

NGHIÊN CỨU HIỆU ỨNG LƯỜNG ỔN ĐỊNH QUANG HỌC TRONG TINH THỂ PHOTONIC PHI TUYẾN MỘT CHIỀU

Nguyễn Văn Phú

Khoa Vật lý, Trường Đại học Vinh, 182 Lê Duẩn, Vinh, Nghệ An

Email: nvphudhv@gmail.com

Đến Tòa soạn: 28/10/2012; Chấp nhận đăng: 15/6/2013

TÓM TẮT

Các thiết bị quang tử (photonic) hoạt động lưỡng ổn định có vai trò quan trọng trong hệ thống thông tin quang. Chúng được sử dụng như các cổng logic, khóa quang bộ chuyển đổi hay khuếch đại quang học. Trong bài báo này, bằng cách giải hệ phương trình liên kết mode phi tuyến chúng tôi khảo sát hoạt động lưỡng ổn định quang học của một mẫu tinh thể photonic tuần hoàn, phi tuyến một chiều. Các kết quả thu được cho thấy khi thay đổi một vài tham số cấu trúc các đặc trưng lưỡng ổn định như độ rộng, hay ngưỡng chuyển trạng thái đã bị thay đổi.

Từ khóa: lưỡng ổn định quang học, tinh thể photonic phi tuyến, một chiều.

1. MỞ ĐẦU

Các mạng thông tin quang hiện đại cần phải có các bộ chuyển đổi, các cổng logic, các bộ khuếch đại quang hay các khóa quang có cấu trúc nhỏ, tốc độ đáp ứng cao. Các thiết bị quang tử hoạt động lưỡng ổn định có thể đáp ứng được các yêu cầu đó [1].

Ngay từ khi lí thuyết [2] và thực nghiệm [3] tìm thấy sự xuất hiện của các đường cong trễ và hiệu ứng lưỡng ổn định trong giao thoa kế Fabry-Pero chứa môi trường phi tuyến trong đáp ứng của nó với tín hiệu quang vào, các thiết bị lưỡng ổn định với các môi trường có cấu trúc khác nhau [4, 5] đã được chế tạo hoàn thiện và có các ứng dụng to lớn trong hệ thống truyền dẫn quang đường dài. Chúng được sử dụng như các bộ khuếch đại quang, nén xung, các phần tử nhớ, các bộ cảm quang hay các cổng logic.

Trong [6] xuất phát từ mô hình tinh thể photonic tuần hoàn, phi tuyến chúng tôi đã tìm thấy hoạt động lưỡng ổn định và khảo sát ảnh hưởng của một vài tham số cấu trúc lên đường cong lưỡng ổn định xuất hiện trong cấu trúc đề xuất. Tuy nhiên giá trị giới hạn của các tham số chưa được tìm thấy và vì vậy hình dạng và các đặc trưng lưỡng ổn định xuất hiện chưa rõ nét và thay đổi không nhiều.

Trong bài báo này, dựa trên mô hình tinh thể photonic tuần hoàn, phi tuyến chúng tôi khảo sát các đặc trưng lưỡng ổn định quang học xuất hiện trong tinh thể khi thay đổi các tham số cấu trúc của chính tinh thể cũng như của các tham số đầu vào. Một vài ảnh hưởng đến quá trình đa ổn định cũng được khảo sát.

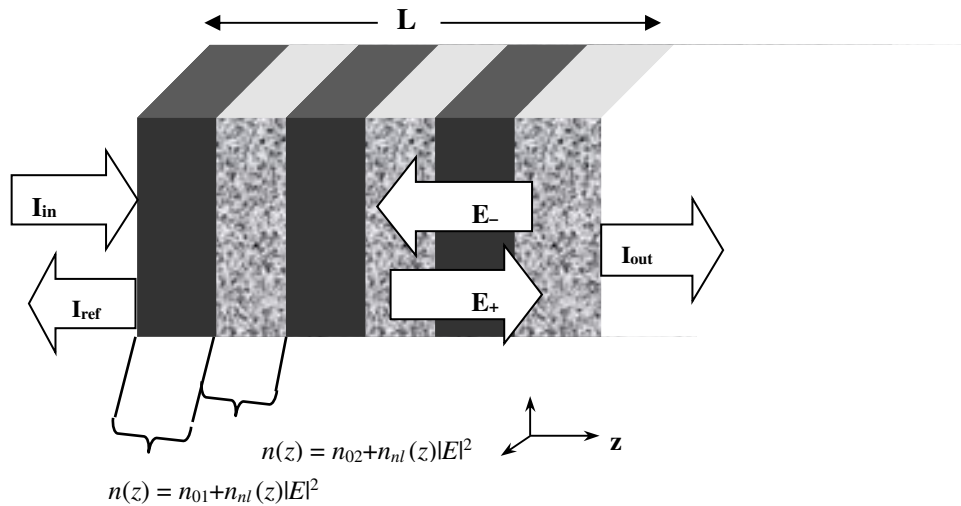
2. HỆ PHƯƠNG TRÌNH LIÊN KẾT MODE PHI TUYẾN

Chúng ta xét một tinh thể photonic phi tuyến có cấu trúc được mô tả như trên hình 1. Trong cấu trúc này môi trường phi tuyến được tạo thành bằng cách phân bố các phần tử nano CdSe vào trong nền polyme cao phân tử. Quá trình này được thực hiện sao cho mật độ các phần tử CdSe biến thiên một cách tuần hoàn tạo nên sự phân bố không gian của chiết suất với những sự thay đổi tăng giảm có tính chất chu kì. Chùm ánh sáng tới sẽ bị phản xạ một phần tại bề mặt các lớp và phần còn lại được truyền đi ra khỏi cấu trúc. Phổ huỳnh quang của các phần tử nano CdSe phụ thuộc vào chính kích thước của nó, vì vậy dưới tác dụng của chùm sáng có cường độ lớn, các phần tử này trở thành vật liệu phi tuyến có chiết suất phụ thuộc vào cường độ sáng tới. Chính sự phản hồi của chùm sáng tại các lớp kết hợp với tính chất phi tuyến của môi trường là nguyên nhân gây ra các hiện tượng quang phi tuyến ở trong cấu trúc. Chiều dài tổng cộng của cấu trúc được xác định bởi công thức $L = N\Lambda$, với Λ là chu kì cách tử và N là tổng số lớp.

Sự thay đổi chiết suất của tinh thể có dạng [8]:

$$n(z, |E|^2) = n_{0k}(z) + n_{nl}(z)|E|^2$$

với $n_{0k}(z)$ là hệ số chiết suất tuyến tính ($k = 1, 2$), $n_{nl}(z)$ là hệ số chiết suất phi tuyến được điều biến theo hiệu ứng Kerr. Các tham số $\Lambda, N, L, n(z, |E|^2)$ được gọi là các tham số cấu trúc.



Hình 1. Cấu trúc tinh thể photonic có môi trường tuần hoàn phi tuyến.

Chúng ta giả sử rằng trường lan truyền trong cấu trúc theo phương trục Oz có dạng:

$$E(z, t) = [E_+(z)e^{i\beta z} + E_-(z)e^{-i\beta z}]e^{-i\omega t} + c.c.$$

Trong gần đúng hàm bao biến đổi chậm, hệ phương trình liên kết mode mô tả sự biến đổi của biên độ các sóng lan truyền trong cấu trúc có dạng [7]:

$$i\left(\frac{\partial E_+}{\partial Y} + \frac{\partial E_+}{\partial T}\right) + n_{0k}E_- + n_{nl}\left(|E_+|^2 + 2|E_-|^2\right)E_+ + n_{2k}\left[\left(2|E_+|^2 + |E_-|^2\right)E_- + E_+^2E_-^*\right] = 0 \quad (1)$$

$$-i\left(\frac{\partial E_-}{\partial Y} - \frac{\partial E_-}{\partial T}\right) + n_{0k}E_+ + n_{nl}\left(2|E_+|^2 + |E_-|^2\right)E_- + n_{2k}\left[\left(|E_+|^2 + 2|E_-|^2\right)E_+ + E_-^2E_+^*\right] = 0 \quad (2)$$

trong đó E_+ và E_- là biên độ của sóng tới và sóng phản xạ lan truyền theo các hướng ngược nhau từ trái và phải; $Y = \omega_0 z/c$ và $T = \omega_0 t/n_{nl}$ là các tham số chuẩn hoá của các thành phần tọa độ không gian và thời gian tương ứng. Thành phần $n_{2k} = 2n_{nl}I_0\eta_0/n_{ok}$ với I_0 là cường độ ánh sáng mẫu, đóng vai trò như là chiết suất phi tuyến, η_0 là tham số vật liệu.

Ở tại các biên của cấu trúc ($Z = 0$ and $Z = L$), cường độ của sóng tới I_{in} , sóng phản xạ I_{ref} và truyền qua I_{out} được xác định bởi:

$$|E_+(0)|^2 = I_{in}, \quad |E_-(0)|^2 = I_{ref}, \quad (3)$$

$$|E_+(L)|^2 = I_{out}, \quad |E_-(L)|^2 = 0. \quad (4)$$

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Sự xuất hiện của hiệu ứng lưỡng ổn định quang học

Chúng tôi đã giải bằng số hệ phương trình kết hợp phi tuyến (1), (2) với các điều kiện biên (3), (4) bằng phương pháp Runge - Kutta trong ngôn ngữ lập trình Matlab. Các phương trình cơ bản của thuật toán được mô tả bởi:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6} (K_1 + 4K_2 + K_3).$$

$$K_1 = f(x_n, y_n),$$

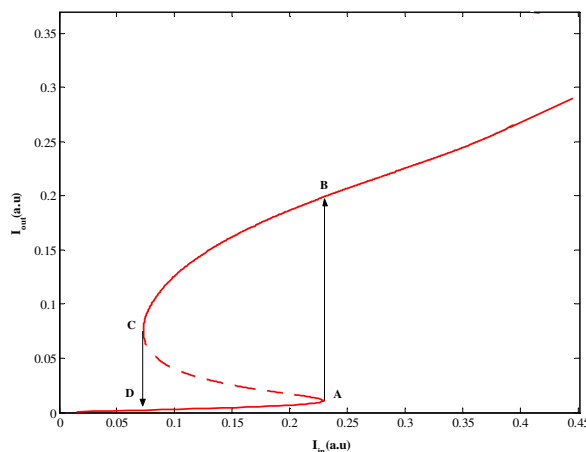
$$K_2 = f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{4} K_1 + \frac{h}{4} K_2\right),$$

$$K_3 = f(x_n + h, y_n + hK_2),$$

$$K_r^{s+1} = f\left(x_n + a_r h, y_n + h \sum_{m=1}^{r-1} b_{rm} K_m^{s+1} + hb_{rr} K_r^s\right). \quad (r = 1, 2, 3)$$

ở đây K_r^s ($r = 1, 2, 3$) là các giá trị trung gian tương ứng và y_{n+1} biểu diễn $E_+(z_{i+1})$ hoặc $E_-(z_i)$.

Các giá trị số trong hệ phương trình phi tuyến (1), (2) được lấy từ các kết quả thực nghiệm về tinh thể photonic có cấu trúc tuần hoàn sử dụng cùng các phần tử nano CdSe phân bố trên nền polyme cao phân tử [7]: $c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$, $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $n_{ok} = 2,55$, $\Lambda = 0,28 \times 10^{-6} \text{ m}$; $N = 50$; $I_{in} = 0,15 \text{ (a.u)}$ (tương ứng với cường độ mẫu $I_0 = 15 \text{ MW/cm}^2$).



Hình 2. Đồ thị mô tả sự xuất hiện hiệu ứng lưỡng ổn định quang học trong tinh thể.

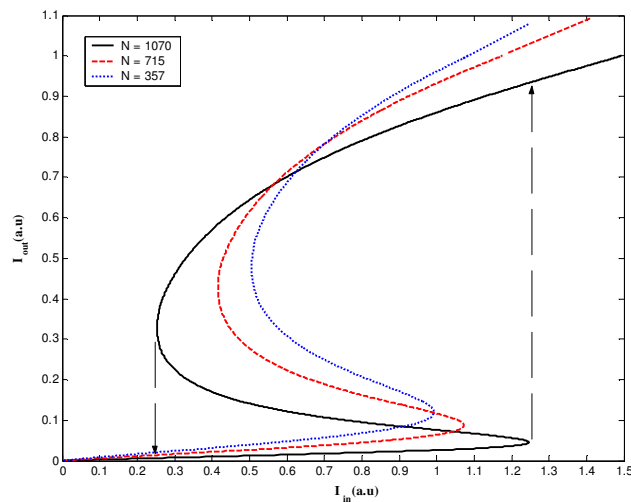
Hình 2 biểu thị sự phụ thuộc của cường độ ra I_{out} vào tham số điều khiển là cường độ vào I_{in} . Từ đồ thị chúng ta nhận thấy đáp ứng vào ra đã có dạng đường cong trễ mô tả hoạt động lưỡng ổn định quang học của tinh thể. Khi cường độ ánh sáng vào tăng lên thì cường độ ra cũng tăng theo. Bắt đầu từ điểm A trên đồ thị, hệ chuyển lên trạng thái trên ở điểm B và khi cường độ sáng giảm về giá trị tại điểm C ở nhánh trên của đồ thị, hệ chuyển xuống điểm D ở nhánh dưới. Cửa sổ chuyển cỡ khoảng 0,15 (a.u).

3.2. Điều khiển lưỡng ổn định bằng số lớp cách tử

Trong các thiết bị lưỡng ổn định sử dụng môi trường tuần hoàn, số lớp cách tử N ảnh hưởng đến độ đáp ứng hay thời gian chuyển trạng thái cũng như giá trị ngưỡng đáp ứng vào - ra của thiết bị [8]. Các mô tả trong các công trình này cho thấy ngưỡng chuyển trạng thái thay đổi khi N thay đổi, có khả năng đáp ứng tốc độ chuyển nhanh của hệ thống truyền dẫn quang.

Trong mục này để khảo sát ảnh hưởng của số lớp N lên các đường cong lưỡng ổn định, bằng cách giữ nguyên các tham số khác, thay đổi số lớp N của cách tử với các giá trị khác nhau $N = 1070$, $N = 715$ và $N = 357$, chúng tôi nhận được các đường cong lưỡng ổn định khác nhau. Kết quả khảo sát được mô tả trên hình 3.

Từ hình 3 chúng ta nhận thấy, khi thay đổi giá trị của N , các đặc trưng của đường cong lưỡng ổn định như bề rộng, chiều cao đã thay đổi. Cụ thể với $N = 1070$, ngưỡng chuyển lên trạng thái trên là của cường độ lối vào I_{in} là 1,23(a.u) và ngưỡng chuyển xuống là 0,25(a.u), trong khi với $N = 357$ các giá trị chuyển của ngưỡng là 1(a.u) và 0.55(a.u) tương ứng.



Hình 3. Ảnh hưởng của số lớp cách tử đến đường cong lưỡng ổn định.

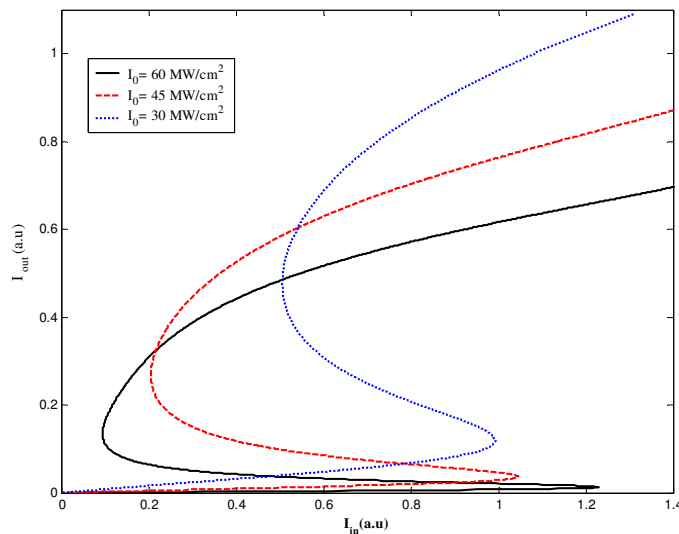
3.3. Điều khiển lưỡng ổn định bằng cường độ sáng

Trong các cấu trúc tuần hoàn phi tuyến, sự phụ thuộc của chiết suất phi tuyến n_{2k} vào cường độ ánh sáng tới I_0 được mô tả bởi công thức $n_{2k} = n_{nl}I_0^{2k}/n_{0k}$. Khi xem cường độ ánh sáng tới như là tham số đầu vào thì sự thay đổi giá trị của I_0 sẽ làm thay đổi giá trị của n_{2k} , do đó làm thay đổi các giá trị ngưỡng lưỡng ổn định.

Trong mục này, bằng cách chọn các giá trị khác nhau của I_0 lần lượt bằng 30 MW/cm², 45

MW/cm² và 60 MW/cm², sử dụng phương pháp giải tương tự như ở mục trên, chúng tôi nhận được các đường cong mô tả ảnh hưởng của cường độ sáng lên hoạt động lưỡng ổn định của tinh thể. Kết quả khảo sát được mô tả trên hình 4.

Từ hình 4 chúng ta nhận thấy, về mặt hình thức, dạng của các đường cong lưỡng ổn định trong trường hợp thay đổi cường độ sáng vào giống như dạng các đường cong lưỡng ổn định khi thay đổi số lớp cách tử. Về mặt vật lý kết quả này phản ánh ảnh hưởng của hiệu ứng Kerr lên tính chất của môi trường. Khi cường độ sáng tới tăng lên, chiết suất môi trường phụ thuộc phi tuyến vào cường độ sáng làm thay đổi các đặc trưng vào-ra của các đường cong lưỡng ổn định. So sánh với các kết quả đã được phản ánh trong [6, 7], hình ảnh trên các hình 3 và 4 cho thấy các đường cong lưỡng ổn định có dạng chữ S rõ rệt khi tăng giá trị số lớp cách tử cũng như cường độ sáng vào. Rõ ràng tồn tại giá trị ngưỡng của số lớp cách tử ($N = 50$) và giá trị ngưỡng của cường độ sáng mẫu ($I_0 \geq 25$ MW/cm²) để có sự xuất hiện hiệu ứng lưỡng ổn định trong cấu trúc tuần hoàn phi tuyến đề xuất.



Hình 4. Ảnh hưởng của chiết suất phi tuyến lên các đường cong lưỡng ổn định.

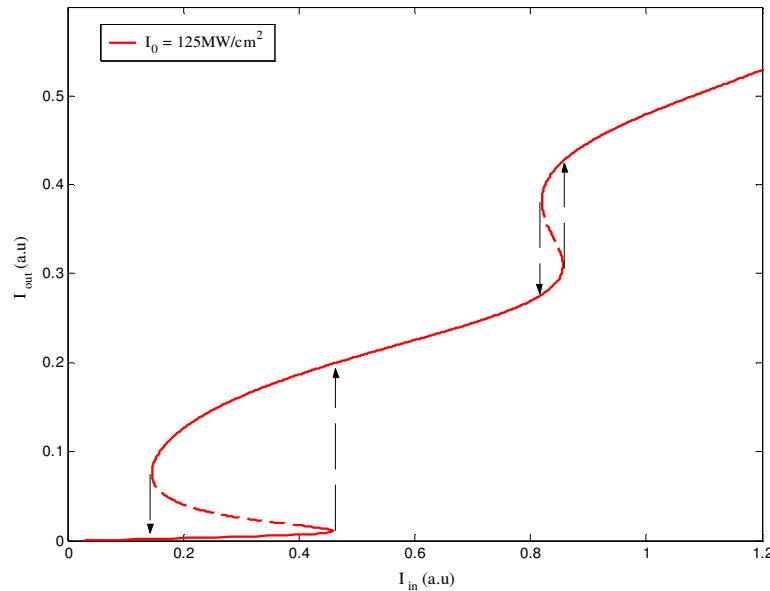
Kết quả khảo sát chi tiết hơn cũng cho thấy khi tăng cường độ sáng vượt quá giá trị 120 MW/cm², trong hệ xuất hiện quá trình đa ổn định (hình 5). Hai đoạn đứt nét trên đồ thị mô tả quá trình này. Kết quả này đã có sự phù hợp nhất định với các kết quả công bố trong [9 - 11] và công trình thực nghiệm [12]. Về mặt vật lý sự kết hợp giữa sóng tới và sóng phản xạ ở các lớp có chiết suất khác nhau của cấu trúc tạo nên các quá trình chuyển pha ở các trạng thái khác nhau trong hệ, do vậy các trạng thái đa trị của cường độ lồi ra đã xuất hiện ở các vị trí khác nhau trên đường cong lưỡng ổn định.

4. KẾT LUẬN

Chúng tôi đã khảo sát hoạt động lưỡng ổn định của tinh thể photonic tuần hoàn phi tuyến dẫn sóng một chiều. Các kết quả nghiên cứu cho thấy, với bộ tham số trung tâm đã chọn, chúng tôi đã nhận được đường cong chữ S mô tả hoạt động lưỡng ổn định của tinh thể theo mô hình đề xuất. Bằng cách thay đổi giá trị của tham số đầu vào như cường độ sáng mẫu, hay số lớp cách tử, chúng tôi đã có thể tìm thấy các giá trị ngưỡng chuyển trạng thái và có thể làm thay

đôi đặc trưng của đường cong lưỡng ổn định. Chẳng hạn với số lớp cách tử $N = 1070$ ngưỡng chuyển lên trạng thái trên của cường độ lối vào I_{in} bằng 1,23(a.u) và ngưỡng chuyển xuống là 0,25(a.u), trong khi với $N = 357$ các giá trị chuyển của ngưỡng tương ứng là 1(a.u) và 0,55(a.u).

Chúng tôi hy vọng các kết quả lí thuyết này có thể được đề xuất với thực nghiệm nghiên cứu chế tạo mẫu photonic nói trên như là các thiết bị quang tử có độ đáp ứng cao ứng dụng trong hệ thống thông tin quang.



Hình 5. Hoạt động đa ổn định của tinh thể khi tăng cường độ mẫu. Hai đoạn đứt nét trên đồ thị mô tả quá trình đa ổn định đó.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. He G. S., Liu S. H. - Physics of nonlinear optics, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore, 1999, Chapter 12.
2. Felber F. S. and Marburger I. H. - Theory of nonresonant multistable optical devices, Appl. Phys. Lett. **28** (1976) 731-734.
3. Gibbs H. M., McCall S. L., and Venkatesan T. N. C. - Differential Gain and Bistability Using a Sodium-Filled Fabry-Perot Interferometer, Phys. Rev. Lett. **36** (1976) 1135-1138.
4. Ming Chen et al. - Optical bistable device based on one-dimensional photonic crystal waveguide, Optics Communications **255** (2005) 46-50.
5. Kazuhiko Ogusu and Kosuke Takayama - Optical bistability in photonic crystal microrings with nonlinear dielectric materials, Optics Express **16** (2008) 7525-7539.
6. Nguyễn Văn Phú - Ảnh hưởng của một vài tham số cấu trúc lên đường cong lưỡng ổn định quang học trong môi trường tuần hoàn phi tuyến, Tạp chí Khoa học và Công nghệ **49** (3A) (2011) 192-197.
7. Pelinovsky D. - Stable all-optical limiting in nonlinear periodic structures: I. Analysis, J. Opt. Soc. Am. B **19** (2002) 43-53.

8. Hegde R. S., Winful H. G. - Optical bistability in periodic nonlinear structures containing left handed materials, *Microwave and Optical Technology Letters* **46** (2005) 528–530.
9. Midrio M. - Shooting technique for the computation of plane-wave reflection and transmission through one-dimensional nonlinear inhomogeneous dielectric structures, *J. Opt. Soc. Am. B* **18**(12) (2001) 1866-1871.
10. Maksymov I. S. et. al - Finite-difference time-domain analysis of band structures in one-dimensional Kerr-nonlinear photonic crystals, *Optics Communications* **239** (2004) 213–222.
11. Matsuda N. et. al. - Slow light enhanced optical nonlinearity in a silicon photonic crystal coupled-resonator optical waveguide, *Opt. Express* **19** (2011) 19861-19874.
12. Malcuit M. S, Herbert C., Heid C. - Experimental Study of Nonlinear periodic Structures, Lehigh University Bethlehem PA 18015, 1995, pp. 1-56.

ABSTRACT

STUDY ON CHARACTERISTICS OF OPTICAL BISTABILITY IN ONE-DIMENSIONAL NONLINEAR PHOTONIC CRYSTALS

Nguyen Van Phu

Physics Department, Vinh University, 182 Le Duan, Vinh, Nghe An

Email: *nvphudhv@gmail.com*

A powerful principle that could be explored to implement all-optical transistors, switches, logical gates, and memory, is the concept of optical bistability. In systems that display optical bistability, the outgoing intensity is a strongly non-linear function of the input intensity, and might even display a hysteresis loop. In this paper, we present a photonic crystal devices demonstrating optical bistability. By changing the number of layer N and incident intensity into structure, we investigate the influence of these parameters on optical bistability hysteresis curves of mentioned model and remark that hysteresis behavior can be controlled.

Keywords: optical bistability, nonlinear photonic crystals, one-dimensional.