

BỘ TÁCH GHÉP KÊNH RGB QUANG KÍCH THƯỚC NANO DỰA TRÊN CÁC ỐNG DẪN SÓNG MIM-PLASMONIC

Nguyễn Văn Tài, Trương Cao Dũng, Đặng Hoài Bắc

Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

Tóm tắt - Trong bài báo này, chúng tôi trình bày một đề xuất về bộ lọc bước sóng RGB nhỏ gọn và thiết bị tách bước sóng dựa trên cấu trúc kim loại-cách điện-kim loại nanoplasmonic. Các kết quả đã được nghiên cứu chính xác bằng cách sử dụng lý thuyết ghép mode theo thời gian. Phương pháp mô phỏng số triển khai 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 < 8 dB, mức tín hiệu trên nhiễu quang lớn hơn 10 dB trong 30-nm 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 truyền thông quang học ở kích thước nano.

Từ khóa - các phân cực plasmon bề mặt (SPP), bộ lọc bước sóng RGB, cộng hưởng nano Fabry-Perot, kim loại-cách điện-kim loại (MIM), mô phỏng triển khai mode riêng (EME).

1. GIỚI THIỆU

Thông tin ánh sáng khả kiến VLC (visible light communication) là một hình thức giao tiếp không dây trong đó thông tin diễn ra bằng cách sử dụng vùng quang phổ của ánh sáng khả kiến [1]. Thông thường, điốt phát quang LED trong phạm vi nhìn thấy và điốt 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 [2],[3]. 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 [4]; truyền dữ liệu âm thanh, hình ảnh [5]–[7]; các hệ thống truy nhập internet dựa trên công nghệ Lifi [8],[9]. 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 [10], không bị ảnh hưởng bởi nhiễu điện từ, cho phép thiết lập các hệ thống thông tin liên lạc an toàn [11].

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 [12],[13] và có thể đạt được tốc độ cao hơn [14],[15]. 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 [16][17]. Một hệ thống LED ánh sáng trắng của hệ thống VLC có thể được tổng hợp từ các LED phổ hẹp của các ánh sáng đỏ (Red), xanh lá cây (Green) và xanh lam (Blue).

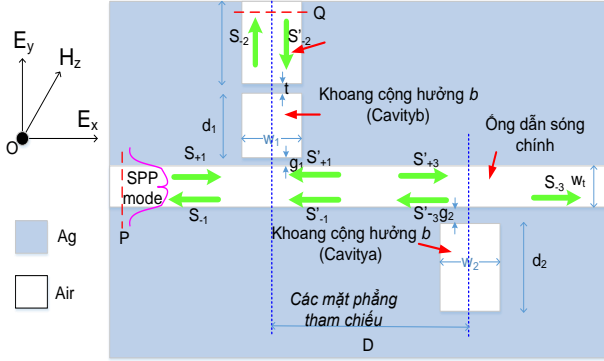
Có nhiều cách để tổng hợp nên các ánh sáng phổ hẹp ở các màu riêng rẽ như vậy. Chẳng hạn, có thể sử dụng mạch điện tử để điều khiển thu chọn lọc các tần số quang của vùng nhìn thấy tương ứng các màu R, G, B riêng thông qua các mạch lái điều khiển bằng điện áp [18] hoặc thông qua các mạch logic có thể đảo ngược (reversible logic gates) [19]. 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 [20], phim nhiều lớp và các loại sợi quang như sợi PCF (photonic crystal fiber) đa lõi, sợi polymer đa lõi [21]–[23] 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 [24],[25]. 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 μm . 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 [26]. Các phân cực plasmonic bề mặt SPP (surface

Tác giả liên hệ: Nguyễn Văn Tài

Email: tai2006vn@gmail.com

Đến tòa soạn: 10/2020, chỉnh sửa: 11/2020, chấp nhận đăng 12/2020

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 [27].



Hình 1. Sơ đồ của bộ lọc plasmonic dựa trên hiệu ứng đảo hầm cộng hưởng của khoang nano trong ống dẫn sóng MIM.

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 [27],[28]. Là một ống dẫn sóng plasmonic quan trọng, cấu trúc kim loại-điện môi-kim loại MIM (metal-insulator-metal) 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 quang toàn phần 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 [29][30], các thiết bị chuyển mạch plasmonic [31], đặc biệt là các thiết bị ghép/tách kênh phân chia theo bước sóng [32],[33]. 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) [34] sử dụng vật liệu Si₃N₄ và ống dẫn sóng MIM dùng hốc cộng hưởng hình lục giác đều [37] và vật liệu Ag/LiNbO₃ 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 12 nm) [35][36].

Trong bài báo này, chúng tôi trình bày thiết kế và tối ưu hóa dựa trên phương pháp mô phỏng số khai triển mode riêng EME (eigenmode expansion method) 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.

2. MÔ HÌNH VÀ NGUYÊN LÝ THIẾT KẾ

Hình 1 cho thấy cấu trúc bộ lọc rẽ kênh plasmonic ba cộng bao gồm ống dẫn sóng hình cái và ống dẫn sóng cũng như hai hốc nano hình chữ nhật trong lớp phủ kim loại. Chất cách điện trong các khe và hốc 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 nổi tiếng [38]:

$$\epsilon_m(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)} \tag{1}$$

trong đó ϵ_∞ đại diện cho hằng số điện môi ở tần số vô hạn, γ và ω_p lần lượt là hệ số va chạm electron và tần số plasma mở rộng, ω 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 1550 nm thì kim loại được chọn là kim loại bạc (Ag). Bởi vì kim loại này có 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. Với kim loại bạc, các thông số từ (1) cho bạc có thể được đặt là $\epsilon_\infty = 3.7$, $\omega_p = 9.1$ eV, và $\gamma = 0.018$ eV [39]. Sóng phân cực TM được phát ra từ P và truyền đến Q. Sự truyền qua khoang rẽ (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 công suất rẽ 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 [40]. Vì chiều rộng của ống dẫn sóng trong cấu trúc của chúng tôi 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 dạng bus (ống dẫn sóng ngang chính trong Hình 1). 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:

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

$$db/dt = [j - 1/Q_{ob} - 1/(2Q_2) - 1/(2Q_1)] \times \omega_{ob}b + \sqrt{\omega_{ob}/(2Q_1)}e^{j\theta_1}(S_{+1} + S'_{+1}) \tag{3}$$

$$S_{-3} = S'_{+3} - \sqrt{\omega_{oa}/(2Q_3)}e^{-j\theta_3}a \tag{4}$$

$$S'_{-3} = -\sqrt{\omega_{oa}/(2Q_3)}e^{-j\theta_3}a \tag{5}$$

$$S'_{+3} = S'_{-1}e^{-jD\beta_{spp}} \tag{6}$$

$$S'_{+1} = S'_{-3}e^{-jD\beta_{spp}} \tag{7}$$

$$S'_{-1} = S_{+1} - \sqrt{\omega_{ob}/(2Q_1)}e^{-j\theta_1}b \tag{8}$$

$$S_{-1} = S'_{+1} - \sqrt{\omega_{ob}/(2Q_1)}e^{-j\theta_1}b \tag{9}$$

$$S_{-2} = \sqrt{\omega_{ob}/Q_2}e^{-j\theta_2}b \tag{10}$$

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, ω_{oa} và ω_{ob} đại diện cho các tần số cộng hưởng của Cavitya và Cavityb, tương ứng. Q_2 là hệ số chất

lượng của khoang cộng hưởng rẽ do sự phân rã công suất vào ống dẫn sóng rẽ. Q_1 và Q_3 lần lượt là hệ số chất lượng của Cavityb và Cavitya do sự phân rã thành ống dẫn sóng bus. θ_1 và θ_3 lần lượt là các pha ghép từ Cavityb và Cavitya đến ống dẫn sóng bus, θ_2 là pha ghép giữa Cavityb và ống dẫn sóng rẽ, β_{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 hốc. Pha φ giữa hai mặt phẳng tham chiếu có thể được biểu thị bằng:

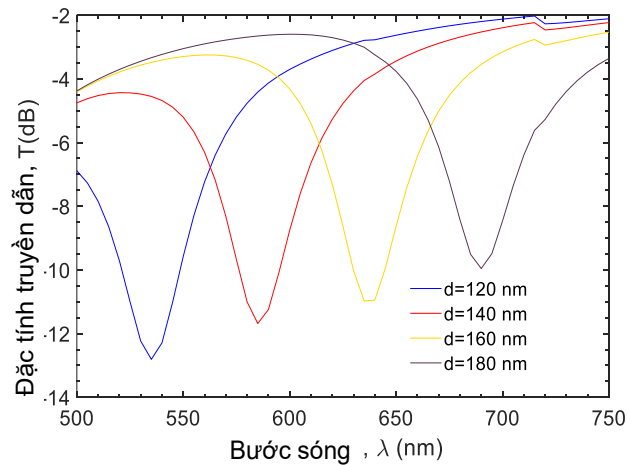
$$\varphi = D\beta_{spp} = Dn_{eff}k_0 \quad (11)$$

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 λ và chiều rộng w_i của ống dẫn sóng bus. Mối quan hệ tán sắc của chúng được chi phối bởi phương trình tán sắc sau đây[41]:

$$\varepsilon_m \sqrt{n_{eff}^2 - \varepsilon_d} \tan\left(h \frac{w_i k_0 \sqrt{n_{eff}^2 - \varepsilon_d}}{2}\right) + \varepsilon_d \sqrt{n_{eff}^2 - \varepsilon_m} = 0 \quad (12)$$

Ở đây ε_d và ε_m là hằng số điện môi của ống dẫn sóng bus và lớp kim loại, $k_0 = 2\pi/\lambda$ là vector sóng (wave number) của ánh sáng tới trong chân không, biểu thị cho mô men của sóng. Hiệu suất truyền của tách kênh được biểu thị bằng [32]:

$$T_d = \frac{[1 - r \exp^{-2j\varphi}]^2 / (2Q_1 Q_2)}{[\omega / \omega_b - 1 + r \sin 2\varphi / (2Q_1)]^2 + [1/Q_b + 1/(2Q_2) + (1 - r \cos 2\varphi) / (2Q_1)]^2} \quad (13)$$



Hình 2. Phổ truyền qua của cấu trúc ống dẫn sóng MIM cho các chiều dài khoang khác nhau d với $g = 10$ nm và $w = 50$ nm.

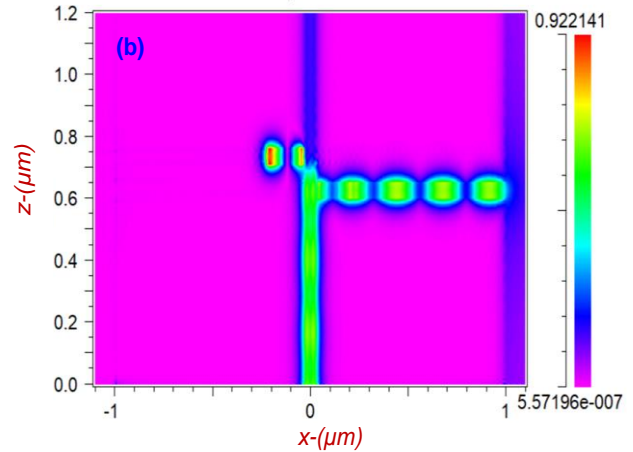
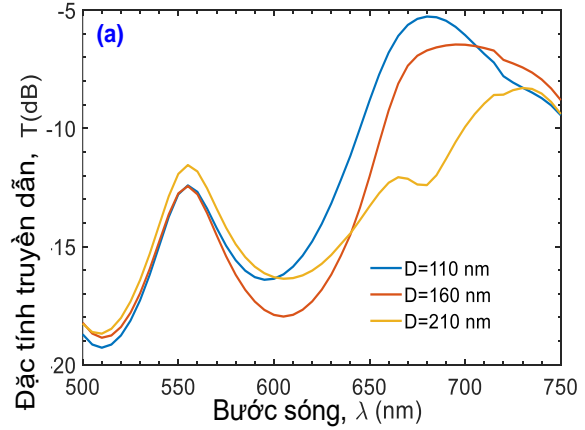
Ở đây,

$$r = [1 / (2Q_3)] / [j(\omega / \omega_{ca} - 1) + 1 / (2Q_3) + 1 / Q_{ca}] \quad (14)$$

3. THIẾT KẾ TỐI ƯU VÀ MÔ PHỎNG

Chúng tôi sử dụng phương pháp EME 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 hốc [42]. Như trong Hình 2, khi ta chọn các giá trị ban đầu của $g_1 = g_2 = g = 10$ nm, $w = w_i = 50$ 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 120 nm đến 180 nm, các đỉnh cộng hưởng nằm trong dải phổ ánh sáng nhìn thấy từ 500 nm đến 700 nm.

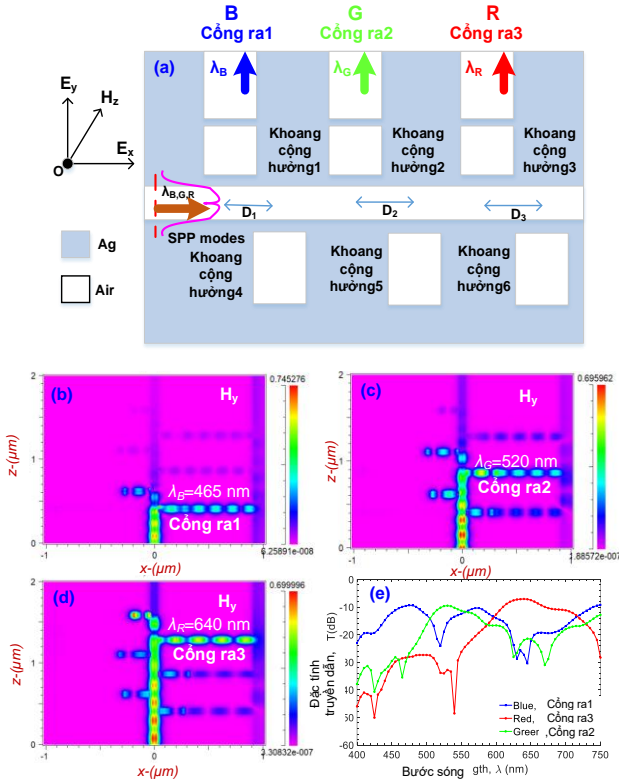


Hình 3. (a) Quang phổ truyền qua với sự phân tách khoang-khoang khác nhau trong hệ thống ống dẫn sóng ghép đôi khoang với $d = d_2 = 180$ nm, $g = 10$ nm và $w = 50$ nm. (b) Hình ảnh mô phỏng sự phân bố trường của bước sóng đỉnh trong suốt trong ống dẫn sóng ghép khoang kép với $D = 110$ nm.

Đối với hệ thống ống dẫn sóng ghép hai khoang (cavity), phổ truyền qua với sự phân tách khoang - khoang D được tính toán và thể hiện trong Hình 3(a). Ở đây, chiều dài của hai khoang được cố định là $d = d_2 = 180$ 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(a). Chúng 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 bus giữa hai khoang, phổ đặc tính truyền theo bước sóng thể hiện tính chất của hiệu ứng trong suốt cảm ứng điện từ EIT (electromagenically induced transparency). Sự tách biệt được tối ưu hóa giữa hai khoang có thể được biểu thị như sau:

$$D = \frac{\lambda}{2\text{Re}(n_{eff}(\lambda))} \quad (15)$$

Hiệu quả truyền của bộ lọc kênh rẽ (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 nhận ra 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, chúng tôi chọn bộ phân kênh ba bước sóng với ba bộ lọc rẽ kênh để khảo sát phản ứng truyền, như được thể hiện trong Hình 4(a).



Hình 4. (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 có (đường cong đặc) và không có (đường cong đứt nét) các hốc nano phân xạ.

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 phân kênh đa bước sóng khác. Chiều rộng của ống dẫn sóng và các khoang được cố định là 50 nm. Chiều dài của cặp khoang 1-4, 2-5 và 3-6 lần lượt được đặt là 245, 291 và 162 nm. Khoảng cách ghép nối giữa tất cả các khoang và ống dẫn sóng là 10 nm. Do đó, trong ống dẫn sóng bus, công suất truyền ở các bước sóng hoạt động được phân 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 4(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 4(b,c,d). Hình 4(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 lỗ nano

phản xạ ghép đôi. Bên cạnh đó, hình ảnh mô phỏng ở Hình 4(e) cho thấy phổ 3-dB 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 3-dB 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) [24] 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 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 μm^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.

4. KẾT LUẬN

Tóm lại, chúng tôi đã đề xuất và nghiên cứu kỹ thuật số một hệ thống ống dẫn sóng plasmonic để tạo ra đáp ứng giống như hiệu ứng EIT trong hệ thống ống dẫn sóng plasmonic MIM bao gồm một ống dẫn sóng bus được ghép nối với một loạt các hốc khe cho truyền thông ánh sáng khả kiến VLC cũng như các ứng dụng hiển thị bằng cách ghép kênh RGB. Kết quả mô phỏng của chúng tôi cho thấy bước sóng cộng hưởng của khoang rãnh có thể được điều chỉnh bằng cách điều chỉnh chiều dài khoang. Rõ ràng độ trong suốt do plasmon gây ra sẽ xuất hiện khi ống dẫn sóng plasmonic giữa các khoang liên kế 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 tìm thấy những ứng dụng tiềm năng trong các thiết bị quang tích hợp cao, chẳng hạn như bộ lọc RGB hoặc WDM plasmonic đa kênh kích thước nano, chuyển mạch quang và các thành phần ánh sáng chậm.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia Việt Nam (Nafosted) cho chương trình Nghiên cứu cơ bản trong KHTN&KT năm 2017 với Mã số 103.03-2017.61.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S.-H. Chen and C.-W. Chow, "Color-filter-free spatial visible light communication using RGB-LED and mobile-phone camera," *Opt. Express*, vol. 22, no. 25, p. 30713, 2014.
- [2] A. M. Khalid, G. Cossu, R. Corsini, P. Choudhury, and E. Ciaramella, "1-Gb/s transmission over a phosphorescent white LED by using rate-adaptive discrete multitone modulation," *IEEE Photonics J.*, vol. 4, no. 5, pp. 1465–1473, 2012.
- [3] 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, pp. 1777–1798, 2018.
- [4] 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*, 2018, pp. 175–180.
- [5] 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.
- [6] 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*, 2016, pp. 1–3.
- [7] 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, p. 17300, 2018.
- [8] 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.
- [9] L. Ding, F. Liu, Z. Yu, and Y. Wang, “The demonstration of wireless access via visible light communications,” in *2013 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, WCSP 2013*, 2013, pp. 1–4.
- [10] 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, pp. 1063–1065, 2009.
- [11] 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, pp. 81–85, 2015.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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, pp. 422–426, 2018.
- [16] P. Berlioz, J. L. Perbos, and J. Charlier, “Multi /Demultiplexer And Spectral Isolator For Optical Inter - Satellites Communications,” in *Proc. SPIE 1131, Optical Space Communication-International Congress on Optical Science and Engineering*, 1989, vol. 1131.
- [17] L. V. Bartkiv and Y. V. Bobitski, “Fiber Optic Transmission of RGB-signals using a WDM system,” in *CAOL 2005*, 2005, pp. 257–259.
- [18] A. 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.
- [19] L. Touil and B. Ouni, “Design of hardware RGB to HMMD converter based on reversible logic,” *IET Image Process.*, vol. 11, no. 8, pp. 646–655, 2017.
- [20] 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*, 2008, vol. 1, pp. 31–32.
- [21] R. Dadabayev and D. Malka, “A visible light RGB wavelength demultiplexer based on polycarbonate multicore polymer optical fiber,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 116, no. February, pp. 239–245, 2019.
- [22] R. Dadabayev, N. Shabairou, Z. Zalevsky, and D. Malka, “A visible light RGB wavelength demultiplexer based on silicon-nitride multicore PCF,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 111, no. October 2018, pp. 411–416, 2019.
- [23] J. K. Kim, H. R. Kim, A. Tünnermann, and K. Oh, “Synthesis of pure white color and its equal power, equal chromatic splitting through a novel 3×3 fiber optic visible multiplexer,” *Opt. Express*, vol. 16, no. 22, p. 17319, 2008.
- [24] 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.
- [25] R. Dadabayev and D. Malka, “RGB wavelength demultiplexer based on PCF/POF structure,” in *Proc. SPIE 11029, Micro-structured and Specialty Optical Fibres VI*, 2019, no. April 2019, p. 30.
- [26] M. Salsi *et al.*, “Transmission at 2×100Gb/s, over two modes of 40km-long prototype few-mode fiber, using LCOS-based mode multiplexer and demultiplexer,” *Opt. InfoBase Conf. Pap.*, no. October 2014, pp. 2–5, 2011.
- [27] S. A. Maier, “Plasmonics: The Promise of Highly Integrated Optical Devices,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 12, no. 6, pp. 1671–1677, 2006.
- [28] E. Li, B. Zhou, Y. Bo, A. X. Wang, and S. Member, “High-Speed Femto-Joule per Bit Silicon- Conductive Oxide Nanocavity Modulator.”
- [29] M. Ayata *et al.*, “High-speed plasmonic modulator in a single metal layer,” *Science (80-.)*, vol. 632, no. November, pp. 630–632, 2017.
- [30] C. Haffner *et al.*, “All-plasmonic Mach-Zehnder modulator enabling optical high-speed communication at the microscale,” *Nat. Photonics*, vol. 9, no. 8, pp. 525–528, 2015.
- [31] V. A. Aksyuk, “Design and modeling of an ultra-compact 2x2 nanomechanical plasmonic switch,” *Opt. Express*, vol. 23, no. 9, p. 11404, 2015.
- [32] 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, pp. 12885–12890, 2011.
- [33] Y. Xu, J. Xiao, and X. Sun, “Design of a compact polarization demultiplexer for silicon-based slot waveguides,” *Appl. Opt.*, vol. 53, no. 35, pp. 8305–8312, 2014.
- [34] M. J. Uddin, T. Khaleque, and R. Magnusson, “Guided-mode resonant polarization-controlled tunable color filters,” *Opt. Express*, vol. 22, no. 10, p. 12307, 2014.
- [35] D. Fleischman, L. A. Sweatlock, H. Murakami, and H. Atwater, “Hyper-selective plasmonic color filters,” *Opt. Express*, vol. 25, no. 22, p. 27386, 2017.
- [36] C. Jiang *et al.*, “Plasmonic color filter based on a hetero-metal-insulator-metalgrating,” *Appl. Opt.*, vol. 59, no. 14,

pp. 4432–4436, 2020.

- [37] 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, pp. 2579–2583, 2009.
- [38] A. B. Djuris, J. M. Elazar, and M. L. Majewski, “Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices,” *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 22, pp. 5271–5283, 1998.
- [39] 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, pp. 1–8, 2016.
- [40] 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, p. 17922, 2010.
- [41] X.-S. Lin and X. G. Huang, “Tooth-shaped plasmonic waveguide filters with nanometric sizes,” *Opt. Lett.*, vol. 33, no. 23, pp. 2874–2876, 2008.
- [42] Y. Xiong, R. B. Priti, and O. Liboiron-Ladouceur, “High-speed two-mode switch for mode-division multiplexing optical networks,” *Optica*, vol. 4, no. 9, p. 1098, 2017.

NANOSCALE OPTICAL RGB FILTER BASED ON MIM PLASMONIC WAVEGUIDES

Abstract: In this paper, we present a proposal for compact RGB filters wavelength and wavelength separators based on nanoplasmonic metal - insulator - metal structures. The results have been accurately investigated using the temporal coupled-mode theory. Numerical simulation method eigenmode expansion (EME) propagation simulation has been also used for the overall design process. The simulation results show that the transmission efficiency of the RGB drop filter can be achieved significantly efficient by applying specifically optimized of nano Fabry-Perot resonance cavity waveguide. Optical performance is good with transmission loss is less than <8 dB, signal-to-noise level is greater than 10 dB in 30-nm bandwidth for three RGB bands. The proposed structure has strongly potential for the design of highly efficient ultra-compact integration circuits as well as nanoscale optical communication systems.

Keywords: *Surface plasmon polarizations (SPP), frequency filter RGB, nano resonance Fabry - Perot, Metal - Insulation - Metal (MIM)*



Nguyễn Văn Tài, nhận bằng tốt nghiệp đại học Giao thông vận tải Hà Nội năm 2006, nhận bằng thạc sỹ Đại học Bách Khoa Hà Nội năm 2010. Anh bắt đầu làm nghiên cứu sinh tại Học viện Công nghệ Bưu chính viễn thông vào năm 2017. Hướng nghiên cứu của anh bao gồm ống dẫn sóng nano plasmonic, trường điện từ và truyền sóng.

Email: tai2006vn@gmail.com



Trương Cao Dũng, nhận các bằng Đại học, Thạc sỹ và Tiến sỹ của trường Đại học Bách Khoa Hà Nội, Việt Nam, lần lượt vào các năm 2003, 2006 và 2015. Anh hiện là Giảng viên khoa Kỹ thuật điện tử, Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông (PTIT), Hà Nội, Việt Nam. Các nghiên cứu của anh bao gồm các mạch tích hợp photonic, plasmonics và hệ thống thông tin quang.

Email: tcdungict@gmail.com



Đặng Hoài Bắc, nhận bằng Đại học từ trường Đại học Bách khoa Hà Nội, Việt Nam, vào năm 1997, các bằng Thạc sỹ và Tiến sỹ của Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông (PTIT), Hà Nội, Việt Nam, lần lượt vào các năm 2004 và 2010. Năm 2007, Anh là thực tập sinh tại Viện nghiên cứu Điện tử và Viễn thông, Daejeon, Hàn Quốc. Từ năm 2009 đến 2010, anh làm Nghiên cứu viên tại Orange Lab, France Telecom R & D, Paris, France. Anh hiện là Phó giáo sư /Phó giám đốc tại PTIT. Các nghiên cứu hiện tại của anh bao gồm các lĩnh vực điều khiển tự động, xử lý tín hiệu, hệ thống nhúng và mạch tích hợp.

Email: bacdh@ptit.edu.vn