

ĐẶC TRUNG CƯỜNG ĐỘ MODE VÀ LƯƠNG ỔN ĐỊNH TRONG LASER ĐA MODE CHỨA CHẤT HẤP THỤ BẢO HÒA

VÕ ĐỨC LƯƠNG, ĐINH VĂN HOÀNG

I. MỞ ĐẦU

Trong các bài báo [1,2], chúng tôi đã nghiên cứu đặc trưng cường độ mode và lương ổn định quang học (Optical bistability (OB)) của các laser có chứa vật liệu hấp thụ bão hòa (Laser with saturable absorber (LSA)) theo sơ đồ 4 mức của cả môi trường khuếch đại lẫn hấp thụ. Hoạt động của laser ở chế độ đơn mode có tính đến bức xạ tự động và xem sự mở rộng không đồng nhất là nổi bật. Trong bài báo này chúng tôi tiếp tục khảo sát hiện tượng OB ứng với trường hợp laser phát đa mode. Như đã biết, lý thuyết của laser đa mode thường được khảo sát ở trạng thái gần ngưỡng phát khi cường độ mode khá nhỏ [3, 4] còn lý thuyết về laser đa mode có môi trường hấp thụ bão hòa [5], và đặc biệt là lý thuyết laser đa mode có môi trường hấp thụ bão hòa với sự mở rộng không đồng nhất mới chỉ bắt đầu được nghiên cứu. Vì thế, khi giải quyết bài toán đặt ra chúng tôi sử dụng phương pháp gần đúng phương trình tốc độ và chỉ xét ở trạng thái gần ngưỡng phát.

II. ĐẶC TRUNG CƯỜNG ĐỘ MODE VÀ ĐIỀU KIỆN XUẤT HIỆN LƯƠNG ỔN ĐỊNH QUANG HỌC

Khi giải hệ phương trình tốc độ ở chế độ dừng [1] chúng tôi tìm được phương trình cơ bản đặc trưng cho cường độ mode j là :

$$Q_j - (Q_j + m) \sum_{\mu} L(\omega_{\mu} - \Omega_j) \left\{ \frac{\sigma_a^*}{1 + \sum_k L(\omega_{\mu} - \Omega_k) \cdot Q_k} - \frac{\sigma_b}{1 + \sum_k L(\omega_{\mu} - \Omega_k) \alpha Q_k} \right\} = 0 \quad (1)$$

Với các kí hiệu được dùng như ở [1, 2]

Phương trình (1) cho phép xác định ảnh hưởng của K mode còn lại lên mode thứ j cần khảo sát. Để xác định Q_j cần đánh giá cả tổng theo K lần tổng theo μ .

1. Bơm phân bố đều cho các mode

Bởi vì mất mát trong buồng cộng hưởng đối với các mode được xem là như nhau ($X_j = X$) nên khi năng lượng bơm không đổi thì cường độ mode sẽ không đổi và bằng nhau. Vì thế đại lượng Q_k có thể đưa ra ngoài tổng K . Dùng phép chuyển tổng theo μ và K thành tích phân như ở [1, 2], sau tính toán ta có:

$$Q_j + (Q_j + m) \left[\frac{4X' + 2mX' Q_j}{\alpha M^2 Q_j^2 + 2(1 + \alpha) M Q_j + 4} \right] = 0 \quad (2)$$

trong đó : $M = \Gamma/\Delta\Omega$ là số mode có trong khoảng mở rộng đồng nhất

$$\Delta\Omega = \Omega_{k+1} - \Omega_k, \quad X = X_a - X_b, \quad X' = \alpha X_a - X_b \quad (3)$$

1. 1. Bỏ qua bức xạ tự động

Khi $m = 0$, phương trình (2) nhận dạng:

$$Q_j [\alpha M^2 Q_j^2 - 2 [X' - (1 + \alpha)] M Q_j - 4 (X - 1)] = 0 \quad (4)$$

Phương trình (4) có 3 nghiệm: $Q_{j1} = 0$,

$$Q_{j2,3} = Q_{j\pm} = \frac{1}{\alpha M} \left\{ X' - (1 + \alpha) \pm \left[[X' - (1 + \alpha)]^2 + 4\alpha (X - 1) \right]^{1/2} \right\} \quad (5)$$

Khi khảo sát nghiệm (5) ta tìm được một miền chung mà 3 nghiệm của phương trình (4) đồng thời dương hoặc bằng 0 là

$$\begin{aligned} \alpha &> 1 + \frac{1}{X_b} \\ \frac{z}{\alpha} &< X_a < X_b + 1 \\ \text{với } z &= (\sqrt{\alpha - 1} + \sqrt{X_b})^2 \end{aligned} \quad (6)$$

Phân tích ý nghĩa vật lý và sự ổn định của các nghiệm (5) còn cho thấy nghiệm $Q_{j1} = 0$, $Q_{j2} = Q_{j+}$ là ổn định, còn $Q_{j3} = Q_{j-}$ không ổn định. Như vậy trong trường hợp này, hiện tượng OB sẽ xảy ra khi tham số tích thoát α và đặc trưng tốc độ bóm khuếch đại X_a thỏa mãn điều kiện (6).

Trên hình 1A là chỉ ra dạng đường vòng trở biểu diễn $Q_j(X_a)$ khi thay đổi α . Vùng OB mở rộng ra khi α tăng.

Trên hình 1B chỉ ra dạng đường vòng trở biểu diễn $Q_j(X_a)$ khi thay đổi tốc độ bóm hấp thụ X_b . Vùng OB sẽ giảm cùng với sự giảm của X_b và ngược lại.

1. 2. Tính đến bức xạ tự động.

Khi $m \neq 0$ phương trình (2) có dạng:

$$\alpha M^2 Q_j^3 - 2M [X' - (1 + \alpha)] Q_j^2 + 2 [2 - 2X - mM X'] Q_j - 4mX = 0 \quad (7)$$

Việc giải chính xác phương trình (7) gặp khó khăn. Vì m đặc trưng cho bức xạ tự động là rất nhỏ ($m \sim 10^{-10}$) nên ta xem số hạng tự do trong (7) là nhiễu loạn và sử dụng phép tính gần đúng theo phương pháp nhiễu loạn.

$$\text{Đặt } Q_j = \tilde{Q}_j + \rho_j \text{ với } \rho_j \ll \tilde{Q}_j \quad (8)$$

\tilde{Q}_j là nghiệm của phương trình (7) không chứa số lượng tự do.

$$\tilde{Q}_{j1} = 0$$

$$\tilde{Q}_{j2,3} = \frac{1}{\alpha M} \left\{ \alpha (X_a - 1) - (X_b + 1) \pm \left[[\alpha (X_a - 1) - (X_b + 1)]^2 - \right. \right.$$

$$\left. \left. - 2\alpha [X_b (2 + mM) - X_a (2 + mM\alpha) + 2] \right]^{1/2} \right\}$$

Thế (8) và (9) vào (7) và bỏ qua số hạng bậc cao của ρ_j ta có:

$$\text{Với } Q_{j1} = \tilde{Q}_{j1} + \rho_1 = \rho_1 = \frac{2m(X_a - X_b)}{X_b(2 + mM) - X_a(2 + mM\alpha) + 2} \quad (10a)$$

$$\begin{aligned} \text{Với } Q_{j2,3} &= \tilde{Q}_{j2,3} + \rho_{2,3} \\ &= \tilde{Q}_{j2,3} + \frac{4m(X_a - X_b)}{3\alpha M^2 \tilde{Q}_{j2,3}^2 - 4M[\alpha(X_a - 1) - (X_b + 1)] \tilde{Q}_{j2,3} + 2[X_b(2 + mM) - X_a(2 + mM\alpha) + 2]} \end{aligned} \quad (10b)$$

Từ (9), (10a), (10b) ta tìm được miền xác định của X_a trong đó 3 nghiệm

$Q_{j_1}, Q_{j_2}, Q_{j_3}$ đồng thời dương là:

$$\frac{z}{\alpha} < X_a < \frac{X_b(2 + mM) + 2}{2 + mM\alpha} \quad (11)$$

Với $z = (\alpha - 1 + X_b - mM\alpha) + [4X_b(\alpha - 1) + mM\alpha(mM\alpha - 2\alpha + 2)]^{\frac{1}{2}}$

Dễ dàng thấy rằng điều kiện (11) sẽ trở về (6) khi $m = 0$.

Dạng đồ thị $Q_j(X_a)$ có thể suy ra từ việc vẽ đồ thị $X_a(Q_j)$ bằng phép cộng 2 đồ thị. Trong miền xác định (11) dạng đường biểu diễn $Q_j(X_a)$ như hình 2. Mũi tên chỉ trạng thái của hệ khi X_a tăng hoặc giảm. Nghiệm Q_{j_1} ứng với đoạn AB nghiệm Q_{j_2} ứng với đoạn CD là ổn định, còn Q_{j_3} ứng với đoạn BC là không ổn định.

Như vậy: Nếu tính đến bức xạ tự động, hiện tượng OB đã xảy ra khi X_a thỏa mãn điều kiện (11).

2. Bơm phân bố không đều theo các mode.

Giả thiết, tốc độ bơm khuếch đại phụ thuộc vào tần số theo dạng hàm Lorents

$$R_{\rho_a} = R_0 \varepsilon^2 / [\varepsilon^2 + 4(\omega_p - \Omega_0)^2] \quad (12)$$

Gần ngưỡng phát ($0 \leq Q_k \ll 1$) ta có thể dùng khai triển gần đúng cho các biểu thức dưới mẫu số của (1) đồng thời thực hiện phép biến đổi tổng theo μ thành tích phân như ở [1], sau một loạt phép tính, ta nhận được:

$$Q_j - (Q_j + m) \left[\rho_j X_0 + R - \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} \sigma_{/j-k/} \left[\frac{(\rho_j + \rho_k)}{2} X_0 + T \right] Q_k \right] = 0 \quad (13)$$

trong đó: $\rho_j = \left[1 + \left(\frac{2\Delta\Omega}{\varepsilon} \right)^2 j^2 \right]^{-1}$, $\sigma_j = \left[1 + \left(\frac{\Delta\Omega}{\Gamma} \right)^2 j^2 \right]^{-1}$,
 $\sigma_{/j-k/} = \begin{cases} 1 & \text{khi } /j-k/ = 0 \\ \sigma_n & \text{khi } /j-k/ = n \end{cases}$

$$K = 0, 1, 2, \dots, j = 0, 1, 2, \dots, n = 1, 2, 3, \dots \quad (14)$$

$$R = X_p - X_b, \quad \Gamma = X_p - \alpha X_b$$

Hệ phương trình (13) là hệ liên kết đối với tất cả mode phát.

Từ hệ đó có thể tìm được đặc trưng cường độ của mode phát bất kỳ dưới ảnh hưởng của các mode còn lại và đánh giá được việc xuất hiện OB đối với các mode ấy. Trong [1, 2] cũng như trong mục 1 đã chỉ ra vai trò của bức xạ tự động m , nên để đơn giản trong (13) ta bỏ qua m . Khi đó (13) trở thành

$$Q_j \left\{ \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} \sigma_{/j-k/} \left[\frac{(\rho_j + \rho_k)}{2} X_0 + T \right] Q_k - (\rho_j X_0 + R - 1) \right\} = 0 \quad (15)$$

Hệ phương trình (15) có thể giải bằng máy tính điện tử với số mode bất kỳ. Ở đây chúng tôi đã tiến hành giải bằng số cho trường hợp laser phát 11 mode ($k = 0, 1, 2, \dots, 5$) trên máy tính điện tử IBM-PC của UBKH và KTNN với các tham số được chọn gần với laser CO₂ chứa SF₆ làm vật liệu hấp thụ bão hòa theo tài liệu của E. Arimondo [6].

$$X = 5.10^7 (s^{-1}), \tau_a = 1.39.10^8 (s^{-1}), \gamma_b = 2.07.10^4 (s^{-1}), \rho_a = 1.8.10^{13} (s^{-2}),$$

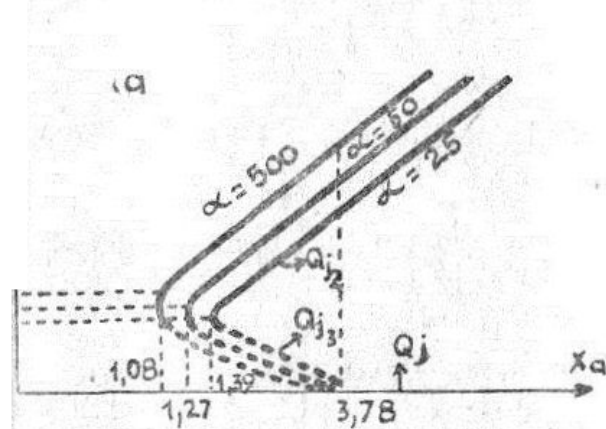
$$\rho_b = 5.10^{10} (s^{-2}), \alpha = 50, B = 10^{-9} (s^{-1}), k_a = 5.1.10^5, k_b = 4.8.10^7.$$

$$\Gamma = 8 \text{ MHz}, \varepsilon = 160 \text{ MHz}, \Delta\Omega = 40 \text{ MHz}, R_p b = 3.36.10^{17}, P = 2.5.10^{18}$$

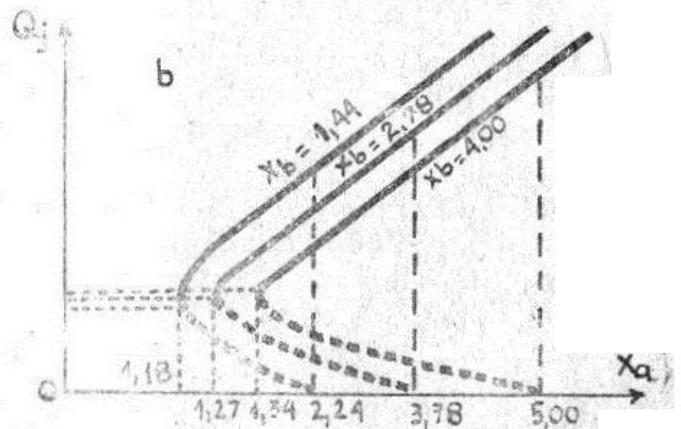
(16)

Dạng đồ thị $Q_j(X_0)$ theo các kết quả tính toán được biểu diễn trên hình như vậy: Trong trường hợp laser phát 11 mode, hiện tượng OB chỉ xuất hiện với các mode $Q_1 (Q_{-1}), Q_4 (Q_{-4})$.

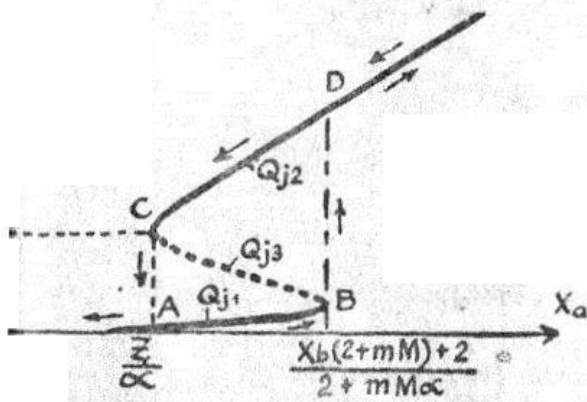
Điều đó cho thấy ảnh hưởng của sự cạnh tranh mode lên việc xuất hiện hiện tượng OB.



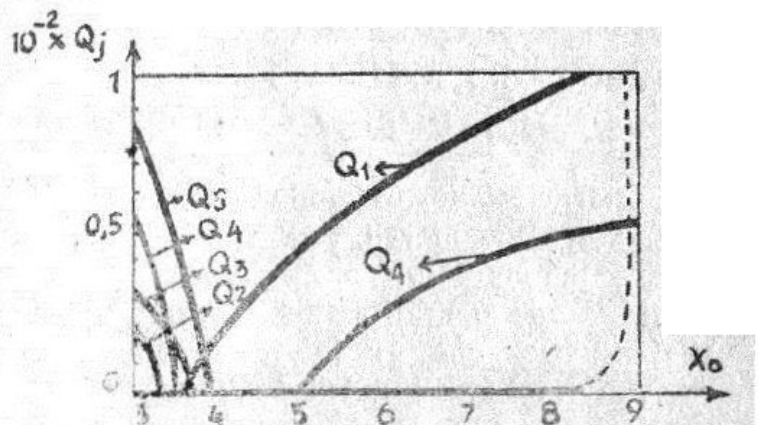
Hình 1. a, Sự phụ thuộc $Q_j(X_a)$ khi $m = 0, X_b = 2,78, \alpha = 26, 50$ và 500



Hình 1. b, Sự phụ thuộc $Q_j(X_a)$ khi $m = 0, \alpha = 50, X_b = 1,44, 2,78$ và $4,00$



Sự phụ thuộc $Q_j(X_a)$ khi $m \neq 0$
Môi trường chỉ trạng thái của hệ khi X_a tăng hoặc giảm.



Hình 3 Đường biểu diễn $Q_j(X_0)$ khi $R_{\mu a}$ có dạng hàm Lorentz, Laser phát 11 mode ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm 5$), $R = -2,40, T = -138,62, \Gamma = 8, \epsilon = 160, \Delta\Omega = 40$.

III - KẾT LUẬN

1. Trong laser vòng có chứa vật liệu hấp thụ bão hòa với sự mở rộng không đồng nhất là nổi bật có thể xác định được điều kiện xuất hiện hiệu ứng OB cho mode phát bất kỳ. Khi bơm khuếch đại phân bố điều cho các mode, điều kiện này là chung cho cả chế độ phát đơn mode lẫn đa mode.

2. Vùng lưỡng ổn định phụ thuộc vào các tham số vật lý của hệ LSA: Γ , s , α , $R_p b$, P , v.v... Khi thay đổi một trong các tham số này vùng OB và đường vòng trở đều bị biến đổi.

3. Hiệu ứng OB chỉ xuất hiện khi tham số tích thoát $\alpha > 1 + \frac{1}{X_b}$. Tăng α vùng OB được mở rộng ra. Khi chú ý đến bức xạ tự động, vùng OB biến đổi không đáng kể nhưng dạng đường vòng trở phù hợp với tính toán lý thuyết và thực nghiệm của các tác giả khác [5, 7, 8]. Khi bỏ qua bức xạ tự động phù hợp với lý thuyết của E. Arimondo [6].

4. Khi bơm phân bố không đều cho các mode, do sự cạnh tranh giữa các mode, hiệu ứng OB chỉ xuất hiện ở một số mode nào đó tùy thuộc vào số mode phát của laser. Vùng OB bị dịch chuyển so với khi laser phát đơn mode.

Tài liệu tham khảo

1. Võ Đức Lương, Đinh Văn Hoàng. Tạp chí vật lý, Viện Khoa học VN Tập XII Số 4/87
2. Võ Đức Lương, Đinh Văn Hoàng. Tạp chí vật lý, Viện Khoa học VN. Tập XII Số 3/87
3. W. E. Lamb, Jr. Phys Rev A 134, 1429 (1964).
4. M. Sargent III. Jr. Phys. Rev W 164, 450 (1967).
5. R. Muller. Preprint 80-4. Zos Mai 1980.
6. E. Arimondo et al Appl. Phys. B30, 57 (1983).
7. R. Bonifacio et al Opt. Commun 19, 172 (1976).
8. S. Ruschin et al Chem. Phys. Lett 66, 100 (1979).

VO DUC LUONG, DINH VAN HOANG

CHARACTERISTICS OF MODE INTENSITY AND OPTICAL BISTABILITY IN MULTIMODE LASERS WITH SATURABLE ABSORBER

Characteristics of mode intensity and conditions for appearance of the OB in LSA are considered. In the case of the pump with equal distribution for all modes, the condition for appearance OB is common for both single-mode and multi-mode operation, and the optical bistability interval transforms when the homogeneous or inhomogeneous broadening, the rotational relaxation rates in amplifying and absorbing cells or the pumping rates of these cells change. In the case of the pump with Lorents distribution, the OB is only appeared in some modes.

Bộ môn Vật lý Quang phổ
Khoa Vật lý— Trường ĐHTH HN

Nhận bài 25/12/1987