

TẠO XOÁY QUANG BƯỚC SÓNG 532 NM VỚI MẪU VI LINH KIỆN PHA XOÁY CÓ CHIẾT SUẤT BIẾN ĐỔI, CẤU TRÚC NANO

Nguyễn Thanh Tùng¹, Nguyễn Thị Huệ Minh¹, Nguyễn Thùy Linh¹,
Nguyễn Thị Loan², Nguyễn Thị Huệ¹

TÓM TẮT

Công trình này trình bày kết quả nghiên cứu kiểm tra chức năng của vi linh kiện pha xoáy có bề mặt phẳng, chiết suất biến đổi và cấu trúc nano (nVPC) hoạt động tại bước sóng 532 nm. Vi linh kiện nVPC được thiết kế và chế tạo dựa trên phương pháp nano hóa cấu trúc vật liệu. Cấu trúc trung tâm của vi linh kiện nVPC gồm 7651 thanh nano, được làm từ hai loại vật liệu có hệ số nhiệt và cơ tương đồng, tạo thành mạng lục giác với đường chéo dài 20 μm . Đặc tính quang học của vi linh kiện được kiểm tra bằng cả phương pháp lý thuyết và thực nghiệm kiểm chứng. Kết quả thí nghiệm xác nhận sự tạo thành xoáy quang bậc cơ bản với điểm kỳ dị pha đặc trưng và cường độ mật cắt dạng bánh rán doughnut. Vi linh kiện nVPC có bề mặt phẳng hoàn toàn và chức năng tạo xoáy xuất phát từ sự biến đổi của cấu trúc chiết suất bên trong nó. Nghĩa là chức năng của nVPC không bị ảnh hưởng bởi chiết suất của môi trường xung quanh, điều này khiến chúng trở thành ứng viên lý tưởng cho các ứng dụng vi chất lưu.

Từ khóa: Xoáy quang học, vi linh kiện pha xoáy cấu trúc nano, công nghệ nano.

DOI: <https://doi.org/10.70117/hdujs.84.2.2026.1113>

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Quang học là một trong những lĩnh vực lâu đời của Vật lý học. Trong suốt quá trình phát triển, lĩnh vực này đã được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác nhau [1]. Gần đây, các nhóm nghiên cứu và các nhà khoa học đang đặc biệt quan tâm đến Quang học kỳ dị - là một nhánh của Quang học hiện đại mà mới được hình thành và nghiên cứu trong khoảng ba thập kỷ qua, nhưng cũng đã cho thấy tiềm năng ứng dụng rộng rãi. Đáng chú ý, sự xuất hiện của chùm sáng mang mômen động lượng quỹ đạo (OAM) hay còn được gọi là chùm xoáy quang học (OV) đã thu hút được sự quan tâm mạnh mẽ của giới khoa học và các nhóm nghiên cứu trên toàn thế giới [2-4]. Những chùm sáng này có điểm kỳ dị pha nằm tại tâm với sự phân bố cường độ sáng mặt cắt ngang mang hình dạng như một chiếc bánh dough-nut, được đặc trưng bởi giá trị điện tích topo. Nhờ những đặc tính này, các xoáy quang học đã và đang được nghiên cứu và ứng dụng trên nhiều lĩnh vực [5][6], điển hình như: bẫy và điều khiển các vi hạt hoặc tế bào sống [7][8], cải thiện độ phân giải trong kính hiển vi [9][10]. Ngoài ra, chúng cũng đóng vai trò quan trọng trong phát triển xử lý thông tin lượng tử - cho phép thao tác dữ liệu nhanh hơn với mức độ bảo mật cao hơn [11,12]. Xoáy quang học công suất lớn còn được sử dụng như một thiết bị mới trong quang khắc, gia công vật liệu cấu trúc vi mô bằng cách tận dụng tính chất xoắn của xung xoáy quang học [13][14].

¹ Khoa Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Hồng Đức; Email: nguyenthihuevl@hdu.edu.vn

² Trường TH, THCS&THPT Hồng Đức

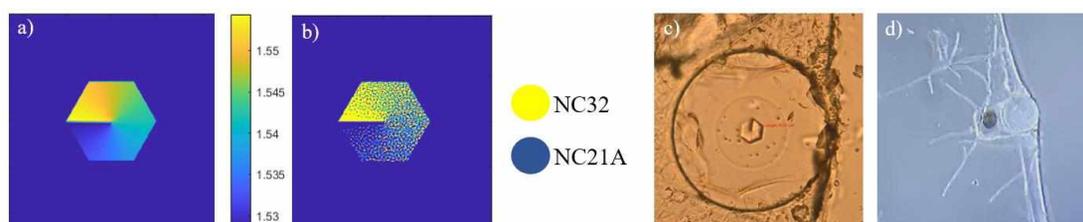
Việc tạo ra xoáy quang học thường dựa trên việc biến đổi pha của chùm Gauss thành dạng pha với bề mặt xoắn ốc. Một số phương pháp đã được đề xuất để thực hiện điều này, chẳng hạn như sử dụng các hologram [15][16], bộ điều biến ánh sáng không gian (SLMs - Spatial Light Modulators) [17][18], hệ gương pha xoắn vi cơ [19], hoặc tấm pha xoắn ốc (SPP - Spiral Phase Plate) [20]. Trong đó, các SLM cho phép tạo lập các mẫu pha một cách linh hoạt, chính xác. Các SLM có độ phân giải cao thường được sử dụng để tạo chùm tia xoáy vi mô chất lượng cao nhờ kích thước điểm ảnh nhỏ đường kính vào ngưỡng 1,6 μm [21]. Tuy nhiên, hiệu suất của chúng bị giới hạn bởi công suất đầu vào và kích thước tổng thể lớn. Đối với các ứng dụng trong hệ thống sợi quang, bộ chuyển đổi xoáy cần có kích thước vi mô để có thể tích hợp trực tiếp với đầu sợi hoặc các thiết bị quang học vi mô khác. Một số phương pháp khác đã được đề xuất là chế tạo các vi linh kiện SPP được chế tạo bằng kỹ thuật khắc hiện đại như khắc bằng chùm điện tử [22] và hấp thụ hai photon kết hợp với ghi laser 3D trực tiếp [23]. Một vài nghiên cứu gần đây chế tạo thành công chùm OV bởi SPP cỡ 40 μm được khắc trực tiếp trên đầu sợi quang [24][25]. Mặc dù phương pháp mới này hứa hẹn là một giải pháp thay thế cho các hệ thống lớn truyền thống trong việc tạo chùm OV, nhưng SPP vẫn có cấu trúc pha rời rạc, dạng bậc thang nhiều bậc điển hình. Cần lưu ý rằng việc chế tạo chúng khá tốn kém, vì đòi hỏi sử dụng các kỹ thuật quang khắc nhiều mặt nạ tiên tiến hoặc ghi bằng chùm điện tử.

Gần đây, chúng tôi đã đề xuất một phương pháp độc đáo để tạo xoáy quang học cấp độ vi mô thông qua các vi linh kiện pha xoáy với chiết suất biến đổi, cấu trúc nano (nVPC - Nanostructured Vortex Phase Converter) được chế tạo bằng kỹ thuật xếp chồng và kéo sợi cải tiến [26-30]. Phương pháp này cho phép phát triển các linh kiện với cấu trúc nano có đường kính khoảng 20 μm và cấu thành từ hàng nghìn thanh nano riêng lẻ. Do kích thước các thanh nano bên trong của linh kiện nhỏ hơn nhiều so với bước sóng của chùm tia tới, vì vậy toàn bộ cấu trúc nano hoạt động như một vùng vật liệu đồng nhất với chiết suất hiệu dụng, theo lý thuyết môi trường hiệu dụng Maxwell-Garnett [31], biến đổi tuyến tính theo góc phương vị đảm bảo sự điều biến pha tạo thành xoáy quang mong muốn. Trên thực tế, những ưu điểm của phương pháp chế tạo này, chẳng hạn, cho phép chế tạo các vi linh kiện với phân bố chiết suất tùy ý đã được chứng minh trong các công trình trước của chúng tôi về linh kiện cấu trúc nano như vi thấu kính chiết suất biến đổi, axicon [32-34]. Đồng thời chúng có bề mặt phẳng và thể duy trì hiệu suất quang học trong mọi môi trường trong suốt như không khí hay chất lỏng. Kết quả là, các linh kiện cấu trúc nano này cho phép tích hợp vào các hệ thống sợi quang đơn để đơn giản và gọn nhẹ hơn [27][35]

Trong nghiên cứu này, chúng tôi kiểm tra thực nghiệm quá trình tạo chùm tia xoáy quang bậc cơ bản trong không khí tại bước sóng 532 nm. Kết quả thực nghiệm được so sánh với mô phỏng và các dự đoán lý thuyết. Các vi xoáy quang học được tạo ra tại bước sóng này hướng đến ứng dụng thực tiễn của xoáy quang học cấp độ vi mô như vi cơ laze để chế tạo các cấu trúc xoắn ốc kích cỡ micromet trong lĩnh vực công nghệ vật liệu tiên tiến. Đồng thời, nghiên cứu với xoáy vi quang trong vùng khả kiến cũng có ý nghĩa quan trọng trong giáo dục và nghiên cứu thực nghiệm cơ sở vì đây là bước sóng phổ biến, dễ sử dụng mà thường có ở hầu hết các phòng thí nghiệm các trường đại học cho các nghiên cứu cơ bản và bài học thí nghiệm.

2. VI LINH KIỆN PHA XOÁY CẤU TRÚC NANO: THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO

Nhìn chung, các xoáy quang học có thể được tạo ra bằng cách cho chùm Gauss đi qua các hệ linh kiện hoặc các linh kiện chuyển đổi. Sự chuyển đổi này có thể dựa trên sự biến đổi theo góc phương vị của độ dày của linh kiện (như ở các SPP truyền thống), hoặc dựa trên sự thay đổi chiết suất của vật liệu. Phương pháp mà chúng tôi sử dụng thuộc loại thứ hai: trong khi độ dày d được giữ không đổi, chiết suất mặt cắt của vi linh kiện được điều chỉnh theo góc phương vị, từ đó tạo ra biến đổi pha theo phương vị trên chùm tia truyền qua và hình thành xoáy quang học. Quy trình thiết kế và chế tạo các nVPC được thực hiện bằng kỹ thuật ghép và kéo sợi đã cải tiến - phương pháp truyền thống trong sản xuất sợi tinh thể quang tử và đã được mô tả chi tiết trong [27][28].

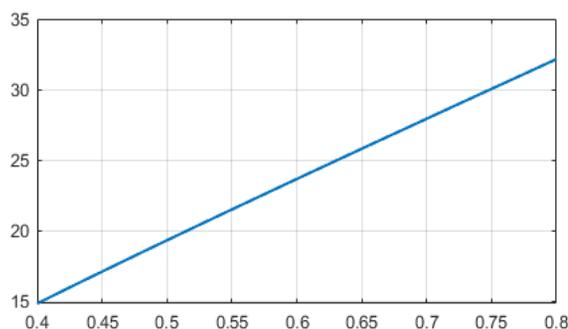


Hình 1. Phân bố chiết suất vi linh kiện pha xoáy với chiết suất biến thiên lý tưởng VPC (a) và mẫu cấu trúc nano nhị phân tương ứng nVPC (b). Hình chụp dưới kính hiển vi của mẫu vi linh kiện nVPC được chế tạo bằng phương pháp ghép–và–kéo sợi cải tiến (c, d)

Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng cặp vật liệu thủy tinh mềm borosilicate NC21A và NC32 [36], làm hai thành phần chiết suất thấp và cao để xây dựng cấu trúc chiết suất biến đổi của vi linh kiện pha xoáy. Hai loại thủy tinh này được lựa chọn bởi chúng có sự tương thích nhiệt rất tốt, thể hiện qua độ chênh lệch hệ số giãn nở nhiệt nhỏ ($\Delta\alpha = 0.4 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$), giúp đảm bảo quá trình nhiệt kéo sợi diễn ra ổn định và hạn chế sự hình thành ứng suất nội. Tại bước sóng 532 nm, NC21A và NC32 có chiết suất lần lượt là 1,529 và 1,554, tạo nên độ tương phản chiết suất $\Delta n \approx 0,025$ gần như không đổi trong dải phổ khả kiến. Cấu trúc nano nhị phân của nVPC đã chế tạo (Hình 1(c, d)) bao gồm 7651 thanh nano được ghép theo đúng thiết kế (Hình 1(b)), mỗi thanh có đường kính ~ 160 nm. Sự phân bố các thanh nano nhị phân này được tối ưu hóa để đạt được phân bố chiết suất, dựa trên lý thuyết môi trường hiệu dụng Maxwell-Garnett (EMT) [37], gần giống với sự phân bố chiết của vi linh kiện chiết suất biến đổi liên tục lý tưởng (VPC) như trên Hình 1(a). Như vậy, toàn bộ cấu trúc nano sẽ hoạt động như một môi trường hiệu dụng liên tục. Nhờ đó, cấu trúc của vi linh kiện nVPC cuối cùng tạo ra một gradient chiết suất $n(\varphi)$ theo góc phương vị φ : $n(\varphi) = n_0 + \varphi\Delta n/2\pi$, trong đó n_0 là chiết suất thấp hơn (ứng với thành phần vật liệu NC21A). Đối với vi linh kiện có điện tích tô-pô l hoạt động tại bước sóng λ_0 , sự biến thiên pha theo góc phương vị đòi hỏi chiết suất phải thay đổi liên tục sao cho tổng độ dịch pha thu được là một bội số của 2π :

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d_0}{\lambda} \Delta n = 2\pi l \quad (1)$$

Độ dày của vi linh kiện pha xoáy có thể được tính toán lý thuyết theo bước sóng của chùm tia tới dựa trên phương trình (1), được minh họa trong Hình 2. Đồ thị cho thấy độ dày cần thiết của vi linh kiện để tạo xoáy quang học với điện tích topo đơn ($l = 1$) tại các bước sóng cụ thể. Để thu được chùm tia xoáy chất lượng cao, vi linh kiện cần được cắt, mài và đánh mịn một cách rất chính xác.

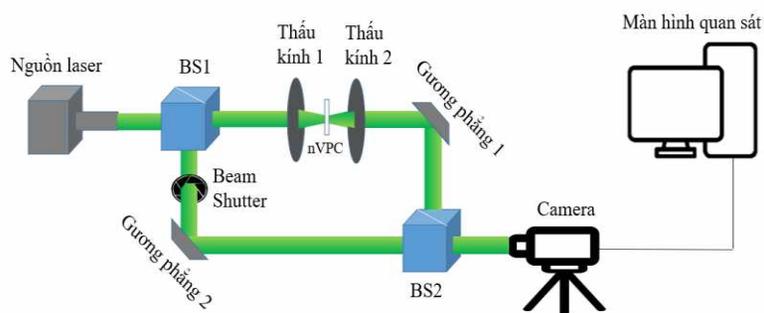


Hình 2. Tính toán lý thuyết độ dày của vi linh kiện nVPC theo bước sóng để tạo ra chùm xoáy quang bậc cơ bản $l = 1$ tại vùng khả kiến

Trong nghiên cứu này, chúng tôi tiến hành thí nghiệm kiểm tra khả năng tạo xoáy quang sử dụng mẫu vi linh kiện nVPC có đường kính tổng là $125 \mu\text{m}$ với cấu trúc trung tâm có đường kính là $19 \mu\text{m}$ và độ dày là $d = 20 \mu\text{m}$. Theo tính toán lý thuyết, mẫu vi linh kiện này có thể chuyển đổi chùm Gauss đầu vào thành chùm xoáy bậc cơ bản ($l = 1$) tại bước sóng $\lambda = 532 \text{ nm}$.

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu này tập trung thực hiện thí nghiệm kiểm chứng chức năng tạo xoáy quang học với điện tích $l = 1$ của mẫu vi linh kiện nVPC được chọn. Vi linh kiện nVPC (Hình 1(c,d)) sau khi chế tạo được gắn vào rìa của một lam kính hiển vi và sau đó được đặt trong bộ thí nghiệm để tương tác với chùm tia tới. Chùm tia tới thu được sẽ được phân tích thông qua phân bố cường độ theo mặt cắt và đặc trưng của cấu trúc pha. Các thí nghiệm được tiến hành trên bộ thí nghiệm Mach-Zehnder xây dựng tại phòng thí nghiệm Quang tử của Trường Đại học Hồng Đức như mô tả trên sơ đồ Hình 3.



Hình 3. Sơ đồ thí nghiệm kiểm tra sự tạo thành xoáy quang sử dụng mẫu vi linh kiện nVPC

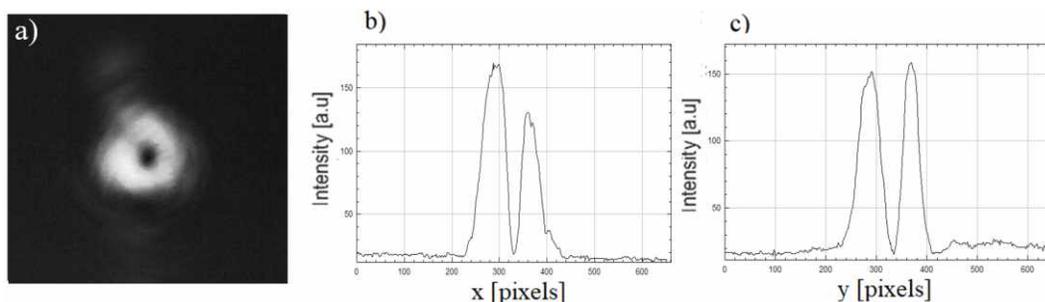
Để quan sát phân bố cường độ của chùm tia xoáy, chúng tôi sử dụng một phần của bộ thí nghiệm - nhánh truyền quang chính (khi đóng beam shutter). Khi đó chùm sáng từ nguồn truyền thẳng qua linh kiện chia chùm tia (BS1, 50:50, Thorlabs) được hội tụ bởi thấu kính hiển vi 1 ($\times 10$, khẩu độ số (NA) 0,25, Thorlabs) để tương tác với cấu trúc nano trung tâm của mẫu vi linh kiện nVPC. Chùm tia xoáy quang ló ra đi qua thấu kính hiển vi 2 ($\times 10$, khẩu độ số (NA) 0,25, Thorlabs) tạo thành chùm song song và được thu lại để quan sát bởi CMOS camera chuyên dùng (DCC1645C - USB 2.0, 1280 x 1024, Color Sensor, Thorlabs).

Để nghiên cứu các đặc tính pha của chùm tia xoáy, chúng tôi sử dụng hai kỹ thuật cơ bản bao gồm: biến đổi xoáy astigmatic bằng thấu kính hình trụ [38], hoặc tạo phổ giao thoa giữa chùm tia xoáy và chùm tia Gaussian tham chiếu trong giao thoa kế Mach-Zehnder [39]. Trong trường hợp đầu tiên, một thấu kính trụ được đặt trước camera làm cho chùm tia xoáy ban đầu có đối xứng trụ được biến đổi thành một dải các vân sáng và tối trên mặt phẳng tiêu cự của thấu kính. Số lượng các vân tối cho biết điện tích của xoáy quang học. Chẳng hạn, đối với xoáy đơn, hệ vân tạo thành bao gồm hai vân sáng tách biệt bởi một vân tối duy nhất. Phép đo này cũng được xác nhận bằng các thí nghiệm giao thoa. Khi chùm xoáy giao thoa với các sóng cầu tham chiếu đồng trục sẽ tạo ra các phổ với cấu trúc xoắn ốc trên màn quan sát. Tương tự, nếu chùm tia tham chiếu và chùm tia xoáy được hội tụ tốt và không đồng trục, phổ giao thoa sẽ có dạng giống cái nĩa (fork-like). Điểm phân nhánh trong cấu trúc dạng nĩa cho biết sự xuất hiện của điểm kỳ dị pha. Hơn nữa, giá trị điện tích của chùm xoáy tạo thành có thể dễ dàng suy ra từ cấu trúc nĩa bằng cách so sánh số vân đếm được ở phía trên và phía dưới của cấu trúc. Hướng xoay của cấu trúc pha liên quan đến hướng thẳng đứng của cấu trúc nĩa.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Như đã trình bày phía trên, mẫu vi linh kiện nVPC có đường kính tổng là $125\ \mu\text{m}$ với cấu trúc trung tâm có đường kính là $19\ \mu\text{m}$ và độ dày là $d = 20\ \mu\text{m}$ được lựa chọn trong nghiên cứu này để kiểm tra tính chất quang học tại bước sóng $\lambda = 532\ \text{nm}$ theo các phương pháp cụ thể tại mục 3. Kết quả thí nghiệm được biểu diễn trên Hình 4 và 5.

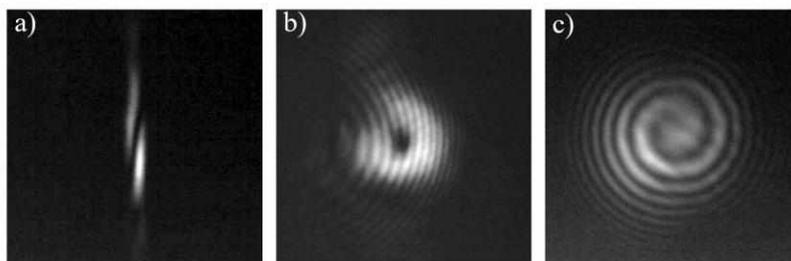
Hình 4(a) mô tả phân bố cường độ ánh sáng quan sát được của chùm xoáy thu được từ thí nghiệm khi truyền trong không khí, với vùng tối trung tâm cho thấy điểm kỳ dị của chùm tia. Các đồ thị trong Hình 4(b) và 4(c) lần lượt mô tả phân bố cường độ theo phương ngang và phương thẳng đứng của cường độ mặt cắt chùm tia xoáy. Phân bố cường độ thể hiện sự khá đồng đều theo góc phương vị. Điều này phản ánh ảnh hưởng của hiệu ứng dẫn sóng - xu hướng chùm sáng được dẫn chủ yếu trong vùng có chiết suất cao hơn của vi linh kiện có chiết suất biến đổi - khi mà ánh sáng lan truyền qua vi linh kiện nVPC mỏng ($d = 20\ \mu\text{m}$).



Hình 4. Cường độ mặt cắt của chùm tia ló tạo bởi mẫu vi linh kiện nVPC trong không khí (a) và phân bố cường độ của nó theo phương ngang (b) và phương thẳng đứng (c). Tỷ lệ tương phản cường độ của phép đo > 17:1

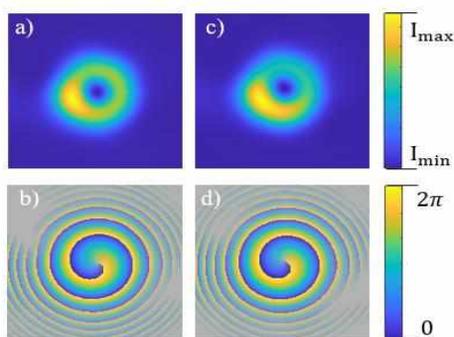
Biến đổi astigmatic thu được bởi thấu kính trụ cho phép chúng ta xác định điện tích topo của chùm xoáy quang. Hình 5(a) cho thấy có hai vân sáng rõ rệt, tách biệt nhau bởi một dải tối, chứng minh điện tích topo của chùm xoáy hình thành là $l = 1$. Kết quả này cũng được

xác nhận bởi phương pháp tạo phổ giao thoa độc lập sử dụng các chùm tia tham chiếu đồng trục và lệch nhẹ tương ứng như trên Hình 5(b,c). Thật vậy, một nhánh vân sáng được bổ sung trong phổ cấu trúc giao thoa hình nĩa cũng như một nhánh xoắn ốc đơn cũng xác nhận xoáy quang có điện tích $l = 1$.



Hình 5. Cấu trúc phổ thu được từ phép biến đổi astigmatic sử dụng thấu kính trụ (a) và phổ giao thoa sử dụng các chùm tia tham chiếu lệch nhẹ (b) và đồng trục (c). Các kết quả đều cho thấy điện tích topo của chùm xoáy là $l = 1$

Các kết quả thực nghiệm không chỉ phù hợp với dự đoán lý thuyết mà còn phù hợp với các kết quả mô phỏng (xem Hình 6) với cường độ phân bố dạng bánh rán doughnut và cấu trúc pha xoắn đơn quanh điểm kỳ dị trung tâm. Các mô phỏng được thực hiện bằng phương pháp lan truyền chùm tia (Beam Propagation Method - BPM), trong đó các tham số đầu vào của vi linh kiện pha xoáy thiết kế lý tưởng VPC và cấu trúc nano nhị phân nVPC trùng khớp với cấu trúc đã chế tạo (đường kính $19 \mu\text{m}$, độ dày $20 \mu\text{m}$). Tất cả các mô phỏng đều được thực hiện với chùm đầu vào có bước sóng 532 nm truyền trong không gian tự do. Vùng mô phỏng có bề rộng và cao đều là $200 \mu\text{m}$, còn chiều dài dọc theo trục quang học là $1020 \mu\text{m}$. Tức là các kết quả mô phỏng đều thu ở khoảng cách $1000 \mu\text{m}$ tính từ mặt sau của vi linh kiện pha xoáy. Độ phân giải ngang và dọc đều được cố định ở mức $0,1 \mu\text{m}$ cho cả sự lan truyền bên trong vi linh kiện và môi trường ngoài.



Hình 8. Phân bố cường độ và cấu trúc pha trên mặt cắt của chùm tia tại khoảng cách $1000 \mu\text{m}$ thu được bằng phương pháp mô phỏng bởi vi linh kiện pha xoáy cấu trúc nano nVPC (a, b) và bởi vi linh kiện lý tưởng VPC tương ứng (c, d)

Các kết quả thu được cũng xác nhận rằng vi linh kiện cấu trúc nano nVPC hoạt động như một cấu trúc pha liên tục lý tưởng VPC. Điều này cùng với các kết quả thí nghiệm về tạo xoáy quang chất lượng cao chứng tỏ rằng cấu trúc nano nhị phân đáp ứng các yêu cầu của lý thuyết môi trường hiệu dụng và là cấu trúc tối ưu hóa nhất cho nghiên cứu này.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu thực nghiệm về vi linh kiện nVPC có chiết suất biến đổi cấu trúc nano có độ dày 20 μm , sử dụng nguồn laser bước sóng 532 nm đã được thực hiện. Hai kỹ thuật biến đổi astigmatic và giao thoa kế Mach-Zehnder đã được sử dụng để chứng minh việc tạo ra các xoáy quang học với phân bố cường độ, pha phương vị và xác nhận giá trị của điện tích topo đơn. Kết quả cho thấy, mẫu nVPC cấu trúc nano đã chế tạo có khả năng chuyển đổi chùm tia Gauss đầu vào thành chùm tia xoáy quang học bậc cơ bản $l = 1$.

So với các phương pháp khác, vi linh kiện thu được với bề mặt phẳng song song có thể dễ dàng tích hợp hiệu quả vào các hệ thống sợi quang để dễ dàng điều khiển được chùm xoáy quang tạo ra trong không gian 3D hướng đến các ứng dụng về bẫy quang học. Hơn nữa, vật liệu thủy tinh sử dụng chế tạo mẫu vi linh kiện nVPC đều có độ truyền quang cao cho dải phổ khả kiến và có ngưỡng chịu hư hại do laser rất cao, vì vậy chúng có thể hoạt động với nguồn công suất lớn hoặc đưa vào buồng cộng hưởng của nguồn laser để tạo thành nguồn phát xoáy quang trực tiếp có thể dùng cho công nghệ quang khác.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. Ware, J. Peatross (2015), *Physics of Light and Optics (Black & White)*, Lulu.com.
- [2] L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, J. P. Woerdman (1992), *Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes*, Phys. Rev. A. (Coll Park), 45(11) 8185-8189.
- [3] A. M. Yao, M. J. Padgett (2011), *Orbital angular momentum: Origins, behavior and applications*, Adv. Opt. Photonics, 3(2) 161-204.
- [4] Y. Yang, Y. X. Ren, C. Rosales-Guzmán (2024), *Optical vortices: Fundamentals and applications*, Institute of Physics Publishing, 1-240.
- [5] Y. Shen, X. Wang, Z. Xie, C. Min, X. Fu, Q. Liu, M. Gong, X. Yuan (2019), *Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities*, Light Sci. Appl, 8(1) 1-29.
- [6] F. Pang, L. Xiang, H. Liu, L. Zhang, J. Wen, X. Zeng, T. Wang (2021), *Review on Fiber-Optic Vortices and Their Sensing Applications*, Journal of Lightwave Technology, 39(12) 3740-3750.
- [7] V. G. Shvedov, A. V. Rode, Y. V. Izdebskaya, A. S. Desyatnikov, W. Krolikowski, Y. S. Kivshar (2010), *Giant optical manipulation*, Phys. Rev. Lett., 105(11), 118103.
- [8] Brijesh K Singh, Harel Nagar, Yael Roichman, Ady Arie (2017), *Particle manipulation beyond the diffraction limit using structured super-oscillating light beams*, Light Sci. Appl, 6, e17050.
- [9] K. I. Willig, S. O. Rizzoli, V. Westphal, R. Jahn, S. W. Hell (2006), *STED microscopy reveals that synaptotagmin remains clustered after synaptic vesicle exocytosis*, Nature, 440(7086) 935-939.
- [10] L. Yan, P. Kristensen, S. Ramachandran (2018), *Vortex fibers for STED microscopy*, APL Photonics, 4(2), 022903.
- [11] A. Mair, A. Vaziri, G. Weihs, A. Zeilinger (2001), *Entanglement of the orbital angular momentum states of photons*, Nature, 412, pp.313-316.

- [12] I. Nape, B. Sephton, P. Ornelas, C. Moodley, A. Forbes (2023), *Quantum structured light in high dimensions*, APL Photonics, 8(5), 051101.
- [13] K Toyoda, F Takahashi, S Takizawa, Y Tokizane, K Miyamoto, R Morita, T Omatsu (2013), *Transfer of light helicity to nanostructures*, Physical Review Letters, 110, 143603.
- [14] T.Omatsu, K.Miyamoto, K.Toyoda, R.Morita, Y.Arita, K.Dholakia (2019), *A new twist for materials science: the formation of chiral structures using the angular momentum of light*, Advanced Optical Materials 9(7), 1801672.
- [15] N. R. Heckenberg, R. McDuff, C. P. Smith, A. G. White (1992), *Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms*, Opt. Lett., 17, pp.221-223.
- [16] K. S. Malik, N. Kumar, B. R. Boruah (2022), *Dynamic modulation of spatial intensity profile of a laser beam using a binary hologram*, Opt. Commun., 515, 128201.
- [17] Djenan Ganic, Xiaosong Gan, Min Gu, et. al. (2002), *Generation of doughnut laser beams by use of a liquid-crystal cell with a conversion efficiency near 100%*, Opt. Lett. 27, pp.1351-1353.
- [18] M. Li, S. J. Elston, C. He, X. Qiu, A. A. Castrejón-Pita, S. M. Morris (2024), *Printed Liquid Crystal Optical Vortex Beam Generators*, Adv. Optical Mater 12, 2400450.
- [19] G. Campbell, B. Hage, B. Buchler, P. K. Lam (2012), *Generation of high-order optical vortices using directly machined spiral phase mirrors*, Applied Optics, 51(7) 873-876.
- [20] J. Chen, D. F. Kuang, M. Gui, Z. L. Fang (2009), *Generation of Optical Vortex Using a Spiral Phase Plate Fabricated in Quartz by Direct Laser Writing and Inductively Coupled Plasma Etching*, Chinese Physics Letters, 26(1) 014202.
- [21] J. Pi, J. Yang, S. Cho, S. Cheon, G. Kim, K. Choi, H. Kim, W. Lee, H. Kang, C. Hwang (2018), *Development of high-resolution active matrix spatial light modulator*, Optical Engineering, 57(6), 061606.
- [22] M. Massari, G. Ruffato, M. Gintoli, F. Ricci, F. Romanato (2015), *Fabrication and characterization of high-quality spiral phase plates for optical applications*, Appl. Opt. 54, pp.4077-4083.
- [23] H Wei, AK Amrithanath, S Krishnaswamy (2019), *3D printing of micro-optic spiral phase plates for the generation of optical vortex beams*, IEEE Photonics Technology Letters, 31(8) 599-602.
- [24] Rita S. Rodrigues Ribeiro, Pabitra Dahal, Ariel Guerreiro, Pedro Jorge, Jaime Viegas (2016), *Optical fibers as beam shapers: from Gaussian beams to optical vortices*, Opt. Lett. 41, pp.2137-2140.
- [25] Ksenia Weber, Felix Hütt, Simon Thiele, Timo Gissibl, Alois Herkommer, Harald Giessen (2017), *Single mode fiber based delivery of OAM light by 3D direct laser writing*, Opt. Express 25, pp.19672-19679.
- [26] K. Switkowski, A. Anuszkiewicz, A. Filipkowski, D. Pysz, R. Stepien, W. Krolikowski, R. Buczynski (2017), *Formation of optical vortices with all-glass nanostructured gradient index masks*, Opt. Express, 25(25) 31443.

- [27] H. T. Nguyen, K. Switkowski, R. Kasztelanic, A. Anuszkiewicz (2020), *Optical characterization of single nanostructured gradient index vortex phase masks fabricated by the modified stack-and-draw technique*, Opt. Commun., 463, 125435.
- [28] H. T. Nguyen, R. Kasztelanic, A. Filipkowski, D. Pysz, H. Van Le, R. Stepień, T. Omatsu, W. Krolikowski, R. Buczynski (2023), *Broadband optical vortex beam generation using flat-surface nanostructured gradient index vortex phase masks*, Sci. Rep., 13(1), 20255.
- [29] T. H. Nguyen, T. T. Nguyen, T. L. Nguyen, M. K. Cao, T. H. Tran, V. H. Le (2025), Numerical study on broadband optical vortex beam in the visible range using nanostructured vortex phase components, Hong Duc University Journal of Science, 74, 24–31.
- [30] H. Le Van, R. Buczynski, B. C. Van, R. Kasztelanic, H. T. Nguyen, B. Le Viet, H. T. Thi (2025), *Achromatic nanostructured phase components for micro-optical vortex beam generation*”, Journal of the Optical Society of America B, 42(6) 1194-1203.
- [31] A. Sihvola (1999), *Electromagnetic Mixing Formulas and Applications*, The Institution of Engineering and Technology, 1-296.
- [32] Hudelist F, Buczynski R, Waddie AJ, Taghizadeh MR (2009), *Design and fabrication of nano-structured gradient index microlenses*, Opt. Express, 17(5) 3255-3263.
- [33] Adam Filipkowski, Bernard Piechal, Dariusz Pysz, Ryszard Stepień, Andrew Waddie, Mohammad R. Taghizadeh, Ryszard Buczynski (2015), *Nanostructured gradient index microaxicons made by a modified stack and draw method*, Opt. Lett, 40, 5200-5203.
- [34] J. Nowosielski, R. Buczynski, A. J. Waddie, A. Filipkowski, D. Pysz, A. McCarthy, R. Stepień, and M. R. Taghizadeh (2012), *Large diameter nanostructured gradient index lens*, Optics Express, 20(11) 11767-11777.
- [35] H. T. Nguyen, G. Stepniewski, A. Filipkowski, R. Kasztelanic, D. Pysz, H. Le Van, R. Stepień, M. Klimczak, W. Krolikowski, R. Buczynski (2022), *Transmission of an optical vortex beam in antiresonant fibers generated in an all-fiber system*, Optics Express, 30(25) 45635-45647.
- [36] R. Stepień, J. Cimek, D. Pysz, I. Kujawa, M. Klimczak, R. Buczynski (2014), *Soft glasses for photonic crystal fibers and microstructured optical components*, Optical Engineering, 53(7), 071815.
- [37] D. W. Prather, J. N. Mait, M. S. Mirotznik (1999), *Design of binary subwavelength diffractive lenses by use of zeroth-order effective-medium theory*, Journal of the Optical Society of America A, 16(5) 1157-1167.
- [38] V. V. Kotlyar, A. A. Kovalev, and A. P. Porfirev (2017), *Astigmatic transforms of an optical vortex for measurement of its topological charge*, Appl Opt, 56(14), 4095.
- [39] P. Kumar, N. K. Nishchal (2019), *Modified Mach-Zehnder interferometer for determining the high-order topological charge of Laguerre-Gaussian vortex beams*, Journal of the Optical Society of America A, 36(8), 1447.

532 NM OPTICAL VORTEX GENERATION USING A GRADIENT-INDEX NANOSTRUCTURED VORTEX PHASE MICROCOMPONENT

Nguyen Thanh Tung, Nguyen Thi Hue Minh, Nguyen Thuy Linh,
Nguyen Thi Loan, Nguyen Thi Hue

ABSTRACT

This paper reports on the functional characterization of a flat-surface, nanostructured gradient index vortex phase microcomponent (nVPC) operating at a wavelength of 532 nm. The nVPC was designed and fabricated using a nanostructuring-material approach. The core region comprises 7,651 nanorods made from two thermally and mechanically matched glasses, arranged in a hexagonal lattice with a 20 μm diagonal. The optical performance of the component was evaluated through theoretical analysis and experimental verification. The measurements confirm the generation of a fundamental optical vortex, evidenced by a characteristic phase singularity and a doughnut-shaped transverse intensity profile. The nVPC has flat surfaces, and vortex generation arises from the engineered internal refractive-index distribution. Consequently, its function is insensitive to the refractive index of the surrounding medium, making it well-suited for microfluidic applications.

Keywords: *Optical vortex, nanostructured vortex phase microcomponent, nanotechnology.*

* Ngày nộp bài: 19/12/2025; Ngày gửi phản biện: 06/01/2026; Ngày duyệt đăng: 28/02/2026