

**Ứng dụng kỹ thuật khắc laser trực tiếp 3D và phun xạ DC
chế tạo cấu trúc linh kiện plasmonic**

**Nguyễn Hữu Tư^{1,2}, Nguyễn Xuân Bách³, Trần Minh Quý³, Phạm Thanh Sơn⁴,
Trần Anh Tú³, Ngô Quang Minh^{3*}**

¹Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam,
18 Hoàng Quốc Việt, phường Nghĩa Đô, Hà Nội, Việt Nam

²Trường Cao đẳng Y tế và Thiết bị Việt Đức, Bệnh viện Hữu nghị Việt Đức,
1/89 Lương Định Của, phường Kim Liên, Hà Nội, Việt Nam

³Trường Đại học Khoa học và Công nghệ Hà Nội, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ
Việt Nam, 18 Hoàng Quốc Việt, phường Nghĩa Đô, Hà Nội, Việt Nam

⁴Trường Điện và Điện tử, Đại học Công nghiệp Hà Nội, 298 Cầu Diễn,
phường Tây Tựu, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 12/2/2026; ngày chuyển phản biện 24/2/2026;

ngày nhận phản biện 6/3/2026; ngày chấp nhận đăng 12/3/2026

Tóm tắt:

Bài báo trình bày kỹ thuật khắc laser trực tiếp (Direct Laser Writing - DLW) 3D và phương pháp chế tạo cấu trúc linh kiện plasmonic bằng kỹ thuật DLW 3D kết hợp với phun xạ DC. Cấu trúc linh kiện plasmonic gồm mảng hai chiều (2D) cột polime được sắp xếp tuần hoàn trên đế thủy tinh và được phủ một lớp màng mỏng bạc (Ag). Thời gian chiếu và cường độ laser được sử dụng trong quá trình chế tạo cấu trúc polime được tối ưu để có được điều kiện công nghệ phù hợp. Việc xác định hình thái học và thành phần vật liệu của cấu trúc chế tạo bằng việc sử dụng kính hiển vi điện tử quét phát xạ trường (FE-SEM) và quang phổ tán xạ tia X (EDS). Kết quả chế tạo khẳng định rằng, DLW đã thành công tạo ra các siêu bề mặt được thiết kế với các hằng số mạng tinh thể và kích thước mô hình khác nhau với độ phân giải tốt. Phương pháp phun xạ DC cũng đã tạo ra màng mỏng bạc trên cấu trúc polime với độ dày có thể điều khiển được. Phương pháp chế tạo đã cho thấy ưu điểm trong chế tạo cấu trúc plasmonic như chi phí thấp, dễ chế tạo, hướng tới các ứng dụng trong chụp ảnh và cảm biến sinh học, linh kiện cộng hưởng hồng ngoại và truyền thông lượng tử tiên tiến.

Từ khóa: khắc laser 3D trực tiếp, linh kiện cộng hưởng plasmon hồng ngoại, plasmonic bề mặt.

Chỉ số phân loại: 1.3, 2.3, 2.11

*Tác giả liên hệ: email: ngo-quang.minh@usth.edu.vn

**Application of 3D direct laser writing combining with DC sputtering techniques
in fabrication of plasmonic structures****Huu Tu Nguyen^{1,2}, Xuan Bach Nguyen³, Minh Quy Tran³, Thanh Son Pham⁴,
Anh Tu Tran³, Quang Minh Ngo^{3*}**¹*Graduate University of Science and Technology, Vietnam Academy of Science and
Technology, 18 Hoang Quoc Viet Street, Nghia Do Ward, Hanoi, Vietnam*²*Viet Duc College of Medicine and Medical Device, Viet Duc University Hospital,
1/89 Luong Dinh Cua Street, Kim Lien Ward, Hanoi, Vietnam*³*University of Science and Technology of Hanoi, Vietnam Academy of Science
and Technology, 18 Hoang Quoc Viet Street, Nghia Do Ward, Hanoi, Vietnam*⁴*School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi University of Industry,
298 Cau Dien Street, Tay Tuu Ward, Hanoi, Vietnam*

Received 12 February 2026; revised 6 March 2026; accepted 12 March 2026

Abstract:

This paper presents the 3D direct laser writing technique and a method for fabricating plasmonic structures using 3D direct laser writing combining with DC sputtering techniques. The plasmonic structure consists of a two-dimensional (2D) array of polymer pillars arranged on a glass substrate and coated with a silver (Ag) film. The exposure time and laser intensity used in the fabrication process were experimentally determined to obtain suitable fabrication conditions. To determine the morphology and composition of the fabricated structures, we used field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). The fabrication results confirm that DLW has successfully generated designed hypersurfaces with different lattice constants and model sizes with good resolution. The DC sputtering method also produced silver thin films on polymer structures with controllable thickness. This method has shown the advantages in fabricating plasmonic structures such as low cost and ease of fabrication, aiming towards applications in bioimaging and biosensing, infrared resonant devices, and advanced quantum communication.

Keywords: direct 3D laser engraving, infrared plasmon resonant components, surface plasmonics.

Classification numbers: 1.3, 2.3, 2.11

1. Đặt vấn đề

Plasmonics là một lĩnh vực nghiên cứu đang phát triển nhanh và được sử dụng rộng rãi trong nhiều ứng dụng, bao gồm cảm biến sinh học, hình ảnh sinh học, kính hiển vi, xử lý thông tin, năng lượng mặt trời và truyền thông lượng tử [1-3]. Hiệu ứng plasmon bề mặt

(Surface Plasmon - SP) xảy ra do sự tương tác của sóng điện từ (EM) với các cấu trúc kim loại có kích thước nhỏ hơn bước sóng. Cộng hưởng plasmon bề mặt (Surface Plasmon Resonances - SPR) xuất hiện khi sự dao động tập thể của các điện tử tự do tại bề mặt kim loại được kích thích bởi sóng điện từ có bước sóng phù hợp. SPR được tạo bởi các màng mỏng kim loại tạo thành plasmon bề mặt lan truyền (Propagating Surface Plasmons - PSP) hoặc bởi các cấu trúc nano kim loại sẽ hình thành plasmon bề mặt định xứ (Localized Surface Plasmons - LSP). SPR có thể thay đổi được bằng cách thay đổi các thông số cấu trúc, chẳng hạn như kích thước và hình dạng, sự sắp xếp mạng tinh thể, chỉ số khúc xạ của môi trường xung quanh, vật liệu kim loại được sử dụng và nguồn sáng tới. Tại vị trí cộng hưởng, điện trường (E) gần bề mặt kim loại được tăng cường đáng kể. Việc tăng cường điện trường E có thể được sử dụng cho các ứng dụng như đã đề cập ở trên, nó cũng được dùng để khuếch đại các tín hiệu quang học yếu như tán xạ phân tử, plasmonic phi tuyến và cải thiện độ phân giải của hệ thống chụp ảnh quang học [4, 5].

Cấu trúc plasmonic một chiều (1D) gồm các phần tử kim loại có kích thước nhỏ hơn bước sóng tuần hoàn theo một hướng, trong khi các cấu trúc plasmonic hai chiều (2D), bao gồm các phần tử kim loại tuần hoàn theo hai hướng, cho phép tương tác với EM một cách tự do [2, 6]. Nói chung, chúng được gọi là các siêu bề mặt plasmonic. Những cấu trúc plasmonic này không cần sử dụng cấu hình ghép lăng kính, trong đó việc kích thích plasmon bề mặt đòi hỏi các thành phần quang học công kênh và góc tới của ánh sáng phải được xác định chính xác. Các cấu trúc plasmonic cho phép kích thích plasmon bề mặt ngay cả khi góc tới vuông góc với bề mặt cấu trúc. Ngoài ra, các thí nghiệm ở góc tới cao thì khó khăn hơn so với các thí nghiệm ở bước sóng dài, vốn thể hiện độ nhạy chiết suất cao. Hơn nữa, các cấu trúc plasmonic có sự tăng cường điện trường E cao và phát xạ mạnh, cho phép tăng cường huỳnh quang trực tiếp [7, 8].

Hiện nay, có nhiều phương pháp hiện đại được sử dụng để chế tạo các cấu trúc plasmonic, như các phương pháp “top-down”, bao gồm quang khắc chùm tia điện tử dựa trên mặt nạ và kỹ thuật “lift-off” [9], quy trình lắng đọng dựa trên sự bốc bay bằng chùm tia điện tử [10] và chùm ion hội tụ [8]. Mặc dù các kỹ thuật này đạt được kích thước nano, nhưng chúng tốn kém cả về chi phí, thời gian và yêu cầu các điều kiện phòng thí nghiệm nghiêm ngặt, ảnh hưởng đến tốc độ và khả năng mở rộng. Các phương pháp tiết kiệm chi phí và hiệu suất cao như quang khắc [11] đã được sử dụng để chế tạo cấu trúc plasmonic, nhưng yêu cầu nhiều bước chế tạo, làm giảm tính linh hoạt và tốc độ xử lý. Đối với các ứng dụng thực tế trong cảm biến chiết suất và cảm biến tăng cường huỳnh quang, hiệu quả của quy trình chế tạo là cần thiết, vì nó quyết định chi phí sản xuất, độ nhỏ gọn và khả năng tích hợp cao hơn.

Do đó, việc sử dụng linh kiện quang học tích hợp phẳng dựa trên cấu trúc plasmonic kết hợp với vật liệu polyme và để trong suốt là phương pháp được ưa chuộng nhờ chi phí thấp, dễ chế tạo nhờ khả năng tương thích của kỹ thuật quang khắc vật liệu hữu cơ. Các linh kiện plasmonic dựa trên polyme này mang lại hiệu suất tương đương với các công nghệ dựa trên tấm bán dẫn/điện môi mà không cần các quy trình chế tạo phức tạp mà chúng tôi đã thực hiện gần đây trong điều kiện phòng thí nghiệm thông thường [12, 13]. Cấu trúc

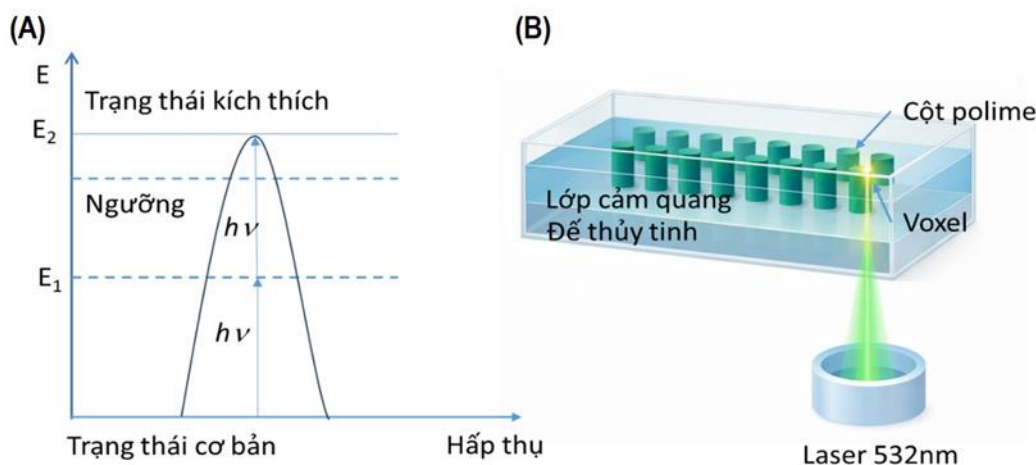
plasmonic này bao gồm các cột polime được sắp xếp tuần hoàn 2D trên đế thủy tinh được phủ một lớp màng mỏng Ag bằng kỹ thuật DLW 3D kết hợp với phún xạ DC. Các cấu trúc này có bước sóng cộng hưởng trong vùng cận hồng ngoại II (NIR-II) (1000-1700 nm), đã được đề xuất cho các ứng dụng cảm biến chiết suất (RI) và tăng cường ảnh huỳnh quang sinh học. Tiếp nối các kết quả đạt được của các linh kiện plasmonic trong những năm gần đây, nghiên cứu này chủ yếu tập trung vào quy trình chế tạo các cấu trúc plasmonic bằng cách sử dụng kỹ thuật DLW 3D kết hợp với phún xạ DC. Chúng tôi cũng nghiên cứu về thời gian chiếu laser và cường độ laser được sử dụng trong quá trình chế tạo để có được điều kiện thí nghiệm phù hợp nhất. Để xác định hình thái và thành phần của các cấu trúc chế tạo được, từ đó chứng minh hiệu quả của linh kiện chúng tôi sử dụng FE-SEM và EDS. Kết quả của công trình nghiên cứu này có thể là một lợi thế cho việc ứng dụng cấu trúc chế tạo được trong cảm biến RI, ảnh huỳnh quang sinh học và các linh kiện hồng ngoại gần khác.

2. Phương pháp chế tạo

2.1. Quá trình trùng hợp hai photon

Quá trình trùng hợp hai photon (Two-Photon Polymerization - TPP) - còn được gọi là quang khắc hai photon hoặc DLW là một kỹ thuật chế tạo vi mô tiên tiến cho phép in 3D các cấu trúc polime. Không giống như quang khắc thông thường (về cơ bản là phẳng) hoặc quang khắc một photon, TPP tận dụng sự hấp thụ hai photon (Two-Photon Absorption- TPA) để giới hạn quá trình trùng hợp trong một thể tích tiêu điểm nhỏ, cho phép “khắc” các hình dạng 3D tự do bên trong vật liệu cảm quang. Khả năng tạo ra các cấu trúc 3D phức tạp này đã khiến TPP trở thành một kỹ thuật độc đáo trong chế tạo cấu trúc micro và nano [14].

TPP dựa trên quá trình quang học phi tuyến của hiện tượng TPA. Trong TPA, một phân tử đồng thời hấp thụ hai photon có tổng năng lượng bằng hoặc cao hơn năng lượng cần thiết (mức ngưỡng) để đạt đến trạng thái điện tử kích thích (hình 1A). Vì xác suất hấp thụ hai photon đồng thời cực kỳ thấp nên cần một dòng photon mạnh (đạt được bằng cách tập trung các xung laser cực nhanh) để hai photon được hấp thụ gần như cùng một lúc. Tốc độ hấp thụ tỷ lệ thuận với bình phương cường độ ánh sáng, do đó sự kích thích đáng kể chỉ xảy ra trong thể tích nhỏ tại điểm hội tụ của laser, nơi cường độ cao nhất. Trên thực tế người ta sử dụng laser xung femtô giây vì cường độ cực cao của chúng cung cấp mật độ photon cần thiết cho TPA diễn ra một cách hiệu quả.



Hình 1. Sơ đồ kích thích hai photon (A) và minh họa quá trình TPP (B).

Sau khi sự hấp thụ hai photon nâng phân tử chất cảm quang lên trạng thái kích thích, các phân tử chất cảm quang có thể trải qua các phản ứng hóa học tạo ra các gốc tự do hoặc cation để bắt đầu quá trình trùng hợp các monome thành polime. Điều quan trọng là, do những đặc điểm TPA đã đề cập phía trên, TPP được giới hạn trong một điểm thể tích (voxel) có kích thước femtolit bên trong điểm hội tụ (hình 1B). Sự liên kết chéo của polime được tạo ra sẽ làm cứng hóa vùng voxel đó. Các vùng nằm ngoài vùng hội tụ do chịu cường độ laser thấp nên sẽ không bị trùng hợp. Do ngưỡng năng lượng và sự kích thích được giới hạn trong voxel đã cho phép TPP tạo cấu trúc dưới giới hạn nhiễu xạ, các điểm nhỏ hơn nhiều so với tiêu điểm quang học, có thể đạt được bằng cách chỉ sử dụng liều lượng vừa đủ để trùng hợp ngay tại trung tâm của hàm phân tán.

Về bản chất, chế tạo các cấu trúc polyme sử dụng TPP là một quy trình sản xuất dựa trên sự biến tính vật liệu sử dụng laser, trong đó chùm xung laser được hội tụ mạnh và được quét qua một lớp monome lỏng (chất cảm quang) để làm đông cứng nó một cách chọn lọc tại điểm hội tụ thông qua các phản ứng hóa học do TPA tạo ra. Bằng cách di chuyển tiêu điểm laser trong không gian ba chiều, các cấu trúc polime 3D tùy ý có thể được tạo ra bên trong lớp chất cảm quang (hình 1B). Sau đó phần chất cảm quang chưa bị polime hóa sẽ được rửa sạch để tạo ra cấu trúc vi mô.

2.2. Quy trình chế tạo

Quy trình chế tạo cấu trúc tuần hoàn được đề xuất được mô tả trong hình 2, bao gồm các bước sau:

(i) Chuẩn bị đế và phủ chất cảm quang

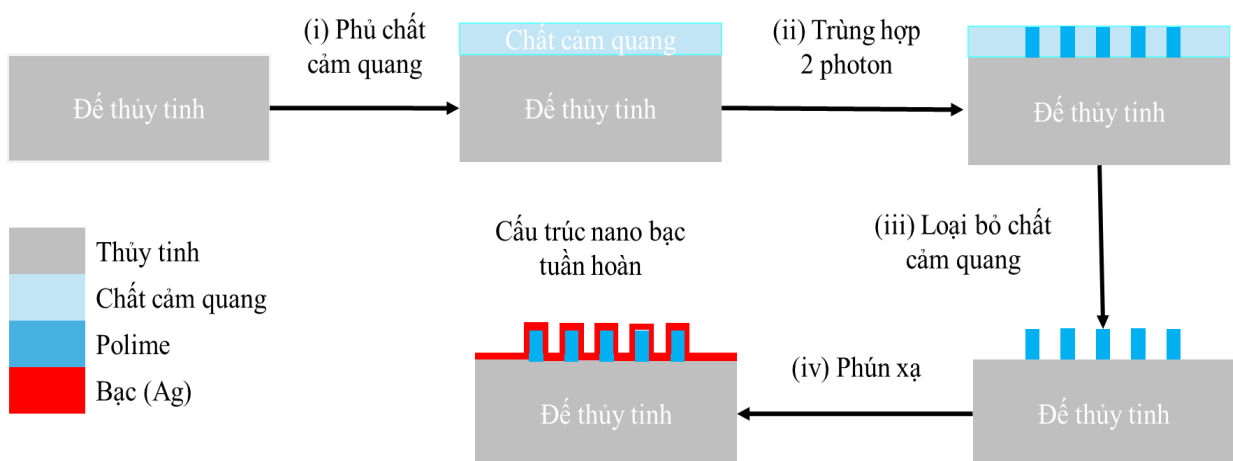
Vật liệu dùng làm đế thường là một tấm kính có kích thước 24x24x0,1-0,2 mm. Để đảm bảo độ bám dính của cấu trúc được chế tạo trên bề mặt đế, đế thủy tinh cần được làm sạch bằng cách ngâm trong dung dịch acetone, kết hợp với rung siêu âm trong 5 phút, sau đó để khô tự nhiên và bảo quản trong hộp kín. Sau khi làm sạch đế, chúng tôi sẽ phủ một lớp vật liệu cảm quang (monome) lên đế. Việc phủ vật liệu cảm quang được thực hiện trực

tiếp bằng phương pháp nhỏ giọt hoặc phủ quay ly tâm. Về vật liệu cảm quang, chúng tôi sử dụng vật liệu cảm quang “Green-A” của Microlight 3D, là vật liệu gốc acrylate.

(ii) Trùng hợp hai photon

Cấu trúc polime cần chế tạo được thiết kế bằng phần mềm CAD, sau đó được tạo file in thông qua phần mềm Simpoly chuyên dụng, phần mềm này tính toán đường đi của điểm hội tụ laser. Tùy thuộc vào yêu cầu độ phân giải, khoảng cách giữa các điểm laser sẽ được xác định. Tiếp theo, cấu trúc được tạo ra bằng phương pháp DLW. Giai đoạn chế tạo của chúng tôi gồm: Nguồn laser, giá đỡ mẫu và bàn piezo, bộ điều khiển bàn piezo và bộ điều khiển laser. Nguồn laser có công suất tối đa 50 mW ở bước sóng 532 nm. Nó được kết hợp với thấu kính ngâm dầu 100X có khẩu độ NA=1,4 để hội tụ chùm tia laser vào điểm cần chế tạo.

Tùy thuộc vào vật liệu chất cảm quang, công suất laser và thời gian chiếu xạ sẽ được điều chỉnh. Trong ứng dụng của chúng tôi, cấu trúc được in tốt ở mức 20% công suất laser tối đa trong khi thời gian chiếu laser kéo dài khoảng 2 ms mỗi lần.



Hình 2. Quy trình chế tạo cấu trúc linh kiện plasmonic bằng kỹ thuật khắc laser trực tiếp 3D kết hợp với phún xạ DC.

(iii) Loại bỏ chất cảm quang

Để thu được cấu trúc polyme duy nhất, phần monome còn lại sau quá trình DLW cần được làm sạch. Quá trình làm sạch được thực hiện bằng cách ngâm mẫu đã chế tạo trong dung dịch acetone (hoặc IPA) hai lần, mỗi lần 10 phút.

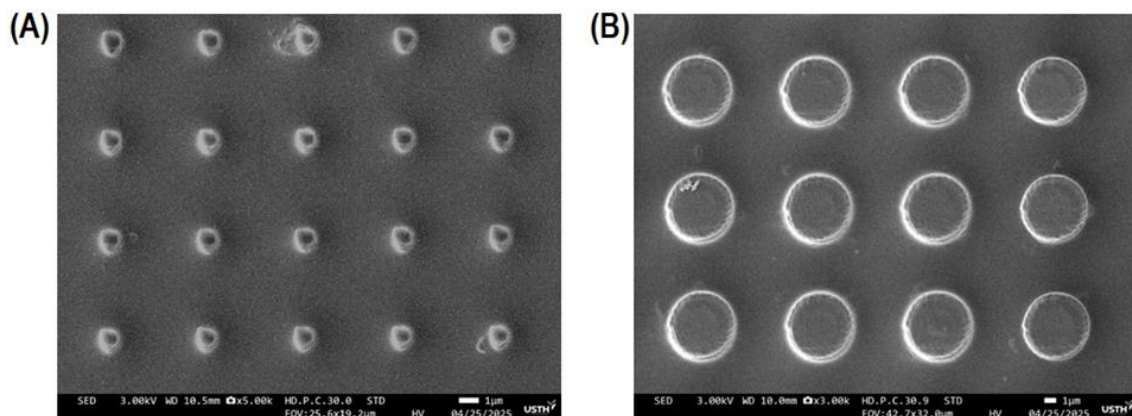
(iv) Phún xạ

Sau khi thu được cấu trúc polyme, quá trình phún xạ kim loại được tiến hành. Quá trình này cho phép các hạt nano kim loại tách ra khỏi bia, bay đến và phủ lên cấu trúc polyme. Thời gian thực hiện quá trình phún xạ sẽ phụ thuộc vào kích thước của cấu trúc nano kim loại cần chế tạo. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã sử dụng hệ thống SYSKEY SP-01 với các thông số chế tạo như sau: Công suất DC 50W, tốc độ quay của đế 10 vòng/phút, áp suất khí Argon 7,5 mTorr và tốc độ phún xạ khoảng 23 nm/phút để phún xạ màng mỏng Ag.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Chế tạo cấu trúc polime

Như đã đề cập ở trên, các cấu trúc mục tiêu của chúng tôi là các siêu bề mặt có khả năng tạo ra SPR. Loại cấu trúc này được đặc trưng bởi tính tuần hoàn của một phần tử cụ thể. Hình 3 là kết quả chế tạo về mảng 2D của các cột polyme sắp xếp tuần hoàn. Quan sát thấy rằng, các phần tử trên đế có kích thước và chiều cao gần như nhau, điều này chứng tỏ tính ổn định của phương pháp chế tạo. Những kết quả này cũng cho thấy rằng, DLW đã thành công tạo ra các siêu bề mặt được thiết kế với các hằng số mạng tinh thể và kích thước mô hình khác nhau với độ phân giải tốt.



Hình 3. Kết quả chế tạo cấu trúc cột polyme tuần hoàn 2D trên đế thủy tinh. (A) Chu kỳ tuần hoàn $P=5\ \mu\text{m}$ và kích thước cột polyme $D=1\ \mu\text{m}$; **(B)** Chu kỳ tuần hoàn $P=10\ \mu\text{m}$ và kích thước cột polyme $D=5\ \mu\text{m}$.

Thông qua việc nghiên cứu và làm việc với TPP, chúng tôi có một số thảo luận về phương pháp này. TPP có thể tạo ra các điểm ảnh có kích thước vài trăm nanomet hoặc thậm chí dưới 100 nm trong điều kiện tối ưu [14]. Lý do cơ bản cho độ phân giải đặc biệt này là do kích thích hai photon chỉ xảy ra tại tiêu điểm của chùm tia laser và hiệu ứng ngưỡng trong quá trình trùng hợp. Độ phân giải ngang (XY) của TPP chủ yếu được xác định bởi kích thước điểm hội tụ giới hạn bởi nhiễu xạ và sự chặt chẽ của quá trình trùng hợp có thể được giới hạn ở tại điểm hội tụ. Với thấu kính NA cao ($NA \sim 1,4$) và bước sóng 532 nm, đường kính điểm hội tụ có thể là ~ 250 nm, nhưng bằng cách hoạt động gần ngưỡng, chỉ phần trong cùng được rắn hóa, tạo ra độ rộng voxel $\sim 100\text{-}200$ nm hoặc thậm chí nhỏ hơn [14]. Độ phân giải dọc (Z) thường kém hơn độ phân giải ngang, vì voxel mở rộng dọc theo hướng chùm tia do độ sâu tiêu điểm hữu hạn (ngay cả thấu kính NA rất cao cũng cho độ phân giải dọc gấp vài lần kích thước ngang) [14]. Ví dụ, với một voxel có đường kính ngang ~ 200 nm có thể đi kèm với chiều cao ~ 500 nm theo trục Z. So với phương pháp quang khắc lập thể bằng photon đơn, bị giới hạn bởi nhiễu xạ quang học ở kích thước đặc điểm $\sim \lambda/2$ (thường là vài chục micromet đối với ánh sáng nhìn thấy), TPP đạt được độ phân giải tốt hơn [14].

Cần lưu ý rằng, độ phân giải thực tế phụ thuộc vào nhiều yếu tố: độ nhạy của chất cảm quang, sự khuếch tán chất khởi tạo, độ rung của bàn in... Nếu mục tiêu chỉ đơn thuần

là tối đa hóa độ phân giải, người ta sẽ sử dụng loại chất rất nhạy (ngưỡng thấp) và công suất laser rất thấp để chỉ vừa vượt qua ngưỡng tại điểm hội tụ. Điều này làm giảm tốc độ nhưng mang lại các cấu trúc nhỏ nhất.

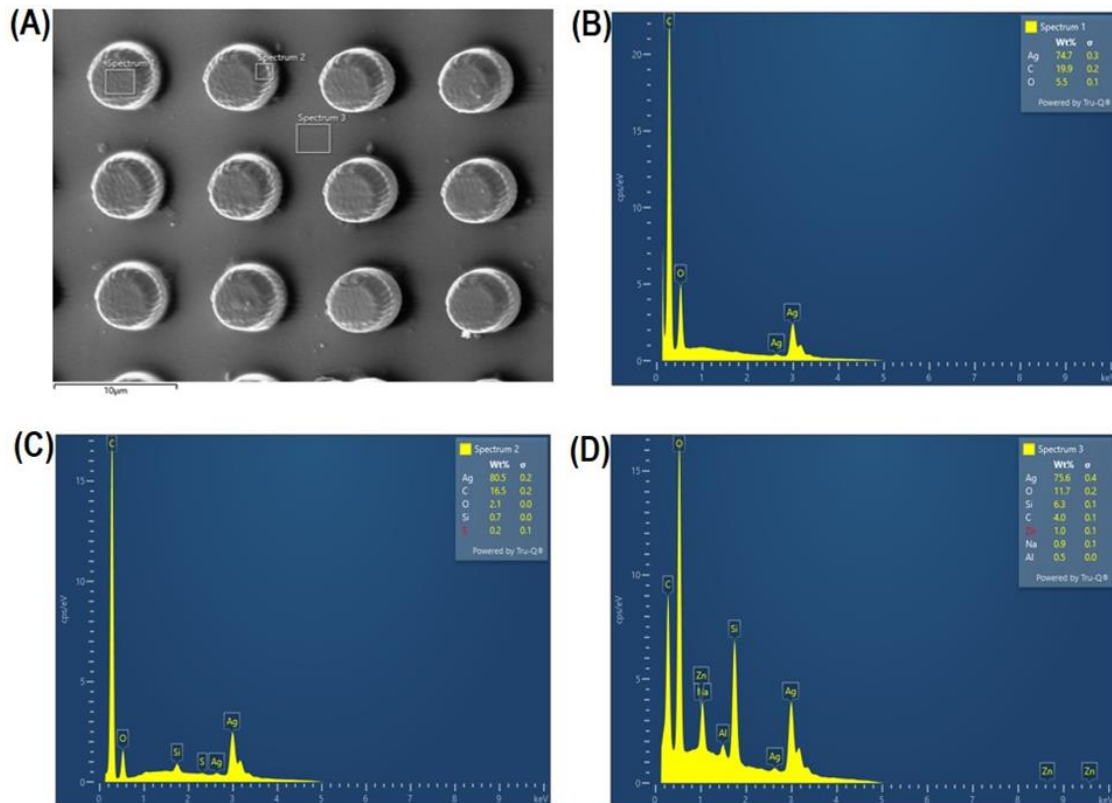
Một hạn chế thường thấy của quá trình TPP là tốc độ xử lý tương đối chậm. TPP về bản chất là một quy trình khắc “từng điểm” tuần tự - mỗi phần phải được khắc ra bằng tia laser hội tụ, tương tự như cách một chiếc máy vẽ một bức tranh. Điều này trái ngược với một số phương pháp in 3D làm cứng toàn bộ lớp cùng một lúc (ví dụ: quang khắc xử lý chùm tia số - Digital Light Processing (DLP)) hoặc sử dụng các chùm tia song song. Do đó, việc chế tạo các cấu trúc lớn hoặc nhiều cấu trúc bằng TPP có thể tốn nhiều thời gian. Tốc độ chế tạo voxel (voxel mỗi giây) là một thước đo hữu ích: TPP tiêu điểm đơn cơ bản có thể đạt được khoảng 10^4 - 10^5 voxel/giây trên thực tế. Một số nỗ lực nghiên cứu gần đây sử dụng mảng đa tiêu điểm hoặc bộ điều biến ánh sáng không gian cho tốc độ khắc lên đến $\sim 2.000.000$ voxel/giây [15], nhưng những nỗ lực đó vẫn đang trong giai đoạn phát triển. Trên thực tế, các hệ thống thương mại thường chế tạo các vật thể có kích thước vài milimét trong vài giờ. Trong trường hợp của chúng tôi, có thể mất 30 phút để khắc một vùng $100 \times 100 \mu\text{m}$ gồm các mảng các cột polime tuần hoàn 2D có chu kỳ, kích thước và độ cao là $P \sim 1,5 \mu\text{m}$, $D \sim 1 \mu\text{m}$ và $h \sim 1,0 \mu\text{m}$ như trên hình 3A.

Hiệu suất cũng bị hạn chế bởi động học quang trùng hợp - chất cảm quang cần một liều lượng nhất định (năng lượng trên mỗi thể tích) để trùng hợp. Quét quá nhanh với công suất không đủ sẽ dẫn đến quá trình đóng rắn không hoàn toàn. Có sự đánh đổi giữa tốc độ và công suất laser: người ta có thể tăng công suất laser để trùng hợp nhanh hơn, nhưng công suất quá cao lại có nguy cơ đóng rắn quá mức và biến dạng (hoặc tạo ra các vụn nhỏ do nhiệt). Máy quét điện kế cộng hưởng và laser có tốc độ lặp lại cao có thể giúp tăng tốc độ bằng cách di chuyển nhanh điểm tiêu cự. Một số thiết lập tiên tiến sử dụng nhiều cặp điện kế để ghi các vùng khác nhau đồng thời, hoặc thậm chí nhiều thấu kính mục tiêu song song (hiếm nhưng có thể thực hiện được để sao chép cấu trúc). Phép chiếu dựa trên thiết bị gương siêu nhỏ kỹ thuật số (Digital Micromirror Device - DMD) trong TPP cũng đang được nghiên cứu: về cơ bản sử dụng một mảng gương siêu nhỏ để chiếu một mẫu 2D gồm nhiều pixel đồng thời và sau đó xếp chồng các lần chiếu như vậy để tạo ra 3D. Điều này tương tự như kỹ thuật khắc không cần mặt nạ từng lớp, nhưng với kích hoạt hai photon để bảo toàn khả năng 3D. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng, TPP dựa trên DMD có thể tăng tốc độ in đáng kể trong khi vẫn đạt được độ phân giải dưới 100 nm [15].

Bất chấp những cải tiến này, khả năng mở rộng vẫn còn hạn chế. Hầu hết các hệ thống TPP hiện chỉ có thể chế tạo các bộ phận có kích thước từ vi mô đến trung bình (từ micromet đến vài milimét) trong thời gian hợp lý [14]. Việc chế tạo các vật thể thực sự lớn (vài centimet) hoặc số lượng lớn các bộ phận là không thực tế với quy trình nối tiếp một điểm. Để giải quyết vấn đề này, các phương pháp lai được sử dụng trong sản xuất: ví dụ, TPP có thể được sử dụng để tạo ra một mẫu chính (như khuôn vi mô hoặc bề mặt quang học vi mô), sau đó được sao chép hàng loạt thông qua in nano hoặc ép phun. Bằng cách đó, quá trình ghi nối tiếp chậm của TPP chỉ được sử dụng một lần để tạo ra khuôn mẫu, và quá trình sản xuất tiếp theo diễn ra nhanh chóng và song song.

3.2. Kết quả phún xạ kim loại

Sau khi loại bỏ lớp chất cản quang còn sót lại, các mẫu được làm khô tự nhiên. Tiếp theo, chúng được chuyển sang bước phún xạ kim loại. Như đã đề cập ở trên, chúng tôi đã sử dụng hệ thống SYSKEY SP-01 để phún xạ bạc lên các mảng polyme. Tùy thuộc vào thời gian phún xạ, độ dày của lớp bạc sẽ thay đổi. Để đánh giá hình thái và thành phần của các cấu trúc đã chế tạo, chúng tôi đã thực hiện phân tích SEM và EDS, kết quả được trình bày trong hình 4.



Hình 4. Kết quả phún xạ ở các thông số cấu trúc $P=10,0\ \mu\text{m}$, $D=5,0\ \mu\text{m}$, $h=1,0\ \mu\text{m}$ (A) và EDS tại ba điểm được đánh dấu trong (A) (B-D).

Hình 4A hiển thị ảnh chụp SEM của mảng 2D các cột polyme phủ bạc trên nền thủy tinh với phần phóng to được thiết kế với các thông số cấu trúc $P=10,0\ \mu\text{m}$, $D=5,0\ \mu\text{m}$, $h=1,0\ \mu\text{m}$. Kết quả cho thấy, màng mỏng Ag đã được phủ đều lên mảng cột polyme. Độ phủ của Ag đã được xác minh bằng kết quả đo EDS (xem hình 4 (B-D)) của cấu trúc trong hình 4A tại ba điểm khác nhau. Tại điểm khảo sát Spectrum1 giữa cột, Ag chiếm 74,7%, điểm khảo sát Spectrum 2 tại vùng biên của cột, Ag chiếm 80,5% và tại điểm khảo sát Spectrum 3, Ag chiếm 75,6%. Như vậy có thể thấy rằng Ag được bao phủ khá đồng đều trên bề mặt cấu trúc và có đóng góp trọng lượng cao nhất tại tất cả các vị trí được xem xét.

4. Kết luận

Trong bài báo này, chúng tôi đã giới thiệu quy trình chế tạo cấu trúc linh kiện plasmonic tuần hoàn 2D tạo SPR bằng phương pháp DLW 3D kết hợp với kỹ thuật phún xạ DC. Kết quả cho thấy, các cấu hình được thiết kế với kích thước, hình dạng và chiều

cao khác nhau có thể được “khắc” thành công bằng quy trình đề xuất với độ phân giải tốt. Bên cạnh đó, những hạn chế của phương pháp DLW dựa trên TPP, bao gồm khả năng mở rộng, vật liệu... cũng đã được thảo luận, cho thấy phương pháp chế tạo được trình bày có nhiều ưu điểm trong chế tạo cấu trúc linh kiện plasmonic, hướng tới các ứng dụng trong chụp ảnh và cảm biến sinh học, linh kiện cộng hưởng hồng ngoại và truyền thông lượng tử tiên tiến.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 103.03-2025.102. Các tác giả xin chân thành cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S.A. Maier (2007), *Plasmonics: Fundamentals and Applications*, Repr, 234pp.
- [2] M.I. Stockman (2011), “Nanoplasmonics: Past, present, and glimpse into future”, *Opt. Express*, **19(22)**, pp.22029-20106, DOI: 10.1364/OE.19.022029.
- [3] Z.A. Peyman, A. Jafarholi, A.Z. Moshfegh (2024), “An elliptical nanoantenna array plasmonic metasurface for efficient solar energy harvesting”, *Nanoscale*, **16(7)**, pp.3591-3605, DOI: 10.1039/D3NR05657K.
- [4] J.H. Kim, J.Y. Lee, E.S. Kim, et al. (2023), “Electric field enhancement of coupled plasmonic nanostructures for optical amplification”, *PhotonIX*, **4(8)**, pp.1-13, DOI: 10.1186/s43074-023-00086-4.
- [5] Z. Yang, S. Samanta (2024), “Fluorescent materials for super-resolution imaging”, *Super Resolution Optical Imaging and Microscopy*, Wiley, pp.163-227.
- [6] K. Kim, J. Yajima, Y. Oh, et al. (2012), “Imaging: Nanoscale localization sampling based on nanoantenna arrays for super-resolution imaging of fluorescent monomers on sliding microtubules”, *Small*, **8(6)**, pp.786-786, DOI: 10.1002/sml.201290039.
- [7] T.T. Hoang, X.B. Nguyen, H.T. Nguyen, et al. (2025), “Numerical investigation of selective near-infrared fluorescent enhancement based on dual-band plasmonic metasurfaces with truncated pyramids”, *Plasmonics*, **20(8)**, pp.6017-6025, DOI: 10.1007/s11468-025-03056-7.
- [8] Q.M. Ngo, Y.L.D. Ho, J.R. Pugh, et al. (2018), “Enhanced UV/blue fluorescent sensing using metal-dielectric-metal aperture nanoantenna arrays”, *Curr. Appl. Phys.*, **18(7)**, pp.793-798, DOI: 10.1016/j.cap.2018.04.007.
- [9] K.Q. Le, Q.M. Ngo, T.K. Nguyen (2017), “Nanostructured metal-insulator-metal metamaterials for refractive index biosensing applications: Design, fabrication, and characterization”, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron*, **23(2)**, pp.388-393, DOI: 10.1109/JSTQE.2016.2615944.

- [10] A. Das, Y. Nanao, A. Rajan, et al. (2025), “Low-temperature fabrication of plasmonic titanium nitride thin films by electron beam evaporation”, *J. Phys. Photonics*, **7(2)**, pp.1-7, DOI: 10.1088/2515-7647/adcdde.
- [11] S. Mohapatra, U. Pant, R.S. Moirangthem (2020), “Thermal nanoimprint lithography based plasmonic nanogratings for refractive index sensing of polar solvents”, *Mater. Today Proc*, **28**, pp.215-217, DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.581.
- [12] M.Q. Tran, X.B. Nguyen, A.T. Tran, et al. (2025), “Near-infrared plasmonic-based fluorescence enhancement by silver-coated polymer pillar metasurfaces”, *J. Opt. Soc. Am. B*, **42(5)**, pp.992-1000, DOI: 10.1364/JOSAB.551878.
- [13] X.B. Nguyen, H.T. Nguyen, T.S. Pham, et al. (2024), “Tailored silver coated polymer pillar metasurfaces for near-infrared refractive index sensing applications”, *Phys. B Condens. Matter*, **689**, pp.1-8, DOI: 10.1016/j.physb.2024.416212.
- [14] S. O’Halloran, A. Pandit, A. Heise, et al. (2023), “Two-photon polymerization: Fundamentals, materials, and chemical modification strategies”, *Adv. Sci*, **10(7)**, pp.1-18, DOI: 10.1002/advs.202204072.
- [15] M. Ren, W. Lu, Q. Shao, et al. (2021), “Aberration-free large-area stitch-free 3D nano-printing based on binary holography”, *Opt. Express*, **29(26)**, pp.44250-44263, DOI: 10.1364/OE.446503.