

NGHIÊN CỨU VỀ SỰ HÌNH THÀNH XOÁY QUANG HỌC TRONG MỘT SỐ MÔI TRƯỜNG SỬ DỤNG CÙNG MỘT VI LINH KIỆN XOÁY QUANG CẤU TRÚC NANO

Nguyễn Thùy Linh¹, Nguyễn Thị Thảo², Đỗ Thị Huệ Linh¹, Nguyễn Thanh Tùng³,
Vũ Tiến Tuấn Minh⁴, Nguyễn Thị Ngọc², Nguyễn Thị Loan², Nguyễn Thị Huệ²

TÓM TẮT

Trong bài báo này, chúng tôi trình bày nghiên cứu về mô phỏng tạo xoáy quang học trong vùng ánh sáng khả kiến sử dụng thiết kế vi linh kiện xoáy quang có bề mặt phẳng, chiết suất biến đổi và cấu trúc nano. Mặt cắt của vi linh kiện xoáy quang này có chiết suất biến đổi tuyến tính từ thấp đến cao theo góc phương vị từ 0 tới 2π . Kết quả mô phỏng khẳng định các thiết kế vi linh kiện xoáy quang cấu trúc nano có khả năng tạo xoáy quang học ổn định bậc cơ bản. Đồng thời, sự ảnh hưởng của một số môi trường chất lỏng đối với quá trình tạo xoáy quang khi sử dụng cùng một linh kiện trên cũng được đánh giá trong nghiên cứu này. Chúng tôi thu được các xoáy quang học hình thành trong các môi trường khác nhau, có bậc không đổi $l = 1$ – Độ dịch pha không đổi. Điều này cho thấy các thiết kế vi linh kiện xoáy quang cấu trúc nano, chiết suất biến đổi là loại linh kiện tiềm năng để chế tạo và sử dụng cho các nghiên cứu thực nghiệm và ứng dụng trong môi trường chất lỏng ở cấp độ vi mô.

Từ khóa: Xoáy quang học, vi linh kiện cấu trúc nano, quang vô định, môi trường ngoài.

DOI: <https://doi.org/10.70117/hdujs.2.2024.741>

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Một chùm xoáy quang học là một chùm sáng có cường độ mặt cắt là một vòng sáng dạng bánh rán dough-nut, pha xoắn ốc và điện tích topo l ứng với động lượng góc quỹ đạo mang theo [1], [2]. Mỗi giá trị điện tích topo l được quy định bởi tổng biến đổi pha của chùm xoáy ứng với $2\pi l$. Xoáy quang đã và đang là đối tượng nghiên cứu trọng tâm của lĩnh vực quang học kỳ dị thuộc quang học hiện đại [3]. Việc tạo và kiểm soát các xoáy quang học là mối quan tâm hàng đầu bởi các ứng dụng của chúng trong nhiều lĩnh vực [4], [5], chẳng hạn như nhíp quang học [6], [7], vi cơ laze [8], [9], plasmonics [10], hoặc kính hiển vi suy giảm phát xạ kích thích [11]. Hơn nữa, xoáy quang học còn có những đóng góp quan trọng trong sự phát triển của thông tin quang - Sử dụng động lượng góc quỹ đạo để ghép kênh tín hiệu dữ liệu cho phép tăng dung lượng của các liên kết truyền thông và hiệu suất phổ [12-14].

¹ Sinh viên lớp K24-ĐHSP Vật lý CLC, Khoa Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Hồng Đức

² Khoa Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Hồng Đức; Email: nguyenthihuevl@hdu.edu.vn

³ Sinh viên lớp K25-ĐHSP Vật lý, Khoa Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Hồng Đức

⁴ Sinh viên lớp K23-ĐHSP Vật lý CLC, Khoa Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Hồng Đức

Một số kỹ thuật đã được đề xuất để tạo ra các xoáy quang học trong vài thập kỷ qua. Một trong những giải pháp trực tiếp nhất là dựa vào việc truyền chùm tia sáng thông thường qua mặt nạ pha xoắn ốc (Spiral phase plate - SPP) để áp sự lệch pha xoắn ốc từ bề mặt linh kiện lên chùm tia truyền qua và biến nó thành một chùm xoáy [15], [16]. Một phương pháp khác là sử dụng thạch bản in ba chiều [17], trong đó sự nhiễu xạ của chùm tia Gauss từ các thạch bản dẫn đến sự xuất hiện của các xoáy quang học ở các bậc nhiễu xạ thứ cấp. Việc điều chế pha với độ chính xác cao thường đạt được bằng cách sử dụng các khối tinh thể lỏng định hướng như trong bộ điều biến ánh sáng không gian [18], [19].

Các kỹ thuật trên thường được sử dụng để chế tạo xoáy quang có kích thước tiêu chuẩn, nhưng lại bị hạn chế khi áp dụng cho việc tạo ra chùm tia xoáy có kích thước micron mét (xoáy vi quang). Mà chúng rất cần thiết cho các ứng dụng sử dụng các thiết bị quang học tích hợp và hệ thống sợi quang. Gần đây, công nghệ xử lý vật liệu laser quang học thông qua trùng hợp hai photon [20] hoặc in 3D trực tiếp [21] đã được vận dụng thành công để tạo ra mặt nạ SPP có kích thước micromet. Tuy nhiên, các phương pháp này thường rất tốn kém và thường có những hạn chế về độ mất mát, ảnh hưởng của môi trường, khả năng tích hợp với sợi quang.

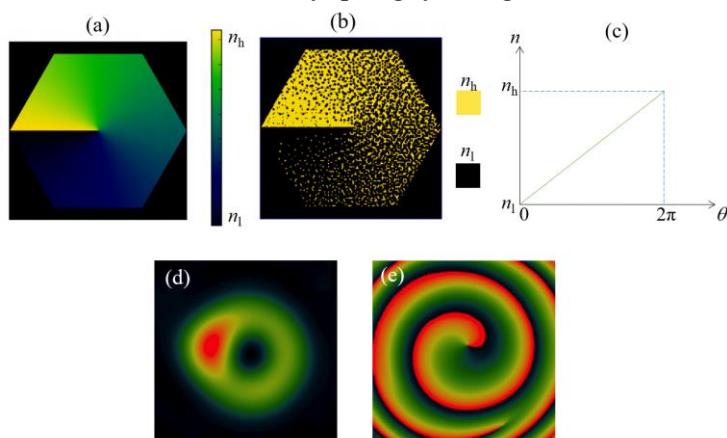
Trong nghiên cứu này, chúng tôi trình bày nghiên cứu bằng lý thuyết và mô phỏng quá trình hình thành xoáy quang bậc cơ bản ($l = 1$) trong vùng ánh sáng khả kiến sử dụng các vi linh kiện pha xoáy cấu trúc nano có bề mặt phẳng (Nanostructured gradient index vortex phase mask - NVPM). Loại vi linh kiện pha xoáy này lần đầu tiên được nghiên cứu bởi nhóm GS. Buczynski vào năm 2017 [22], nghiên cứu chuyên sâu và cải tiến hướng đến các ứng dụng hữu ích [23] - [25]. Vi linh kiện NVPM có chiết suất biến đổi tuyến tính theo góc phương vị bởi sự sắp xếp của các cấu tử nano làm từ hai loại vật liệu khác nhau. Trong nghiên cứu này, chúng tôi lựa chọn hai loại vật liệu thủy tinh mềm với các thành phần pha tạp là các kim loại nặng để thiết kế cấu trúc nhằm đạt được xoáy quang bậc cơ bản với độ phân bố cường độ đồng đều. Đồng thời, chúng tôi khảo sát sự ảnh hưởng của các yếu tố nhiễu (ảnh hưởng của môi trường không khí, rượu, nước) đối với sự tạo thành xoáy quang tạo bởi cùng một thiết kế vi linh kiện quang cấu trúc nano. Các mô phỏng được thực hiện cho hai bước sóng điển hình trong vùng ánh sáng khả kiến gồm 532 nm và 633 nm. Kết quả nghiên cứu sẽ cung cấp kiến thức cơ sở cần thiết về vi linh kiện NVPM cho nghiên cứu thực nghiệm, chế tạo và ứng dụng xoáy quang.

2. NGUYÊN LÝ CẤU TRÚC VÀ VẬT LIỆU THIẾT KẾ VI LINH KIỆN NVPM

Việc tạo ra xoáy quang học đòi hỏi phải có sự dịch pha phương vị là $\Delta\varphi = 2\pi l$ với l là điện tích topo của chùm xoáy và nhận các số nguyên dương ($l = 1$ nghĩa là dọc theo trục lan truyền của chùm xoáy chỉ tồn tại 1 xoáy mặt sóng). Nhìn chung, sự dịch pha như vậy có thể đạt được bằng sự thay đổi độ dày của bề mặt linh kiện hoặc chiết suất của linh kiện theo dạng xoắn ốc. Trong nghiên cứu này chúng ta quan tâm đến sự thay đổi chiết suất của linh kiện như biểu diễn trên Hình 1.(a). Khi đó, độ dày của vi linh kiện d được cố định, chiết suất biến đổi tuyến tính theo góc phương vị θ . Tổng biến đổi pha mong muốn đạt được cho bước sóng xác định λ sẽ dựa trên độ lệch chiết suất giữa vùng cao nhất n_{high} (tại góc $\theta = 2\pi$) và thấp nhất n_{low} (tại $\theta = 0$):

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} (n_{high} - n_{low}) = 2\pi l, \quad (*)$$

Tuy nhiên, trong thực tế việc chế tạo vi linh kiện có chiết suất biến đổi liên tục không thể thực hiện được khi chỉ sử dụng một loại vật liệu rắn duy nhất. Giải pháp cho vấn đề này là sử dụng lý thuyết môi trường hiệu dụng (Effective medium theory - EMT) [26]. Khi đó, vi linh kiện được cấu tạo bởi các vùng (cấu tử) có kích thước nano làm từ hai vật liệu có chiết suất khác nhau. Các cấu tử nano được sắp xếp theo cấu trúc xác định sao cho, theo EMT, chiết suất hiệu dụng của vi linh kiện này (Hình 1.(b)) sẽ được phân bố tương tự như nguyên tắc biến đổi chiết suất của vi linh kiện xoay quang lý tưởng như trên Hình 1.(a).



Hình 1. Thiết kế cấu trúc trung tâm của vi linh kiện xoay quang học có bề mặt phẳng với sự phân bố chiết suất biến đổi tuyến tính liên tục lý tưởng theo góc phương vị θ (a, c) và thiết kế cấu trúc nano tương ứng (b). Mô phỏng xoay quang học với các vi linh kiện này sử dụng vật liệu thủy tinh mềm borosilicate (NC) đã công bố trên [14]: Phân bố cường độ (d) và cấu hình pha (e).

Trong nghiên cứu trước đây về loại vi linh kiện bề mặt phẳng cấu trúc nano này [22], chúng tôi nhận thấy với vi linh kiện xoay được chế tạo bằng hai loại vật liệu thủy tinh mềm borosilicate (độ lệch chiết suất là $dn = 0.025$ trong vùng ánh sáng khả kiến) có hiện tượng biến dạng xoay không mong muốn như trên Hình 1.(d,e). Chùm sáng có xu hướng định vị ở vùng chiết suất cao của vi linh kiện bởi hiện tượng dẫn sóng ánh sáng khi nó lan truyền quãng dài trong môi trường không đồng nhất. Để giảm hiện tượng không mong muốn này (cường độ sáng phân bố đều hơn), ta có thể giảm độ dày d của vi linh kiện. Điều này dẫn tới yêu cầu tăng độ lệch chiết suất Δn do mối liên hệ trên công thức (*).

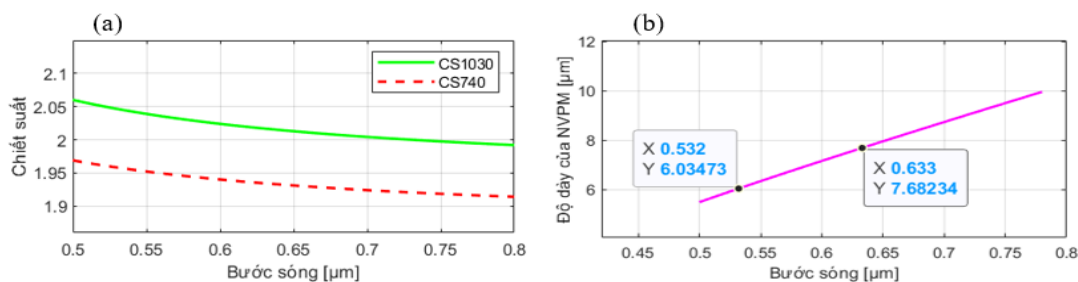
Trong nghiên cứu này chúng tôi lựa chọn cặp vật liệu thủy tinh mềm pha tạp nhóm oxit kim loại nặng chì-bismuth-gallium được tổng hợp tại Viện nghiên cứu vi điện tử và quang tử ký hiệu là CS740 and CS1030 [27]. Chúng có độ lệch chiết suất là $\Delta n = 0.078 \div 0.089$ và có độ truyền quang lớn cho vùng ánh sáng khả kiến. Chúng tôi sử dụng các thông tin về độ tán sắc của hai loại vật liệu CS này (hình 2.(a)) và dựa trên công thức (*) tính toán được độ dày cần thiết của các vi linh kiện pha xoay quang bậc cơ bản ($l = 1$):

$$d = \frac{\lambda}{(n_{CS1030} - n_{CS740})}$$

Hình 2.(b) biểu diễn độ dày của vi linh kiện được tính toán để tạo xoáy quang bậc cơ bản tại các bước sóng xác định trong vùng khả kiến.

Chúng tôi lựa chọn nghiên cứu xoáy quang tại hai bước sóng $\lambda = 532$ nm và $\lambda = 633$ nm để 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 micro mét trong lĩnh vực công nghệ vật liệu tiên tiến. Đồng thời, nghiên cứu với xoáy vi quang tại bước sóng 633 nm 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 của các laze He-Ne mà thường có ở hầu hết các phòng thí nghiệm ở các trường đại học cho các nghiên cứu cơ bản và bài học thí nghiệm.

Đối với hai bước sóng $\lambda = 532$ nm và $\lambda = 633$ nm, độ dày cần thiết của thiết kế vi linh kiện pha xoáy cấu trúc nano bậc cơ bản là $d_{532\text{nm}} = 6.0$ μm và $d_{633\text{nm}} = 7.7$ μm . Với cặp vật liệu mới này, chúng tôi vẫn khảo sát thiết kế vi linh kiện NVPM với đường kính ngoài là 125 μm và cấu trúc nano để tạo xoáy được đặt ở trung tâm có đường chéo dài là 20 μm (đường chéo ngắn là 17 μm).



Hình 2. (a) Chiết suất của vật liệu CS740 và CS1030. (b) Độ dày của vi linh kiện được tính toán để tạo xoáy quang bậc cơ bản tại vùng khả kiến

Hai thiết kế vi linh kiện xoáy quang NVPM này được kiểm tra chức năng hình thành xoáy quang học trong không khí bằng phương pháp mô phỏng mô phỏng - phương pháp lan truyền ánh sáng dựa trên biến đổi Fourier được thực hiện trên nền tảng ứng dụng Matlab. Đồng thời, chúng tôi cũng kiểm tra sự ảnh hưởng của một số môi trường ngoài tới sự tạo thành xoáy quang và các tính chất của chúng như nước và rượu.

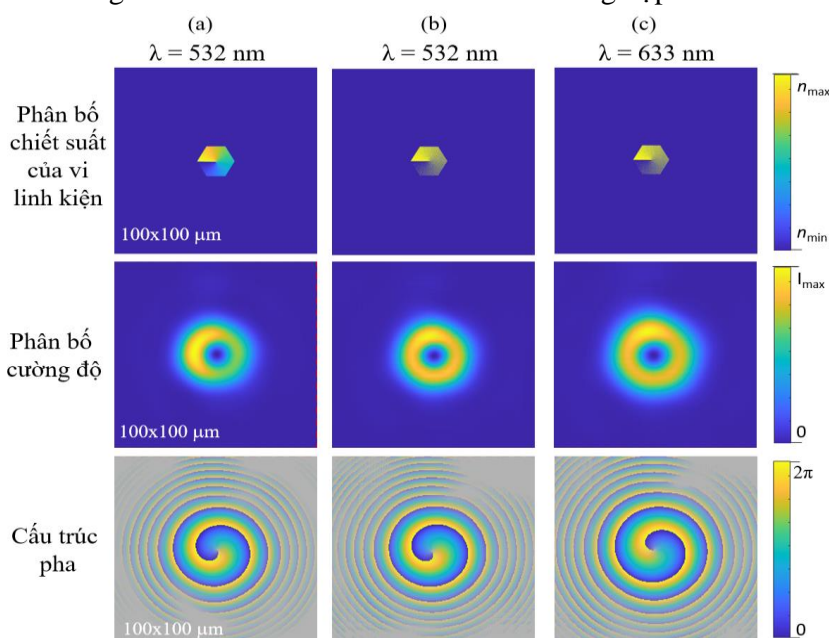
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Mô phỏng xoáy quang học với vi linh kiện xoáy quang cấu trúc nano trong không khí

Trong phần này, chúng tôi tập trung thảo luận về mô phỏng kiểm tra chức năng hoạt động của vi linh kiện được thiết kế NVPM trong môi trường không khí. Về nguyên lý, chùm sáng tới lan truyền qua thiết kế vi linh kiện xoáy quang cấu trúc nano tạo thành xoáy quang học (sự biến đổi chiết suất dẫn đến sự dịch pha xoắn ốc), sau đó nó lan truyền trong môi trường ngoài đồng nhất (không khí, $n = 1$). Các thông số của vi linh kiện như đã thiết kế và tính toán lý thuyết. Các lan truyền sóng đều được mô phỏng trong vùng không gian $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m} \times 2000 \mu\text{m}$. Độ phân giải lưới không gian là 0,1 μm để đảm bảo điều kiện phép tính toán số trong phương pháp biến đổi Fourier.

Với tất cả mô phỏng, chúng tôi sử dụng chùm tia tới là chùm tia Gauss có bước sóng đã chọn và có đường kính là $D = 18 \mu\text{m}$. Đây là kết quả thu được sau khi chúng tôi đã kiểm tra bằng mô phỏng quá trình tạo xoáy quang của các thiết kế vi linh kiện sử dụng chùm tia tới có đường kính khác nhau gồm $D = 12, 15, 18, 20, 23, 28, 30, 35 \mu\text{m}$. Kết quả mô phỏng cho thấy, kích thước của chùm tia tới $18 \mu\text{m}$ 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 trong nghiên cứu.

Kết quả mô phỏng xoáy quang học trong không khí tại hai bước sóng $\lambda = 532 \text{ nm}$ và $\lambda = 633 \text{ nm}$ được biểu diễn trên Hình 3 (a,b) và (c) tương ứng. Hình ảnh cấu trúc phân bố cường độ ánh sáng (hàng giữa) và cấu trúc pha (hàng dưới cùng) trên mặt phẳng trục giao của xoáy quang được quan sát tại khoảng cách $1000 \mu\text{m}$ tính từ mặt sau của thiết kế vi linh kiện NVPM. Chúng tôi thực hiện mô phỏng cho cả thiết kế vi linh kiện xoáy quang lý tưởng và cấu trúc nano để so sánh. Mô phỏng chỉ ra rằng, kết quả tạo ra cho hai loại thiết kế là tương đồng nên chúng tôi chỉ biểu diễn trên Hình. 3 cho trường hợp của bước sóng 532 nm .



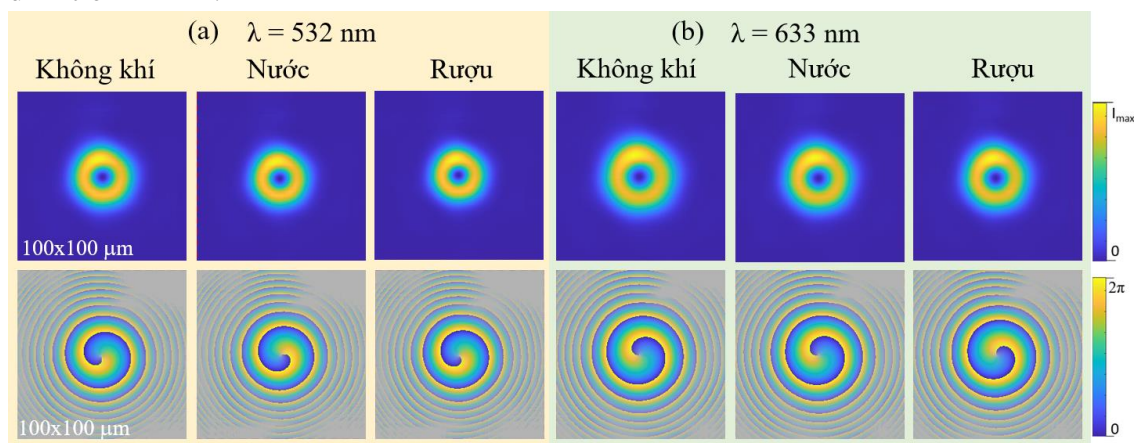
Hình 3. Phân bố chiết suất của các thiết kế vi linh kiện xoáy quang (Hàng trên cùng). Mô phỏng phân bố cường độ ánh sáng (hàng giữa) và cấu hình pha (hàng dưới cùng) trên mặt cắt của xoáy được hình thành khi chiếu sáng vi linh kiện xoáy ở bước sóng $\lambda = 532 \text{ nm}$ (a,b) và 633 nm (c)

Hình 3 cho thấy các chùm sáng thu được rõ ràng là đặc biệt kỳ dị với cường độ bằng 0 tại tâm ứng với điểm pha không xác định trên cấu trúc pha xoắn ốc của nó. Sự phân bố cường độ trên vòng sáng tương đối đồng đều khi so sánh với kết quả thu được cho thiết kế sử dụng thủy tinh mềm borosilicate (Hình 1.(c)). Đồng thời cấu trúc pha của chùm sáng thu chỉ có một xoắn đơn chứng tỏ bậc topo của xoáy quang thu được là bậc cơ bản ($l = 1$). Như vậy, chúng ta thu được xoáy quang học bậc cơ bản tại bước sóng 532 nm và 633 nm với các thiết kế vi linh kiện xoáy quang cấu trúc nano đặt trong không khí.

3.2. Nghiên cứu sự ảnh hưởng của một số môi trường chất lỏng lên sự hình thành xoáy quang học của vi linh kiện xoáy quang cấu trúc nano

Để kiểm tra bằng mô phỏng sự ảnh hưởng của môi trường ngoài tới sự tạo thành xoáy quang và các tính chất của chúng. Chúng tôi lựa chọn hai loại chất lỏng phổ thông và không độc hại để nghiên cứu là nước và rượu. Chúng thường được dùng trong cuộc sống hằng ngày và các ứng dụng thực tiễn trong y học. Với nhiệm vụ này chúng tôi thực hiện một số phép đo để kiểm tra chiết suất thực của các chất lỏng thường dùng trong phòng thí nghiệm, gồm nước cất và ethanol. Chúng có chiết suất tương ứng là $n_{\text{nước}} = 1.3337$ và $n_{\text{ethanol}} = 1.3637$ cho bước sóng 532 nm và $n_{\text{nước}} = 1.3317$ và $n_{\text{ethanol}} = 1.3604$ tại bước sóng 633 nm.

Trong nhóm mô phỏng này, chúng tôi đã sử dụng các thiết kế ở phần trên, tuy nhiên thay đổi môi trường ngoài bằng nước và rượu. Các kết quả mô phỏng được biểu diễn trên Hình 4.



Hình 4. Mô phỏng các xoáy quang hình thành từ cùng một thiết kế vi linh kiện pha xoáy cấu trúc nano trong các môi trường không khí, nước và rượu. Mô phỏng cho bước sóng 532 nm với thiết kế vi linh kiện có độ dày $d_{532\text{nm}} = 6.0 \mu\text{m}$ (a). Mô phỏng cho bước sóng 633 nm với thiết kế vi linh kiện có độ dày $d_{633\text{nm}} = 7.7 \mu\text{m}$ (b)

Hình 4 cho thấy sự xuất hiện của điểm pha kỳ dị tại tâm của chùm tia ló sau khi truyền qua thiết kế. Đồng thời cấu trúc pha quan sát được trong tất cả các trường hợp chỉ ra rằng giá trị điện tích topo của các xoáy quang không đổi ($l = 1$). Tức là độ dịch pha $\Delta\varphi$ không đổi và đều bằng 2π . Hơn nữa, ta có thể nhận thấy, sự phân bố cường độ tương đối đồng đều và tương tự cho mọi trường hợp. Tuy nhiên, ở cả hai bước sóng 532 nm và 633 nm, kết quả mô phỏng đều chỉ ra rằng kích thước của chùm tia xoáy tạo ra tại cùng vị trí nhưng trong các môi trường chất lỏng thì nhỏ hơn trong không khí. Điều này được giải thích bởi sự giảm của độ chênh lệch chiết suất giữa vi linh kiện và môi trường ngoài làm giảm giá trị góc khúc xạ của chùm tia ló.

Như vậy, chúng tôi đã chứng minh rằng các NVPM được thiết kế hoạt động tốt như bộ chuyển đổi mode từ chùm Gauss sang chùm xoáy quang không chỉ trong không khí mà còn trong nước và rượu. Nói cách khác, các thiết kế vi linh kiện pha xoáy có cấu trúc nano của chúng tôi bảo toàn các đặc tính quang học của chúng trong các môi trường quang học trong suốt khác nhau.

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, bằng cách sử dụng phương pháp mô phỏng dựa trên nền tảng Matlab kết hợp với các tính toán lý thuyết, chúng tôi đã chứng minh sự tạo thành xoáy quang học chất lượng cao tại hai bước sóng $\lambda = 532$ nm và 633 nm trong vùng ánh sáng nhìn thấy. Kết quả đạt được với hai thiết kế vi linh kiện xoáy quang cấu trúc nano có cấu trúc và các tham số kích thước giống nhau chỉ khác nhau về độ dày ($d_{532\text{nm}} = 6.0$ μm và $d_{633\text{nm}} = 7.7$ μm). Điều này hướng tới ưu thế trong chế tạo thực tiễn các vi linh kiện.

Các kết quả mô phỏng cũng chứng tỏ tính ổn định và sự bảo toàn điện tích topo $l = 1$ của các xoáy quang được tạo ra bởi cùng các thiết kế vi linh kiện xoáy quang cấu trúc nano trên trong một số môi trường trong suốt như không khí, nước và rượu. Tính chất này chính là điểm nổi bật của loại vi linh kiện này với tiềm năng sử dụng trong nhiều môi trường khác nhau hướng đến các ứng dụng về chất lỏng với cấp độ vi mô, đây là điều không thể đạt được ở các phương pháp tạo xoáy quang khác.

Hơn nữa, vi linh kiện có bề mặt phẳng, song song nên có thể dễ dàng tích hợp với các thành phần quang học khác cũng như sợi quang tạo ra tiềm năng ứng dụng trong lĩnh vực truyền dẫn thông tin quang.

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), p.8185-8189.
- [2] M. Padgett, J. Courtial, and L. Allen (2004), *Light's orbital angular momentum*, Phys Today 57(5), p.35-40.
- [3] G. J. Gbur (2016), *Singular Optics*, CRC.
- [4] L. Zhu, J. Wang (2019), *A review of multiple optical vortices generation: methods and applications*, Frontiers of Optoelectronics 12(1), p.52-68.
- [5] Y. Shen, X. Wang, Z. Xie, C. Min, X. Fu, and Q. Liu (2019), *Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities*, Light: Science and Applications, 8(1), p.1-29.
- [6] D. G. Grier (2003), *A revolution in optical manipulation*, Nature 424, p.810-816.
- [7] M. Padgett, R. Bowman (2011), *Tweezers with a twist*, Nature Photonics 5(6), p. 343-348.
- [8] K. Toyoda, F. Takahashi, S. Takizawa, Y. Tokizane, K. Miyamoto, R. Morita, T. Omatsu (2013), *Transfer of Light Helicity to Nanostructures*, Phys. Rev. Lett. 110(14), p.143603.
- [9] 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, 1801672, p.1-18.
- [10] Z. J. Hu, P. S. Tan, S. W. Zhu, X. C. Yuan (2010), *Structured light for focusing surface plasmon polaritons*, Opt. Express 18(10), p.10864-10870.
- [11] S. Fühapter, A. Jesacher, S. Bernet, M. Ritsch-Marte (2005), *Spiral phase contrast imaging in microscopy*, Opt Express 13(3), p.689.
- [12] A. E. Willner, H. Huang, Y. Yan, Y. Ren, N. Ahmed, G. Xie, C. Bao, L. Li, Y. Cao, Z. Zhao, J. Wang, M. P. J. Lavery, M. Tur, S. Ramachandran, A. F. Molisch, N. Ashrafi, S. Ashrafi (2015), *Optical communications using orbital angular momentum beams*, Adv. Opt. Photonics 7(1), p.66-106.

- [13] G. Gibson, J. Courtial, M.J. Padgett, M. Vasnetsov, V. Pas'ko, S.M. Barnett, S. Franke-Arnold (2004), *Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum*, Opt. Express, 12(22), p.5448.
- [14] J. Wang (2016), *Advances in communications using optical vortices*, Photonics Res. 4(5), p.B14-B28.
- [15] 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, p.4077-4083.
- [16] M. W. Beijersbergen, R. P. C. Coerwinkel, M. Kristensen, J. P. Woerdman (1994), *Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate*, Opt. Commun. 112(5-6), p.321-327.
- [17] N. R. Heckenberg, R. McDuff, C. P. Smith, A. G. White (1992), *Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms*, Opt Lett, 17(3), p.221.
- [18] N. Matsumoto, T. Ando, T. Inoue, Y. Ohtake, N. Fukuchi, T. Hara (2008), *Generation of high-quality higher-order Laguerre-Gaussian beams using liquid-crystal-on-silicon spatial light modulators*, J. Opt. Soc. Am. A 25, p.1642-1651
- [19] N. Anaya Carvajal, C. H. Acevedo, Y. Torres Moreno (2017), *Generation of Perfect Optical Vortices by Using a Transmission Liquid Crystal Spatial Light Modulator*, Int J Opt.
- [20] A. Zukauskas, M. Malinauskas, E. Brasselet (2013), *Monolithic generators of pseudo-nondiffracting optical vortex beams at the microscale*, Appl. Phys. Lett. 103, p.181122.
- [21] K. Weber, F. Hütt, S. Thiele, T. Gissibl, A. Herkommer, H. Giessen (2017), *Single mode fiber based delivery of OAM light by 3D direct laser writing*, Opt. Express 25(17), p.19672-19679.
- [22] K. Switkowski *et al.* (2017), *Formation of optical vortices with all-glass nanostructured gradient index masks*, Opt Express, 25(25), p.31443.
- [23] H. T. Nguyen, K. Switkowski, R. Kasztelanic, A. Anuszkiewicz, A. Filipkowski, R. Kasztelanic, D. Pysz, H. Van Le, R. Stepien, W. Krolikowski, R. Buczynski (2020), *Optical characterization of single nanostructured gradient index vortex phase masks fabricated by the modified stack-and-draw technique*, Opt. Commun. 463, p.125435.
- [24] Hue Thi Nguyen, Grzegorz Stepniewski, Adam Filipkowski, Rafal Kasztelanic, Dariusz Pysz, Hieu Le Van, Ryszard Stepien, Mariusz Klimczak, Wieslaw Krolikowski, Ryszard Buczynski (2022), *Transmission of an optical vortex beam in antiresonant fibers generated in an all-fiber system*, Opt. Express 30, p. 45635-45647.
- [25] H.T. Nguyen, R. Kasztelanic, A. Filipkowski, et al. (2023), *Broadband optical vortex beam generation using flat-surface nanostructured gradient index vortex phase masks*, Sci Rep 13, p.20255.
- [26] A. Sihvola 1999, *Electromagnetic Mixing Formulas and Applications*, The Institution of Electrical Engineers.
- [27] R. Stepien, J. Cimek, D. Pysz, I. Kujawa, M. Klimczak, R. Buczynski (2014), *Soft glasses for photonic crystal fibers and microstructured optical components*, Opt. Eng. 053(7), p.071815.

STUDY ON GENERATION OF OPTICAL VORTEX BEAM IN SOME EXTERNAL MEDIA USING THE SAME NANOSTRUCTURED GRADIENT INDEX VORTEX PHASE COMPONENTS

Nguyen Thuy Linh, Nguyen Thi Thao, Do Thi Hue Linh, Nguyen Thanh Tung, Vu Tien Tuan Minh, Nguyen Thi Ngoc, Nguyen Thi Loan, Nguyen Thi Hue

ABSTRACT

In this paper, we present the study result on simulating optical vortex generation in the visible light region using the flat-surface nanostructured gradient index vortex phase micro-optical component designs. The cross-section of this optical vortex micro-component introduces a linear change of its refractive index following the azimuth angle from 0 to 2π . Simulation results confirmed that nanostructured optical vortex micro-device designs can generate stable optical vortices with a single charge. At the same time, the influence of some external fluid media on the formation of optical vortex beams when using the same vortex components is also investigated numerically in this study. We observed that the optical vortices generated in those media have the same order $l = 1$ - the total phase variation of the optical vortex is unchanged. This shows that the designed nanostructured vortex components have potential for experimental studies and applications in fluid environments at the microscopic level.

Keywords: *Optical vortices, nanostructured micro-optical component, singular optics, external media.*

* Ngày nộp bài: 02/4/2024; Ngày gửi phản biện: 05/4/2024; Ngày duyệt đăng: 15/11/2024

* 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.