

ĐIỀU KIỆN TỐI ƯU VÀ THÔNG SỐ ĐỒNG DẠNG TỐI ƯU CỦA LASER N₂ LÀM VIỆC Ở CHẾ ĐỘ XUNG

Trần Tuấn

Khoa Vật Lý, Đại học Khoa học Tự nhiên – ĐHQG-HCM

(Bài nhận ngày 17 tháng 6 năm 2002, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 22 tháng 7 năm 2002)

TÓM TẮT: Laser N₂ là loại laser dịch chuyển dao động điện tử. Đây là loại laser hoạt động theo sơ đồ 3 mức với thời gian sống của mức trên cao hơn so với mức dưới; Vì vậy chỉ có thể làm việc ở chế độ xung. Cơ chế kích thích chủ yếu xảy ra do va chạm với điện tử. Từ phương trình vận tốc có thể tìm được nhiệt độ tối ưu $(T_e)_{opt}$, mật độ đảo lộn tối ưu $(\Delta N)_{opt}$ và tỉ số $\frac{E}{P}$ tối ưu.

I. Mở đầu

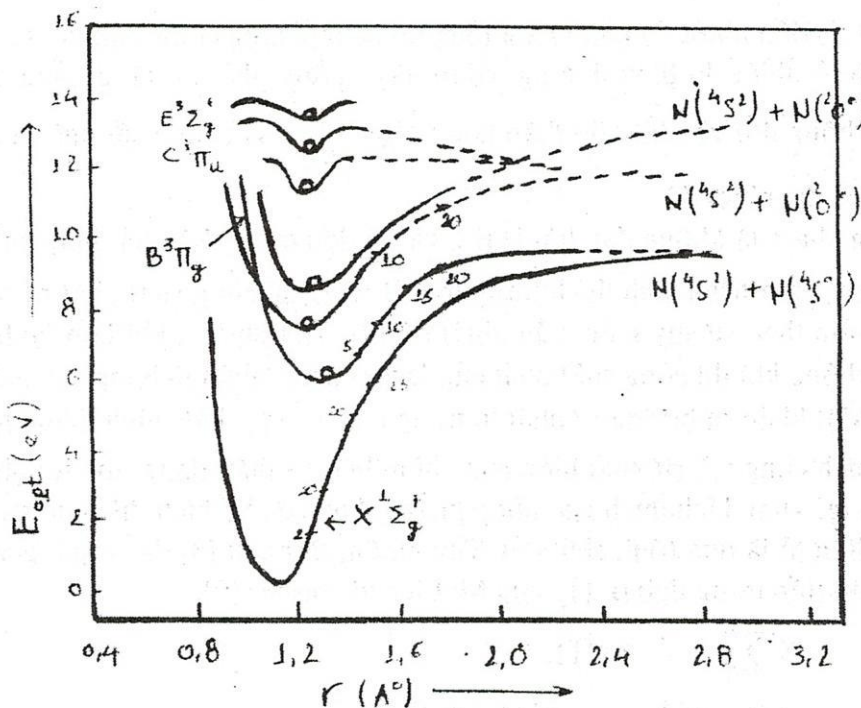
Laser N₂ là một nguồn sáng UV mạnh được sử dụng trong nhiều lĩnh vực ứng dụng và nghiên cứu khoa học, trong đó đặc biệt để làm nguồn bơm cho hệ thống laser màu, dùng để khảo sát cơ chế phát quang của các chất cũng như xác định độ nhiễm bẩn của bầu khí quyển... Chính vì những đặc tính này nên trong thực tế có rất nhiều công trình nghiên cứu về laser N₂ được thực hiện nhằm tính toán (về mặt lý thuyết) hoặc đo đạc (bằng thực nghiệm) các thông số liên quan – chiều dài buồng cộng hưởng, áp suất khí, khoảng cách giữa các điện cực, tốc độ thổi khí, tần số lặp lại... Tuy nhiên, cho đến nay vẫn chưa có một lý thuyết nào đề cập đến việc tối ưu hóa các thông số đặc trưng cho laser N₂. Trong công trình này chúng tôi dựa vào cơ chế kích thích, đường cong thế năng và phương trình vận tốc của mức laser trên và dưới để rút ra các thông số đồng dạng tối ưu.

Trước tiên chúng tôi khảo sát cơ chế kích thích phân tử N₂ trong môi trường hoạt tính.

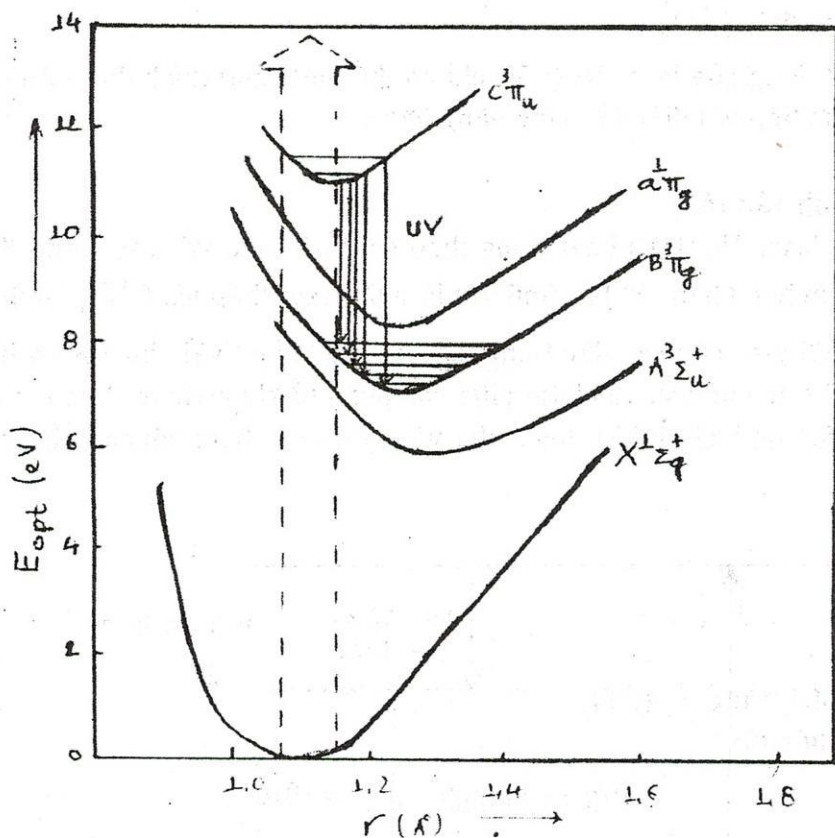
1. Cơ chế kích thích

Hình 1 và 2 mô tả các đường cong thế năng cùng với các dịch chuyển chủ yếu của phân tử N₂. Căn cứ vào các mô hình này chúng ta thấy rằng để tạo ra dao động của laser (phát xung) ứng với chuyển dời (C → B) cần thiết phải đòi hỏi một năng lượng cao hơn so với trường hợp chuyển dời (B → A).

Trong thực tế chùm bức xạ phát ra từ laser N₂ có bước sóng λ rơi vào vùng UV sẽ tương ứng với quá trình tạo ra sự đảo lộn độ bị chiếm giữa hai mức $C^3\Pi_u$ và $B_3\Pi_g$ và được thực hiện thông qua cơ chế kích thích phân tử N₂ từ trạng thái kích thích cơ bản $X^1\Sigma_g^+$ lên các mức trên $C^3\Pi_u$ và $B_3\Pi_g$. Tuy nhiên, vì N₂ là một phân tử gồm hai nguyên tử giống nhau nên momen dipon điện $\vec{P} = 0$. Vì vậy, dịch chuyển giữa các mức dao động trên là bị cấm (về spin). Nhưng theo [1] thì sự cấm này sẽ không bắt buộc chủ yếu trong trường hợp xảy ra sự va chạm trao đổi điện tử trong đó một điện tử tới có thể được xem như thay thế cho một trong số các điện tử hoá trị của phân tử trong suốt quá trình va chạm với spin của điện tử tới song song với điện tử hoá trị khác của phân tử. Sự va chạm trao đổi điện tử này sẽ làm phát sinh các chuyển dời do có sự thay đổi độ bội (liên quan đến spin toàn phần của tất cả các điện tử hoá trị) và theo [2], [3] được xem như là cơ chế kích thích trực tiếp ở mức trên của laser. Lập luận này một lần nữa đã được xác nhận trong lý thuyết về sự gần đúng bảo



Hình 1: Đường cong thế năng

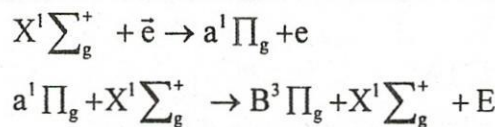


Hình 2: Các dịch chuyển chính trong phân tử N₂

hòa do Gerry đưa ra [4]. Trong đó đề cập đến việc kích thích trạng thái $C^3\Pi_u$ do va chạm trực tiếp với điện tử mang năng lượng. Các kết quả thu được từ lý thuyết này hoàn toàn phù hợp với các số liệu thực nghiệm của Leonard [5]. Mặt khác thực nghiệm [6] chứng tỏ rằng

khi làm lạnh laser N₂ đến nhiệt độ không khí lỏng thì sẽ làm tăng công suất phát ra một cách đáng kể so với khi ở nhiệt độ bình thường. Điều này không phải do tăng nồng độ phân tử (N₀) khi áp suất không đổi và nhiệt độ thấp hơn ($N_0 = \frac{P}{KT}$) vì công suất ngõ ra sẽ đạt đến giá trị cực đại tại cả hai nhiệt độ.

Nếu các va chạm là không đàn hồi loại 2 và kể đến trạng thái giả dừng ($a^1\Pi_g$) đóng vai trò chủ yếu trong quá trình kích thích trạng thái B và C thì công suất phát ra sẽ giảm khi tần số va chạm giảm theo sự suy giảm của nhiệt độ [7]. Tuy nhiên, khi làm lạnh đến nhiệt độ hóa lỏng của không khí thì công suất phát của laser chẳng những không suy giảm mà trái lại còn tăng lên. Mặt khác sự bức xạ tự phát từ trạng thái $C^3\Pi_u$ được hình thành ngay khi có dòng xung kích thích cùng với sự xuất hiện của chùm bức xạ dưới dạng (mode) phát ra trong suốt quá trình tồn tại xung kích thích cho phép khẳng định cơ chế kích thích do va chạm trực tiếp phân tử với điện tử là quá trình chủ yếu. Tuy nhiên, Bonnett [8] đã cố gắng sử dụng mô hình kích thích gián tiếp trạng thái $B_3\Pi_g$ của Matros và Parker [9].

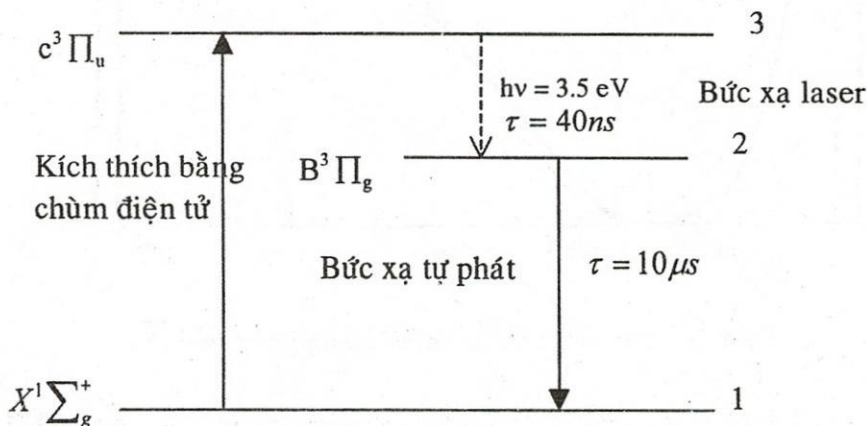


Để giải thích quá trình kích thích trạng thái $C^3\Pi_u$ nhưng cuối cùng bị thất bại do trạng thái $a^1\Pi_g$ nằm dưới trạng thái $C^3\Pi_u$.

Tóm lại hoạt động của laser N₂ (UV) chỉ có thể được giải thích dựa trên cơ chế kích thích do va chạm trực tiếp với điện tử mang năng lượng.

2. Hệ phương trình vận tốc

Có thể xem laser N₂ (UV) hoạt động theo sơ đồ 3 mức với các trạng thái điện tử $X^1\Sigma_g^+$ (mức 1) là mức cơ bản, $B^3\Pi_g$ (mức 2) là mức laser thấp và $C^3\Pi_u$ (mức 3) là mức laser cao. Do dải thời gian của các đặc trưng điện quang chỉ cỡ vài chục ns và hoạt động ở áp suất thấp (p < 100 torr) nên sự va chạm giữa các phân tử khí hoặc tái hợp ion giữa chúng là không đáng kể. Sự ion hoá và kích thích chủ yếu là do va chạm với các điện tử trong khi phóng điện.



Nếu gọi N_1, N_2, N_3 là mật độ hạt tồn tại ở 3 mức (1), (2) và (3); $X_{i,j}$ là vận tốc kích thích phân tử do va chạm với các điện tử để chuyển từ mức $i \rightarrow j$ ($i < j$)

τ_{ji} là thời gian sống bức xạ từ $j \rightarrow i$.

τ_{ji}^{-1} là tốc độ phân hủy bức xạ.

Khi đó phương trình vận tốc về mật độ hạt tại các mức theo thời gian t là:

$$\frac{dN_3}{dt} = X_{13}N_1 - N_3\tau_{32}^{-1} \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = X_{12}N_1 - N_2\tau_{21}^{-1} \quad (2)$$

Trong đó số hạng thứ nhất bên phải của (1) đặc trưng cho số hạt góp thêm vào mức 3 do sự chuyển mức của phân tử từ mức 1 lên mức 3 dưới tác dụng của điện tử, còn số hạng thứ 2 trong (2) biểu thị số hạt rời khỏi mức 3 do bức xạ tự phát. Tương tự như vậy đối với 2.

Mặt khác, theo lập luận đã đưa ra trước đây thì quá trình chuyển mức trong phân tử chủ yếu do va chạm trực tiếp với điện tử do đó:

$$X_{13} = N_e \langle \sigma_{13}v_e \rangle \quad (3)$$

$$X_{12} = N_e \langle \sigma_{12}v_e \rangle \quad (4)$$

Với

N_e : mật độ điện tử

$\langle \sigma_{13}v_e \rangle$: hằng số vận tốc kích thích phân tử do va chạm với điện tử để chuyển phân tử từ mức 1 lên mức 3.

$\langle \sigma_{12}v_e \rangle$: hằng số kích thích do va chạm với điện tử để chuyển phân tử từ mức 1 lên mức 2.

Thay (3) và (4) vào (1) và (2) ta được:

$$\frac{dN_3}{dt} = N_1N_e \langle \sigma_{13}v_e \rangle - N_3\tau_{32}^{-1} \quad (5)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = N_1N_e \langle \sigma_{12}v_e \rangle - N_2\tau_{21}^{-1} \quad (6)$$

Lấy tích phân theo biến t trong khoảng thời gian từ 0 đến τ (với τ là thời gian bơm) cho ta

$$N_3 = N_1N_e \langle \sigma_{13}v_e \rangle \tau - N_3\tau_{32}^{-1}\tau \quad (7)$$

$$N_2 = N_1N_e \langle \sigma_{12}v_e \rangle \tau - N_2\tau_{21}^{-1}\tau \quad (8)$$

Suy ra

$$N_3 = \frac{N_1N_e\tau \langle \sigma_{13}v_e \rangle}{1 + \frac{\tau}{\tau_{32}}} \quad (9)$$

$$N_2 = \frac{N_1N_e\tau \langle \sigma_{12}v_e \rangle}{1 + \frac{\tau}{\tau_{21}}} \quad (10)$$

Ngoài ra

Thời gian bơm $\tau \ll \tau_{21} = 10ns$: thời gian sống của hạt ở mức 2

do đó

$$\frac{\tau}{\tau_{21}} \ll 1 \longrightarrow 1 + \frac{\tau}{\tau_{21}} \approx 1 \quad (11)$$

Mật độ đảo lộn giữa hai mức 2 và 3 là

$$\Delta N = N_3 - N_2 = N_1 N_e \tau \left[\frac{\langle \sigma_{13} v_e \rangle}{1 + \frac{\tau}{\tau_{32}}} - \frac{\langle \sigma_{12} v_e \rangle}{1 + \frac{\tau}{\tau_{21}}} \right] \quad (12)$$

Và sẽ đạt đến giá trị tối ưu khi và chỉ khi $\frac{\partial \Delta N}{\partial N_e} = 0$

$$\Leftrightarrow \frac{N_1 N_e}{\tau} \left[\frac{\langle \sigma_{13} v_e \rangle}{1 + \frac{\tau}{\tau_{32}}} - \langle \sigma_{12} v_e \rangle \right] = 0 \quad (13)$$

Để dàng nhận thấy $N_1 \neq 0; \tau \neq 0$

Suy ra

$$\langle \sigma_{13} v_e \rangle = \left(1 + \frac{\tau}{\tau_{32}} \right) \langle \sigma_{12} v_e \rangle \quad (14)$$

Dựa vào công trình nghiên cứu của Cart Wright [11] về tiết diện va chạm kích thích từ $v'' = 0$ (thuộc trạng thái cơ bản $X^1 \sum_g^+$) lên các trạng thái kích thích thấp nhất của phân tử như là một hàm theo năng lượng điện tử và dùng thêm biểu thức [10]

$$\langle Q_{oj}^e v_e \rangle = 1,8 \cdot 10^8 Q_{oj \max}^e (KT_e)^{1/2} \cdot F(T_e, V_j, V_m) \quad (15)$$

với

$$F(T_e, V_j, V_m) = \frac{b-1}{b^3} \left(2 + b \frac{V_j}{KT_e} \right) \exp \left(- \frac{V_j}{KT_e} \right)$$

và

$$b = 1 + \frac{KT_e}{\Delta V_{mj}} = 1 + \frac{KT_e}{V_m - V_j}$$

Cho ta giá trị tối ưu của năng lượng điện tử là một hàm theo thời gian bơm, cụ thể là:

Khi $\tau = 0 \text{ ns} \iff \frac{\tau}{\tau_{32}} = 0$ thì năng lượng điện tử tối ưu là $(T_e)_{opt} = 6eV$

Khi $\tau = 1.2 \text{ ns} \iff \frac{\tau}{\tau_{32}} = 0.03$ thì $(T_e)_{opt} = 6eV$

Khi $\tau = 1.6 \text{ ns} \iff \frac{\tau}{\tau_{32}} = 0,04$ thì $(T_e)_{opt} = 7eV$

Khi $\tau = 9.9 \text{ ns} \iff \frac{\tau}{\tau_{32}} = 0.248$ thì $(T_e)_{opt} = 8eV$

.....

Biết được giá trị tối ưu của năng lượng điện tử thì từ [12] có thể suy ra được cường độ bơm tối ưu $(E/P)_{opt}$

$$KT_e = 0.11 \left(\frac{E}{P} \right)^{0.8} \quad (16)$$

khi đó với

$$\begin{aligned} (T_e)_{opt} = 6eV & \quad \text{thì} & \quad \left(\frac{E}{P}\right)_{opt} = 148V / cm.torr \\ (T_e)_{opt} = 7eV & \quad \text{thì} & \quad \left(\frac{E}{P}\right)_{opt} = 180V / cm.torr \\ (T_e)_{opt} = 8eV & \quad \text{thì} & \quad \left(\frac{E}{P}\right)_{opt} = 212V / cm.torr \end{aligned}$$

II. So sánh các kết quả với thực nghiệm:

Theo [12] thì chỉ có những điện tử có năng lượng $(T_e)_{opt} > 5eV$ thì mới tạo ra sự đảo lộn độ bị chiếm giữa hai mức $C^3\Pi_u$ và $B^3\Pi_g$, kết quả này hoàn toàn phù hợp với lý thuyết trên vì khi $\tau = 0$ thì $(T_e) = 5eV$.

Mặt khác theo [12] thì $(T_e)_{opt} = 6eV$ và $\left(\frac{E}{P}\right)_{opt} = 130V / cm.torr$

Còn theo lý thuyết thì

$$(T_e)_{opt} = 6eV \rightarrow \left(\frac{E}{P}\right)_{opt} = 148V / cm.torr$$

theo [13] thì

$$(T_e)_{opt} = 6eV \quad \text{và} \quad \left(\frac{E}{P}\right)_{opt} = 154V / cm.torr$$

EXCITATION MECHANISM, OPTIMUM CONDITION AND SIMILARITY PARAMETER OF THE ULTRA – VIOLET (UV) NITROGEN LASER IN A PULSE DISCHARGE

Tran Tuan

Faculty of Physics, University of Natural Sciences – VNU-HCM

ABSTRACT: The UV nitrogen laser is the vibronic laser. It is based on the three levels pumping scheme. The lifetime (radiative) of the C state is shorter than that of the B state. Therefore, the laser can be excited on a pulsed basis on the understanding that the electrical pulse is appreciably shorter than 40ns. The direct electron impact excitation appears to be the dominant mode of excitation. Then, thanks to the rate equations involving the population densities of the upper and lower laser levels, we can determine theoretically optimum electron energise $(T_e)_{opt}$, optimum population inversion $(\Delta N)_{opt}$, optimum value of ratio $(E/P)_{opt}$.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] K.S Kunabenchi, M.R.Gorbal, M.I.Savadotti. *Nitrogen laser*. Department of physics, Karnatak University, Dharwad 580 003 India (1985)
 [2] C.K.Raodes IEEE. *J. Quant. Electr.* QE.10.153 (1974)

- [3] B.M.Sivaraj, Proc. Ind. Nad. Sci. Acad. A.37.169 (1971)
- [4] E.T.Gerry. Appl Phys. Lett.7,6 (1965)
- [5] C.D.Leonard. Appl Phys. Lett.7,5 (1965)
- [6] C.S.Willett. An introduction to gas lasers. Population inversion mechanism, p342, Pergamon Press, Oxford (1974)
- [7] J.P.StingR, S.N.Thakur. J. Sci. Ind. Res 39,613 (1960)
- [8] W.R.Bennett. Appl Opt. Suppl. 2,13 (1965)
- [9] L.E.S Mathins, J.T.Parker. Appl Phys. Lett 3.16 (1963)
- [10] Trần Tuấn. Luận án phó tiến sĩ khoa học (1985)
- [11] D.C. Cartwright. Phys. Rev 42,1331 (1970)
- [12] Nguyễn Hữu Chí. Nghiên cứu và chế tạo TGF, N₂ - laser. Tạp chí vật lý số 3 (1983)
- [13] Nguyễn Hữu Tâm. Nghiên cứu 1 số đặc trưng của laser N₂. Tạp chí vật lý số 3 (1981).