

NGHIÊN CỨU SỐ VỀ CHÙM TIA XOÁY QUANG BẰNG THÔNG RỘNG TRONG VÙNG KHẢ KIẾN SỬ DỤNG VI LINH KIỆN PHA XOÁY QUANG CẤU TRÚC NANO

Nguyễn Thị Huệ¹, Nguyễn Thanh Tùng², Nguyễn Thùy Linh³, Cao Minh Khải⁴,
Trần Thị Hải¹, Lê Văn Hiệu¹

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã thiết kế hai cấu trúc vi linh kiện pha xoáy gradient có cấu trúc nano bề mặt phẳng nhỏ gọn, nhằm tạo ra chùm tia xoáy quang học bằng thông rộng trong vùng bước sóng khả kiến. Chúng tôi nghiên cứu số về chức năng quang học chúng trong môi trường không khí và chất lỏng (ethanol). Kết quả cho thấy các thiết kế vi linh kiện pha xoáy với độ dày 7 μm và 8.5 μm có thể chuyển đổi các chùm tia Gauss thành các chùm xoáy quang học bậc cơ bản trong những dải bước sóng khả kiến nhất định. Hơn nữa, các tính chất của những xoáy quang này được duy trì khi nhúng loại vi linh kiện này trong ethanol. Điều này cho thấy các tiềm năng ứng dụng của chúng trong chất lỏng như vi chất lưu.

Từ khóa: Xoáy quang học, vi linh kiện cấu trúc nano, quang học kỳ dị, băng thông rộng.

DOI: <https://doi.org/10.70117/hdujs.72.03.2025.646>

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Xoáy quang học (optical vortex - OV) có mặt pha xoắn ốc với một điểm kỳ dị ở tâm làm cho cường độ mật cắt của nó có dạng vòng sáng phân bố xung quanh điểm cường độ bằng không giống như hình bánh donut [1], [2]. Những đặc điểm độc đáo này đã góp phần phát triển các lĩnh vực nghiên cứu tích cực mới về quang học kỳ dị và nhiều ứng dụng thực tế tiên tiến [3], chẳng hạn như kính hiển vi suy giảm phát xạ kích thích [4], nhíp quang học [5], vi cơ laze [6], thông tin quang [7]. Việc vận hành hiệu quả các ứng dụng đó trong thực tiễn đòi hỏi phải tạo ra và điều khiển chùm tia OV một cách hiệu quả.

Hiện nay đã có một số kỹ thuật phổ biến và đưa vào thị trường để chế tạo chùm tia xoáy quang học (OV) [3]. Các phương pháp này chủ yếu dựa vào việc áp đặt sự dịch pha phương vị lên các mặt phẳng sóng tới thông qua linh kiện chuyển đổi. Điều này có thể thực hiện bằng cách sử dụng các tấm pha xoắn [8], [9] hoặc hệ gương xoắn [10]. Một kỹ thuật thông dụng khác là sử dụng ảnh ba chiều do máy tính tạo ra [11], [12] hoặc bộ điều biến ánh sáng không gian để điều khiển pha của chùm tia [13]. Mặc dù chúng linh hoạt trong điều chế pha ở thời gian thực, nhưng yêu cầu nguồn điện bên ngoài, hiệu suất hạn chế và chi phí cao là những nhược điểm đáng kể.

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

² K25-ĐHSP Vật lý, Khoa Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Hồng Đức

³ K24-ĐHSP Vật lý CLC, Khoa Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Hồng Đức

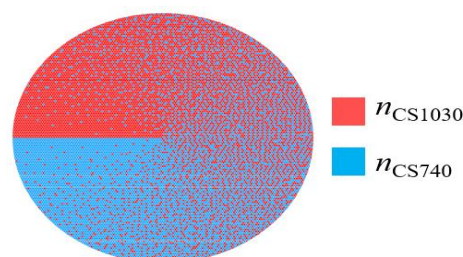
⁴ K16-Cao học Vật lý lý thuyết, Khoa Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Hồng Đức

Những nghiên cứu về việc tạo ra và kiểm soát OV được thúc đẩy bởi sự phát triển của các ứng dụng của xoáy quang trong thực tiễn. Đặc biệt, việc tạo các chùm xoáy quang với kích thước vi mô đang nhận được nhiều sự quan tâm cho sử dụng và cải tiến quá trình vận hành bẫy và thao tác quang học. Một số phương pháp tiếp cận để tạo ra các vi xoáy như vậy đã được công bố trong thời gian gần đây như sử dụng mặt nạ pha xoáy kích thước vi mô được chế tạo trực tiếp trên đầu sợi quang bằng kỹ thuật tiên tiến với chi phí cao như công nghệ xử lý vật liệu laser thông qua trùng hợp hai photon [14], chùm ion hội tụ [15] hoặc in 3D với xung femto-giây [16]. Tuy nhiên, các loại linh kiện này thường bị giới hạn khi sử dụng trong môi trường lỏng do cấu hình bề mặt của nó và công suất chùm tia đầu vào bị hạn chế cho trường hợp linh kiện làm từ polyme. Gần đây, nhóm nghiên cứu của GS. Buczynski đã giới thiệu phương pháp tiếp cận độc đáo để tạo chùm tia OV kích thước vi mô thông qua việc sử dụng vi linh kiện pha xoáy có cấu trúc nano chiết suất biến đổi (nanostructured gradient index vortex phase mask - nVPM) [17], [18]. Vi linh kiện này còn có thể dễ dàng tích hợp trực tiếp vào đầu sợi quang tạo thành hệ thống quang sợi chắc chắn và nhỏ gọn làm nguồn phát để nghiên cứu quá trình lan truyền của xoáy quang [19]. Với cùng kỹ thuật, nhóm đã thiết kế và chế tạo các vi linh kiện nVPM bằng thông rộng hoạt động trong vùng hồng ngoại gần [20] và cho tạo vi xoáy quang bậc cao [21].

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã thiết kế hai cấu trúc vi linh kiện pha xoáy gradient có cấu trúc nano bề mặt phẳng (Broadband-nVPM), nhằm tạo ra chùm tia xoáy quang học băng thông rộng trong dải bước sóng khả kiến. Hai vi linh kiện này có cùng cấu trúc nano và đường kính mặt cắt nhưng có độ dày khác nhau: $d_1 = 7 \mu\text{m}$ và $d_2 = 8.5 \mu\text{m}$. Đồng thời, chức năng tạo xoáy quang học băng thông rộng của hai vi linh kiện này trong các môi trường không khí và lỏng (ethanol) được đánh giá bằng các chuỗi mô phỏng sử dụng phương pháp lan truyền sóng dựa trên biến đổi Fourier (Fourier transform beam propagation method).

2. THIẾT KẾ VI LINH KIỆN VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nguyên lý của vi linh kiện pha xoáy quang học cấu trúc nano lý tưởng dựa trên việc giữ nguyên độ dày của vi linh kiện d_0 , trong khi chiết suất trên mặt cắt của nó $n(\theta)$ thay đổi tuyến tính theo góc phương vị θ (Hình 1). Điều này tạo ra sự điều biến pha phương vị của chùm ánh sáng truyền qua, dẫn đến sự hình thành của xoáy quang học với điện tích tô pô l (l nhận các giá trị nguyên và là số lần xoắn của ánh sáng tại một bước sóng dọc theo trục lan truyền chùm xoáy).



Hình 1. Thiết kế cấu trúc của vi linh kiện xoáy quang cấu trúc nano với sự phân bố chiết suất hiệu dụng biến đổi tuyến tính theo góc phương vị

Độ biến đổi pha tại một bước sóng xác định λ sẽ dựa trên độ lệch chiết suất ($\Delta n = n_{\text{high}} - n_{\text{low}}$) giữa vùng cao nhất n_{high} (tại góc $\theta = 2\pi$) và thấp nhất n_{low} (tại $\theta = 0$):

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

Tính chất băng thông rộng (cho phép vi linh kiện hoạt động trong một dải sóng nhất định) yêu cầu vi linh kiện pha xoáy Broadband-nVPM phải có độ nhạy thấp với bước sóng trong một phạm vi nhất định. Điều này có nghĩa là sự biến đổi pha theo bước sóng

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

phải càng gần với giá trị 0 càng tốt. Như vậy, việc chế tạo vi linh kiện pha xoáy băng thông rộng đòi hỏi phải tìm ra cặp vật liệu có độ lệch tán sắc không đổi theo bước sóng λ . Vì điều kiện này thường là không thể, người ta có thể đơn giản hóa phương trình (2) bằng cách làm cho linh kiện xoáy mỏng nhất có thể. Từ phương trình (1), ta thấy $d_0 = l/\Delta n$, nghĩa là chúng ta nên hướng tới các cặp vật liệu có độ lệch chiết suất rất cao.

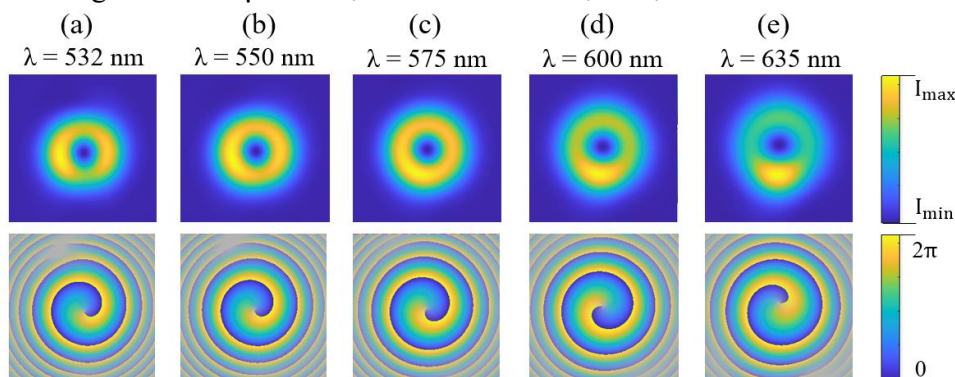
Dựa trên những điều kiện đó, chúng tôi thiết kế vi linh kiện Broadband-nVPM sử dụng cặp vật liệu thủy tinh pha tạp các thành phần chì-bismuth-gallium được dán nhãn CS740 và CS1030 [22]. Các vật liệu này được tổng hợp bằng phương pháp nóng chảy-làm nguội tại Viện vi điện tử và quang tử, Ba Lan (IMiF). Vật liệu CS1030 và vật liệu CS740 có độ lệch chiết suất cao $\Delta n = 0.078 \div 0.089$ (gần gấp 3 lần so với cặp vật liệu NC đã báo cáo trong [17]). Các vật liệu này có độ truyền quang cao cho vùng ánh sáng khả kiến. Các thông tin về độ tán sắc của các vật liệu này được mô tả chi tiết trong các công trình [20], [22]. Cấu trúc vi linh kiện Broadband-nVPM có tổng cộng 17557 cấu tử, bao gồm 8907 cấu tử vật liệu CS1030 và 8650 cấu tử vật liệu CS740. Các cấu tử được sắp xếp theo thiết kế để phân bố chiết suất hiệu dụng trên mặt cắt của nó, theo thuyết môi trường hiệu dụng, thay đổi tuyến tính theo góc phương vị và không đổi trên các đường bán kính. Các cấu tử riêng lẻ có kích thước khoảng 200 nm, thấp hơn nhiều so với giá trị ngưỡng cho vùng bước sóng khả kiến để áp dụng lý thuyết môi trường hiệu dụng để đảm bảo các tính năng quang học của vi linh kiện này trong vùng ánh sáng khả kiến.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng phương pháp nghiên cứu số để mô phỏng sự hình thành xoáy quang học và kiểm tra tính chất băng thông rộng của hai Broadband-nVPM có cùng cấu trúc như trên hình 1 với đường kính là 29 μm và độ dày lần lượt là $d_1 = 7 \mu\text{m}$ và $d_2 = 8.5 \mu\text{m}$. Đồng thời, chúng tôi cũng kiểm tra sự ảnh hưởng của chất lỏng (chẳng hạn ethanol) lên tính chất của xoáy quang băng thông rộng được tạo ra bởi loại vi linh kiện pha xoáy này.

Các mô phỏng được thực hiện bằng phương pháp lan truyền ánh sáng dựa trên biến đổi Fourier trên nền Matlab. Giả sử rằng tất cả các mô phỏng đều sử dụng chùm Gauss làm nguồn đầu vào. Chùm tia tới có đường kính 25 μm là kích thước phù hợp để các thiết kế cấu trúc vi linh kiện xoáy có thể hoạt động hiệu quả nhất tại các bước sóng đã chọn. Vùng mô phỏng có bề rộng và cao đều là 200 μm , còn chiều dài dọc theo trục quang học là 2000 μm . Tức là các kết quả mô phỏng đều thu ở khoảng cách 2000 μm tính từ mặt sau của vi linh kiện pha xoáy. Độ phân giải ngang được cố định ở mức 0,1 μm . Độ phân giải dọc theo trục quang học thay đổi trong khoảng từ 0,05 μm đến 0,5 μm , ứng với sự lan truyền bên trong vi linh kiện và trong môi trường ngoài.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

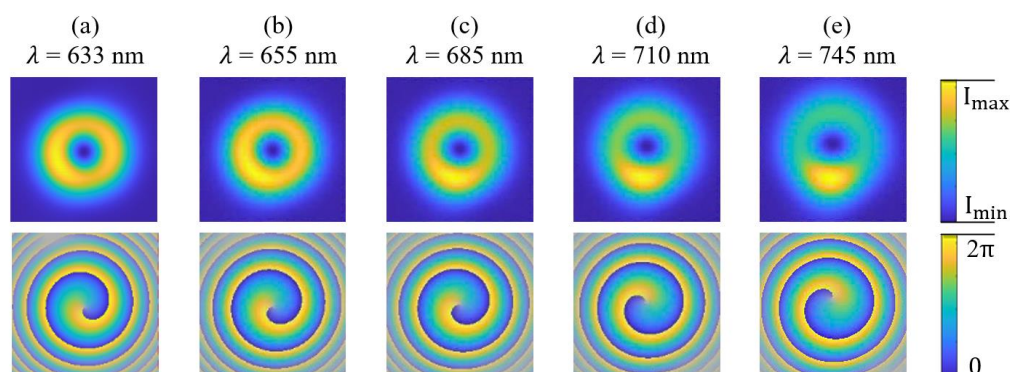
Để kiểm tra sự hình thành xoáy quang học bằng thông rộng bởi thiết kế vi linh kiện pha xoáy Broadband-nVPM với độ dày $d_1 = 7 \mu\text{m}$ trong không khí ($n = 1$), một nhóm các mô phỏng được thực hiện cho các trường hợp bước sóng $\lambda = 550; 575; 600; 635 \text{ nm}$. Các thông số đầu vào cho hai vi linh kiện pha xoáy bằng thông rộng Broadband-nVPM được mô tả như phần trên. Kết quả mô phỏng về cường độ mặt cắt của chùm tia đầu ra và cấu trúc pha thu được ở khoảng cách $2000 \mu\text{m}$ từ mặt sau của vi linh kiện được biểu diễn trên Hình 2.



Hình 2. Mô phỏng cường độ mặt cắt (hàng trên) và cấu trúc pha (hàng dưới) của xoáy quang học tạo bởi Broadband-nVPM có độ dày $d_1 = 7 \mu\text{m}$ trong dải sóng từ 532 nm đến 635 nm trong không khí. Kích thước các hình con là $125 \mu\text{m} \times 125 \mu\text{m}$

Kết quả mô phỏng cho thấy phân bố cường độ trên mặt cắt của chùm sáng đầu ra, trong tất cả các trường hợp bước sóng khảo sát, đều có dạng vòng sáng với cường độ bằng 0 tại tâm. Các chùm tia có cường độ phân bố đồng đều hơn hẳn trường hợp sử dụng vi linh kiện làm từ vật liệu thủy tinh mềm borosilicate [17]. Điều này là do ảnh hưởng của hiệu ứng dẫn sóng được giảm thiểu khi chùm tia chỉ lan truyền một quãng ngắn trong môi trường không đồng nhất ($7 \mu\text{m}$). Hình 2 cũng cho thấy pha của các chùm sáng đầu ra đều có cấu trúc xoắn ốc đơn với điểm kỳ dị pha nằm chính xác tại tâm của các cấu trúc. Điều này chứng tỏ các chùm sáng thu được là các vi xoáy quang học với điện tích tô pô bậc cơ bản. Nghĩa là vi linh kiện Broadband-nVPM có độ dày $d_1 = 7 \mu\text{m}$ cho phép chuyển đổi chùm Gauss thành chùm vi xoáy quang học bậc cơ bản trong không khí cho dải sóng rộng 85 nm từ 550 nm đến 633 nm.

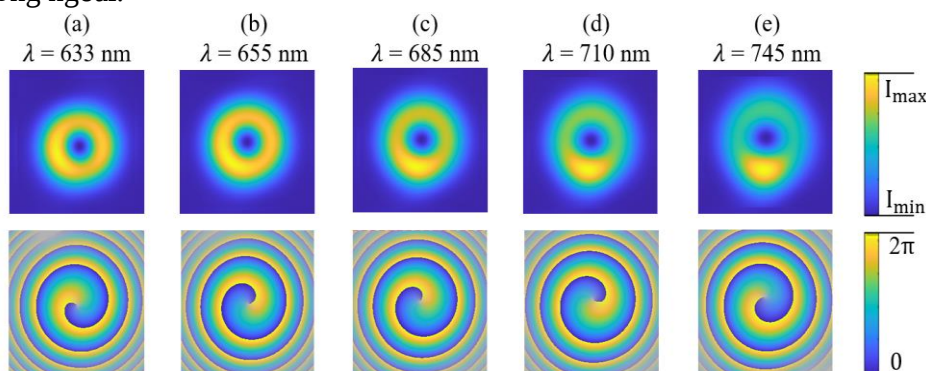
Nhóm các mô phỏng tiếp theo được thực hiện để kiểm tra tính chất băng thông rộng của thiết kế vi linh kiện pha xoáy Broadband-nVPM với độ dày $d_1 = 8.5 \mu\text{m}$ trong không khí ($n = 1$). Bước sóng đầu vào theo tính toán lý thuyết nằm trong dải sóng từ 633 nm đến 745 nm. Kết quả mô phỏng phân bố cường độ và cấu trúc pha của chùm tia đầu ra sau khi lan truyền trong không khí một quãng $2000 \mu\text{m}$ được biểu diễn trên Hình 3. Kết quả mô phỏng thu được cho thấy, ở tất cả các bước sóng, chùm tia đầu ra có cường độ phân bố tương đối đồng đều theo hình dạng bánh donut và có cấu trúc pha xoắn đơn với điểm kỳ dị pha nằm chính xác tại tâm. Nghĩa là chúng tôi thu được xoáy quang học bậc một tại tất cả các trường hợp bước sóng đang khảo sát. Các kết quả này xác nhận rằng vi linh kiện Broadband-nVPM được thiết kế hoạt động tốt trong không khí cho dải sóng rộng 112 nm từ 633 nm đến 745 nm.



Hình 3. Mô phỏng cường độ mặt cắt (hàng trên) và cấu trúc pha (hàng dưới) của xoáy quang học tạo bởi Broadband-nVPM có độ dày $d_1 = 8.5 \mu\text{m}$ trong dải sóng từ 633 nm đến 745 nm trong không khí. Kích thước các hình con là $125 \mu\text{m} \times 125 \mu\text{m}$.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi cũng đánh giá sự ảnh hưởng của môi trường ngoài lên chức năng quang học của các thiết kế vi linh kiện pha xoáy cấu trúc nano bằng thông rộng. Ở phần cuối của báo cáo, chúng tôi phân tích cho một trường hợp đại diện là vi linh kiện pha xoáy Broadband-nVPM với độ dày $d_1 = 8.5 \mu\text{m}$ đặt trong dung dịch ethanol. Chúng tôi thực hiện các phép đo để kiểm tra chiết suất thực của ethanol tại các bước sóng khảo sát từ 633 nm đến 745 nm. Trong nhóm mô phỏng này, chúng tôi đã sử dụng thiết kế vi linh kiện pha xoáy cấu trúc nano ở phần trên, tuy nhiên thay đổi môi trường ngoài từ không khí thành ethanol. Các kết quả mô phỏng được biểu diễn trên Hình 4.

Hình 4 cho thấy kết quả mô phỏng chùm tia đầu ra trong trường hợp môi trường ngoài là ethanol tương tự như trong trường hợp không khí. Chúng tôi vẫn thu được xoáy quang học bậc 1 tương tự cho các bước sóng khảo sát trong dải bước sóng từ 633 nm đến 745 nm khi nhúng loại linh kiện này trong dung dịch ethanol. Như vậy, các thiết kế vi linh kiện pha xoáy bằng thông rộng, cấu trúc nano giữ nguyên các đặc tính quang học trong môi trường ngoài.



Hình 4. Mô phỏng cường độ mặt cắt (hàng trên) và cấu trúc pha (hàng dưới) của xoáy quang học tạo bởi thiết kế vi linh kiện Broadband-nVPM có độ dày $d_1 = 8.5 \mu\text{m}$ trong dải bước sóng từ 633 nm đến 745 nm trong ethanol. Kích thước các hình con là $125 \mu\text{m} \times 125 \mu\text{m}$

Lưu ý rằng, ở tất cả các trường hợp đã phân tích, chất lượng của chùm tia xoáy được tạo ra bởi vi linh kiện với độ dày nhất định cao hơn (cường độ phân bố đồng đều hơn) đối với các bước sóng ngắn hơn. Điều này rất có thể là do pha xoáy dư ra lớn hơn 2π một chút đối với các bước sóng ngắn hơn. Đối với các bước sóng dài hơn, trên thực tế, điểm kỳ dị pha không hoàn chỉnh nên chùm tia bị biến dạng mạnh hơn khi lan truyền bởi hiệu ứng dẫn sóng.

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, hai vi linh kiện pha xoáy chiết suất biến đổi có cấu trúc nano đã được đề xuất để tạo ra chùm xoáy quang học bằng thông rộng trong vùng bước sóng khả kiến. Hai vi linh kiện được thiết kế bằng kỹ thuật cấu trúc nano hóa sử dụng cặp vật liệu thủy tinh mềm có độ lệch chiết suất cao. Điều này cho phép các vi linh kiện có độ dày nhỏ để tạo ra tổng biến đổi pha xoáy 2π với độ phân bố cường độ đồng đều hơn.

Các kết quả mô phỏng và tính toán lý thuyết đã chứng tỏ vi linh kiện Broadband-nVPM có độ dày $d_1 = 7 \mu\text{m}$ cho phép chuyển đổi chùm Gauss ở đầu vào thành chùm vi xoáy quang bậc cơ bản trong không khí cho dải sóng rộng 85 nm từ 550 nm đến 633 nm. Mặt khác, vi linh kiện Broadband-nVPM bậc 1 có cùng cấu trúc nhưng với độ dày $d_1 = 8.5 \mu\text{m}$ hoạt động tốt trong không khí cho dải sóng rộng 112 nm từ 633 nm đến 745 nm. Đồng thời, chúng tôi cũng chứng tỏ được các tính chất của vi linh kiện này được bảo toàn trong môi trường ngoài là chất lỏng (ethanol là một ví dụ). Điều này hướng tới các tiềm năng ứng dụng của xoáy quang học ở mức độ vi mô như thao tác điều khiển vi hạt hoặc vi cơ laser vi mô trong các môi trường ngoài.

Những kết quả trên đã xác nhận tính linh hoạt của phương pháp nano hóa cấu trúc chúng tôi đã đề xuất, cho phép thiết kế các vi linh kiện pha xoáy hoạt động trong các dải bước sóng khác nhau tùy thuộc vào đặc tính tán sắc các loại vật liệu thủy tinh. Đồng thời, các thiết kế có thể được chế tạo bằng phương pháp ghép-kéo sợi cải tiến với chi phí thấp. Đây là phương pháp cho phép tạo ra các vi linh kiện quang học vi mô với cấu hình chiết suất bất kỳ chẳng hạn như: xoáy, thấu kính sắc thực, axicon. Điều này hứa hẹn cho việc tạo ra những mẫu linh kiện pha xoáy với các đặc tính đặc biệt để tạo ra các chùm tia xoáy quang học độc đáo như xoáy sắc thực và xoáy trắng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman (1992), *Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes*, Phys. Rev. A, 45(11), 8185-8189.
- [2] Yao, A. M. & Padgett, M. J. (2011), *Orbital angular momentum: Origins, behavior and applications*. Adv. Opt. Photonics 3(2), 161-204.
- [3] Shen, Y. et al. (2019), Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities, Light Sci. Appl. 8(1), 1-29.
- [4] K. I. Willig, et al. (2006), STED microscopy reveals that synaptotagmin remains clustered after synaptic vesicle exocytosis, Nature 440, 935-939.
- [5] M. Padgett and R. Bowman (2011), *Tweezers with a twist*, Nature Photonics 5(6), 343-348.

- [6] T. Omatsu, K. Miyamoto, K. Toyoda, R. Morita, Y. Arita, and K. Dholakia (2019), *A New Twist for Materials Science: The Formation of Chiral Structures Using the Angular Momentum of Light*, Advanced Optical Materials, 1801672, 1-18.
- [7] J. Wang (2016), *Advances in communications using optical vortices*, Photonics Res. 4(5), pp.B14-B28.
- [8] K. Sueda, G. Miyaji, et al. (2004), Laguerre-Gaussian beam generated with a multilevel spiral phase plate for high intensity laser pulses, Opt. Express, vol.12, 3548-3553.
- [9] T. Jankowski, N. Bennis, et al. (2024), *Optical vortices by an adaptive spiral phase plate*, Optics & Laser Technology, vol. 176, pp.111029.
- [10] G. Campbell, B. Hage, et al. (2012), Generation of high-order optical vortices using directly machined spiral phase mirrors, Applied Optics, 51(7), pp. 873-876.
- [11] N. R. Heckenberg, R. McDuff, C. P. Smith, and A. G. White (1992), Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms, Opt. Lett., 17(3), pp. 221.
- [12] M. Li, S. Elston, C. He, X. Qiu, et al. (2024), *Printed Liquid Crystal Optical Vortex Beam Generators*, Advanced Optical Materials, 12(20), pp. 2400450.
- [13] N. Anaya Carvajal, C. H. Acevedo, et al. (2017), Generation of Perfect Optical Vortices by Using a Transmission Liquid Crystal Spatial Light Modulator, Int. J. Opt., vol. 2017.
- [14] A. Zukauskas, M. Malinauskas, and E. Brasselet (2013), *Monolithic generators of pseudo-nondiffracting optical vortex beams at the microscale*, Appl. Phys. Lett. 103, pp. 181122.
- [15] R. S. Rodrigues Ribeiro, P. Dahal, A. Guerreiro, et al., (2016), *Optical fibers as beam shapers: from Gaussian beams to optical vortices*, Opt. Lett., 41(10), pp. 2137.
- [16] K. Weber, F. Hütt, S. Thiele, T. Gissibl, et al. (2017), *Single mode fiber based delivery of OAM light by 3D direct laser writing*, Opt. Express 25(17), pp. 19672-19679.
- [17] K. Switkowski et al. (2017), *Formation of optical vortices with all-glass nanostructured gradient index masks*, Opt Express, 25(25), pp.31443.
- [18] H. T. Nguyen, K. Switkowski, et al., (2020), *Optical characterization of single nanostructured gradient index vortex phase masks fabricated by the modified stack-and-draw technique*, Opt. Commun. 463, pp.125435.
- [19] Hue Thi Nguyen, et al. (2022), *Transmission of an optical vortex beam in antiresonant fibers generated in an all-fiber system*, Opt. Express 30, pp.45635-45647.
- [20] H.T. Nguyen, et al. (2023), *Broadband optical vortex beam generation using flat-surface nanostructured gradient index vortex phase masks*, Sci Rep 13, pp. 20255.
- [21] H. T. Nguyen, D. Pysz, H. Van Le, R. Stepien, T. Omatsu, W. Krolikowski, & R. Buczynski, (2024), *Generation of high-order optical vortices with nanostructured phase masks*, Optics and Laser Technology, 172, pp. 110490.
- [22] R. Stepien, J. Cimek, D. Pysz, I. Kujawa, et al. (2014), *Soft glasses for photonic crystal fibers and microstructured optical components*, Opt. Eng. 53(7), pp. 071815.

NUMERICAL STUDY ON BROADBAND OPTICAL VORTEX BEAM IN THE VISIBLE RANGE USING NANOSTRUCTURED VORTEX PHASE COMPONENTS

Nguyen Thi Hue, Nguyen Thanh Tung, Nguyen Thuy Linh, Cao Minh Khai,
Tran Thi Hai, Le Van Hieu

ABSTRACT

In this study, we designed two compact flat-surface nanostructured gradient phase components to generate broadband optical vortex beams in the visible wavelength range. We numerically evaluated the optical performance of these components in air and liquid environments (ethanol). The results show that the proposed vortex phase components with thicknesses of $7\ \mu\text{m}$ and $8.5\ \mu\text{m}$ can convert Gaussian beams into fundamental optical vortices within certain visible wavelength ranges. These optical vortex properties are preserved when the components are immersed in ethanol, suggesting potential applications in liquid environments such as microfluidics.

Keywords: Optical vortices, nanostructured micro-optical component, singular optics, broadband.

** Ngày nộp bài: 24/10/2024; Ngày gửi phản biện: 06/12/2024; Ngày duyệt đăng: 20/03/2025*

** Bài báo là kết quả nghiên cứu từ đề tài NCKH cấp cơ sở (mã số ĐT-2023-02) của Trường Đại học Hồng Đức.*