

ẢNH HƯỞNG CỦA THAM SỐ MẤT MÁT PHỤ THUỘC THỜI GIAN LÊN HOẠT ĐỘNG CỦA LASER NGẪU NHIÊN HAI MODE

Nguyễn Văn Phú⁽¹⁾, Đặng Hữu Danh⁽²⁾, Nguyễn Văn Định⁽³⁾

¹ Trường Đại học Vinh, Thành phố Vinh, Tỉnh Nghệ An

² Trường THPT Vũ Quang, Huyện Vũ Quang, Tỉnh Hà Tĩnh

³ Khoa Cơ bản - Ngoại ngữ, Học viện Hải quân, Thành phố Nha Trang, Tỉnh Khánh Hòa

Ngày nhận bài 20/9/2019, ngày nhận đăng 14/11/2019

Tóm tắt: Trong bài báo này, bằng cách giải hệ phương trình tốc độ mô tả sự biến thiên mật độ photon phát của laser ngẫu nhiên hai mode, chúng tôi đã khảo sát ảnh hưởng của hệ số mất mát phụ thuộc thời gian lên các đặc trưng mode của laser ngẫu nhiên phát hai mode. Kết quả khảo sát cho thấy khi hệ số mất mát phụ thuộc thời gian các đặc trưng của mode phát như mật độ photon phát, thời gian đạt đến giá trị cực đại của mật độ photon phát và độ rộng xung thời gian của mode phát đã thay đổi. Kết quả thu được cho chúng ta hiểu rõ hơn về vai trò của hệ số mất mát theo thời gian lên hoạt động của laser ngẫu nhiên hai mode.

Từ khóa: Laser ngẫu nhiên; hệ số mất mát; các đặc trưng mode.

1. Mở đầu

Trong hơn vài thập kỉ qua laser ngẫu nhiên (random laser) đã nhận được sự quan tâm của các nghiên cứu lí thuyết và thực nghiệm nhờ những ứng dụng to lớn trong khoa học, kỹ thuật và đời sống [1]. Sự khác biệt giữa laser thông thường và laser ngẫu nhiên là buồng cộng hưởng của laser ngẫu nhiên không hình thành bởi các gương mà được tạo bởi các tâm tán xạ trong môi trường hoạt chất, đó là môi trường không trật tự và có tính khuếch đại. Môi trường khuếch đại này có thể tồn tại dưới dạng bột gồm các tinh thể nhỏ, chẳng hạn các bột nano ZnO, hay dung dịch hoặc màng vật liệu chứa các hạt tán xạ ngẫu nhiên [1], [2].

Với môi trường khuếch đại dạng bột nano ZnO được chiếu bởi nguồn bơm Gauss, khi xem hệ số mất mát không phụ thuộc thời gian chúng tôi đã nghiên cứu sự thay đổi các đặc trưng của mode laser phát như độ rộng thời gian, thời gian khởi phát laser hay mật độ photon phát cực đại của mode [2], [3]. Tuy nhiên đây là trường hợp lý tưởng, được đơn giản hóa vì trong thực tế hệ số mất mát luôn phụ thuộc thời gian, thường ảnh hưởng đến các đặc trưng của các mode laser.

Trong bài báo này, xem hệ số mất mát là hàm của thời gian chúng tôi khảo sát ảnh hưởng của hệ số mất mát lên các đặc trưng của mode laser phát.

2. Hệ phương trình động học

Xét trường hợp laser ngẫu nhiên với môi trường khuếch đại dạng bột nano ZnO sử dụng nguồn bơm Gauss phát hai mode có mật độ photon ở các mode lần lượt là n_1 và n_2 . Hệ phương trình tốc độ biểu diễn sự thay đổi mật độ photon của các mode theo thời gian được viết [4]:

$$\frac{dn_1}{dt} = \alpha_1 n_1 - \beta_1 n_1^2 - \theta_{12} n_1 n_2 + \gamma_{12} n_2 \quad (2.1)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = \alpha_2 n_2 - \beta_2 n_2^2 - \theta_{21} n_2 n_1 + \gamma_{21} n_1 \tag{2.2}$$

Ở đây α_i ($i = 1, 2$) là hệ số khuếch đại được mô tả dạng Gauss: $\alpha_i = \alpha_{0i} \exp(-t^2/\Delta T)$; θ_{ij}, γ_{ij} ($j = 1, 2$) là các hệ số liên kết trường và hệ số dịch chuyển photon (photon hopping) của các mode tương ứng.

Hệ số mất mát phụ thuộc thời gian $\beta_i(t)$ được mô tả dạng:

$$\beta_i(t) = \beta_{0i}(1 + m.t) \tag{2.3}$$

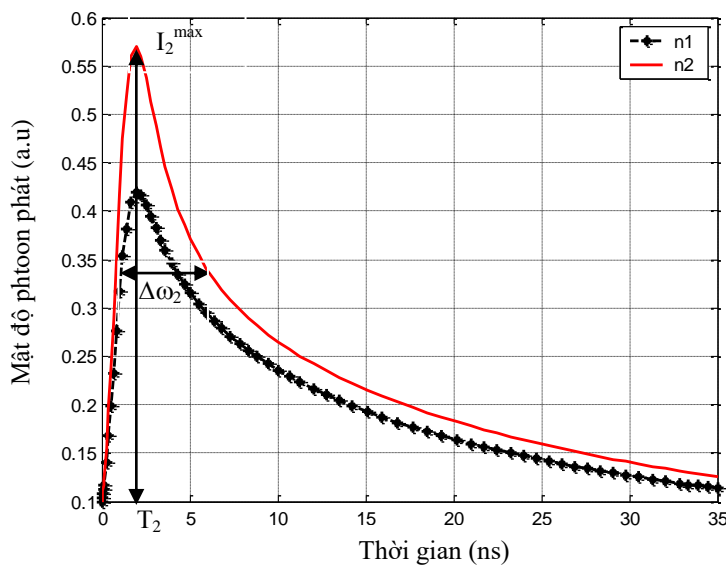
Các đại lượng β_{0i} là các tham số mất mát, m là số nguyên, dương.

Hệ phương trình (2.1), (2.2) được giải bằng số theo phương pháp Runge-Kutta trong ngôn ngữ lập trình Matlab với điều kiện ban đầu $n_1(0) = 0,5$ đơn vị tùy ý (arbitrary unit - a.u) và $n_2(0) = 0,5$ (a.u) [5], [6]. Giá trị các tham số trong hệ phương trình được lấy từ các kết quả thực nghiệm cho laser ngẫu nhiên môi trường hoạt chất ZnO dạng bột, phát hai mode [6], [7]: $\theta_1 = 0,4 \text{ cm}^3 \cdot \text{ns}^{-1}$; $\theta_{12} = 0,8 \text{ cm}^3 \cdot \text{ns}^{-1}$; $\beta_1 = 0,1 \text{ cm}^3 \cdot \text{ns}^{-1}$; $\gamma_{12} = 0,4 \text{ ns}^{-1}$; $\gamma_{21} = 0,4 \text{ ns}^{-1}$; $\theta_{21} = 0,7 \text{ cm}^3 \cdot \text{ns}^{-1}$; $\beta_2 = 0,1 \text{ cm}^3 \cdot \text{ns}^{-1}$; $m = 1$. Kết quả mô phỏng các mode phát của laser ngẫu nhiên được biểu diễn trên Hình 1, trong đó chúng tôi quan tâm đến các đặc trưng của mode:

- Độ rộng xung $\Delta\omega_i$ (ns): là độ rộng của mode phát thứ i tại vị trí có cường độ bằng một nửa cường độ cực đại.
- Mật độ photon cực đại của mode phát n_i^{max} (a.u) thứ i .
- Thời gian T_i đạt đến giá trị n_i^{max} của mode thứ i .

Giá trị các tham số này trên Hình 1 tương ứng với các mode phát là $\Delta\omega_1 = 6,8548$ ns, $n_1^{\text{max}} = 0,42$ a.u, $T_1 = 2,0564$ ns; $\Delta\omega_2 = 5,403$ ns, $n_2^{\text{max}} = 0,57$ a.u và $T_2 = 1,9760$ ns;

Phân tích đường cong mô tả mật độ photon phát $n(t)$ của các mode trên Hình 1 thành các giai đoạn như sau: Trong giai đoạn đầu (từ 0 đến 2 ns) mật độ photon của các mode phát tăng nhanh và thời gian cực đại của mật độ bức xạ của mode n_1 cỡ khoảng 2,0564 ns và của mode n_2 cỡ khoảng 1,9760 ns sau khi phát. Ngay sau đó mật độ bức xạ giảm nhanh, mật độ photon phát không đáng kể ở thời điểm 35 ns sau khi kích hoạt.



Hình 1: Các mode phát của laser ngẫu nhiên

3. Kết quả và thảo luận

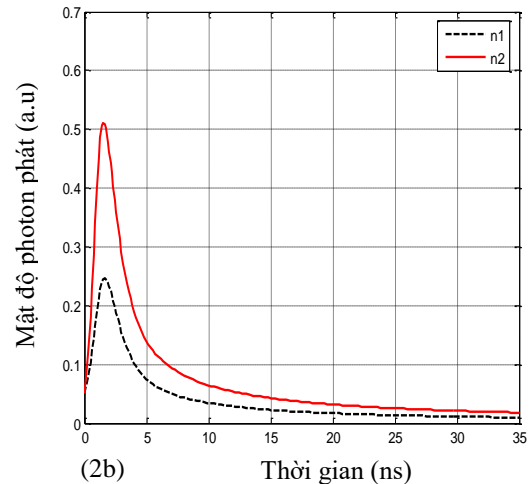
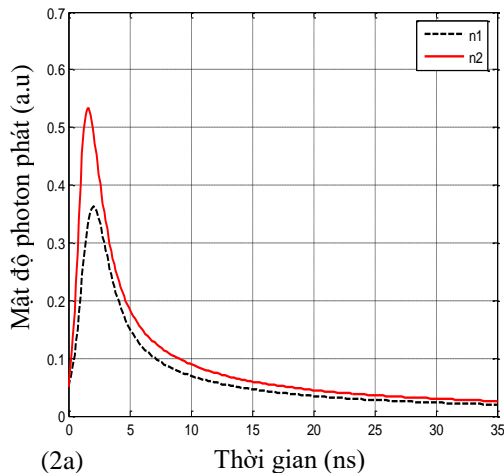
Để khảo sát ảnh hưởng của hệ số mất mát phụ thuộc thời gian dạng (2.3) chúng tôi thay đổi giá trị của các tham số β_{0i} và giá trị tham số m . Tính toán sự thay đổi các đặc trưng của mode phát chúng tôi đánh giá về ảnh hưởng của từng tham số và mối quan hệ giữa hệ số mất mát với các tham số động học laser khác lên các đặc trưng mode phát.

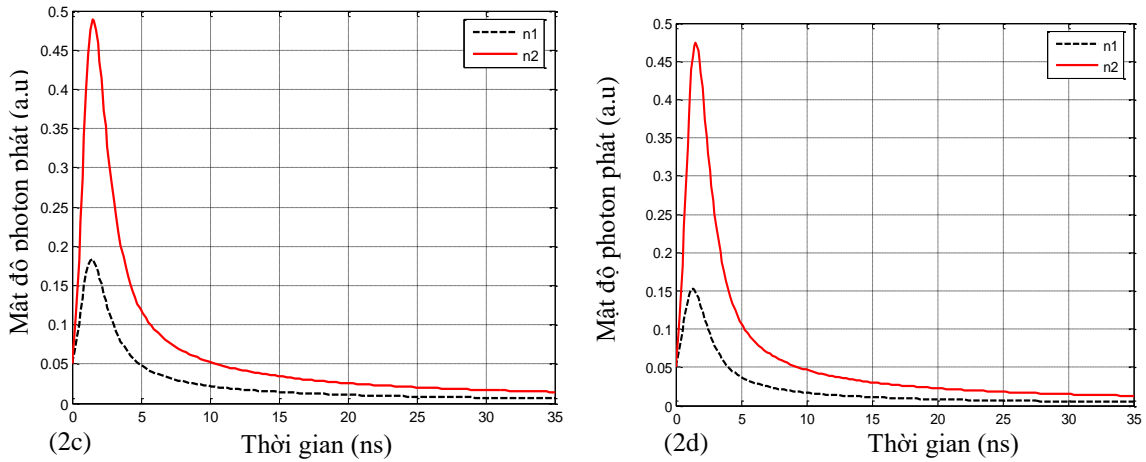
3.1. Ảnh hưởng của tham số β_{01}

Trong phần này, để khảo sát vai trò của hệ số β_{01} lên các đặc trưng của mode phát chúng tôi thay đổi β_{01} từ $0,2 \text{ cm}^3 \cdot \text{ns}^{-1}$ đến $3,8 \text{ cm}^3 \cdot \text{ns}^{-1}$ và cố định giá trị của các tham số động học laser khác. Các kết quả số thu được biểu diễn trên bảng số liệu 1, các đồ thị tương ứng được cho trên các Hình 2.

Bảng 1: Kết quả khảo sát ảnh hưởng của tham số β_{01} lên các đặc trưng mode phát của laser

$\beta_{01} (\text{cm}^3 \cdot \text{ns}^{-1})$	$n_1^{\max} (\text{a.u})$	$T_1 (\text{ns})$	$\Delta\omega_1 (\text{ns})$	$n_2^{\max} (\text{a.u})$	$T_2 (\text{ns})$	$\Delta\omega_2 (\text{ns})$
0,2	0,3624	2,3171	3,0645	0,5334	1,7338	2,4193
0,6	0,2867	1,7338	2,4193	0,5208	1,5725	2,1774
1,0	0,2457	1,6532	2,1774	0,5112	1,5725	2,1774
1,4	0,2186	1,5725	2,1774	0,5031	1,5725	2,1774
1,8	0,1988	1,5725	2,0967	0,4956	1,5725	2,1774
2,2	0,1832	1,4919	2,0161	0,4891	1,5725	2,1774
2,6	0,1711	1,4112	1,9354	0,4841	1,5725	2,1774
3,0	0,1609	1,4112	1,9354	0,4782	1,5725	2,1774
3,4	0,1523	1,4112	1,9354	0,4747	1,5725	2,1774
3,8	0,1448	1,3306	1,9354	0,4702	1,4919	2,0967





Hình 2: Ảnh hưởng của tham số β_{01} lên các mode phát

Trong Hình 2a) $\beta_{01} = 0,2 \text{ ns}^{-1}$; 2b) $\beta_{01} = 0,6 \text{ ns}^{-1}$; 2c) $\beta_{01} = 1,2 \text{ ns}^{-1}$; 2d) $\beta_{01} = 1,8 \text{ ns}^{-1}$.

Từ Bảng 1 và các đồ thị ở Hình 2, chúng ta nhận thấy khi tăng giá trị của hệ số β_{01} cường độ của mode phát thứ nhất (n_1) giảm xuống, độ rộng thời gian của mode và thời gian đạt đến giá trị cực đại của mode phát cũng giảm theo. Về mặt vật lý sự tăng của hệ số mất mát làm tăng thất thoát các photon phát xạ của laser, đồng thời tác động của hiệu ứng photon hopping nên một số photon của mode n_1 chuyển sang mode n_2 làm các đặc trưng của mode n_2 cũng thay đổi.

3.2. Ảnh hưởng của tham số β_{02}

Trong phần này, để khảo sát ảnh hưởng của tham số β_{02} lên các đặc trưng của mode phát chúng tôi thay đổi giá trị của β_{02} từ $0,2 \text{ cm}^3.\text{ns}^{-1}$ đến $3,8 \text{ cm}^3.\text{ns}^{-1}$ và cố định giá trị của các tham số động học laser khác. Các kết quả được biểu diễn trên Bảng 2, và các đồ thị tương ứng được vẽ trên Hình 3.

Bảng 2: Kết quả khảo sát ảnh hưởng của tham số β_{02} lên các đặc trưng mode phát của laser

$\beta_{02}(\text{cm}^3.\text{ns}^{-1})$	$n_1^{\text{max}}(\text{a.u})$	$T_1(\text{ns})$	$\Delta\omega_1(\text{ns})$	$n_2^{\text{max}}(\text{a.u})$	$T_2(\text{ns})$	$\Delta\omega_2(\text{ns})$
0,2	0,2996	1,8145	2,5000	0,5027	1,8951	2,5806
0,6	0,2779	1,4919	2,4194	0,4310	1,8145	2,5000
1,0	0,2662	1,3306	2,2581	0,3350	1,8145	2,5000
1,4	0,2582	1,2500	2,2581	0,2819	1,7339	2,4194
1,8	0,2522	1,1694	2,0968	0,2473	1,7339	2,4194
2,2	0,2476	1,0081	2,0968	0,2225	1,7339	2,4194
2,6	0,2437	1,0081	2,0161	0,2036	1,7339	2,4194
3,0	0,2405	1,0081	1,9355	0,1886	1,7339	2,4194
3,4	0,2376	1,0081	1,8548	0,1764	1,7339	2,4194
3,8	0,2352	1,0081	1,8548	0,1662	1,7339	2,4194

Kết quả tính toán số trên Bảng 2 cho thấy khi thay đổi giá trị của tham số β_{02} , các đặc trưng như mật độ mode phát n_2^{\max} (a.u), thời gian đạt đến giá trị cực đại T_2 (ns) cũng đã suy giảm. Tuy nhiên ở giá trị $\beta_{02} = 1,4 \text{ cm}^3 \cdot \text{ns}^{-1}$ thì thời gian T_2 và độ rộng thời gian $\Delta\omega_2$ của mode n_2 không đổi. Kết quả khảo sát chi tiết hơn cho thấy tại giá trị β_{02} lớn hơn $3,8 \text{ cm}^3 \cdot \text{ns}^{-1}$ mật độ của mode n_2 giảm nhanh.

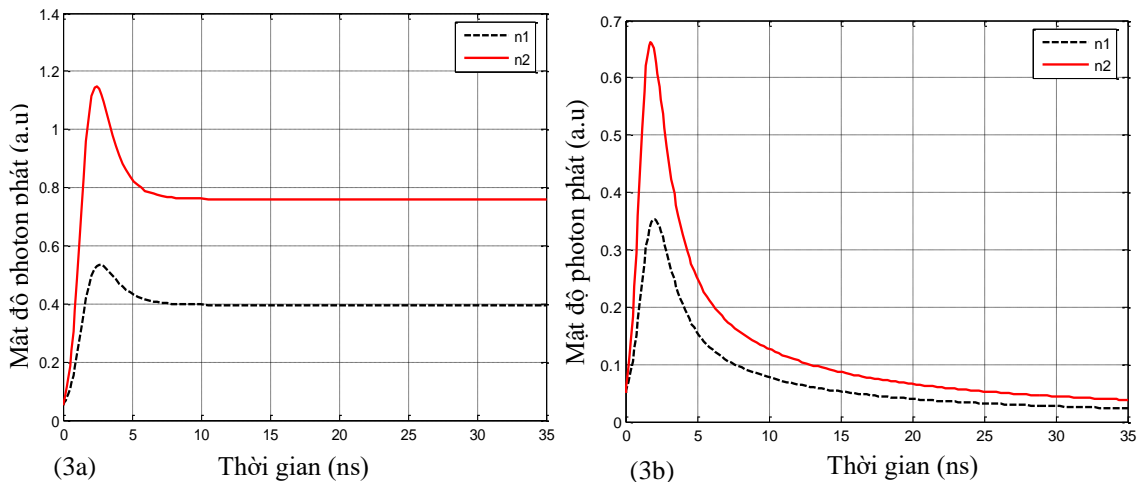
3.3. Ảnh hưởng của tham số m

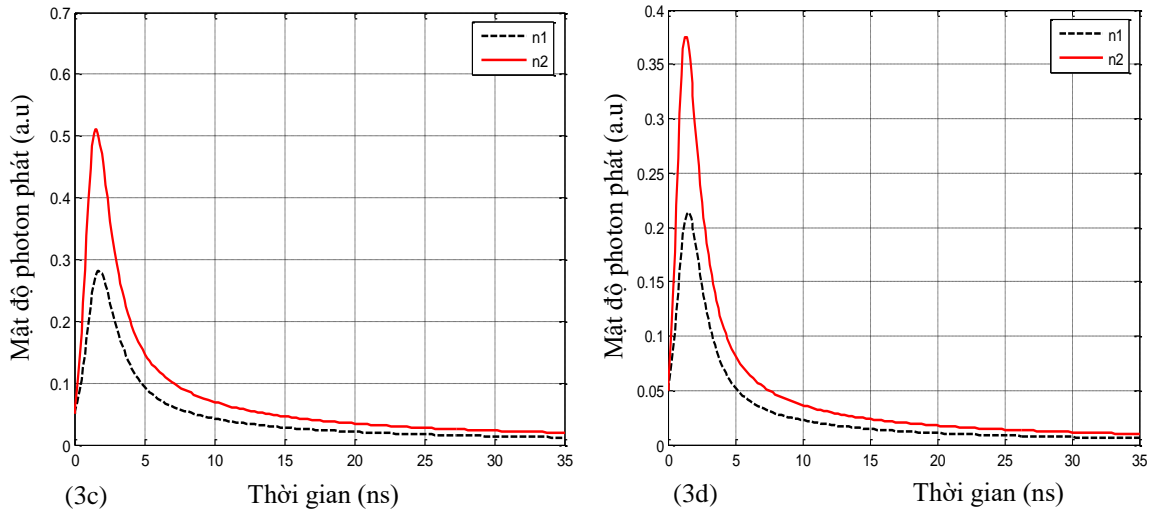
Để khảo sát tác động của tham số m lên các đặc trưng của mode phát chúng tôi thay đổi giá trị của tham số m từ 1 đến 10 và cố định giá trị của các tham số động học laser khác. Các kết quả số thu được trên Bảng 3 và được biểu diễn trên các Hình 3, Hình 4.

Bảng 3: Kết quả khảo sát ảnh hưởng của tham số m lên các đặc trưng mode phát của laser

m	n_1^{\max} (a.u)	T_1 (ns)	$\Delta\omega_1$ (ns)	n_2^{\max} (a.u)	T_2 (ns)	$\Delta\omega_2$ (ns)
1	0,4165	2,2177	3,7097	0,8091	1,8952	3,2258
2	0,3528	2,0565	3,0645	0,6612	1,8145	2,9032
3	0,3112	1,8952	2,6613	0,5718	1,6532	2,6613
4	0,2814	1,7339	2,5000	0,5098	1,5726	2,2581
5	0,2585	1,7339	2,2581	0,4646	1,4919	2,1774
6	0,2405	1,5726	2,2581	0,4289	1,4919	2,0968
7	0,2258	1,5726	2,1774	0,4000	1,3306	2,0161
8	0,2134	1,5726	1,8548	0,3752	1,4113	1,9355
9	0,2029	1,4919	1,8548	0,3562	1,3306	1,9355
10	0,1937	1,4113	1,9355	0,3386	1,2500	1,8548

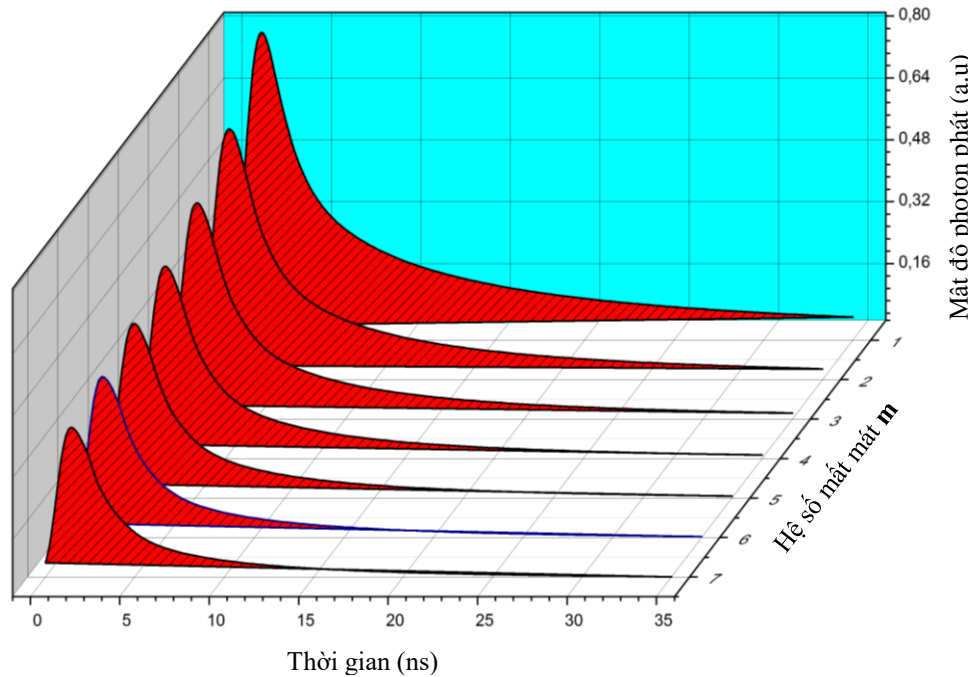
Kết quả tính toán số trên Bảng 3 và Hình 3, Hình 4 cho thấy, khi thay đổi giá trị của tham số m từ 0 đến 8, các đặc trưng như cường độ mode phát, thời gian đạt đến giá trị cực đại và độ rộng thời gian của cả 2 mode đều giảm. Kết quả khảo sát chi tiết hơn cho thấy tại giá trị m lớn hơn 10, mật độ photon của các mode giảm nhanh về không.





Hình 3: Ảnh hưởng của tham số m lên các mode phát

Trong Hình 3a) $m = 0$; 3b) $m = 2$; 3c) $m = 4$; 3d) $m = 8$.



Hình 4: Ảnh hưởng của tham số m lên mode phát n_2

Từ các kết quả thu được ở trên chúng ta nhận thấy, giống như vai trò của các tham số mật mát β_{01}, β_{02} sự tăng lên của giá trị m trong biểu thức của tham số mật mát trong biểu thức (2.3) đã làm suy giảm số photon phát hữu ích trong hoạt chất laser, vì vậy làm cho mật độ photon phát cực đại của cả hai mode giảm xuống, kèm theo thời gian đạt đến giá trị cực đại của mật độ photon phát và độ rộng xung thời gian cũng giảm. Điều này phù hợp với các kết quả công bố trong [6], [7] khi độ mật mát tăng lên cường độ phổ giảm xuống và độ rộng xung (mode) phát cũng giảm theo.

4. Kết luận

Khảo sát ảnh hưởng của hệ số mất mát β_i ($i = 1, 2$) lên các đặc trưng của mode phát trong hoạt động của laser ngẫu nhiên phát hai mode, kết quả cho thấy:

- Các hệ số mất mát ảnh hưởng đến các đặc trưng của mode phát.
- Ảnh hưởng của các hệ số β_{01}, β_{02} lên các đặc trưng của các mode phát tương ứng là như nhau. Hệ số nào thì ảnh hưởng chủ yếu đến mode đó. Mode còn lại cũng bị ảnh hưởng nhưng ít hơn. Sự thay đổi giá trị của m làm ảnh hưởng đồng thời đến đặc trưng của cả hai mode. Ngoài ra cùng với ảnh hưởng của tham số mất mát, tác động của hệ số photon hopping (θ_{0i}, γ_{0i}) làm cho một số photon từ mode n_1 chuyển sang mode n_2 và ngược lại tạo ra thay đổi các đặc trưng mode phát.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] D. S. Wiersma, “The Physics and Applications of Random Lasers”, *Nature Physics*, Vol. 4, pp. 359, 2008.
- [2] Dinh Van Hoang, Nguyen Van Phu, Nguyen Thi Phuong, “Random Lasers: Characteristics, Applications and Some Research Results”, *Computational Methods in Science and Technology*, Special Issue (2), pp. 47-51, 2010.
- [3] Nguyễn Văn Phú, Đinh Văn Hoàng, *Ảnh hưởng của tham số bơm lên các đặc trưng mode của laser ngẫu nhiên*, Kỷ yếu Hội nghị Quang học, Quang phổ toàn quốc lần thứ IX, pp. 460-464, 2017.
- [4] Jiang, X. et. al., “Coupling, competition, and stability of modes in random lasers”, *Physical Review B*. 69, pp. 104202, 2004.
- [5] Soukoulis, C. et. al., “Time dependent theory for random lasers”, *Phys. Rev. Lett.* 85, pp.70, 2000.
- [6] Cao, H. et al., “Random laser action in semiconductor powder”, *Phys. Rev. Lett.* 82, pp. 2278, 2000.
- [7] Luan, F. et al., “Lasing in nanocomposite random media”, *Nano Today* 10, pp.168-192, 2015.
- [8] Zhai, T. et al., “A RGB random laser on an optical fiber facet”, *RSC Adv.* 7, 2017, pp. 45852-45855.
- [9] Cao, H. et al., “Spatial confinement of laser light in active random media”, *Phys. Rev. Lett.* 84, pp. 5584, 2000.

SUMMARY

INFLUENCE OF TIME-DEPENDENT LOSSES ON OPERATION OF TWO-MODE RANDOM LASER

In this paper, we investigated the influence of time-dependent losing coefficient on the characteristics of the laser mode by solving the rate equations system which describe the variation in photon density of two-mode random laser. The results showed that when the losing coefficient depends on the time of the characteristics of the modes such as the photon density, the time to reach the maximum value of the photon density and the pulse duration of the emitting mode were changed. The received results give us more knowledge about the influence of time-dependent losses on the operation of the two-mode random laser.

Keyword: Random laser; lost coefficient; characteristics of the laser mode.