

ẢNH HƯỞNG CỦA CƯỜNG ĐỘ LASER LÊN TIÊU CỤ THẤU KÍNH PHI TUYẾN MÀNG MÀU MỎNG

Bùi Xuân Kiên*

Tóm tắt: Trên cơ sở hiệu ứng Kerr, các thấu kính phi tuyến từ màng mỏng các hỗn hợp màu hữu cơ đã được đề xuất. Tiêu cụ của các thấu kính phi tuyến này đã được khảo sát với chùm laser Gauss có cường độ khác nhau. Kết quả khảo sát được bình luận cho việc ứng dụng chế tạo kim quang học điều khiển vi hạt theo trục chùm tia trong giới hạn micromet với độ phân giải cao.

Từ khóa: Tự hội tụ, Thấu kính phi tuyến, Hỗn hợp màu hữu cơ, Kim quang học.

1. MỞ ĐẦU

Thấu kính phi tuyến đã được phát hiện và nghiên cứu dựa trên hiệu ứng nhiệt [1, 2], hiệu ứng quang âm [3] và đặc biệt hiệu ứng Kerr [4]. Dựa vào hiệu ứng này mà các nghiên cứu thay đổi cấu trúc chùm tia laser [5], xác định hệ số phi tuyến bậc hai bằng phương pháp Z-scan [6], điều khiển vi hạt trong kim quang học phi tuyến đã được triển khai [4] và thu được các thành công. Với các vật liệu Kerr cổ điển dạng khí, lỏng thì hệ số phi tuyến bậc hai rất thấp, $n_2 \sim 3 \cdot 10^{-18} \text{ cm}^2/\text{W}$ [7], do đó, hiệu ứng phi tuyến rất yếu nên việc ứng dụng vào thực tế rất khó khăn vì phải dùng laser có cường độ cao. Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu chế tạo vật liệu phi tuyến mới đã thu được những kết quả đáng khích lệ, đặc biệt các chất màu hữu cơ tổng hợp có hệ số chiết suất phi tuyến rất cao, tăng lên hàng chục bậc. Koushki xác định hệ số chiết suất phi tuyến của dung dịch màu hữu cơ Acid Blue, $n_2 \sim 1 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{W}$ [8]; Krishnamurthy khảo sát dung dịch thuốc nhuộm Mercurochrome có $n_2 \sim 1 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{W}$ ở bước sóng 532nm [9]; Jeyaram đo được hệ số chiết suất phi tuyến của Acid Green bước sóng 635nm là $n_2 \sim 1 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{W}$ [10]; Dhanuskodi và cộng sự đã khảo sát thiourea và các phức chất kim loại của nó như Zn và Cd trong nước cho thấy hệ số chiết suất phi tuyến của chúng vào khoảng $n_2 \sim 1 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{W}$ ở bước sóng 532 nm [11]. Các chất màu hữu cơ này có thể lắng đọng thành các lớp màng mỏng dưới 1mm trên nền thủy tinh [12]. Với các lớp màng mỏng này thì hiệu ứng Kerr vẫn xảy ra vì hệ số chiết suất phi tuyến cao, do đó, có thể sử dụng các màng này như thấu kính mỏng phi tuyến trong các linh kiện vi quang như kim quang học.

Nhằm định hướng cho việc áp dụng các lớp màng mỏng này trong chế tạo kim quang học phi tuyến, chúng tôi thực hiện khảo sát ảnh hưởng của cường độ laser lên tiêu cụ của thấu kính phi tuyến chế tạo bằng các lớp chất màu khác nhau với độ dày khác nhau.

2. TIÊU CỤ THẤU KÍNH PHI TUYẾN

Khi chiếu một chùm laser có cường độ I không đổi vào môi trường phi tuyến Kerr thì chiết suất của môi trường sẽ thay đổi theo cường độ và được mô tả bởi hệ thức sau [13]:

$$n = n_0 + n_2 I \quad (1)$$

trong đó, n_0 là chiết suất tuyến tính khi chưa có mặt của chùm laser, n_2 là hệ số chiết suất phi tuyến. Nếu chùm laser có phân bố cường độ trên tiết diện

chùm tia là dạng hàm Gauss, khi đó, chiết suất của môi trường cũng phân bố tương tự, tức là:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{r^2}{W_0^2}\right) \Rightarrow n = n_0 + n_2 I_0 \exp\left(-\frac{r^2}{W_0^2}\right) \quad (2)$$

trong đó, W_0 là bán kính thắt chùm laser, I_0 là cường độ tại tâm thắt chùm và r là bán kính hướng tâm trên tiết diện chùm tia. Khi đó, lớp môi trường chiều dày d này sẽ trở thành khối có chiết suất thay đổi liên tục từ tâm, tại trục chùm tia ra ngoài (tấm GRIN) và trở thành thấu kính phi tuyến với tiêu cự được xác định trong gần đúng cận trục như sau:

$$I = I \exp\left(-\frac{r^2}{W_0^2}\right) \Rightarrow I_0 \left(1 - \frac{r^2}{W_0^2}\right) \quad (3)$$

Thay (3) vào (2) chúng ta nhận được:

$$n(r) = n_0 + n_2 I_0 \left(1 - \frac{r^2}{W_0^2}\right) = (n_0 + n_2 I_0) \left(1 - \frac{n_2 I_0}{W_0^2 (n_0 + n_2 I_0)} r^2\right) = N_0 (1 - \alpha r^2) \quad (4)$$

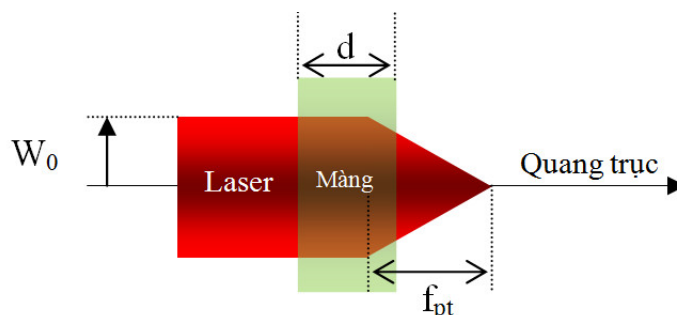
Từ hệ thức (4) chúng ta có thể rút ra [13]:

$$f_{pt} = \frac{1}{N_0 \alpha \sin(\alpha d)} = \frac{W_0^2}{n_2 I_0 \sin\left(\frac{dn_2 I_0}{W_0^2 (n_0 + n_2 I_0)}\right)} \quad (5)$$

Áp dụng các tham số thiết kế như công suất laser, bán kính thắt chùm và độ dày màng và hệ số chiết suất phi tuyến của các hỗn hợp màu hữu cơ, chúng ta có thể khảo sát ảnh hưởng của cường độ laser, độ dày màng vào tiêu cự và từ đó bình luận về khả năng ứng dụng cho kim quang học.

3. KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG CỦA CƯỜNG ĐỘ LASER LÊN TIÊU CỰ

Chúng ta khảo sát thấu kính phi tuyến (TKPT) như trên hình 1.

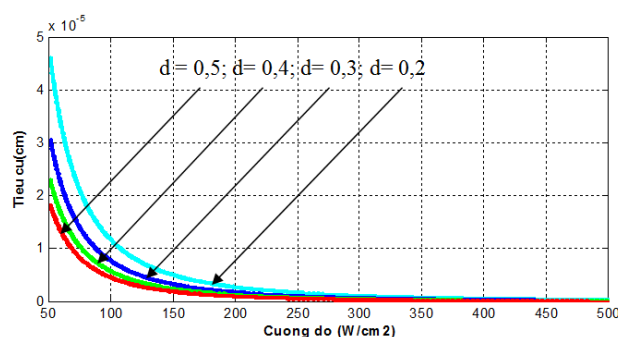


Hình 1. Mô tả thấu kính phi tuyến trên màng màu mỏng.

Thấu kính phi tuyến hình thành khi chùm laser Gauss có bán kính thắt chùm W_0 , cường độ, I_0 chiếu vào màng màu mỏng có độ dày d thay đổi với bốn giá trị 0,5; 0,4; 0,3 và 0,2 mm. Trên hình 2 là đường đặc trưng mô tả sự phụ thuộc của

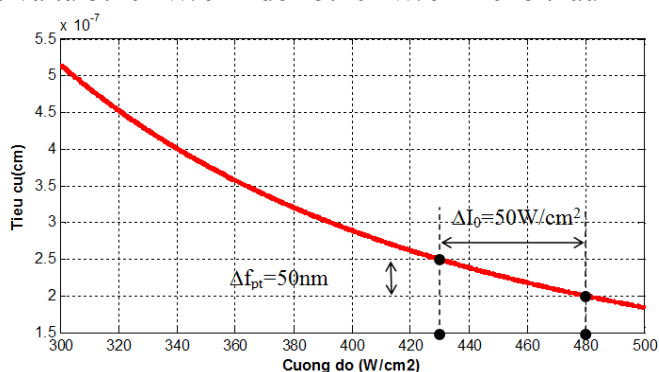
tiêu cự thấu kính của màng màu Acid Blue có hệ số chiết suất $n_2 \sim 1.10^{-6} \text{ cm}^2/\text{W}$ [8] vào cường độ laser được khảo sát bằng hệ thức (5).

Chúng ta nhận thấy, khi thay đổi công suất laser sao cho cường độ laser tại tâm chùm tia thay đổi trong khoảng $(50 \div 500) \text{ W/cm}^2$, tiêu cự TKPT sẽ thay đổi trong miền $(0 \div 50) \mu\text{m}$. So sánh bốn đường đặc trưng, chúng ta thấy khi chiều dày màng lớn hơn, mức độ thay đổi của tiêu cự sẽ nhỏ hơn, đồng thời vùng thay đổi cũng nhỏ hơn. Với độ dày 0,5 mm, vùng thay đổi tiêu cự là $18 \mu\text{m}$, trong khi đó, vùng này sẽ lớn hơn nhiều khoảng $46 \mu\text{m}$ với màng có độ dày 0,2mm với cùng khoảng thay đổi cường độ laser. Hơn nữa, khi cường độ laser lớn, độ tinh chỉnh tiêu cự sẽ mịn hơn, ví dụ khi thay đổi cường độ laser một lượng 50 W/cm^2 tiêu cự sẽ thay đổi một khoảng 50nm (hình 3). Có thể thấy độ phân giải tiêu cự rất lớn khoảng $1 \text{ nm}/1 \text{ Wcm}^{-2}$.



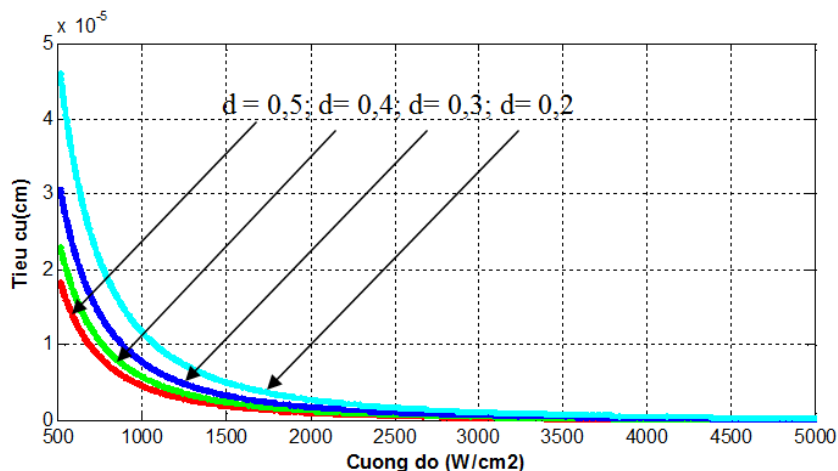
Hình 2. Đặc trưng tiêu cự-cường độ laser của TKPT màng màu Acid Blue.

Các đường đặc trưng tiêu cự-cường độ laser cho TKPT màng màu Mercurochrome có $n_2 \sim 1.10^{-7} \text{ cm}^2/\text{W}$ (hình 4) và phức chất kim loại của thiourea trong nước có $n_2 \sim 1.10^{-8} \text{ cm}^2/\text{W}$ (hình 5) kích thích bởi laser bước sóng 532nm cũng được khảo sát. Các đường đặc trưng này hoàn toàn tương tự nhau, tuy nhiên để có cùng một khoảng thay đổi tiêu cự TKPT khoảng $50 \mu\text{m}$ cần phải thay đổi cường độ trong khoảng từ 500 W/cm^2 đến 5000 W/cm^2 cho thấu kính màng Mercurochrome và từ 5.10^3 W/cm^2 đến 5.10^4 W/cm^2 cho thấu kính màng thiourea.

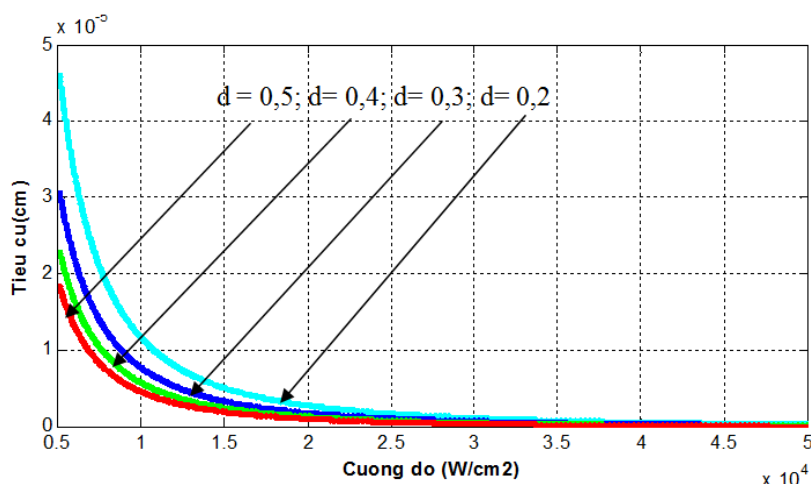


Hình 3. Xác định độ phân giải tinh chỉnh tiêu cự.

Nhược điểm của các TKPT màng có hệ số chiết suất phi tuyến nhỏ phải dùng đến cường độ công suất cao, tuy nhiên một ưu điểm rõ ràng đó là độ phân giải khi điều chỉnh tiêu cự sẽ rất lớn $1 \text{ nm}/10 \text{ Wcm}^{-1}$ (hình 4) hoặc $1 \text{ nm}/100 \text{ Wcm}^{-1}$ (hình 5).



Hình 4. Đặc trưng tiêu cự-cường độ laser của TKPT màng màu Mercurochrome.



Hình 5. Đặc trưng tiêu cự-cường độ laser của TKPT màng màu phức chất thiourea trong nước.

Từ các kết quả khảo sát và phân tích trên, có thể khẳng định rằng, các TKPT trên cơ sở màng các chất màu này có thể ứng dụng thiết kế kim quang học điều khiển các vi hạt trong phạm vi micromet với mấy lý do sau: i) Độ dày màng rất mỏng dưới millimet ($d < 1\text{mm}$) tương đương chiều dày chất lưu chứa mẫu có kích thước nano sẽ dễ dàng đặt trước mẫu như hệ hội tụ quang; ii) Tiêu cự thấu kính có thể thay đổi trong vùng micromet $0 \div 50 \mu\text{m}$, thậm chí dưới micromet ($f_{pt} < 1\mu\text{m}$) sẽ cho ta hệ hội tụ với khẩu độ số lớn ($NA \sim 2W_0/f_{nf} > 1$) đảm bảo bắt được các vi hạt điện môi, đồng thời có thể điều khiển vi hạt bẫy theo chiều dọc trục chùm tia laser với độ chính xác đến nm bằng cách thay đổi công suất laser, tương tự phương pháp đề xuất trong công trình [4], mà không cần đến hệ điều khiển quang-cơ phức tạp như các công trình trước đây [14].

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã khảo sát sự phụ thuộc của tiêu cự thấu kính phi tuyến trên các màng mỏng hỗn hợp màu được hình thành khi chiếu bởi chùm laser Gauss. Tiêu cự thấu

kính phụ thuộc vào cường độ laser, độ dày màng và hệ số chiết suất phi tuyến của chất tạo màng. Kết quả cho thấy, tiêu cự thấu kính phi tuyến thay đổi trong vùng micromet khi thay đổi cường độ laser ở ba vùng khác nhau đối với các chất màu khác nhau. Đối với màng chất màu có hệ số chiết suất phi tuyến thấp cần phải kích thích bởi chùm laser có cường độ cao và ngược lại. Với các chất màu có hệ số chiết suất thấp phải dùng cường độ laser thay đổi trong vùng lớn, tuy nhiên, độ phân giải tinh chỉnh tiêu cự sẽ cao hơn. Kết quả khảo sát và phân tích gợi ý ứng dụng các thấu kính phi tuyến này vào thiết kế kính quang học phi tuyến điều khiển vi hạt dọc trục chùm tia.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. M. Franko, *Thermal Lens Spectrometric Detection in Flow Injection Analysis and Separation Techniques*, Appl. Spectrosc. Rev., 43, 358–388 (2008).
- [2]. A. Cognet, S. Berciaud, D. Lasne, B. Lounis, *Photothermal Methods for Single Nonluminescent Nanoobjects*, Anal. Chem., 80, 2289–2294 (2008).
- [3]. T. T. Doan, K. D. Quoc, Q. H. Quang, *Acoustic-optical tweezers for stretch of DNA molecule*, J. Opt Quant Electron., 50:51 (2018).
- [4]. T. T. Dinh, K. Q. Doan, K. B. Xuan, Q. H. Quang, *3D controlling the bead linking to DNA molecule in a single-beam nonlinear optical tweezers*, J. Opt Quant Electron. , 48:561 (2016).
- [5]. Ho Quang Quy, Tran Ba Chu, Mai Van Luu and Tran Ngoc Truoi, *Influence of Intracavity Nonlinear Effects on Laser Beam's Structure*, Proc. **IWP&Appl.**, Cantho, pp.361-366 (2007).
- [6]. M. B. Alsous, M.D. Zidan, Z. Ajji. A. Allahham, *Z-scan measurements of optical nonlinearity in Acid Blue 29 dye*, Optik-International J. for Light and Electron Optics, 125 (18), 5160-5163 (2014).
- [7]. W. R. Boyd, *Nonlinear optics*, Academic press (2003).
- [8]. E. Koushki, A. Farzaneh, S.H. Mousavi, *Closed aperture Z-scan technique using the Fresnel-Kirchhoff diffraction theory for materials with high nonlinear refractions*, Appl Phys. B99, 565-570 (2010).
- [9]. R.R. Krishnamurthy, R. Alkondan, *Nonlinear characterization of Mercurochrome dye for potential application in optical limiting*, Opt. Appl. XL, 187-196 (2010).
- [10]. S. Jeyaram, T. Geethakrishnan, *Third-order nonlinear optical properties of acid green 25 dye by Z-scan method*, Optics & Laser Technology, 89, 179-185 (2017).
- [11]. S., Dhaunaraja, N.P. Rajesh, G. Vinitha, G. Bhagavannarayana, *Crystal structure and characterization of a novel organic optical crystal: 2-Aminopyridinium trichloroacetate*, Mater. Research Bull. 46, 726-731 (2011).
- [12]. Lam Thanh Nguyen et al, *The numerical methods for analyzing the Z-scan data*, J. Nonlinear Optic. Phys. Mat. **23**, 1450020 (2014).
- [13]. B.E. A. Saleh, M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, Series Editor(s): J. W. Goodman ISBN: 0471213748 (Electronic) 0471839655 (Print) Copyright © 1991 John Wiley & Sons, Inc.

- [14]. W. Singer, S. Bernet, M. Ristch- Marte, *3D-force calibration of optical tweezers for mechanical stimulation of surfactant-releasing lung cell*, Laser Phys. 11, 1217-1223 (2001).

ABSTRACT

INFLUENCE OF LASER INTENSITY ON FOCAL LENGTH OF NONLINEAR LENS CREATED FROM THIN LAYER OF ORGANIC DYE

Based on the Kerr effect, the model of nonlinear lens created from thin layer of organic dye is proposed. The focal lengths are investigated using Gaussian beam laser with different intensity. The results are discussed to use for design the optical tweezers which is possible to longitudinally control the trapped particles in microscale with high resolution.

Keywords: Self-focusing, Nonlinear lens, Organic dye solvent, Optical tweezers.

*Nhận bài ngày 21 tháng 11 năm 2017
Hoàn thiện ngày 08 tháng 12 năm 2017
Chấp nhận đăng ngày 10 tháng 4 năm 2017*

Địa chỉ: Trường ĐH Điện lực.

**Email:* kienbx.epu2011@gmail.com.