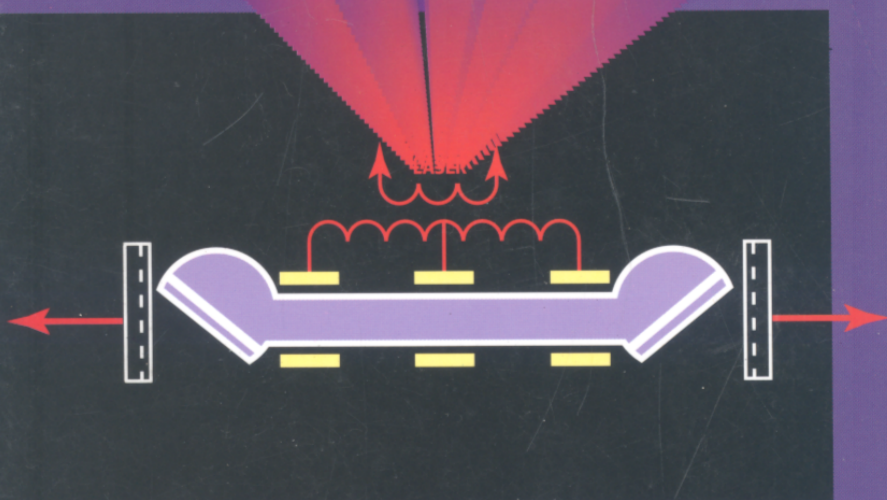


Trần Đức Hân (Chủ biên) - Nguyễn Minh Hiền

CƠ SỞ KỸ THUẬT LASER



NHÀ XUẤT BẢN GIÁO DỤC





GS. TS. TRẦN ĐỨC HÂN (Chủ biên) - PGS. TS. NGUYỄN MINH HIỀN

CƠ SỞ KỸ THUẬT LASER

(Tái bản lần thứ nhất)

NHÀ XUẤT BẢN GIÁO DỤC

LỜI NÓI ĐẦU

Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) là một trong những phát minh khoa học quan trọng nhất của thế kỷ XX. Từ phát minh ra lý thuyết bức xạ kích thích của Einstein năm 1917, đến quan sát được bằng thực nghiệm bức xạ kích thích của Fabricant, giáo sư của trường Đại học năng lượng Moskva năm 1940, đã là cơ sở để Townes, nhà vật lý học người Mỹ phát minh ra máy khuếch đại sóng điện từ bằng bức xạ kích thích. Tháng 2 năm 1960, Maiman đã chế tạo ra Laser Rubi, Laser đầu tiên trên thế giới và 4 tháng sau tức tháng 6 năm 1960, Javan đã chế tạo ra Laser khí He-Ne. Từ đó đã đẩy lên một cao trào nghiên cứu chế tạo và ứng dụng Laser. Cho tới nay hầu hết các loại Laser rắn, lỏng, khí, bán dẫn,... trải hầu hết các dải sóng đều đã được chế tạo mang tính công nghiệp và Laser đã được ứng dụng rất rộng rãi trong hầu hết các ngành khoa học, công nghệ và y tế. Nhưng ứng dụng quan trọng nhất của Laser phải kể đến thông tin cáp sợi quang.

Khoa Điện tử - Viễn thông trường Đại học Bách khoa Hà Nội đã đưa vào giảng dạy môn học “Kỹ thuật Laser” từ năm 1975 và môn “Kỹ thuật thông tin cáp sợi quang” từ năm 1984.

Giáo trình “Cơ sở kỹ thuật Laser” này sẽ cung cấp cho sinh viên những kiến thức cơ bản về Laser và hiểu Laser như một công cụ để nghiên cứu ứng dụng chúng trong một số chuyên ngành như kỹ thuật thông tin, kỹ thuật điện tử, điện tử - y sinh, công nghệ cơ khí, công nghệ hóa học ...

Bằng những công cụ toán và vật lý không phức tạp lắm chúng tôi đã trình bày những nội dung cơ bản của lý thuyết Laser để bạn đọc hiểu được bản chất của Laser. Trong đó cần chú ý đến các hiện tượng như bức xạ kích

thích, nghịch đảo nồng độ và modes của Laser. Vì chỉ hạn chế trong một số ứng dụng, nên chúng tôi chỉ khảo sát một số loại Laser đã được sản xuất công nghiệp và có ứng dụng rộng rãi.

Trong giáo trình các chương 1, 4, 5, 6 do GS. TS. Trần Đức Hân biên soạn, chương 2 và phần phụ lục A, B do PGS. TS. Nguyễn Minh Hiền biên soạn và chương 3 hai tác giả cùng biên soạn.

Các tác giả xin bày tỏ lòng cảm ơn tới : KS. Lê Văn Hải và KS. Nguyễn Đỗ Hùng đã giúp đỡ hoàn thành bản thảo.

Các tác giả rất hoan nghênh những ý kiến đóng góp xây dựng của bạn đọc.

Các tác giả

CHƯƠNG 1

CƠ SỞ LÝ THUYẾT LASER

1.1. ĐỘNG HỌC TRẠNG THÁI KÍCH THÍCH

Nguyên lý làm việc của những máy phát Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) có quan hệ rất mật thiết với tính chất quang của môi trường đặc biệt gọi là môi trường nghịch đảo nồng độ, với khái niệm nồng độ trạng thái hay nồng độ của mức là số hạt đồng thời tồn tại trong một đơn vị thể tích của môi trường ở cùng một trạng thái lượng tử hay năng lượng (xem phụ lục 1). Như ta đã biết, các hạt, nguyên tử, ion hoặc phân tử, của một môi trường bất kỳ có thể tồn tại trong những trạng thái khác nhau, ví dụ nếu khác nhau về cấu trúc của đám mây điện tử, của những nguyên tử và ion thì gọi là trạng thái điện tử, còn nếu khác nhau về đặc tính chuyển động tương đối của những ion trong phân tử thì đó là những trạng thái dao động và trạng thái quay.

Nghiên cứu các đặc tính của trạng thái nguyên tử, ion và phân tử là đối tượng của ngành quang phổ học. Ở đây trên quan điểm về Laser và Maser chúng ta chỉ quan tâm đến năng lượng nội của hạt. Năng lượng này gồm động năng và thế năng của điện tử trong đám mây điện tử của nguyên tử hoặc ion. Còn đối với phân tử thì chúng ta sẽ xét thêm động năng, thế năng và phân bố các ion trong phân tử.

Mỗi trạng thái dừng của hạt sẽ tương ứng với một giá trị năng lượng nhất định và tập hợp những giá trị năng lượng này của một nguyên tử riêng rẽ sẽ được một dãy những giá trị gián đoạn (xem phụ lục 2) và được gọi là giản đồ năng lượng.

Trạng thái ứng với năng lượng cực tiểu gọi là trạng thái ổn định hay trạng thái cơ bản của hạt. Còn những trạng thái ứng với những năng lượng nội của hạt lớn hơn trạng thái cơ bản gọi là trạng thái kích thích. Số hạt tồn tại ở một trạng thái trong một đơn vị thể tích của môi trường gọi là nồng độ của trạng thái.

Nếu trong môi trường vật chất có rất nhiều hạt thì ở trạng thái bình thường hoặc ở trạng thái kích thích đồng thời sẽ tồn tại rất nhiều hạt. Tập hợp tất cả các nồng độ của các trạng thái của môi trường gọi là phân bố nồng độ theo trạng thái và chính phân bố này sẽ đặc trưng cho môi trường. Trong điều kiện bình thường thì hầu như các hạt đều ở trạng thái bình thường và tuân theo phân bố Boltzmann. Muốn tăng nồng độ ở những trạng thái kích thích cần có tác động bên ngoài vào môi trường ví dụ bằng bức xạ, bằng dòng điện, nhiệt lượng v.v.. và nếu môi trường chứa nhiều hạt ở trạng thái kích thích sẽ gọi là môi trường kích thích.

Có thể có trường hợp, một số trạng thái kích thích lại ứng với cùng một giá trị năng lượng, người ta gọi đó là những trạng thái suy biến. Số trạng thái ứng với cùng một mức năng lượng gọi là độ suy biến hay còn gọi là trọng lượng thống kê của mức và đối với mức thứ i nào đó ta ký hiệu là g_i . Ta sẽ gọi số hạt trong một đơn vị thể tích của môi trường có cùng một giá trị năng lượng là nồng độ của mức và ký hiệu là N_i . Như vậy nồng độ của mức khác với nồng độ của trạng thái. Phần này chúng ta đã khảo sát kỹ trong giáo trình vật lý điện tử.

Các hạt của môi trường thường không tồn tại lâu ở trạng thái kích thích và do những tác động vật lý, các hạt có thể chuyển từ mức năng lượng (trạng thái) này sang mức năng lượng (trạng thái) khác. Ta gọi đó là những dịch chuyển và cứ mỗi dịch chuyển hạt sẽ hấp thụ hoặc bức xạ một lượng tử năng lượng và tuân theo định luật bảo toàn năng lượng.

Năng lượng bức xạ hoặc hấp thụ khi dịch chuyển có thể ở những dạng khác nhau, ví dụ khi nguyên tử chuyển từ trạng thái năng lượng

thấp lên trạng thái năng lượng cao hơn ví dụ do nguyên tử va chạm với điện tử trong phóng điện chất khí, khi đó phần năng lượng nội mà nguyên tử có thêm là do động năng của điện tử bị giảm đi khi va chạm. Còn nếu hạt lại dịch chuyển từ mức năng lượng cao xuống mức năng lượng thấp thì phần năng lượng nội thừa của hạt lại chuyển thành năng lượng nhiệt của hạt tức thành động năng để hạt chuyển động hỗn loạn. Đó là những dịch chuyển không quang học hay dịch chuyển không bức xạ. Chúng ta không quan tâm đến các dịch chuyển này.

Dịch chuyển lên hoặc xuống có thể hấp thụ hoặc bức xạ một lượng tử năng lượng điện từ. Khi đó tần số của lượng tử bức xạ hoặc hấp thụ sẽ được xác định bằng:

$$\omega = \frac{\Delta E}{\hbar} \quad (1-1)$$

trong đó : $\hbar$ - hằng số Planck = $1,05 \cdot 10^{-34}$ Joule.sec và $\hbar = \frac{h}{2\pi}$;

$\Delta E = E_i - E_k$ - hiệu năng lượng của trạng thái đầu và trạng thái cuối.

Đó là những dịch chuyển quang học.

Để tiện mô tả các dịch chuyển quang học chúng ta có thể dùng những ký hiệu sau:

- A - hạt ở trạng thái thường ;
- A* - hạt ở trạng thái kích thích thấp ;
- A** - hạt ở trạng thái kích thích cao hơn ;
- A⁺ - ion dương ;
- e - điện tử chậm ;
- $\bar{e}$ - điện tử nhanh ;

$h\nu = \hbar\omega$ - năng lượng của photon.

Ví dụ mô tả hạt được kích thích do va chạm với điện tử nhanh ta sẽ có đẳng thức:

$$A + \bar{e} = A^* + e \quad (1-2)$$

Để định lượng quá trình dịch chuyển người ta dùng khái niệm vận tốc của quá trình: là số dịch chuyển trong một đơn vị thời gian trong một đơn vị thể tích. Tốc độ đó ký hiệu là M_{ik} thứ nguyên $\text{cm}^{-3} \cdot \text{sec}^{-1}$.

Ta sẽ phân biệt vận tốc tích lũy và vận tốc nghèo hóa. Vận tốc tích lũy của mức i nào đó sẽ là $\sum_{k \neq i} M_{ki}$ và vận tốc nghèo hóa của mức i là

$\sum_{k \neq i} M_{ik}$, tổng sẽ lấy với mọi mức trừ mức thứ i là chính mức đó.

Để khảo sát sự biến thiên nồng độ của trạng thái chúng ta hãy cân bằng vận tốc của các quá trình tích lũy và nghèo hóa:

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_{k \neq i} M_{ki} - \sum_{k < i} M_{ik} \quad (1-3)$$

Đó chính là phương trình động học dùng để xác định phân bố nồng độ của hệ.

Vận tốc của quá trình nghèo hóa từ mức i đi các mức k sẽ tỷ lệ với nồng độ của trạng thái i là N_i :

$$M_{ik} = \gamma_{ik} \cdot N_i \quad (1-4)$$

trong đó: γ_{ik} là hệ số tỷ lệ và đặc trưng cho môi trường vật chất.

Hệ số γ_{ik} có thứ nguyên $[\text{sec}^{-1}]$ về giá trị nó là xác suất dịch của chuyển $i \rightarrow k$.

Thay (1-4) vào (1-3) ta có phương trình động học ở trạng thái i :

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_{k \neq i} N_k \gamma_{ki} - \sum_{k < i} N_i \gamma_{ik} \quad (1-5)$$

Nếu những quá trình tích lũy của mức i kết thúc, tức chỉ có dịch chuyển đi từ mức i mà không có dịch chuyển về mức i thì nồng độ của

mức i sẽ bắt đầu giảm xuống. Quá trình đó được mô tả bằng phương trình:

$$\frac{dN_i}{dt} = - \sum_{k < i} N_i \gamma_{ik} \quad (1-6)$$

Như vậy nồng độ của mức i sẽ giảm đi theo hàm mũ đối với thời gian.

$$N_i(t) = N_{i0} \exp \left[- \left(\sum_{k < i} \gamma_{ik} \right) . t \right] \quad (1-7)$$

Với N_{i0} là nồng độ hạt mức i ban đầu. Tốc độ giảm nồng độ của mức i sẽ phụ thuộc vào tổng xác suất nghèo hóa của mức i và ký hiệu bằng:

$$\gamma_i = \sum_{k < i} \gamma_{ik}$$

Thời gian tồn tại của hạt ở một trạng thái i nào đó gọi là thời gian sống của trạng thái và ký hiệu là τ_i : đó là thời gian mà sau thời gian đó, nồng độ của trạng thái sẽ giảm đi e lần. Như vậy, từ (1-7) ta có thể xác định thời gian sống của trạng thái:

$$\tau_i = \frac{1}{\gamma_i} = \frac{1}{\sum_{k < i} \gamma_{ik}} \quad (1-8)$$

Thời gian sống τ_i của hạt thường vào khoảng từ 10^{-10} sec tới vài giây. Những trạng thái có thời gian sống lớn gọi là trạng thái siêu bền.

Như vậy, trong giản đồ năng lượng của một hệ lượng tử, ngoài giá trị năng lượng, ở mỗi mức năng lượng E_i còn có thể ghi thêm nồng độ hạt N_i và thời gian sống τ_i của mỗi mức năng lượng đó.

1.2. DỊCH CHUYỂN QUANG HỌC

Dịch chuyển quang học là dịch chuyển có kèm theo hấp thụ hoặc bức xạ điện từ. Ngay khi không có tác động nào ở bên ngoài vào hệ thì

hạt cũng chỉ tồn tại ở trạng thái kích thích trong một thời gian rất ngắn nào đó và ở một thời điểm tùy ý nào đó hạt sẽ dịch chuyển xuống trạng thái ứng với mức năng lượng thấp hơn, khi đó hạt sẽ bức xạ ra một lượng tử năng lượng điện từ (photon).

Quá trình đó gọi là bức xạ tự phát, vì cường độ bức xạ không phụ thuộc vào tác động bên ngoài. Dùng những ký hiệu trong 1.1 ta có thể mô tả bức xạ tự phát bằng mô hình:

$$A^{**} \rightarrow A^{*} + (\hbar\omega) \quad (1-9)$$

Vận tốc của quá trình bức xạ tự phát là số dịch chuyển bức xạ tự phát trong một đơn vị thời gian và trong một đơn vị thể tích. Nó phụ thuộc vào nồng độ ban đầu của trạng thái kích thích N_i và:

$$M_{ik}^{ip} = A_{ik} \cdot N_i$$

trong đó : A_{ik} là hệ số tỷ lệ, nhưng lại có ý nghĩa vật lý. Nó chính là xác suất dịch chuyển tự phát và có thứ nguyên $[\text{sec}^{-1}]$. Giá trị của A_{ik} là đặc trưng riêng của dịch chuyển và không phụ thuộc vào bất kỳ điều kiện bên ngoài nào. Nhờ vận tốc của quá trình tự phát ta có thể xác định công suất bức xạ tự phát trong một đơn vị thể tích của môi trường:

$$P_{ik}^{ip} = M_{ik}^{ip} \cdot \hbar\omega_{ik} = A_{ik} \cdot N_i \cdot \hbar\omega_{ik} \quad (1-10)$$

Quá trình quang học thứ hai trong môi trường là quá trình hấp thụ năng lượng. Hạt tương tác với photon có thể sẽ hấp thụ photon và dịch chuyển sang trạng thái ứng với mức năng lượng cao hơn. Quá trình hấp thụ đó được mô tả như sau: $A^{*} + (\hbar\omega) \rightarrow A^{**}$

Năng lượng của photon khi đó phải bằng hiệu hai mức năng lượng của dịch chuyển. Quá trình hấp thụ năng lượng này khác với quá trình bức xạ tự phát không chỉ về năng lượng mà chính ở chỗ nó phụ thuộc vào tác động bên ngoài. Nếu mật độ photon càng lớn thì số hoạt động hấp thụ trong môi trường sẽ xảy ra mạnh hơn, do đó vận tốc của quá