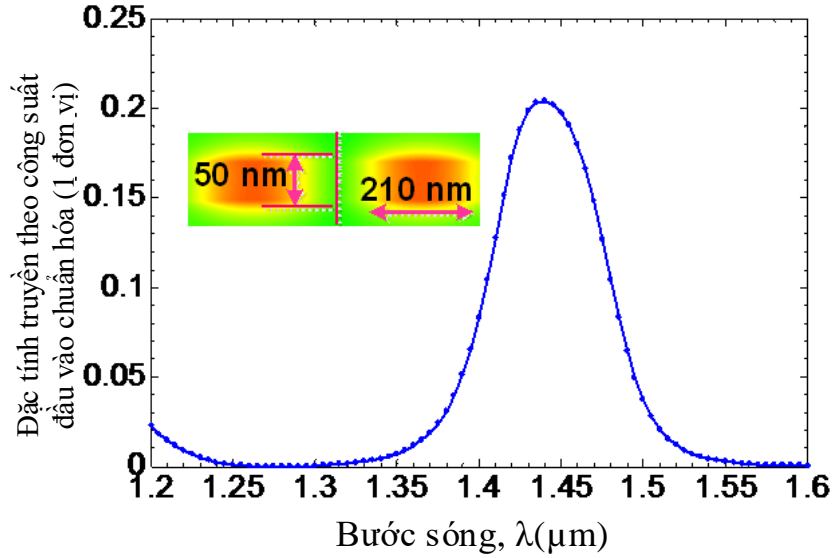
Với  $\varepsilon_m$  và  $\varepsilon_d$  là hằng số điện môi của lớp mạ bạc và lớp cách điện silica. Ba thông số truyền cực đại  $T_{d1}, T_{d2}, T_{d3}$  của ba cổng rẽ được biểu diễn như sau [103]:

$$T_{d_1, \max} = \left| \frac{[1+r_1]^2 / (2Q_{d1}Q_1)}{[1/Q_1 + 1/(2Q_{d1}) + (1+r_1)/(2Q_{d1})]^2} \right| \quad (3.9)$$

$$T_{d_2, \max} = \left| \frac{[1+r_2]^2 / (2Q_{d2}Q_2)}{[1/Q_2 + 1/(2Q_{d2}) + (1+r_2)/(2Q_{d2})]^2} \right| \quad (3.10)$$

$$T_{d_3, \max} = \left| \frac{[1+r_3]^2 / (2Q_{d3}Q_3)}{[1/Q_3 + 1/(2Q_{d3}) + (1+r_3)/(2Q_{d3})]^2} \right| \quad (3.11)$$

Với  $Q_1, Q_2, Q_3$  là hệ số phẩm chất của khoang 1, 2, 3;  $Q_{d1}, Q_{d2}, Q_{d3}$  là hệ số phẩm chất bị suy giảm do suy giảm công suất đi vào các ống dẫn rẽ;  $r_1 = 1/[1+2Q_{d1}/Q_1], r_2 = 1/[1+2Q_{d2}/Q_2]$  và  $r_3 = 1/[1+2Q_{d3}/Q_3]$  lần lượt là hệ số phẩm chất suy giảm từ ống dẫn sóng chính tới ba cổng rẽ do sự hấp thụ Ohmic của sóng truyền.



Hình 3. 11. Mô phỏng EME của phổ công suất truyền tại cổng ra Port2. Quá trình truyền được chuẩn hóa từ công suất vào. Hình ảnh lồng ghép trong hình là trường điện từ ở kích thước nano 50nm x 210nm ở đầu ra Port2

Hình 3.11 biểu diễn đặc tính truyền dẫn biên độ từ trường  $|H_y|$  của mode SPP phân cực TM được mô phỏng bằng phương pháp mô phỏng 2D-EME tại cổng ra Port2 trong trường hợp không có khoang 1 và khoang 3 cũng như cặp ống dẫn sóng. Hình ảnh lồng ghép trong hình là phân bố trường điện từ của mode TM tại bước sóng  $\lambda = 1430\text{nm}$  có kích thước nano  $50\text{nm} \times 210\text{nm}$  ở đầu ra Port2.

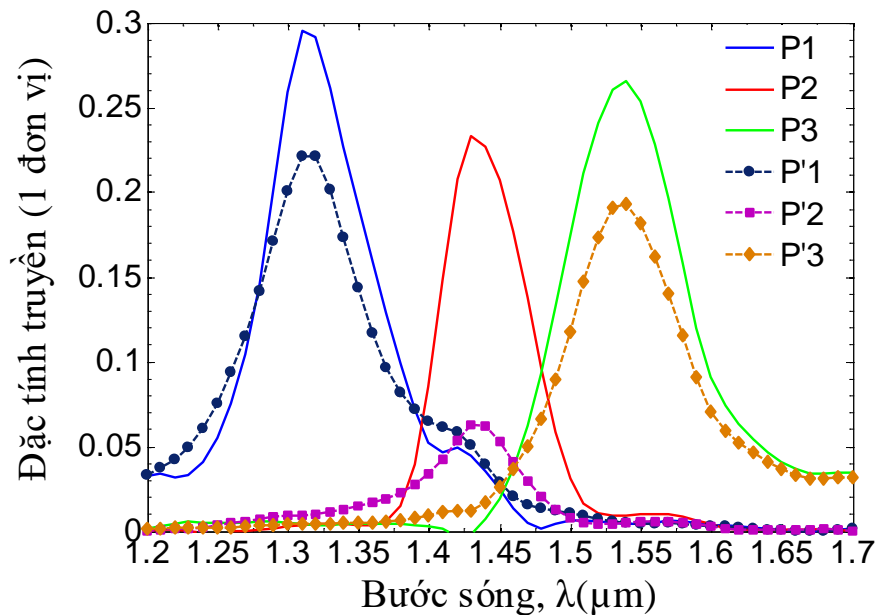
Để tách ba dải bước sóng đi tới các cổng ra mong muốn, ta cần phải thiết kế các khoang 1, 2, 3 một cách hợp lý sao cho khoang 1 có tính cộng hưởng cao với

bước sóng 1310nm nhưng không cộng hưởng với các bước sóng khác và ngược lại. Theo cách tương tự, khoang 2 và khoang 3 được thiết kế để chỉ cộng hưởng lần lượt cho các bước sóng 1430nm và 1550nm. Lưu ý rằng không tồn tại giải pháp phân tích nào để mô tả hiệu ứng cộng hưởng của sóng lan truyền trong ống dẫn sóng plasmonic. Vì vậy, trong đề xuất này sẽ áp dụng phương pháp mô phỏng số để chứng minh, đánh giá. Mặc dù cả hai phương pháp mô phỏng EME và FDTD (miền thời gian chênh lệch hữu hạn) đều là những giải pháp nghiêm ngặt để mô phỏng mạch plasmonic đã được chứng minh là hiệu quả trong nhiều công trình liên quan trước đây [104], tuy nhiên phương pháp FDTD tiêu tốn nhiều thời gian vào việc mô phỏng và mô tả đặc tính của mạch khi so sánh với phương pháp EME. Vì vậy, trong đề xuất này sử dụng phương pháp EME để mô phỏng và tối ưu hóa các quy trình thiết kế, kết quả thu được là chính xác.

Trong mô phỏng, đặt độ dày vách ngăn ban đầu giữa các khoang hình chữ nhật và các ống dẫn sóng rẽ tương ứng là  $t_1 = t_2 = t_3 = t = 10nm$ , khoảng cách giữa các khoang và ống dẫn sóng chính cũng được đặt cùng một giá trị là  $g = 0nm$ . Quá trình thiết kế được thực hiện một cách chọn lọc để đạt được hiệu quả truyền cao tại các khoang kích thước nano mét thông qua mô phỏng số. Quá trình được thực hiện bằng cách tìm kiếm hiệu suất truyền cao nhất ở điều kiện chồng chất pha của khoang 1  $\varphi_1 = (2m+1)\pi/2$  đối với bước sóng 1310nm bằng cách thay đổi cả khoảng cách  $D_1$  và chiều dài  $L$  của khoang 1. Ở đây  $D_1$  là khoảng cách từ khoang 1 tới cổng vào mà ban đầu được đặt là 455nm,  $m$  là số nguyên với mong muốn xác định được giá trị nhỏ nhất. Các bước tương tự cũng được thực hiện cẩn thận trong các trường hợp của khoang 2 và khoang 3. Kết quả xác định được độ dài của khoang 1, khoang 2 và khoang 3 lần lượt là 400nm, 640nm và 575nm. Khoảng cách tham chiếu  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  từ các khoang tương ứng đến cổng đầu vào được tìm ra là 455nm, 1305nm và 860nm để thu được hiệu suất truyền cao nhất.

Hình 3.12 mô tả hiệu suất truyền của bộ tách kênh đề xuất tại ba cổng ra mong muốn với ba dải bước sóng 1310nm, 1430nm và 1550nm bằng cách sử dụng mô phỏng số cho cả hai trường hợp có và không có sự đóng góp của cặp ống dẫn sóng. Ở đây công suất đầu vào chuẩn hóa cho các cổng Port1, Port2 và Port3 được biểu

thì là  $P_1, P_2, P_3$  trong trường hợp có sự đóng góp của cặp ống dẫn sóng; công suất đầu vào chuẩn hóa cho các cổng Port1, Port2 và Port3 được biểu thị là  $P'_1, P'_2, P'_3$  trong trường hợp không có sự đóng góp của cặp ống dẫn sóng. Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu quả truyền của các mode SPP tại các cổng ra được nâng cao đáng kể đối với cả ba dải bước sóng khi đưa vào cặp ống dẫn sóng. Dựa trên nguyên lý làm việc của bộ lọc, ta có thể thiết kế bộ chia ba băng sóng 3dB bằng cách phản chiếu các đầu ra qua ống dẫn sóng chính thẳng. Đặc điểm chi tiết của bộ chia này được trình bày trong phần tiếp theo.



Hình 3. 12. Mô phỏng EME của các đường truyền chuẩn hóa là một hàm của bước sóng đối với ba cổng ra có sự đóng góp ( $P_1, P_2, P_3$ ) và không có sự đóng góp ( $P'_1, P'_2, P'_3$ ) của cặp ống dẫn

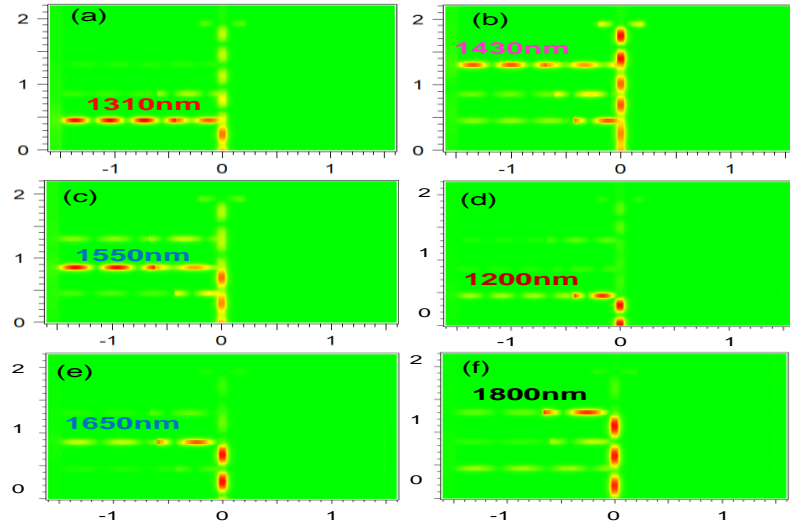
### 3.2.3. Hiệu suất và đặc điểm của bộ chia ba băng sóng 3dB

Trước tiên, ta sử dụng mô phỏng số để đánh giá các chức năng của bộ lọc ba băng sóng và bộ chia ba băng sóng 3dB cũng như mô tả hiệu suất quang học của thiết bị đề xuất bằng phương pháp mô phỏng EME.

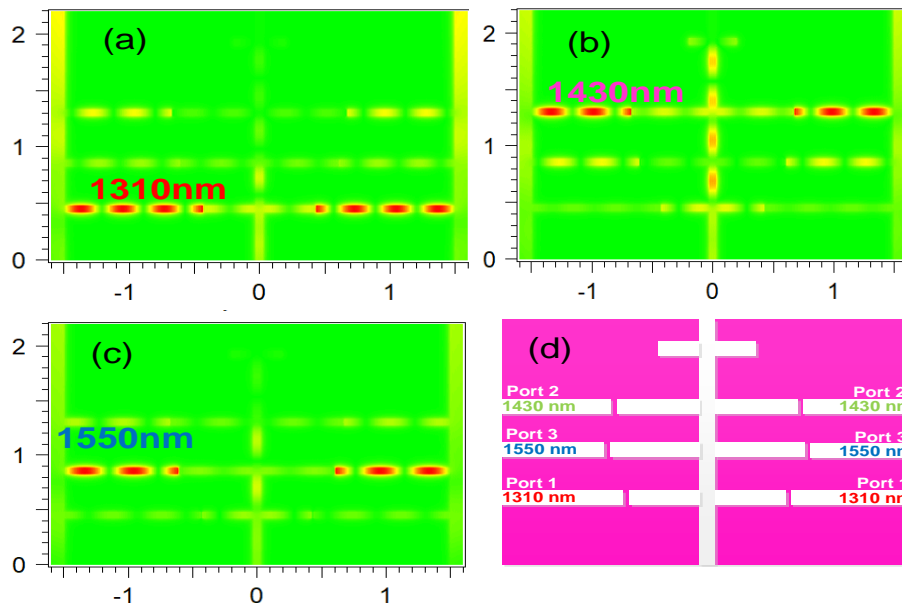
Hình 3.13 (a), (b), (c) và hình 3.14 (a), (b), (c) lần lượt biểu diễn sự phân bố trường của các mode plasmonic tại từng dải bước sóng riêng rẽ cho bộ lọc bước sóng và bộ chia bước sóng. Biểu đồ 2D của phân bố trường đối với các mode tại ba băng sóng chỉ rõ chức năng của bộ chia 3dB có hiệu suất cao và nhiễu xuyên âm



không đáng kể giữa các trường quang tại mỗi cổng ra. Ngoài ra, biểu đồ 2D tương ứng với các hình 3.13 (d), (e), (f) cũng thể hiện sự giam giữ ánh sáng trong các khoang 1, khoang 2, khoang 3 đối với các bước sóng 1200nm, 1650nm và 1800nm.



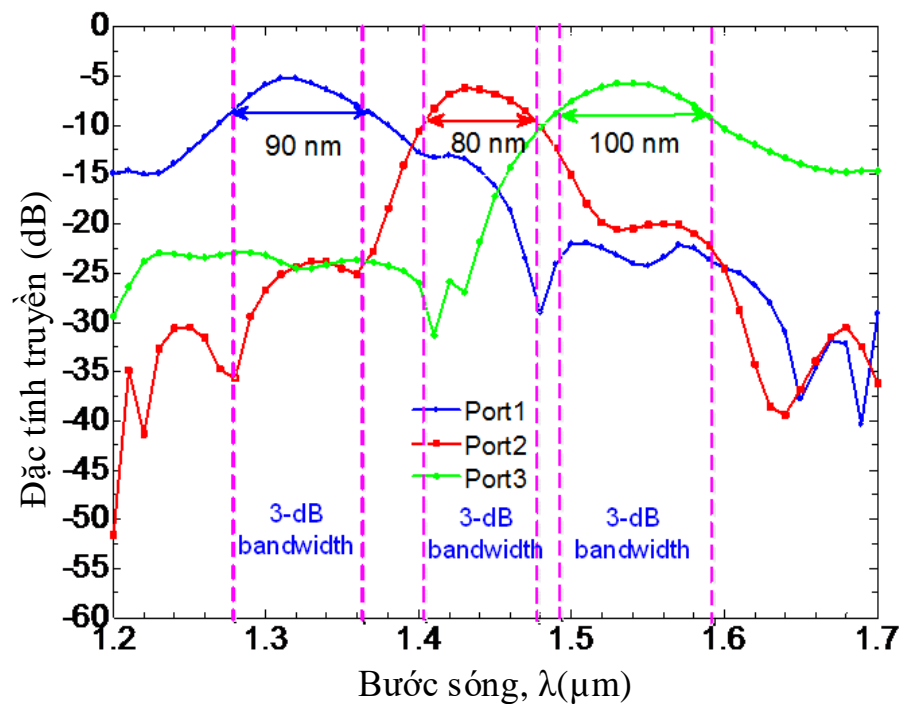
Hình 3. 13. Phân bố biên độ từ trường  $|H_y|$  của các mode plasmonic được mô phỏng cho ba băng sóng (a) 1310nm, (b) 1430nm, (c) 1550nm đối với bộ lọc ống dẫn sóng plasmonic đề xuất. Hình (d), (e), (f) biểu diễn sự giam giữ ánh sáng tại khoang 1, khoang 2, khoang 3 tương ứng với các bước sóng 1200nm, 1650nm và 1800nm.  
Thang chia các trục đơn vị  $\mu m$



Hình 3. 14. Phân bố biên độ từ trường  $|H_y|$  của các mode plasmonic được mô phỏng cho ba băng sóng (a) 1310nm, (b) 1430nm, (c) 1550nm và (d) sơ đồ cấu trúc của bộ chia bước sóng 3dB đề xuất. Thang chia các trục đơn vị  $\mu m$

Bởi vì bộ chia công suất ba bước sóng 3dB được thiết kế theo cấu trúc đối xứng với thiết kế của bộ lọc ba bước sóng, do đó ở đây chỉ xem xét các đặc tính của thiết bị đề xuất trong vai trò là bộ lọc bước sóng. Ta khảo sát hiệu suất của thiết bị này trong miền bước sóng bằng cách quét bước sóng từ 1200nm đến 1700nm thông qua mô phỏng EME.

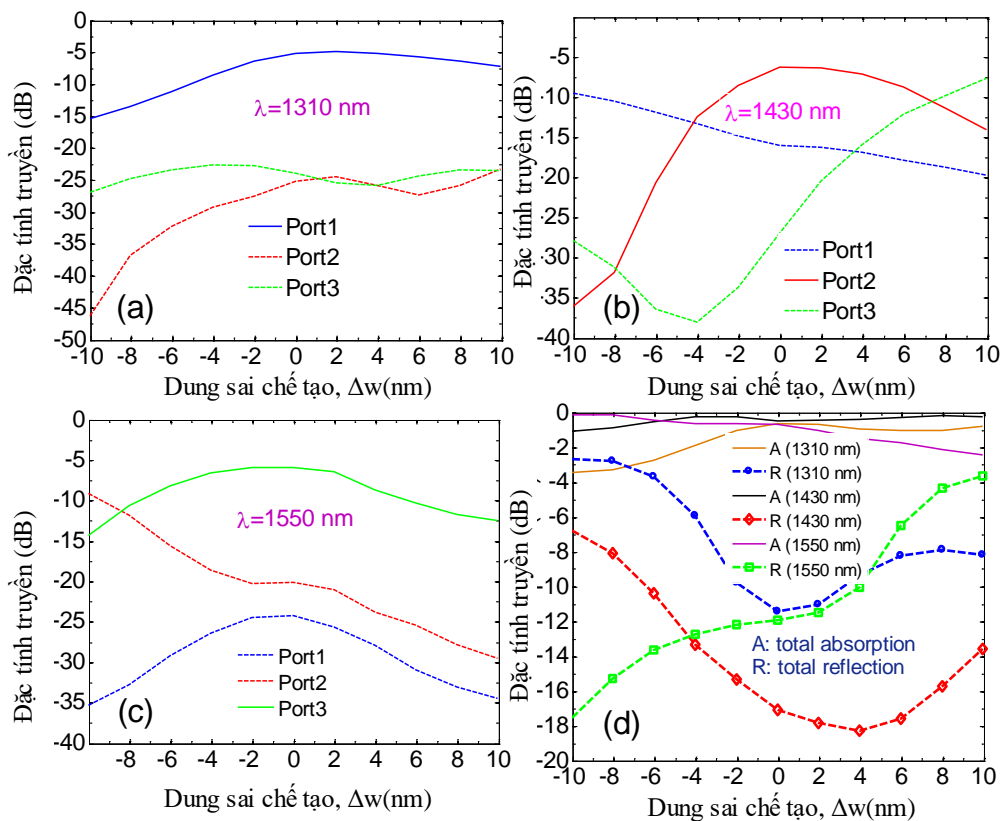
Hình 3.15 minh họa các đặc tính truyền của ba cổng đầu ra phụ thuộc vào bước sóng, có thể thấy rằng công suất truyền tại các cổng ra nhận được các đỉnh cộng hưởng cao nhất tại các băng sóng 1310nm, 1430nm và 1550nm với các mức công suất tương ứng là -5.37dB, -6.19dB và -5.68dB.



Hình 3. 15. Đáp ứng bước sóng của ba cổng ra đối với bộ lọc plasmonic đề xuất

Bên cạnh đó, băng thông 3dB ( $\Delta\lambda_{FWHM}$ ) của ba băng tần nhận được từ mô phỏng thể hiện các độ rộng băng thông là 90nm, 80nm và 100nm được biểu diễn bởi các mũi tên hai đầu lần lượt là màu xanh lam, màu đỏ và màu xanh lục. Tuy nhiên, để đảm bảo mức chênh lệch giữa công suất mong muốn và công suất không mong muốn, hoặc công suất xuyên âm không nhỏ hơn 10dB, băng thông cho các cổng đầu ra Port1, Port2 và Port3 trong trường hợp này lần lượt là 90nm, 40nm, 100nm. Các băng thông của các phổ truyền dẫn này được tính toán tương đối rộng,

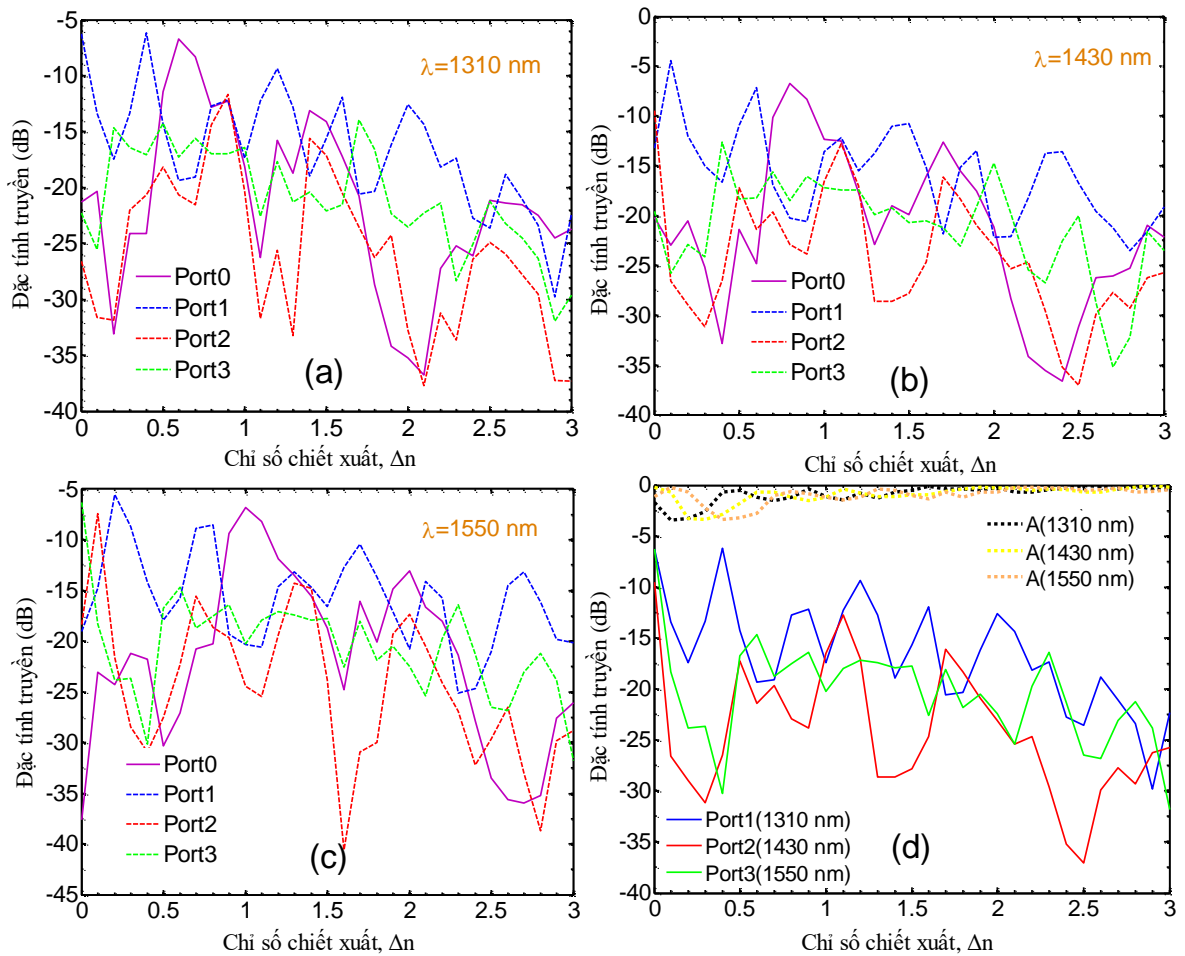
và do đó, bộ lọc đã đề xuất thích hợp để ứng dụng trong các mạng quang truy nhập băng thông rộng. Để tạo ra băng thông hẹp hơn và tăng khả năng chuyển đổi bước sóng cho các bộ lọc chọn lọc bước sóng ứng dụng trong kỹ thuật WDM, ta có thể điều chỉnh đặc tính cộng hưởng của bộ cộng hưởng FP thành bộ cộng hưởng Fano dạng đường thẳng (Fano-line) bằng cách điều chỉnh độ dày, vị trí của các vách ngăn bạc và khoảng cách, chiều dài của bộ cộng hưởng FP [105].



Hình 3. 16. Đặc tính truyền quang phụ thuộc vào dung sai chiều rộng bốn cổng ra (a) Port1 tại bước sóng 1310nm, Port2 tại bước sóng 1430nm, Port3 tại bước sóng 1550nm, và (d) hấp thụ và phản xạ toàn phần tại ba băng sóng đối với ba cổng ra

Để chế tạo ống dẫn sóng MIM có kích thước nano mét, kỹ thuật khắc hình có độ phân giải cao như kỹ thuật khắc chùm ion hội tụ (FIB), dựa trên các hạt nặng hơn để tạo ra vân trên bề mặt nhằm tạo ra cấu trúc rất nhỏ thay vì sử dụng kỹ thuật quang khắc tia cực tím hay tia X. Mặc dù kỹ thuật FIB có độ chính xác cao nhưng nó vẫn tồn tại dung sai hữu hạn vì những hạt nặng hơn này có nhiều động lượng hơn để khắc các mẫu. Do đó, điều quan trọng là phải khảo sát sự ảnh hưởng của dung sai chế tạo cấu trúc hình học liên quan đến chiều rộng của các khoang và ống

dẫn sóng chính đối với hiệu suất của bộ lọc đề xuất. Hình 3.16 minh họa sự thay đổi công suất truyền tại ba cổng ra tương ứng với các dải bước sóng 1310nm (a), 1430nm (b), 1550nm (c) và hấp thụ và phản xạ toàn phần của bộ lọc bước sóng (d). Với dung sai  $\Delta w = \pm 2nm$  thì công suất truyền là không nhỏ hơn -7dB, công suất xuyên âm dưới -15dB, hấp thụ không vượt quá -1dB và phản xạ dưới -10dB.



Hình 3. 17. Các đặc tính truyền quang phụ thuộc vào các chỉ số khác nhau của vật liệu cách điện tại ba cổng ra: (a) bước sóng 1310nm, (b) bước sóng 1430nm, (c) bước sóng 1550nm và (d) hấp thụ toàn phần và công suất toàn phần tại ba băng sóng đối với ba cổng ra.  $\Delta n = 0$  tương ứng với silica

Cuối cùng, NCS nghiên cứu sự ảnh hưởng của vật liệu cách điện đến các đặc tính của bộ lọc chọn lựa bước sóng được đề xuất. Để làm điều này, ta sẽ khảo sát hiệu suất của thiết bị bằng việc thay đổi chiết suất  $\Delta n$  của các vật liệu khác nhau so với tinh thể silica đã được sử dụng cho thiết bị đề xuất ở trên thông qua sử dụng mô

hình Sellmeier [99]. Hình 3.17 biểu diễn công suất truyền tại các cổng ra Port1, Port2, Port3 và cổng ra Port0 của ống dẫn sóng chính tương ứng với các băng sóng 1310nm (a), 1430nm (b), 1550nm (c), hình 4.17(d) biểu diễn hấp thụ toàn phần và công suất truyền toàn phần của từng bước sóng tại ba cổng ra. Ta có thể thấy sự phụ thuộc mạnh của các đặc tính quang tại các cổng ra đối với các chỉ số chiết xuất khác nhau của vật liệu cách điện. Tuy nhiên, không có hướng xử lý nào rõ ràng để quan sát chính xác sự biến thiên của công suất truyền theo các chỉ số chiết xuất khác nhau của vật liệu cách điện. Cả công suất truyền và công suất hấp thụ đều đạt mức cao nhất đối với vật liệu silica, công suất truyền khoảng từ -5dB đến -6dB, công suất hấp thụ khoảng -1dB. Kết quả của đề xuất này được so sánh với một số kết quả tương tự đã được công bố trên các tạp chí quốc tế uy tín theo bảng 3.2 dưới đây.

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 <sub>2</sub>                               | Ag, SIO <sub>2</sub>   | 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 $\mu$ m x 1,72 $\mu$ m                        | Chiều dài của cấu kiện lớn hơn 2,25 $\mu$ m, chiều rộng không nhắc đến | 0,5 $\mu$ m x 0,9 $\mu$ m  | > 3 $\mu$ m x 1,072 $\mu$ m |
| Hiệu suất truyền tại các cổng ra | -5.37dB (29%) (1310nm), -6.19dB (24%)              | - 4dB (1340nm), - 5dB (1550nm)   | 70%                        | 26%, 25%, 31%               |

|                         |  |                |                |                |
|-------------------------|--|----------------|----------------|----------------|
|                         | (1430nm) và<br>-5.68dB (27%)<br>(1550nm) |                |                |                |
| <b>Suy hao hấp thụ</b>  | < -1dB                                   | Không nhắc đến | Không nhắc đến |                |
| <b>Suy hao phản xạ</b>  | < -10dB                                  | Không nhắc đến | Không nhắc đến |                |
| <b>Nhiều xuyên âm</b>   | < -15dB                                  | Không nhắc đến | Không nhắc đến |                |
| <b>Dung sai chế tạo</b> | $\Delta w = \pm 2nm$                     | 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.

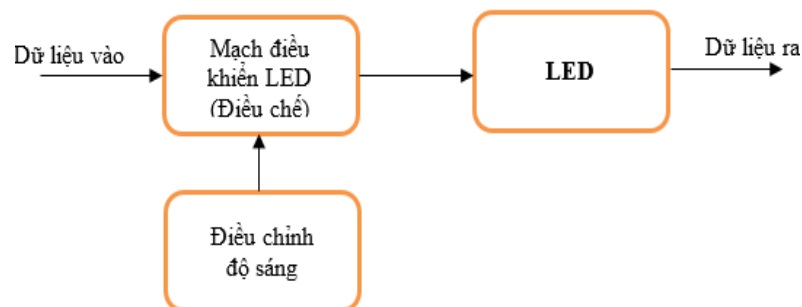
### **3.3. Thiết kế bộ lọc bước sóng RGB để ứng dụng cho xử lý ảnh, trộn màu truyền hình, thông tin VLC**

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. Các kết quả đã được nghiên cứu chính xác bằng cách sử dụng thuyết ghép mode theo thời gian. Phương pháp mô phỏng số khai triển mode riêng EME cũng đã được sử dụng cho quá trình thiết kế tổng thể. 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 < -8dB, mức tín hiệu trên nhiễu quang lớn

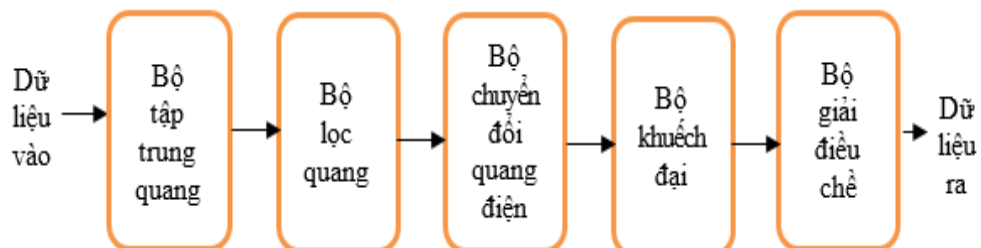
hơn -10dB trong 30nm băng thông cho ba dải RGB. Cấu trúc được đề xuất có tiềm năng mạnh mẽ cho việc thiết kế các mạch tích hợp siêu nhỏ gọn hiệu quả cao cũng như các hệ thống thông tin quang ở kích thước nano.

Thông tin ánh sáng khả kiến VLC (Visible Light Communication) là công nghệ truyền thông tin không dây bằng cách sử dụng sóng mang là ánh sáng nhìn thấy phát ra từ các bóng đèn LED. Dữ liệu được truyền trong hệ thống VLC bằng cách điều biến ánh sáng. Ở tốc độ chậm ánh sáng sẽ nhấp nháy liên tục, chia nhỏ dữ liệu thành một hệ thống các mức 1 và mức 0 sẽ được chuyển đổi thành dữ liệu tiêu thụ thông qua một bộ thu phát. Tuy nhiên, tốc độ truyền dữ liệu phụ thuộc nhiều vào tốc độ nhấp nháy. Vì lý do này, diode phát quang (LED) được sử dụng làm nguồn sáng chính trong hệ thống VLC. LED là chất bán dẫn do đó có khả năng xử lý điều biến ánh sáng cực nhanh xảy ra với tốc độ mắt người không thể phát hiện được. LED được sử dụng phổ biến trong các hệ thống VLC là LED RGB bởi nó có ưu điểm là có thể tạo ra băng thông cao, cho phép tốc độ dữ liệu cao hơn. Tuy nhiên, nó rất phức tạp và khó điều chỉnh. Các phương pháp khác để tạo ra ánh sáng trắng là lưỡng sắc (xanh lam và vàng) và tứ sắc (lam, lục lam, lục và đỏ).

Một hệ thống VLC gồm có hai phần phát và thu được mô tả như trong hình 3.18 và hình 3.19.



Hình 3. 18. Sơ đồ nguyên lý phía phát của hệ thống VLC



Hình 3. 19. Sơ đồ nguyên lý phía thu của hệ thống VLC

Thông thường, đi ốt phát quang LED trong phạm vi nhìn thấy và đi ốt tách sóng quang được sử dụng làm bộ phát và bộ thu tương ứng trong hệ thống VLC. VLC đang được phát triển nhanh chóng ngày nay do sự phát triển của đèn LED trắng hiệu suất cao mới để giảm tắc nghẽn trong băng tần 2,4 GHz [106]. Kỹ thuật VLC được ứng dụng trong nhiều hệ thống thông tin và các ứng dụng như: tích hợp trong các phương tiện di chuyển hiện đại với nhiều cảm biến điện tử để theo dõi tốc độ, vị trí, hướng đi, gia tốc ngang và dọc của xe [107]; truyền dữ liệu âm thanh, hình ảnh [108, 109, 110]; các hệ thống truy nhập internet dựa trên công nghệ Lifi [111]. So với thông tin liên lạc bằng tần số vô tuyến, VLC có nhiều ưu điểm và đặc tính hữu ích, trong đó bao gồm: băng thông không bị điều chỉnh, khả năng truyền dẫn cao với tốc độ bức xạ thấp [112], không bị ảnh hưởng bởi nhiễu điện từ, cho phép thiết lập các hệ thống thông tin liên lạc an toàn [113].

Để tăng hơn nữa tốc độ bit truyền trong hệ thống VLC, kỹ thuật ghép kênh phân chia theo bước sóng (WDM) có thể được sử dụng. Kỹ thuật WDM cho phép kết hợp một số tín hiệu với nhau và truyền chúng đồng thời trong khi mỗi tín hiệu được mang bởi một bước sóng khác nhau. Theo các nghiên cứu công bố gần đây, hệ thống sẽ có thể hỗ trợ tốc độ truyền bitrate lên đến 8 Gb/s [114, 115] và có thể đạt được tốc độ cao hơn [116, 117]. Bộ tách/ghép kênh RGB là một phần quan trọng cốt yếu của hệ thống WDM/VLC cho phép tách các bước sóng từ một đầu vào thành nhiều đầu ra nhưng cần yêu cầu có độ trễ lan truyền thấp, tốc độ truyền dữ liệu cao và tỷ lệ lỗi bit thấp [118]. Một hệ thống LED ánh sáng trắng của hệ thống VLC có thể được tổng hợp từ các LED phổ hẹp của ánh sáng đỏ Red, xanh lá cây Green và xanh lam Blue.

Có nhiều cách để tổng hợp nên các ánh sáng phổ hẹp ở các màu riêng rẽ như vậy. Chẳng hạn, có thể sử dụng mạch điện tử để điều khiển thu chọn lọc các tần số quang của vùng nhìn thấy tương ứng các màu R, G, B riêng thông qua các mạch lái điều khiển bằng điện áp [119] hoặc thông qua các mạch logic có thể đảo ngược (reversible logic gates) [120]. Tuy nhiên, những kiến trúc sử dụng mạch điều khiển điện tử tuy linh hoạt nhưng cần phối ghép với vi mạch điện tử nên tốc độ hoạt động



bị giới hạn bởi đáp ứng điện tử thấp cũng như không thuận lợi cho tích hợp trên miền quang. Mặt khác, bộ ghép kênh RGB nhỏ gọn dành cho điốt laser rất hấp dẫn để sử dụng trong các màn hình bằng kính, màn hình gắn trên đầu và các thiết bị thu nhỏ gọn. Các ứng dụng hình ảnh laser như vậy sử dụng nhiều nguồn laser và ghép chúng thành một chùm tia duy nhất, sau đó được quét lên màn hình bằng máy quét chùm chẳng hạn như gương hệ thống vi cơ điện tử. Bộ ghép kênh RGB thường được xây dựng bằng cách sử dụng lăng kính gương [121], dựa trên cấu trúc sợi tinh thể quang tử đa lõi polycarbonate  $C_{15}H_6O_{12}$  hay silicon nitride  $Si_3N_4$  [122, 123] nhưng kích thước là khá lớn và không thể tích hợp đơn khối và nhỏ gọn với các thành phần quang khác được. Bộ ghép kênh RGB dựa trên mạch quang tử phẳng PLC (planar lightwave circuit) hứa hẹn sẽ giảm kích thước xuống một chip duy nhất tích hợp các chức năng được sử dụng trong bộ ghép kênh RGB thông thường [124]. Tuy vậy, công nghệ PLC dựa trên hiện tượng phản xạ toàn phần quang học hiện nay đã đạt đến giới hạn nhiễu xạ nên kích thước không thể vượt qua kích thước dẫn sóng tối thiểu ở cỡ vài trăm nm đến vài  $\mu m$ . Do đó, bộ tách kênh RGB cần đạt được các yêu cầu về khả năng tích hợp đơn khối, xử lý toàn quang và đặc biệt là kích thước phải rất nhỏ (cỡ nano) và hiệu suất tương đối cao nhằm đáp ứng những yêu cầu tốc độ thông tin cao [125]. Các phân cực plasmonic bề mặt SPP (surface plasmon polariton) là sóng điện từ bị giữ lại trên các mặt phân cách kim loại-điện môi và kết hợp với sự lan truyền dao động của điện tử tự do trong kim loại. SPP được coi là cách hứa hẹn nhất để hiện thực hóa các mạch quang tích hợp cao vì chúng có thể vượt qua đáng kể giới hạn nhiễu xạ cổ điển của ánh sáng và điều khiển ánh sáng trên thang bước sóng.

Với sự phát triển của các công nghệ chế tạo kỹ thuật cao hiện đại, các thiết bị này có thể được chế tạo và ứng dụng trong truyền thông toàn quang và mạch quang tích hợp trong tương lai [6]. Là một ống dẫn sóng plasmonic quan trọng, cấu trúc kim loại-điện môi-kim loại MIM có khả năng hạn chế ánh sáng mạnh với độ dài chấp nhận được để truyền SPP. Ống dẫn sóng MIM hứa hẹn cho việc thiết kế các thiết bị toàn quang nhỏ gọn do chế tạo tương đối dễ dàng đã và đang được nghiên cứu phát triển mạnh mẽ cho nhiều thành phần quang khác nhau như các bộ điều chế

tốc độ cao [126, 127], các thiết bị chuyển mạch plasmonic [128], đặc biệt là các thiết bị ghép/tách kênh phân chia theo bước sóng [103, 129]. Tuy nhiên, các nghiên cứu sử dụng ống dẫn sóng plasmonic chủ yếu là ứng dụng cho các bộ ghép kênh phổ hồng ngoại và phổ telecom và không nhiều công bố cho các bộ ghép kênh RGB. Một vài nghiên cứu về lọc màu RGB cho ánh sáng trắng sử dụng cách tử nhiễu xạ (gratings) [130] sử dụng vật liệu Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> và ống dẫn sóng MIM dùng học cộng hưởng hình lục giác đều [131] và vật liệu Ag/LiNbO<sub>3</sub> hay có hiệu suất truyền đạt không cao, hoặc cách tử dựa trên MIM với vật liệu Al có băng thông bộ lọc mỗi màu tương đối thấp (chỉ cỡ 12nm) [132, 133].

Phần này trình bày giải pháp thiết kế và tối ưu hóa dựa trên phương pháp mô phỏng số khai triển mode riêng EME để thiết kế một bộ lọc ba phổ kênh quang RGB của ánh sáng khả kiến với kích thước cực nhỏ và hiệu năng quang học tương đối cao. Cấu trúc cộng hưởng sử dụng là các buồng cộng hưởng Fabry-Perot hình chữ nhật đơn giản.

Hình 3.20 cho thấy cấu trúc bộ lọc rẽ kênh plasmonic ba cổng bao gồm ống dẫn sóng chính và ống dẫn sóng cũng như hai khoang nano hình chữ nhật trong lớp phủ kim loại bạc. Chất cách điện trong các khe và khoang kim loại là không khí. Kim loại được giả định là bạc, có hằng số điện môi tương đối có thể được mô tả theo mô hình Lorentz - Drude:

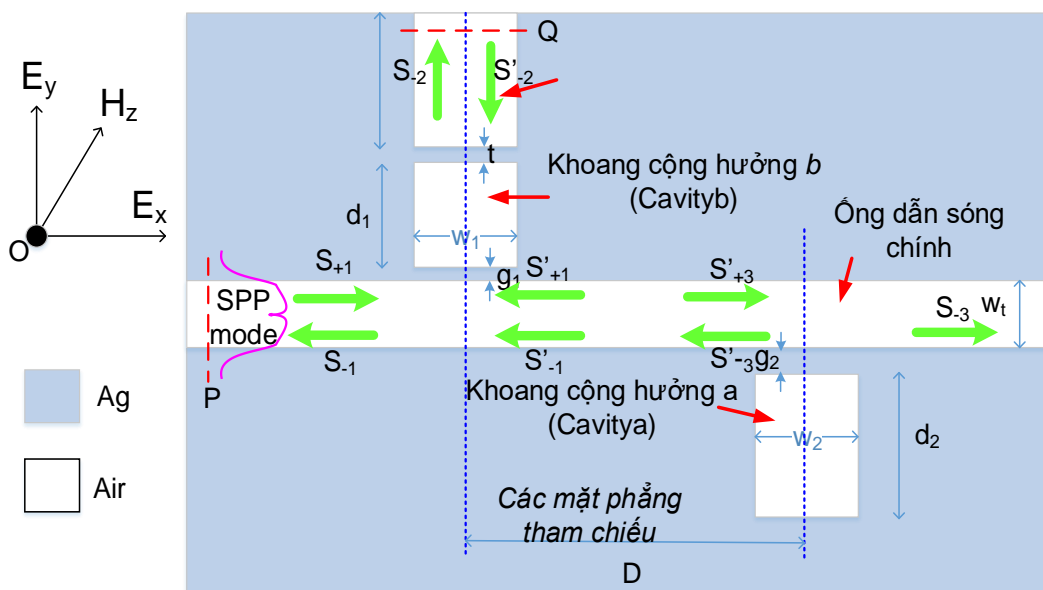
$$\varepsilon_m(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)} \quad (3.12)$$

Trong đó  $\varepsilon_\infty$  đại diện cho hằng số điện môi ở tần số vô hạn,  $\gamma$  và  $\omega_p$  lần lượt là hệ số va chạm electron và tần số plasma mở rộng,  $\omega$  là tần số góc của ánh sáng tới trong chân không. Trong hầu hết các nghiên cứu về ống dẫn sóng MIM ở phổ tần số vùng cửa sổ 1550nm thì kim loại được chọn là kim loại bạc (Ag). Bởi vì kim loại này có thành phần ảo của hằng số điện môi nhỏ không đáng kể ở dải tần cửa sổ telecom thứ ba nên suy hao do hấp thụ hạt dẫn đối với sóng quang là rất nhỏ.

### 3.3.1. Mô hình và nguyên lý thiết kế

Với kim loại bạc, các thông số từ (3.12) cho bạc có thể được đặt là  $\varepsilon_\infty = 3.7, \omega_p = 9.1eV, \gamma = 0.018eV$ . Sóng phân cực TM được phát ra từ  $P$  và truyền đến  $Q$ .

Sự truyền qua khoang rỗng (drop cavity) ở đầu ra được định nghĩa là  $P_P/P_Q$ , ở đây  $P_P$  và  $P_Q$  lần lượt là viết tắt của dòng công suất tới và công suất rã ra công ra. Có hai loại mode SPP trong ống dẫn sóng MIM. Một là mode đối xứng, và mode kia là mode phản đối xứng. Thuật ngữ này dựa trên điện trường dọc. Do đó, cả thành phần trường điện ngang (TE) ( $E_y$ ) và trường từ trường ngang (TM) ( $H_z$ ) đều thể hiện phân bố phản đối xứng ở mode đối xứng và phân bố đối xứng ở mode phản đối xứng. Chế độ đối xứng thực hiện một điểm cắt khi  $w$  giảm xuống dưới độ rộng khoảng hàng trăm nanomet [134].



Hình 3. 20. Sơ đồ của bộ lọc plasmonic dựa trên hiệu ứng đào hầm cộng hưởng của khoang nano trong ống dẫn sóng MIM

Vì chiều rộng của ống dẫn sóng trong cấu trúc đề xuất thấp hơn chiều rộng ngưỡng, nên chỉ có mode phản đối xứng được xem xét ở đây. Khi một sóng phẳng phân cực TM cản trở đến cấu trúc MIM, sóng tới được ghép vào ống dẫn sóng và sóng SPP hình thành trên các giao diện kim loại. Công suất tới một phần được kết hợp vào trọng lực nano gần ống dẫn sóng chính (ống dẫn sóng ngang chính trong Hình 3.20). Khoang nano hoạt động như một chức năng của bộ cộng hưởng có thể dừng tín hiệu ánh sáng có bước sóng cộng hưởng. Để khám phá sự truyền của cấu trúc, biên độ của sóng đến và sóng đi trong ống dẫn sóng được mô tả bằng các tham số tán xạ  $S_{+i}$ ,  $S'_{+i}$  và  $S_{-i}$ ,  $S'_{-i}$  ( $i = 1,2,3$ ) theo lý thuyết ghép mode theo thời gian bởi các quan hệ sau:

$$da/dt = [j - 1/Q_{oa} - 1/(2Q_3)]\omega_{oa}a + \sqrt{\omega_{oa}/(2Q_3)}e^{j\theta_3}S'_{+3} \quad (3.13)$$

$$db/dt = [j - 1/Q_{ob} - 1/(2Q_2) - 1/(2Q_1)]\omega_{ob}b + \sqrt{\omega_{ob}/(2Q_1)}e^{j\theta_1}(S'_{+1} + S_{+1}) \quad (3.14)$$

$$S_{-3} = S'_{+3} - \sqrt{\omega_{oa}/(2Q_3)}e^{-j\theta_3}a \quad (3.15)$$

$$S'_{-3} = -\sqrt{\omega_{oa}/(2Q_3)}e^{-j\theta_3}a \quad (3.16)$$

$$S'_{+3} = S'_{-1}e^{-jD\beta_{spp}} \quad (3.17)$$

$$S'_{+1} = S'_{-3}e^{-jD\beta_{spp}} \quad (3.18)$$

$$S'_{-1} = S_{+1} - \sqrt{\omega_{ob}/(2Q_1)}e^{-j\theta_1}b \quad (3.19)$$

$$S_{-1} = S'_{+1} - \sqrt{\omega_{ob}/(2Q_1)}e^{-j\theta_1}b \quad (3.20)$$

$$S_{-2} = \sqrt{\omega_{ob}/Q_2}e^{-j\theta_2}b \quad (3.21)$$

Trong đó  $Q_{oa}$  và  $Q_{ob}$  đại diện cho các hệ số chất lượng của các khoang cộng hưởng Cavitya và Cavityb do mất mát nội tại,  $\omega_{oa}$  và  $\omega_{ob}$  lần lượt là tần số cộng hưởng của Cavitya và Cavityb.  $Q_2$  là hệ số chất lượng của khoang cộng hưởng rỗng do sự phân rã công suất vào ống dẫn sóng rỗng.  $Q_1$  và  $Q_3$  lần lượt là hệ số chất lượng của Cavityb và Cavitya do sự phân rã thành ống dẫn sóng chính.  $\theta_1$  và  $\theta_3$  lần lượt là các pha ghép từ Cavityb và Cavitya đến ống dẫn sóng chính,  $\theta_2$  là pha ghép giữa Cavityb và ống dẫn sóng rỗng,  $\beta_{spp}$  đại diện cho hằng số truyền của sóng SPP trong ống dẫn sóng MIM.  $D$  là khoảng cách giữa các mặt phẳng tham chiếu của hai khoang. Pha  $\varphi$  giữa hai mặt phẳng tham chiếu có thể được biểu thị bằng:

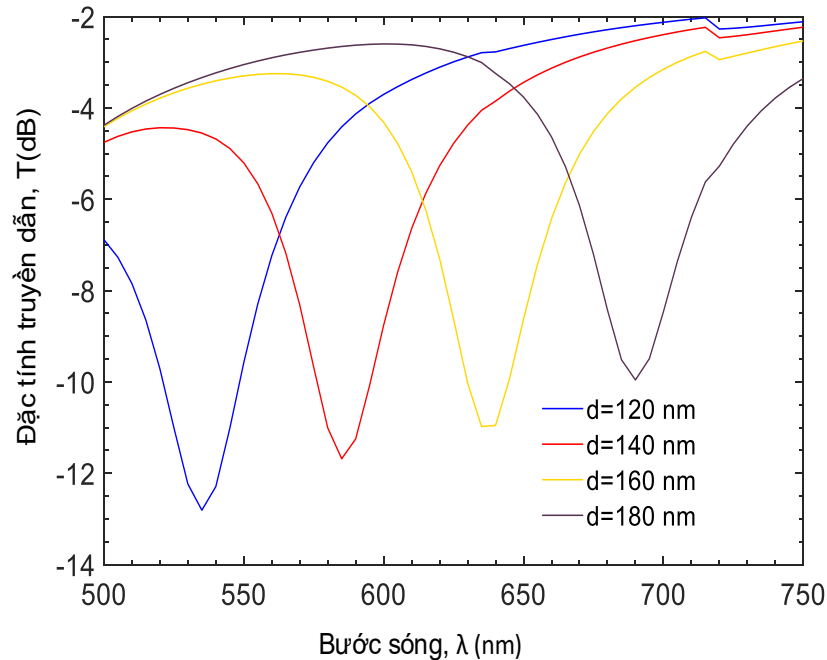
$$\varphi = D\beta_{spp} = Dn_{eff}k_0 \quad (3.22)$$

Với  $n_{eff}$  biểu thị chỉ số khúc xạ hiệu dụng ERI (effective refractive index) của mode SPP. Chỉ số  $n_{eff}$  có liên quan đến bước sóng  $\lambda$  và chiều rộng  $w_t$  của ống dẫn sóng chính. Mối quan hệ tán sắc của chúng được chi phối bởi phương trình tán sắc

(4.8) với  $\epsilon_m$  và  $\epsilon_d$  là hằng số điện môi của ống dẫn sóng chính và lớp kim loại,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  là vectơ sóng của ánh sáng tới trong chân không, biểu thị cho mô men của sóng. Hiệu suất truyền của tách kênh được biểu thị theo công thức (3.3) với  $r = [1/(2Q_3)]/[j(\omega/\omega_{oa} - 1) + 1/(2Q_3) + 1/Q_{oa}]$  là hệ số suy giảm.

### 3.3.2. Thiết kế tối ưu và mô phỏng

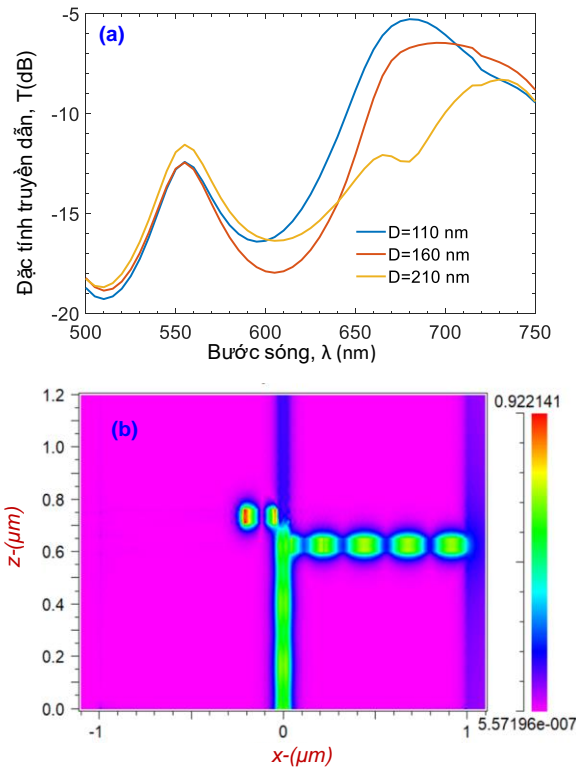
Phương pháp EME được sử dụng là phương pháp mô phỏng hiệu quả và chính xác cao đối với các cấu trúc ống dẫn sóng plasmonic để khảo sát các đặc tính truyền dẫn của ống dẫn sóng plasmonic MIM kết hợp với các khoang [135].



Hình 3. 21. Phổ truyền qua của cấu trúc ống dẫn sóng MIM cho các chiều dài khoang  $d$  khác nhau với  $g = 10\text{nm}$  và  $w = 50\text{nm}$

Như trong Hình 3.21, khi ta chọn các giá trị ban đầu của  $g_1=g_2=g = 10\text{nm}$ ,  $w = w_1 = 50\text{nm}$  ống dẫn sóng MIM kết hợp với một khoang có thể hoạt động như một bộ lọc dừng băng tần quang học. Bằng cách thay đổi tham số hình học  $d$ , đại diện cho chiều dài của khoang, bước sóng hoạt động (cộng hưởng) có thể được điều khiển một cách hiệu quả. Tại các khoảng cách hình học khác nhau cho vài giá trị của  $d$  từ 120nm đến 180nm, các đỉnh cộng hưởng nằm trong dải phổ ánh sáng nhìn thấy từ 500nm đến 700nm.

Đối với hệ thống ống dẫn sóng ghép hai khoang, phổ truyền qua với khoảng cách  $D$  phân tách khoang - khoang được tính toán và thể hiện trong Hình 3.22(a). Ở đây, chiều dài của hai khoang được cố định là  $d_1 = d_2 = 180\text{nm}$ . Các ánh sáng tới ở bước sóng cộng hưởng của các lỗ sâu sẽ bị phản xạ và dẫn hướng trong cực hấp dẫn, như thể hiện trong Hình 3.22(a).

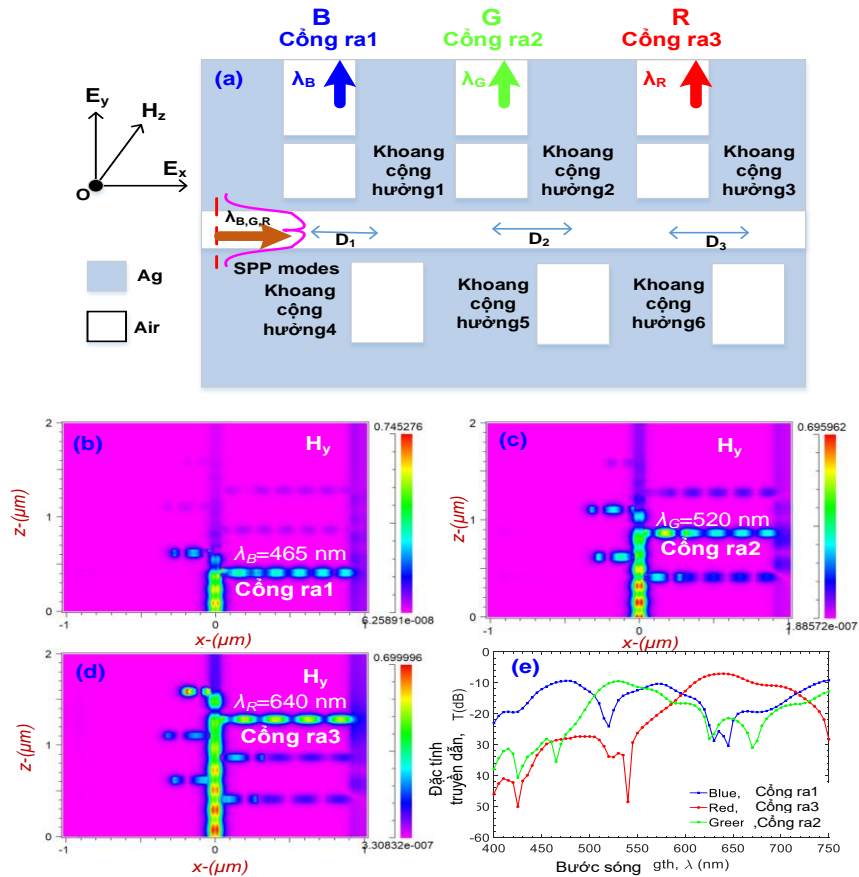


Hình 3. 22. (a) Quang phổ truyền qua với sự phân tách khoang-khoang khác nhau trong hệ thống ống dẫn sóng ghép đôi khoang với  $d_1 = d_2 = 180\text{ nm}$ ,  $g = 10\text{ nm}$  và  $w = 50\text{ nm}$ . (b) Hình ảnh mô phỏng sự phân bố trường của bước sóng đỉnh trong suốt trong ống dẫn sóng ghép khoang kép với  $D = 110\text{ nm}$

Ta cũng có thể thấy rõ rằng có một đỉnh truyền giữa các điểm lốm truyền qua, điều này là tương đối với sự phân tách  $D$ . Khi cộng hưởng Fabry-Perot (FP) hình thành trong ống dẫn sóng chính giữa hai khoang, đặc tính phổ truyền theo bước sóng thể hiện tính chất của hiệu ứng cảm ứng điện từ trong suốt EIT (electromagnetically induced transparency). Sự tách biệt được tối ưu hóa giữa hai khoang có thể được biểu thị như sau:

$$D = \frac{\lambda}{2\text{Re}(n_{\text{eff}}(\lambda))} \quad (3.23)$$

Hiệu quả truyền của bộ lọc rẽ kênh (drop channel) có thể được nâng cao bằng cách thiết lập pha giữa hai mặt phẳng tham chiếu là  $\Delta\varphi=(2m+1)\pi/2$ . Để thực hiện được bộ tách RGB kích thước siêu nhỏ gọn, ta chọn  $m = 0$ . Để thiết kế cấu trúc bộ lọc RGB bằng cách sử dụng tách kênh hiệu quả cao, ta chọn bộ phân kênh ba bước sóng với ba bộ lọc rẽ kênh để khảo sát phản ứng truyền, thể hiện trong Hình 3.23(a).



Hình 3. 23. (a) Sơ đồ nguyên lý của một bộ tách kênh ba bước sóng plasmonic, các tham số được tối ưu  $D_1 = 209$  nm,  $D_2 = 241$  nm và  $D_3 = 304$  nm. (b,c,d) Phân bố trường của  $|H_y|$  tương ứng với các bước sóng 465 nm, 520 nm và 640 nm. (e) Đặc tính truyền dẫn của quang phổ truyền qua của ống dẫn sóng tách ba kênh. Bước sóng lần lượt là 465nm, 520nm, 640nm của các ánh sáng đỏ, lục, lam.

Kết quả có thể được mở rộng cho các cấu trúc ghép kênh đa bước sóng khác. Chiều rộng của ống dẫn sóng và các khoang được cố định là 50nm. Chiều dài của cặp khoang 1-4, 2-5 và 3-6 lần lượt được đặt là 245nm, 291nm và 162nm. Khoảng cách ghép nối giữa tất cả các khoang và ống dẫn sóng là 10nm. Do đó, trong ống dẫn sóng chính, công suất truyền ở các bước sóng hoạt động được phản xạ một cách hiệu quả bởi các khoang tách đôi này. Khoảng cách tối ưu  $D_1$ ,  $D_2$  và  $D_3$  để truyền

cực đại ở bước sóng 465nm, 520nm, 640nm lần lượt là 209nm, 241nm và 304nm. Hình 3.23(b,c,d) mô tả các phân bố trường của  $|H_y|$  với việc phóng sóng liên tục ở bước sóng 465nm, 520nm, 640nm tương ứng thông qua mô phỏng EME. Các phân bố trường phù hợp tốt với phổ truyền qua trong Hình 3.23(b,c,d). Hình 3.23(e) cho thấy đặc tính truyền qua của đáp ứng phổ quang đối với ba cổng ra của ba ống dẫn sóng rẽ kênh tương ứng với ba cổng ra Output1, Output2, Output3 cho lần lượt ba phổ màu R, G, B là 465nm, 520nm và 640nm. Hiệu quả được cải thiện hơn 50% khi so sánh với trường hợp không có khoang nano phản xạ ghép đôi. Bên cạnh đó, hình ảnh mô phỏng ở Hình 3.23(e) cho thấy phổ 3dB cho mỗi kênh là khá rộng, hơn 30nm cho mỗi tín hiệu R, G, B với suy hao khoảng 8dB tại đỉnh của ba bước sóng RGB và chênh lệch giữa tín hiệu trên nhiều quang trong dải 3dB bằng thông luôn lớn hơn 10dB. Đây là các kết quả hiệu năng quang học tương đối tốt. Mặc dù suy hao 8dB là khá lớn so với suy hao của các mạch quang tử dựa trên ống dẫn sóng phản xạ toàn phần chẳng hạn như dựa trên công nghệ quang tử silic (khoảng 2dB) [124] tuy nhiên điều này là dễ hiểu vì mạch quang tử plasmonic bị suy hao do hấp thụ của kim loại là không thể tránh khỏi mà lợi thế của các mạch plasmonic dựa trên ống dẫn sóng MIM là các mode quang được bắt giữ trong kích thước chỉ vài chục nano mét và kích thước toàn mạch chỉ vài  $\mu\text{m}^2$ . Kích thước nhỏ gọn và diện tích mode cực nhỏ cho phép vi mạch tích hợp với mật độ rất cao với đáp ứng xung quang cực nhanh và hứa hẹn cho các vi mạch xử lý tín hiệu toàn quang tích hợp trên chip trong các hệ thống thông tin quang thế hệ mới. Các ưu điểm của cấu kiện đề xuất được so sánh với một số kết quả đã được công bố trên các tạp chí uy tín thời gian gần đây được thể hiện trong bảng 3.3 dưới đây.

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 $\mu$ m x 3,2 $\mu$ m     | 4 $\mu$ m x 4 $\mu$ m         | 3 $\mu$ m x 3 $\mu$ m         |
| 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

Như vậy, trong 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. Các kết quả đã được phân tích chính xác bằng thuyết ghép mode theo thời gian và được tối ưu hóa bằng phương pháp mô phỏng số. Cấu trúc đề xuất có tiềm năng quan trọng cho việc thiết kế các mạch tích hợp cực nhỏ gọn hiệu suất cao và các hệ thống thông tin quang.

Kết quả này được đăng trên kỷ yếu Hội nghị quốc tế ATC'2018: “Dualband-wavelength demultiplexer based on the nanoplasmonic MIM waveguides”, 2018 International Conference On Advanced Technologies For Communications, 2018, Ho Chi Minh City, Vietnam.

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. Dựa trên hiệu ứng ghép nối mạnh mẽ của bộ cộng hưởng FP khác nhau và sự tăng cường của ống dẫn sóng kích thước nano mét, một 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. Cấu trúc đã đề xuất thể hiện khả năng truyền dẫn cao, độ hấp thụ thấp, dung sai tương đối lớn và băng thông rộng cho các ứng dụng trong mạng truy nhập quang tại cửa sổ bước sóng viễn thông. Ngoài ra, 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.

Kết quả này được công bố trong bài báo quốc tế ISI: *“Triple-wavelength filter based on the nanoplasmonic metal-insulator-metal waveguides”*, *Optical and Quantum Electronics, Vol.53, No.223, 2021.*

Ba là, đề xuất bộ lọc bước sóng RGB dựa trên ống dẫn sóng plasmonic MIM có kích thước nano mét, bao gồm một ống dẫn sóng chính được ghép nối với các khoang hẹp cho truyền thông ánh sáng khả kiến VLC cũng như các ứng dụng hiển thị. 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. Rõ ràng độ trong suốt do plasmon gây ra sẽ xuất hiện khi ống dẫn sóng plasmonic giữa các khoang liền kề thỏa mãn điều kiện cộng hưởng. Độ trong suốt cảm ứng đa điểm có thể được thực hiện bằng cách xếp tầng nhiều khoang có độ dài và độ phân tách khác nhau. 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 quả này được công bố trên tạp chí khoa học, Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông năm 2020: “*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.*

### KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Ống dẫn sóng Plasmonic kích thước nano mét có khả năng truyền dẫn ánh sáng dưới bước sóng có băng thông rộng, hiệu suất truyền cao, suy hao thấp và kích thước cực kỳ nhỏ gọn đã được các nghiên cứu khoa học chứng tỏ là một trong những ứng viên tốt cho việc thiết kế các vi mạch tích hợp trong các hệ thống ghép kênh phân chia theo bước sóng và trong một số hệ thống tính toán tốc độ cao.

Nghiên cứu các phương pháp thiết kế dựa trên kỹ thuật FDTD, thuyết ghép mode theo thời gian kết hợp với phương pháp mô phỏng EME để tối ưu các tham số cấu trúc của cấu kiện và phân tích, đánh giá các đặc tính của cấu kiện đề xuất như đặc tính truyền, hấp thụ, dung sai chế tạo cho phép,...

Luận án đã trình bày các thiết kế ống dẫn sóng nano plasmonic theo cấu trúc MIM có chức năng quay phân cực, tính toán logic, thêm/bớt/chia các bước sóng trong cửa số bước sóng viễn thông để ứng dụng kỹ thuật ghép kênh phân chia theo bước sóng cũng như các thành phần chức năng xử lý tín hiệu trong mạng thông tin toàn quang.

### ĐÓNG GÓP KHOA HỌC CỦA LUẬN ÁN

Các nội dung nghiên cứu được chỉ ra sau đây lần đầu tiên được đề xuất và thực hiện trong luận án này. Đây cũng chính là 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.***

Ống dẫn sóng HPW có công suất hấp thụ và phản xạ nhỏ (hấp thụ dưới -7dB và phản xạ dưới -10dB), suy hao truyền thấp (nhỏ hơn -1.5dB) trong dải băng thông 100nm ở bước sóng 1500nm đến 1600nm. Kích thước của cấu kiện chỉ dài cỡ 4.1 $\mu$ m và rộng 400nm là rất nhỏ. Kết quả này được công bố trong kỷ yếu Hội nghị

Quốc gia 2017 về Điện tử, Truyền thông và Công nghệ thông tin: “*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*.

Các cổng logic plasmonic đã đề xuất có thể giảm đáng kể kích thước do đó giảm tán xạ, giảm ngưỡng tín hiệu cho các hoạt động logic và có băng thông rộng trên 300nm trong khi kích thước nhỏ gọn, kích thước các cổng OR, XOR, NOT là 340nm x 1,073 $\mu$ m; cổng Feynman là 1,25 $\mu$ m x 963nm. Kết quả này được công bố trong tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Đà Nẵng năm 2020: “*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*.

**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.**

<sup>(1)</sup>Tạo ra một bộ tách kênh plasmonic hai băng sóng 1310nm và 1550nm có đặc điểm: kích thước toàn cấu kiện là 1,7 $\mu$ m x 3,4 $\mu$ m; khi nhiễu xuyên âm dưới -20dB, băng thông 80nm trong cửa sổ băng tần 1310nm (1290nm đến 1370nm) và băng thông bao phủ toàn bộ dải C + L (1525nm đến 1625nm) trong cửa sổ băng tần 1550nm; hệ số hấp thụ A là -1.8dB ở bước sóng 1310nm và hệ số hấp thụ A nhỏ hơn -3,7dB trong toàn bộ dải C + L. Kết quả này được đăng trên kỷ yếu Hội nghị quốc tế ATC'2018: “*Dualband-wavelength demultiplexer based on the nanoplasmonic MIM waveguides*”, *2018 International Conference On Advanced Technologies For Communications, 2018, Ho Chi Minh City, Vietnam*.

<sup>(2)</sup>Tạo ra bộ lọc bước sóng quang ba băng 1310nm, 1430nm và 1550nm và thiết bị chia bước sóng 3dB dựa trên cấu trúc ống dẫn sóng plasmonic MIM kích thước nano mét có đặc điểm: công suất truyền tại các cổng ra của bộ lọc ba băng sóng 1310nm, 1430nm và 1550nm tương ứng là -5.37dB, -6.19dB và -5.68dB; băng thông 3dB của ba băng tần 1310nm, 1430nm và 1550nm là tương đối rộng, lần lượt là 90nm, 80nm và 100nm; với dung sai chế tạo cho phép là  $\Delta w = \pm 2nm$  thì công suất truyền là không nhỏ hơn -7dB, công suất xuyên âm dưới -15dB, hấp thụ dưới -1dB

và phản xạ dưới -10dB. Kết quả này được công bố trong bài báo quốc tế ISI: “*Triple-wavelength filter based on the nanoplasmonic metal-insulator-metal waveguides*”, *Optical and Quantum Electronics*, Vol.53, No.223, 2021.

<sup>(3)</sup>Bộ lọc bước sóng plasmonic RGB kích thước nano mét dựa trên cấu trúc MIM có đặc điểm: mức chênh lệch giữa tín hiệu trên nhiều quang trong dải 3dB băng thông luôn lớn hơn -10dB và suy hao truyền < -8dB trong 30nm băng thông tại ba phổ màu RGB là 465nm, 520nm và 640nm; bắt giữ các mode quang có kích thước vài chục nano mét, kích thước toàn mạch là 2,2 $\mu$ m x 3,2 $\mu$ m. Kết quả này được công bố trên tạp chí khoa học, Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông năm 2020: “*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*.

### **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 CÁC 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 Truong 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 Truong 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 Bru chính Viễn thông, Số 4A.2020.

[J3] Cao Dung Truong, **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.

## DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Davidson, N. S. Bergano and C. R., "Wavelength Division Multiplexing in Long-Haul Transmission Systemns," *J. Light. Technol.*, Vols. 14, No.6, p. 1299–1308, 1996.
- [2] N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, A. E. Willner, and S. Ramachandran, "Terabit-Scale Orbital Angular Momentum Mode Division Multiplexing in Fibers," *Science (80-. )*, Vols. 340, No.6140, p. 1545–1548, 2013.
- [3] X. Liu, S. Member, F. Buchali, and R. W. Tkach, "Improving the Nonlinear Tolerance of in Long-Haul Fiber Transmission," *J. Light. Technol.*, Vols. 27, No.16, p. 3632–3640, 2009.
- [4] H. N. Tan, K. Tanizawa, T. Inoue, T. Kurosu, and S. Namiki, "No guard-band wavelength translation of Nyquist OTDM-WDM signal for spectral defragmentation in an elastic add – drop node," *Opt. Lett.*, Vols. 38, No.17, p. 3287–3290, 2013.
- [5] I.Djordjevic, "On the Irregular Nonbinary QC-LDPC-Coded Hybrid Multidimensional OSCD-Modulation Enabling Beyond 100 Tb / s Optical Transport," *J. Light. Technol.*, Vols. 31, No.16, p. 2669–2675, 2013.
- [6] S.A.Maier, "Plasmonics : The Promise of Highly Integrated Optical Devices," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, Vols. 12, No.6, p. 1671–1677, 2006.
- [7] R.H.Ritchie, "Surface plasmons in solids," *Surf. Sci.*, vol. 34, p. 1–19, 1973.
- [8] H.A.Atwater, "The Promise of Plasmonics," *Sci. Am.*, vol. 296, pp. 56-63, 2007.
- [9] H. M. G. Wassel, D. Dai, M. Tiwari, J. K. Valamehr, L. Theogarajan, J. Dionne, F. T. Chong, and T. Sherwood, "Opportunities and Challenges of Using Plasmonic Components in Nanophotonic Architectures," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst.*, Vols. 2, no. 2, p. 154–168, 2012.
- [10] R. Soref, L. Fellow, and I. Paper, "The Past, Present, and Future of Silicon Photonics," *Sel. Top. Quantum Electron. IEEE J.*, Vols. 12, No.6, pp. 1678-1687, 2006.
- [11] S. I. Bozhevolnyi, V. S. Volkov, E. Devaux, J. Laluet, and T. W. Ebbesen, "Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators," *Nature*, vol. 440, pp. 508-511, 2006.

- [12] E.Ozbay, "Plasmonics : Merging Photonics and Electronics at Nanoscale Dimensions," *Science* (80-. ), vol. 311, pp. 189-193, 2006.
- [13] S. A. Maier, P. G. Kik, H. A. Atwater, S. Meltzer, E. Harel, B. E. Koel, and A. A. G. Requicha, "Local detection of electromagnetic energy transport below the diffraction limit in metal nanoparticle plasmon waveguides," *Nat. Mater.*, vol. 2, pp. 229-232, 2003.
- [14] J. . Dionne, L. A. Sweatlock, H. A. Atwater, and A. Polman, "Plasmon slot waveguides: Towards chip-scale propagation with subwavelength-scale localization," *Phys. Rev. B*, pp. 1-9, 2006.
- [15] Y. Song, J. Wang, Q. Li, M. Yan, and M. Qiu, "Broadband coupler between silicon waveguide and hybrid plasmonic waveguide," *Opt. Express*, Vols. 18, No.12, pp. 13173-13179, 2010.
- [16] D. Kalavrouziotis, S. Papaioannou, G. Giannoulis, D. Apostolopoulos, K. Hassan, L. Markey, J.-C. Weeber, A. Dereux, A. Kumar, S. I. Bozhevolnyi, M. Baus, M. Karl, T. Tekin, O. Tsilipakos, A. Ptilakis, E. E. Kriezis, H. Avramopoulos, K. Vyrsoinos, and N., "0.48Tb/s (12x40Gb/s) WDM transmission and high-quality thermo-optic switching in dielectric loaded plasmonics," *Opt. Express*, Vols. 20, No.7, pp. 7655-7662, 2012.
- [17] D. Zografopoulos, M. Swillam, and R. Beccherelli, "Hybrid plasmonic modulators and filters based on electromagnetically-induced transparency," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vols. 28, No.7, pp. 818-821, 2016.
- [18] J.T.Kim, "Silicon Optical Modulators Based on Tunable Plasmonic Directional Couplers," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vols. 21, No.4, 2015.
- [19] M. T. Bohr, "Interconnect scaling-the real limiter to high performance ULSI," *IEDM Tech. Dig*, pp. 241-244, 1995.
- [20] Ting-Yen Chiang ; B. Shieh ; K.C. Saraswat, "Impact of Joule heating on scaling of deep sub-micron Cu/low-k interconnects," in *2002 Symposium on VLSI Technology. Digest of Technical Papers*, Honolulu, HI, USA, USA, 2002.
- [21] M.Lax, "From Maxwell to paraxial optics," *Phys. Rev. A*, vol. 11, pp. 1365 - 1370, 1975.
- [22] Ritchie R H and Eldridge H B, *Phys. Rev.*, 1962.
- [23] I. P. Kaminow, W. L. Mammel, and H. P. Weber, "Metal-Clad Optical Waveguides: Analytical and Experimental Study," *Applied Optics*, vol. 13,



- no. 2, pp. 396-405, 1974.
- [24] E. D. PALIK, Handbook of Optical Constants of Solids, New York: ACADEMIC PRESS, INC., 1985.
- [25] William L. Barnes, Alain Dereux & Thomas W. Ebbesen, "Surface plasmon subwavelength optics," *Nature*, pp. 824-830, 2003.
- [26] Joachim R Krenn, B Lamprecht, Harald Ditlbacher, Gerburg Schider, Marco Salerno, Alfred Leitner, Franz R Aussenegg, "Non-diffraction-limited light transport by gold nanowires," *EUROPHYSICS LETTERS*, pp. 663-669, 2002.
- [27] G. Veronis and S. Fan, "Modes of Subwavelength Plasmonic Slot Waveguides," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 9, pp. 2511 - 2521, 2007.
- [28] Veselago, Viktor G, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ," *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10(4):509, 1968.
- [29] A. B. V. Á. Uardado et al., "Hybrid cavity-coupled plasmonic biosensors for low concentration, label-free and selective biomolecular detection," *Opt. Express*, vol. 24, no. 22, p. 21184–21192, 2016.
- [30] J. Guo, "Plasmon-induced transparency in metal – insulator – metal waveguide side-coupled with multiple cavities," *Applied Optics*, vol. 53, no. 8, pp. 1604-1609, 2014.
- [31] Sangsik Kim and Minghao Qi, "Polarization rotation and coupling between silicon waveguide and hybrid plasmonic waveguide," *Optics Express*, vol. 23, no. 8, pp. 9968-9978, 2015.
- [32] M. Mossayebi, A. J. Wright, A. Parini, M. G. Somekh, G. Bellanca, and E. C. Larkins, "Investigating the use of a hybrid plasmonic – photonic nanoresonator for optical trapping using finite-difference time-domain method," *Opt. Quantum Electron.*, 2016.
- [33] Daoxin Dai and Sailing He, "A silicon-based hybrid plasmonic waveguide with a metal cap for a nano-scale light confinement," *Opt. Express*, vol. 17, no. 19, pp. 16646-16653, 2009.
- [34] G. Li et al., "A novel plasmonic resonance sensor based on an infrared perfect absorber," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 45, 2012.
- [35] L. Dong, H. Liu, S. Wang, S. Qu, and L. Wu, "Hybrid Tube-Triangle Plasmonic Waveguide for Ultradeep Subwavelength Confinement," *J. Light.*

- Technol.*, vol. 35, no. 11, pp. 2259-2265, 2017.
- [36] Y.-J. Chang and T.-H. Yu, "Photonic-Quasi-TE-to-Hybrid-Plasmonic-TM Polarization Mode Converter," *J. Light. Technol.*, vol. 33, no. 20, p. 4261–4267, 2015.
- [37] C. Hu, Q. Chen, F. Chen, T. H. Gfroerer, M. W. Wanlass, "Overcoming diffusion-related limitations in semiconductor defect imaging with phonon-plasmon coupled mode Raman scattering," *Light Sci. Appl.*, Vols. 7, no.1, 2018.
- [38] D. K. Gramotnev and S. I. Bozhevolnyi, "Plasmonics beyond the diffraction limit," *Nat. Photonics*, Vols. 4, no.2, p. 83–91, 2010.
- [39] M. Dragoman and D. Dragoman, "Plasmonics: Applications to nanoscale terahertz and optical devices," *Prog. Quantum Electron*, Vols. 32, no. 1, p. 1–41, 2008.
- [40] X. Fang, K. F. MacDonald, and N. I. Zheludev, "Controlling light with light using coherent metadevices: All-optical transistor, summator and inverter," *Light Sci. Appl.*, vol. 4, no. 5, pp. 1-7, 2015.
- [41] C. Hoessbacher et al., "Plasmonic modulator with >170 GHz bandwidth demonstrated at 100 GBd NRZ," *Opt. Express*, vol. 25, no. 3, 2017.
- [42] A. Emboras et al., "Electrically controlled plasmonic switches and modulators," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 21, no. 4, 2015.
- [43] B. Ni and J. Xiao, "Ultracompact and broadband silicon-based TE-pass  $1 \times 2$  power splitter using subwavelength grating couplers and hybrid plasmonic gratings," *Opt. Express*, vol. 26, no. 26, pp. 33942-33955, 2018.
- [44] L. Gao, Y. Huo, J. S. Harris, and Z. Zhou, "Ultra-compact and low-loss polarization rotator based on asymmetric hybrid plasmonic waveguide," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 25, no. 21, p. 2081–2084, 2013.
- [45] N. I. Zheludev, S. A. Maier, N. J. Halas, P. Nordlander, H. Giessen, and C. T. Chong, "The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials," *Nat. Mater.*, vol. 9, no. 9, p. 707–715, 2010.
- [46] C.-T. Wu, C.-C. Huang, and Y.-C. Lee, "Plasmonic wavelength demultiplexer with a ring resonator using high-order resonant modes," *Appl. Opt.*, vol. 56, no. 14, pp. 4039-4044, 2017.
- [47] D. Bradley, "Plasmonic communication," *Mater. Today*, vol. 19, no. 4, 2016.
- [48] R. Zafar and M. Salim, "Analysis of asymmetry of Fano resonance in

- plasmonic metal-insulator-metal waveguide," *Photonics Nanostructures - Fundam. Appl.*, vol. 23, pp. 1-6, 2017.
- [49] Y. Gong, L. Wang, X. Hu, X. Li, and X. Liu, "Broad-bandgap and low-sidelobe surface plasmon polariton reflector with Bragg-grating-based MIM waveguide," *Opt. Express*, vol. 17, no. 16, pp. 13727-13736, 2009.
- [50] L. Wang, L. Yan, Y. Guo, K. Wen, W. Pan, and B. Luo, "Optical quasi logic gates based on polarization-dependent four-wave mixing in subwavelength metallic waveguides," *Opt. Express*, vol. 21, no. 12, pp. 14442-14451, 2013.
- [51] M. Z. Interferometer, R. Katti, and S. Prince, "All Optical new 3x3 reversible logic gate using Mach-Zehnder Interferometer," *Opt. Quantum Electron.*, pp. 1-18, 2016.
- [52] G. K. Bharti, M. P. Singh, and J. K. Rakshit, "Design and Modeling of Polarization-Conversion Based all-Optical Basic Logic Gates in a Single Silicon Ring Resonator," *Silicon*, vol. 12, p. 1279–1288, 2020.
- [53] R. Sattibabu and P. Ganguly, "Design of reversible optical Feynman gate using directional couplers," *Optical Engineering*, vol. 59, no. 2, 2020.
- [54] Nilima Gogoi and Partha Pratim Sahu, "All-optical compact surface plasmonic two-mode interference device for optical logic gate operation," *Applied Optics*, vol. 54, no. 5, pp. 1051-1057, 2015.
- [55] A. Heydari, A. Bahrami, and A. Mahmoodi, "All-Optical XOR, XNOR, NAND and or Logic Gates Based on Photonic Crystal 3-DB Coupler for BPSK Signals," *J. Opt. Commun.*, pp. 1-9, 2019.
- [56] Z. Yin et al., "All-Optical Logic Gate for XOR Operation between 40-Gbaud QPSK Tributaries in an Ultra-Short Silicon Nanowire," *IEEE Photonics J.*, vol. 6, no. 3, pp. 1-7, 2014.
- [57] C. Murapaka, P. Sethi, S. Goolaup, and W. S. Lew, "Reconfigurable logic via gate controlled domain wall trajectory in magnetic network structure," *Sci. Rep.*, vol. 6, pp. 1-11, 2016.
- [58] Y. N. Kulchin, O. B. Vitrik, and A. V. Dyshlyuk, "Analysis of surface plasmon resonance in bent single-mode waveguides with metal-coated cladding by eigenmode expansion method," *Opt. Express*, vol. 22, no. 18, pp. 22196-22201, 2014.
- [59] A. E. Grigorescu, M. C. van der Krogt, C. W. Hagen, and P. Kruit, "10 nm lines and spaces written in HSQ, using electron beam lithography,"

- Microelectron. Eng.*, vol. 84, p. 822–824, 2007.
- [60] S. Cabrini et al., "Focused ion beam lithography for two dimensional array structures for photonic applications," *Microelectron. Eng.*, Vols. 78-79, pp. 11-15, 2005.
- [61] J. Park, H. Kim, and B. Lee, "High order plasmonic Bragg reflection in the metal-insulator-metal waveguide Bragg grating," *Opt. Express*, vol. 16, no. 1, pp. 413-425, 2008.
- [62] G. Ghosh, M. Endo, and T. Iwasaki, "Temperature-Dependent Sellmeier Coefficients and Chromatic Dispersions for Some Optical Fiber Glasses," *J. Light. Technol.*, vol. 12, no. 8, p. 1338–1342, 1994.
- [63] C. Z. Tan and J. Arndt, "Temperature dependence of refractive index of glassy SiO<sub>2</sub> in the infrared wavelength range," *Phys. Chem. Solids*, vol. 61, no. 8, p. 1315–1320, 2000.
- [64] E. Fontana, J.-M. Kim, I. Llamas-Garro, and G. O. Cavalcanti, "Microfabricated Otto chip device for surface plasmon resonance-based optical sensing," *Appl. Opt.*, vol. 54, no. 31, pp. 9200-9204, 2015.
- [65] J. J. Foley, H. Harutyunyan, D. Rosenmann, R. Divan, G. P. Wiederrecht, and S. K. Gray, "When are Surface Plasmon Polaritons Excited in the Kretschmann-Raether Configuration?," *Scientific Reports*, vol. 5, 2015.
- [66] H. Lu, X. Liu, Y. Gong, D. Mao, and L. Wang, "Enhancement of transmission efficiency of nanoplasmonic wavelength demultiplexer based on channel drop filters and reflection nanocavities," *Opt. Express*, vol. 19, no. 14, p. 12885–12890, 2011.
- [67] P. Sethi and S. Roy, "All-Optical Ultrafast Switching in 2 x 2 Silicon Microring Resonators and its Application to Reconfigurable DEMUX / MUX and Reversible Logic Gates," *J. Light. Technol.*, vol. 32, no. 8, p. 1–8, 2014.
- [68] H. T. Miyazaki and Y. Kurokawa, "Squeezing visible light waves," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 96, no. 9, pp. 1-4, 2006.
- [69] P. Berini, "Plasmon–polariton modes guided by a metal film of finite thickness," *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 15, pp. 1011-1013, 1999.
- [70] D. F. P. Pile and D. K. Gramotnev, "Plasmonic subwavelength waveguides: next to zero losses at sharp bends," *Opt. Lett.*, vol. 30, no. 10, pp. 1186-1188, 2005.
- [71] J. Xiao et al., "A CMOS-compatible hybrid plasmonic slot waveguide with

- enhanced field confinement," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 37, no. 4, p. 456–458, 2016.
- [72] S. H. Kwon, "Deep subwavelength-scale metal-insulator-metal plasmonic disk cavities for refractive index sensors," *IEEE Photonics J.*, vol. 5, no. 1, 2013.
- [73] J. Guo, "Plasmon-induced transparency in metal – insulator – metal waveguide side-coupled with multiple cavities," *Applied Optics*, vol. 53, no. 8, pp. 1604-1609, 2014.
- [74] M. Islam, D. R. Chowdhury, A. Ahmad, and G. Kumar, "Terahertz Plasmonic Waveguide Based Thin Film Sensor," *J. Light. Technol.*, vol. 35, no. 23, p. 5215–5221, 2017.
- [75] L. Dong, H. Liu, S. Wang, S. Qu, and L. Wu, "Hybrid Tube-Triangle Plasmonic Waveguide for Ultradeep Subwavelength Confinement," *J. Light. Technol.*, vol. 35, no. 11, p. 2259–2265, 2017.
- [76] J. H. Zhu, Q. J. Wang, P. Shum, and X. G. Huang, "A Nanoplasmonic High-Pass Wavelength Filter Based on a Metal-Insulator-Metal Circuitous Waveguide," *IEEE Transactions on NanoTechnology*, vol. 10, no. 6, p. 1357–1361, 2011.
- [77] Tadesse Mulugeta and Mahmoud Rasras, "Silicon hybrid (de)multiplexer enabling simultaneous mode and wavelength-division multiplexing," *Optics Express*, vol. 23, no. 2, pp. 943-949, 2015.
- [78] S. E. Kocabas, G. Veronis, D. Miller, and S. Fan, "Transmission Line and Equivalent Circuit Models for Plasmonic Waveguide Components," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 146, p. 1462–1472, 2008.
- [79] J. Park, H. Kim, and B. Lee, "High order plasmonic Bragg reflection in the metal-insulator-metal waveguide Bragg grating," *Opt. Express*, vol. 16, no. 1, p. 413–425, 2008.
- [80] T. Søndergaard, J. Jung, S. I. Bozhevolnyi, and G. Della Valle, "Theoretical analysis of gold nano-strip gap plasmon resonators," *New J. Phys.*, vol. 10, 2008.
- [81] H. Lu, X. Liu, Y. Gong, D. Mao, and L. Wang, "Enhancement of transmission efficiency of nanoplasmonic wavelength demultiplexer based on channel drop filters and reflection nanocavities," *Optics express*, vol. 19, no. 14, p. 12885–12890, 2011.

- [82] D. Dai and S. He, "A silicon-based hybrid plasmonic waveguide with a metal cap for a nano-scale light confinement," *Opt. Express*, vol. 17, no. 19, p. 16646–16653, 2009.
- [83] A. Melikyan et al., "High-speed plasmonic phase modulators," *Nat. Photonics*, vol. 8, no. 3, p. 229–233, 2014.
- [84] L. Dong, H. Liu, S. Wang, S. Qu, and L. Wu, "Hybrid Tube-Triangle Plasmonic Waveguide for Ultradeep Subwavelength Confinement," *J. Light. Technol.*, vol. 35, no. 11, p. 2259–2265, 2017.
- [85] X. Wu, J. Zhang, and Q. Gong, "Metal-insulator-metal nanorod arrays for subwavelength imaging," *Opt. Express*, vol. 17, no. 4, p. 2818–2825, 2009.
- [86] S. H. Kwon, "Deep subwavelength-scale metal-insulator-metal plasmonic disk cavities for refractive index sensors," *IEEE Photonics J.*, vol. 5, no. 1, 2013.
- [87] Y.-C. Chang, C.-M. Wang, M. N. Abbas, M.-H. Shih, and D. P. Tsai, "T-shaped plasmonic array as a narrow-band thermal emitter or biosensor," *Opt. Express*, vol. 17, no. 16, pp. 13526-13531, 2009.
- [88] J. Guo, "Plasmon-induced transparency in metal-insulator-metal waveguide side-coupled with multiple cavities," *Appl. Opt.*, vol. 53, no. 8, pp. 1604-1609, 2014.
- [89] M. Islam, D. R. Chowdhury, A. Ahmad, and G. Kumar, "Terahertz Plasmonic Waveguide Based Thin Film Sensor," *J. Light. Technol.*, vol. 35, no. 23, p. 5215–5221, 2017.
- [90] L. Dong, H. Liu, S. Wang, S. Qu, and L. Wu, "Hybrid Tube-Triangle Plasmonic Waveguide for Ultradeep Subwavelength Confinement," *J. Light. Technol.*, vol. 35, no. 11, pp. 2259-2265, 2011.
- [91] Y. Liu, J. Yan, and G. Han, "The transmission characteristic of metal-dielectric-metal slot waveguide-based nanodisk cavity with gain medium," *IEEE Photonics J.*, vol. 7, no. 2, 2015.
- [92] A. Noual, A. Akjouj, Y. Pennec, J.-N. Gillet, and B. Djafari-Rouhani, "Modeling of two-dimensional nanoscale Y-bent plasmonic waveguides with cavities for demultiplexing of the telecommunication wavelengths," *New J. Phys.*, vol. 11, no. 103020, 2009.
- [93] M. S. Kumar, X. Piao, S. Koo, S. Yu, and N. Park, "Out of plane mode conversion and manipulation of Surface Plasmon Polariton Waves," *Opt.*

- Express*, vol. 18, no. 9, p. 8800–8805, 2010.
- [94] H. Lu, X. Liu, Y. Gong, D. Mao, and L. Wang, "Enhancement of transmission efficiency of nanoplasmonic wavelength demultiplexer based on channel drop filters and reflection nanocavities," *Opt. Express*, vol. 19, no. 14, p. 12885–12890, 2011.
- [95] H. Lu, X. M. Liu, L. R. Wang, D. Mao & Y. K. Gong , "Nanoplasmonic triple-wavelength demultiplexers in two-dimensional metallic waveguides," *Applied Physics B*, vol. 103, p. 877–881, 2011.
- [96] X. M. Geng, T. J. Wang, D. Q. Yang, L. Y. He, and C. Wang, "Tunable Plasmonic Wavelength Demultiplexing Device Using Coupled Resonator System," *IEEE Photonics J.*, vol. 8, no. 3, 2016.
- [97] Shiva Khani, Mohammad Danaie, Pejman Rezaei, "Double and triple-wavelength plasmonic demultiplexers based on improved circular nanodisk resonators," *Optical Engineering*, vol. 57, no. 10, 2018.
- [98] P. T. Kristensen, J. R. De Lasson, M. Heuck, N. Gregersen, and J. Mork, "On the Theory of Coupled Modes in Optical Cavity-Waveguide Structures," *J. Light. Technol.*, vol. 35, no. 19, p. 4247–4259, 2017.
- [99] G. Ghosh, M. Endo, and T. Iwasaki, "Temperature-Dependent sellmeier Coefficients and Chromatic Dispersions for Some Optical fiber glasses," *J. Light. Technol.*, vol. 12, no. 8, p. 1338–1342, 1994.
- [100] C. Z. Tan and J. Arndt, "Temperature dependence of refractive index of glassy SiO<sub>2</sub> in the infrared wavelength range," *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 61, no. 8, p. 1315–1320, 2000.
- [101] Y. Matsuzaki, T. Okamoto, M. Haraguchi, M. Fukui, and M. Nakagaki, "Characteristics of gap plasmon waveguide with stub structures," *Opt. Express*, vol. 16, no. 21, 2008.
- [102] X.-S. Lin and X. G. Huang, "Tooth-shaped plasmonic waveguide filters with nanometric sizes," *Opt. Lett.*, vol. 33, no. 23, p. 2874–2876, 2008.
- [103] H. Lu, X. Liu, Y. Gong, D. Mao, and L. Wang, "Enhancement of transmission efficiency of nanoplasmonic wavelength demultiplexer based on channel drop filters and reflection nanocavities," *Opt. Express*, vol. 19, no. 14, p. 12885–12890, 2011.
- [104] A. Dolatabady and N. Granpayeh, "All-optical logic gates in plasmonic metal–insulator–metal nanowaveguide with slot cavity resonator," *J.*

*Nanophotonics*, vol. 11, no. 2, 2017.

- [105] Z. Chen, R. Hu, L. Cui, L. Yu, L. Wang, and J. Xiao, "Plasmonic wavelength demultiplexers based on tunable Fano resonance in coupled-resonator systems," *Opt. Commun.*, vol. 320, pp. 6-11, 2014.
- [106] G. Naik, J. Liu, and J. M. J. Park, "Coexistence of wireless technologies in the 5GHz bands: A survey of existing solutions and a roadmap for future research," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 20, no. 3, p. 1777–1798, 2018.
- [107] M. A. Vieira, M. Vieira, P. Louro, and P. Vieira, "Vehicular Visible Light Communication I2V2V2I connected cars," in *SENSORDEVICES 2018: The Ninth International Conference on Sensor Device Technologies and Applications VehicularVisible*, p. 175–180, 2018.
- [108] A. Baklanov, S. Grigoryeva, A. Alimkhanova, and E. Grigoryev, "Audio Transmission System Using White LEDs," *2019 Int. Sib. Conf. Control Commun.*, pp. 1-4, 2019.
- [109] S. Liang, Y. Zhou, M. Zhang, and N. Chi, "Experiment of Audio Visual Communication System Based on White LED and Intelligent Mobile Terminal," in *2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON) Experiment*, pp. 1-3, 2016.
- [110] Y. Zhang, J. Wang, W. Zhang, S. Chen, and L. Chen, "LED-based visible light communication for color image and audio transmission utilizing orbital angular momentum superposition modes," *Opt. Express*, vol. 26, no. 13, pp. 17300-17311, 2018.
- [111] A. Sewaiwar, P. P. Han, and Y. H. Chung, "3-Gbit/s Indoor Visible Light Communications Using Optical Diversity Schemes," *IEEE Photonics J.*, vol. 7, no. 6, pp. 1-9, 2015.
- [112] H. Le Minh et al., "100-Mb/s NRZ visible light communications using a postequalized white LED," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 21, no. 15, p. 1063–1065, 2009.
- [113] C. W. Chow, Y. Liu, C. H. Yeh, C. Y. Chen, C. N. Lin, and D. Z. Hsu, "Secure communication zone for white-light LED visible light communication," *Opt. Commun.*, vol. 344, p. 81–85, 2015.
- [114] Y. Wang, L. Tao, X. Huang, J. Shi, and N. Chi, "8-Gb/s RGBY LED-Based WDM VLC System Employing High-Order CAP Modulation and Hybrid Post Equalizer," *IEEE Photonics J.*, vol. 7, no. 6, pp. 7-12, 2015.



- [115] Y. Wang, L. Tao, X. Huang, J. Shi, and N. Chi, "Enhanced Performance of a High-Speed WDM CAP64 VLC System Employing Volterra Series-Based Nonlinear Equalizer," *IEEE Photonics J.*, vol. 7, no. 3, 2015.
- [116] T. C. Wu, Y. C. Chi, H. Y. Wang, C. T. Tsai, Y. F. Huang, and G. R. Lin, "Tricolor R/G/B laser diode based eye-safe White lighting communication beyond 8 Gbit/s," *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, pp. 1-10, 2017.
- [117] L.-Y. Wei, C.-W. Hsu, C.-W. Chow, and C.-H. Yeh, "20.231 Gbit/s tricolor red/green/blue laser diode based bidirectional signal remodulation visible-light communication system LIANG-YU," *Photonics Res.*, vol. 6, no. 5, p. 422–426, 2018.
- [118] L. V. Bartkiv and Y. V. Bobitski, "Fiber Optic Transmission of RGB-signals using a WDM system," in *CAOL 2005*, p. 257–259, 2015.
- [119] . Sabne, A. Panda, and V. More, "Simplified Wavelength Division Multiplexing in Visible Light Communication by Using RGB LED as Frequency Selective Receiver," *2019 10th Int. Conf. Comput. Commun. Netw. Technol. ICCCNT 2019*, pp. 1-5, 2019.
- [120] L. Touil and B. Ouni, "Design of hardware RGB to HMMD converter based on reversible logic," *IET Image Process.*, vol. 11, no. 8, p. 646–655, 2017.
- [121] W. O. Davis, R. Sprague, and J. Miller, "MEMS-based Pico projector display," in *2008 IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics, OPT MEMS*, vol. 1, pp. 31-32, 2008.
- [122] R. Dadabayev and D. Malka, "A visible light RGB wavelength demultiplexer based on polycarbonate multicore polymer optical fiber," *Opt. Laser Technol.*, vol. 116, p. 239–245, 2019.
- [123] Rami Dadabayeva, Nadav Shabairoub, Zeev Zalevskyb, Dror Malkaa,, "A visible light RGB wavelength demultiplexer based on silicon-nitride multicore PCF," *Optics and Laser Technology*, vol. 111, pp. 411-416, 2019.
- [124] J. Sakamoto and T. Hashimoto, "Recent progress in applications of optical multimode devices using planar lightwave circuits," *NTT Tech. Rev.*, vol. 17, no. 5, pp. 40-44, 2019.
- [125] M. Salsi et al., "Transmission at  $2 \times 100$ Gb/s, over two modes of 40km-long prototype few-mode fiber, using LCOS-based mode multiplexer and demultiplexer," *Opt. InfoBase Conf. Pap.*, pp. 2-5, 2011.
- [126] M. Ayata et al., "High-speed plasmonic modulator in a single metal layer," *Science (80-. )*, vol. 632, p. 630–632, 2017.

- [127] C. Haffner et al., "All-plasmonic Mach-Zehnder modulator enabling optical high-speed communication at the microscale," *Nat. Photonics*, vol. 9, no. 8, p. 525–528, 2015.
- [128] V. A. Aksyuk, "Design and modeling of an ultra-compact 2x2 nanomechanical plasmonic switch," *Opt. Express*, vol. 23, no. 9, pp. 11404–11411, 2015.
- [129] Y. Xu, J. Xiao, and X. Sun, "Design of a compact polarization demultiplexer for silicon-based slot waveguides," *Appl. Opt.*, vol. 53, no. 35, p. 8305–8312, 2014.
- [130] M. J. Uddin, T. Khaleque, and R. Magnusson, "Guided-mode resonant polarization-controlled tunable color filters," *Opt. Express*, vol. 22, no. 10, pp. 12307–12315, 2014.
- [131] K. Diest, J. A. Dionne, M. Spain, and H. A. Atwater, "Tunable color filters based on metal-insulator-metal resonators," *Nano Lett.*, vol. 9, no. 7, p. 2579–2583, 2009.
- [132] D. Fleischman, L. A. Sweatlock, H. Murakami, and H. Atwater, "Hyper-selective plasmonic color filters," *Opt. Express*, vol. 25, no. 22, pp. 27386–27395, 2017.
- [133] C. Jiang et al., "Plasmonic color filter based on a hetero-metal-insulator-metal grating," *Appl. Opt.*, vol. 59, no. 14, p. 4432–4436, 2020.
- [134] H. Lu, X. Liu, D. Mao, L. Wang, and Y. Gong, "Tunable band-pass plasmonic waveguide filters with nanodisk resonators," *Opt. Express*, vol. 18, no. 17, pp. 17922–17927, 2010.
- [135] Y. Xiong, R. B. Priti, and O. Liboiron-Ladouceur, "High-speed two-mode switch for mode-division multiplexing optical networks," vol. 4, no. 9, pp. 1098–1102, 2017.
- [136] Y. J. He, "Investigation of LPG-SPR sensors using the finite element method and eigenmode expansion method," *Opt. Express*, vol. 21, no. 12, pp. 13875–13895, 2013.