

SỰ TƯƠNG TỰ GIỮA SỰ TRONG SUỐT CẢM ỨNG ĐIỆN TỬ VỚI DAO ĐỘNG CƠ, ĐIỆN CỔ ĐIỆN

Hồ Thị Thanh Lịch⁽¹⁾, Nguyễn Thọ Hoài⁽¹⁾, Lương Thị Yến Nga⁽¹⁾, Nguyễn Lê Thủy An⁽²⁾, Nguyễn Tuấn Anh⁽³⁾,
Thái Doãn Thanh⁽³⁾,

⁽¹⁾Trường Đại học Vinh

⁽²⁾Trường THPT Ngô Thời Nhiệm

⁽³⁾Trường Đại học Công nghiệp Thực phẩm Tp. HCM

Ngày gửi bài: 18/5/2015

Ngày chấp nhận đăng: 22/5/2015

TÓM TẮT:

Chúng tôi nghiên cứu sự tương tự của sự trong suốt cảm ứng điện tử của môi trường nguyên tử ba mức năng lượng cấu hình bậc thang với sự dao động cơ và dao động điện tử cổ điển. Kết quả cho thấy rằng cả hai hệ dao động cổ điển có phổ hấp thụ và tán sắc của công suất cơ/điện rất giống với tín hiệu EIT thu được trong cấu hình hệ nguyên tử ba mức. Các sự tương tự cổ điển này giúp cho việc mô tả đơn giản và trực quan các quá trình giao thoa lượng tử phức tạp xảy ra bên trong hệ nguyên tử và cho phép minh họa các thí nghiệm về EIT và các hiện tượng liên quan trong các hệ lượng tử.

ABSTRACT:

We study a classical analog of electromagnetically induced transparency (EIT) in a three-level ladder-type atomic medium using two mechanical and electrical oscillator systems. It is shown that both of the two classical systems have absorption and dispersion spectra of the mechanical and electrical powers very similar to that of the three-level ladder-type atomic system. These classical analogies provide simple and intuitive physical description of complex quantum interference processes that occur in the atomic system and can be used to illustrate experimental observations of the EIT and related effects in quantum systems.

1. MỞ ĐẦU

Môi trường nguyên tử thường hấp thụ mạnh ánh sáng có tần số trùng với tần số chuyển mức của nguyên tử. Tuy nhiên, nếu môi trường chứa các nguyên tử ba mức năng lượng được kích thích bởi hai trường laser (một laser dò có cường độ yếu và một laser liên kết có cường độ mạnh) vào hai dịch chuyển có một mức chung thì sự đáp ứng quang học của môi trường đối với chùm laser dò có thể được điều khiển bởi chùm laser liên kết. Nghĩa là, chúng ta có thể điều khiển chùm laser liên kết để cho môi trường trở nên trong suốt đối với chùm laser dò ngay tại tần số cộng hưởng, hiện tượng này được gọi là sự trong suốt cảm ứng điện tử -EIT. EIT đã được đề xuất lý thuyết năm 1989 [1] và quan sát thực nghiệm năm 1991 [2] bởi nhóm nghiên cứu của Harris tại Stanford, Mỹ. Bản chất vật lý của hiệu ứng EIT là sự giao thoa lượng tử của các biên độ xác suất dịch chuyển theo các nhánh kích thích khác nhau đối với chùm laser dò [3].

Bên cạnh sự thay đổi hệ số hấp thụ thì hệ số tán sắc cũng được thay đổi căn bản trong môi trường EIT. Hệ quả là làm giảm vận tốc nhóm ánh sáng [4] hay thậm chí làm dừng hoàn toàn ánh sáng lan truyền qua môi trường [5]. Một số ứng dụng điển hình của EIT đó là phát laser không đảo lộn đô cư trú [6], thông tin lượng tử và máy tính lượng tử [7], bộ nhớ lượng tử [8], bộ chuyển mạch quang [9], tăng cường phi tuyến Kerr [10], v.v.

Trong vài thập kỷ qua, nghiên cứu sự tương tự trong mô tả lượng tử và cổ điển của các hiện tượng vật lý đã đạt được là rất hữu ích cho việc hiểu các khái niệm vật lý cơ bản và ứng dụng của các lý thuyết khác nhau [11]. Điều quan trọng là chúng ta chú ý rằng các sự tương tự này có thực tế là các mô hình toán học tương tự có thể được áp dụng cho cả hiện tượng lượng tử và cổ điển,

mặc dù các lí thuyết về thực chất khác nhau cả về hình thức lẫn các khái niệm cơ bản. Gần đây, có một số nghiên cứu sự tương tự cổ điển về các hệ quang lượng tử khác nhau đã được báo cáo, chẳng hạn: hiệu ứng Ramann cộng hưởng kích thích [12], sự truyền đoạn nhiệt nhanh trong vật lí nguyên tử [13], dao động Rabi chân không [14], cộng hưởng Fano [15], EIT trong các hệ ba mức lambda [16] và bốn mức [17], v.v.

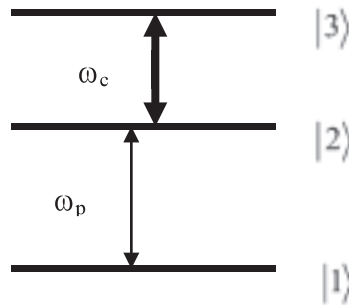
Trong bài báo này chúng tôi phát triển sự tương tự cổ điển của hiệu ứng EIT trong hệ nguyên tử ba mức năng lượng cấu hình bậc thang với hệ con lắc lò xo và mạch dao động RLC. Chúng tôi cho thấy rằng cả hai hệ cổ điển này có dạng phổ hấp thụ tương tự phổ EIT tương tự với hệ nguyên tử ba mức năng lượng. Các sự tương tự này giúp hiểu bản chất vật lí đơn giản và trực quan các quá trình giao thoa lượng tử mà có thể được sử dụng để minh họa cho các quan sát thực nghiệm về EIT trong các hệ lượng tử.

Cấu trúc của bài báo như sau: trong mục 2, sử dụng lý thuyết bán cổ điển chúng tôi mô tả hiệu ứng EIT trong hệ ba mức bậc thang thông qua các phương trình ma trận mật độ. Mục 3 và 4 minh họa các sự tương tự cơ và điện của EIT. Cuối cùng là phần kết luận về các kết quả chính thu được trong công trình này.

2. EIT TRONG HỆ BA MỨC BẬC THANG

Chúng tôi khảo sát sơ đồ ba mức năng lượng cấu hình bậc thang được kích thích bởi hai trường laser như được mô tả trên hình 1. Giả thiết rằng cả chùm laser dò có cường độ rất bé và laser điều khiển có cường độ rất lớn. Cả hai laser này đều phát ở chế độ liên tục, đơn mode tương ứng với các tần số ω_p và ω_c . Gọi Δ_p và Δ_c là các độ lệch tần số của chùm dò và chùm điều khiển với các dịch chuyển nguyên tử như trên Hình 1:

$$\Delta_p = \omega_p - \omega_{21}, \quad \Delta_c = \omega_c - \omega_{32}. \tag{1}$$



Hình 1. Sơ đồ ba mức năng lượng được kích thích theo cấu hình bậc thang.

Dưới tác dụng của các trường quang học, sự tiến triển các trạng thái lượng tử của hệ nguyên tử có thể được mô tả qua ma trận mật độ ρ theo phương trình Liouville [10]:

$$\dot{\rho} = -\frac{i}{\hbar}[H, \rho] + \Lambda\rho. \tag{2}$$

ở đây, H là Hamintonian của hệ nguyên tử-trường; Λ đặc trưng cho các quá trình phân rã của nguyên tử. Hệ nguyên tử xét trong bài toán này có ba mức năng lượng nên phương trình (2) là một hệ gồm $3 \times 3 = 9$ phương trình cho các phần tử ma trận mật độ ρ_{ik} . Tuy nhiên, vì chỉ quan tâm

đến phân tử ma trận ứng với dịch chuyển tạo bởi chùm dò ρ_{21} nên ta chỉ cần viết 3 phương trình cho các phần tử ma trận mật độ mô tả độ liên kết giữa các mức. Trong gần đúng sóng quay và gần đúng lưỡng cực điện, bỏ qua các biến đổi trung gian, hệ 3 phương này có dạng:

$$\dot{\rho}_{32} = [i\Delta_c - \gamma_{32}]\rho_{32} - \frac{i}{2}\Omega_p\rho_{31} - \frac{i}{2}\Omega_c(\rho_{33} - \rho_{22}), \quad (3)$$

$$\dot{\rho}_{31} = [i(\Delta_c + \Delta_p) - \gamma_{31}]\rho_{31} - \frac{i}{2}\Omega_p\rho_{32} + \frac{i}{2}\Omega_c\rho_{21}, \quad (4)$$

$$\dot{\rho}_{21} = [i\Delta_p - \gamma_{21}]\rho_{21} - \frac{i}{2}\Omega_p(\rho_{22} - \rho_{11}) + \frac{i}{2}\Omega_c\rho_{31}. \quad (5)$$

ở đây, $\Omega_p = d_{21}E_p/\hbar$ và $\Omega_c = d_{32}E_c/\hbar$ tương ứng là tần số Rabi được cảm ứng bởi chùm laser dò và chùm laser điều khiển; E_p và E_c tương ứng là biên độ điện trường của chùm laser dò và laser điều khiển; γ_{ik} đặc trưng cho tốc độ phân rã độ liên kết từ mức i sang mức k [10].

Giải hệ các phương trình (3)-(5) dưới điều kiện ban đầu $\rho_{33} = \rho_{22} = 0$, $\rho_{11} = 1$ chúng ta tìm được:

$$\rho_{21} = -\frac{\frac{i}{2}\Omega_p}{\gamma_{21} - i\Delta_p + \frac{(\Omega_c/2)^2}{\gamma_{31} - i(\Delta_p + \Delta_c)}}. \quad (6)$$

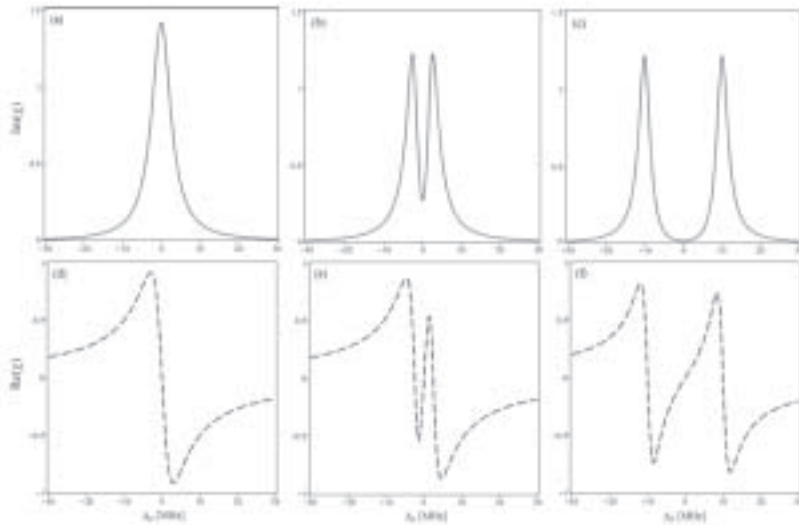
Mặt khác, độ cảm của nguyên tử đối với chùm laser dò liên hệ ρ_{21} theo biểu thức [10]:

$$\chi = 2\frac{Nd_{21}}{\varepsilon_0 E_p}\rho_{21}, \quad (7)$$

với N là mật độ nguyên tử, còn ε_0 là hằng số điện môi của chân không và d_{21} là phần tử mômen lưỡng cực điện của dịch chuyển $|2\rangle \rightarrow |1\rangle$.

Áp dụng cho hệ nguyên tử ^{87}Rb , các trạng thái $|1\rangle$, $|2\rangle$ và $|3\rangle$ tương ứng với các mức $5S_{1/2}(F=1)$, $5S_{1/2}(F=2)$ và $5P_{3/2}(F=3)$. Các tham số của hệ nguyên tử ^{87}Rb được sử dụng là [18]: $\gamma_{31} = 0.5$ MHz, $\gamma_{21} = 3$ MHz và $d_{21} = 2.5 \cdot 10^{-29}$ C.m. Phổ hấp thụ và tán sắc của chùm laser dò được vẽ như trên Hình 2. Từ hình này chúng ta thấy, khi chưa có trường laser liên kết (tức là, $\Omega_c = 0$) thì phổ hấp thụ có một đỉnh cực đại tại tần số cộng hưởng nguyên tử (hình a) và do đó cũng chỉ có một đường tán sắc dị thường trong miền cộng hưởng (Hình d). Tuy nhiên, khi có mặt của trường laser liên kết và tăng dần cường độ thì sự hấp thụ chùm laser dò tại tần số cộng hưởng bị suy giảm và triệt tiêu hoàn toàn (Hình b và c), tạo thành miền phổ trong suốt hay cửa sổ EIT. Đồng thời, trên công tua phổ tán sắc xuất hiện thêm đường cong tán sắc thường trong miền phổ EIT như chúng ta thấy trên Hình e và f. Để giải thích hiện tượng này chúng ta dựa vào hiệu ứng giao thoa lượng tử của biên độ xác suất dịch chuyển xảy ra bên trong hệ nguyên tử. Theo đó, có hai khả năng dịch chuyển khác nhau đối với dịch chuyển dò: một nhánh là dịch chuyển trực tiếp từ trạng thái $|1\rangle$ lên trạng thái $|2\rangle$ chỉ bởi chùm laser dò; và một nhánh là dịch chuyển gián tiếp nguyên tử được kích thích từ trạng thái $|1\rangle$ lên trạng thái $|2\rangle$ bởi chùm laser dò và ngay sau đó bị

phân rã cưỡng bức xuống trạng thái $|3\rangle$ rồi tiếp tục được bơm lên trạng thái $|2\rangle$ nhờ chùm laser liên kết. Biên độ xác suất dịch chuyển của hai nhánh này thoả mãn điều kiện kết hợp, do đó xảy ra sự giao thoa triệt tiêu biên độ xác suất dịch chuyển toàn phần của dịch chuyển $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$. Sự triệt tiêu của biên độ xác suất dịch chuyển toàn phần dẫn đến triệt tiêu phổ hấp thụ tại cộng hưởng, tức là môi trường trở nên trong suốt đối với chùm laser dò. Để dễ dàng hình dung được hiện tượng kết hợp lượng tử này, chúng ta sử dụng mô hình dao động cơ và dao động điện như trong các mục 3 và 4, tương ứng dưới đây.



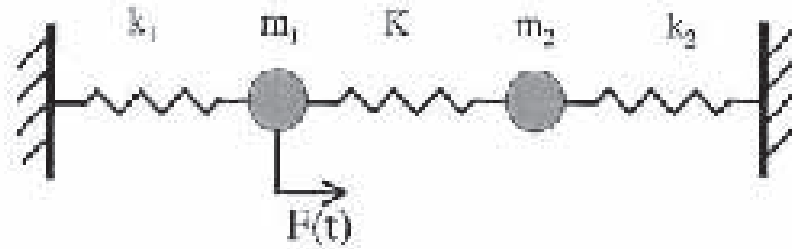
Hình 2. Phổ hấp thụ (đường liền nét) và tán sắc (đường đứt nét) của chùm laser dò khi $\Delta_c = 0$ và $\Omega_c = 0$ [(a) và (d)], $\Omega_c = 5$ MHz [(b) và (e)] và $\Omega_c = 20$ MHz [(c) và (f)].

3. SỰ TƯƠNG TỰ CƠ CỦA EIT

Trước hết, chúng ta khảo sát sự tương tự cơ của EIT bằng cách xem nguyên tử như một dao động tử điều hoà tắt dần bao gồm một vật có khối lượng m_1 được gắn với giá cố định thông qua lò xo có độ cứng k_1 và được điều khiển bởi một lực điều hoà $F(t) = F_0 e^{-i(\omega_s t + \varphi)}$. Hệ vật-lò xo này được gắn với vật m_2 thông qua lò xo có độ cứng K . Vật m_2 ban đầu được giữ đứng yên, đầu còn lại của m_2 được gắn với giá cố định thông qua lò xo k_2 . Hệ thống con lắc lò xo được đặt trên mặt phẳng nằm ngang như mô tả như trên Hình 3.

Sự tương tự vật lý giữa mô hình dao động tử này với hệ nguyên tử ba mức năng lượng được kích thích bởi hai trường laser như sau: dao động tử m_1 tương đương với dịch chuyển $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ với tần số cộng hưởng $\omega_1 = \sqrt{(k_1 + K) / m_1}$, dao động tử m_2 tương đương với dịch chuyển $|2\rangle \leftrightarrow |3\rangle$ với tần số cộng hưởng $\omega_2 = \sqrt{(k_2 + K) / m_2}$; lò xo K gắn giữa vật m_1 và m_2 đóng vai trò như trường laser liên kết kích thích dịch chuyển $|2\rangle \leftrightarrow |3\rangle$; còn lực điều hoà $F(t)$ tác dụng vào vật m_1 đóng vai trò là laser dò kích thích dịch chuyển $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$. Nếu chúng ta phân tích công suất truyền từ nguồn điều hoà tới vật m_1 là hàm của tần số ω_p thì chúng ta sẽ thu được công suất hấp thụ cộng hưởng có dạng Lorentz (đỉnh công suất hấp thụ tại tần số ω_1). Tuy nhiên, nếu chúng ta cho vật m_2 dao động chỉ dưới tác dụng của các lực từ các lò xo K và k_2 thì công suất hấp thụ sẽ bị

thay đổi. Như chúng ta sẽ thấy sau đây, chúng ta sẽ thu được công tua hấp thụ có dạng tương tự như phổ EIT.



Hình 3. Mô hình dao động cơ để mô phỏng EIT.

Để mô tả chuyển động cổ điển của hệ này, chúng ta sử dụng các tọa độ một chiều x_1 và x_2 biểu diễn li độ của các vật m_1 và m_2 so với vị trí cân bằng của chúng. Lúc đó, phương trình chuyển động của các vật có thể được viết tương ứng dưới dạng:

$$\ddot{x}_1(t) + \gamma_1 \dot{x}_1(t) + \omega_1^2 x_1(t) - \Omega_c^2 x_2(t) = \frac{F_0}{m} e^{-i\omega_p t}, \quad (8a)$$

$$\ddot{x}_2(t) + \gamma_2 \dot{x}_2(t) + \omega_2^2 x_2(t) - \Omega_c^2 x_1(t) = 0. \quad (8b)$$

trong đó, chúng ta đã giả sử $\varphi = 0$, $m_1 = m_2 = m$ và $\Omega_c = \sqrt{K/m}$ là tần số đặc trưng cho tần số Rabi được cảm ứng bởi trường laser liên kết trong mô hình nguyên tử; γ_1 là hệ số ma sát liên quan đến tốc độ tiêu hao năng lượng của vật m_1 tương ứng với tốc độ phát xạ tự phát của trạng thái $|2\rangle$; γ_2 là tốc độ tiêu hao năng lượng của vật m_2 tương ứng với tốc độ phát xạ tự phát của trạng thái $|3\rangle$.

Vì chúng ta chỉ quan tâm công suất bị hấp thụ bởi vật m_1 từ lực dò nên chúng ta chỉ tìm nghiệm của $x_1(t)$. Chúng ta giả sử các nghiệm có dạng $x_i(t) = B_i e^{-i\omega_p t}$ với B_i là hằng số ($i = 1, 2$). Thay các biểu thức này vào các phương trình (9), chúng ta tìm được li độ dao động của vật m_1 là:

$$x_1(t) = - \frac{(F_0 / m) e^{-i\omega_p t}}{i\gamma_1 \omega_p + \omega_p^2 - \omega_1^2 - \frac{\Omega_r^4}{i\gamma_2 \omega_p + \omega_p^2 - \omega_2^2}}. \quad (9)$$

Chúng ta giả thiết $k_1 = k_2 = k$ do đó $\omega_1 = \omega_2$. Ngoài ra, vì chúng ta khảo sát trong miền cộng hưởng của cả hai dao động tử nên có thể xem như $\omega_1 = \omega_2 \approx \omega_p \approx \omega_c$. Vì vậy, chúng ta có thể viết biểu thức (9) dưới dạng gần đúng như sau:

$$x_1(t) \approx - \frac{(F_0 / m) e^{-i\omega_p t}}{i\gamma_1 \omega_p + \omega_p^2 - \omega_1^2 - \frac{\Omega_r^4}{i\gamma_2 \omega_p + \omega_p^2 - \omega_1^2 + \omega_c^2 - \omega_2^2}}. \quad (10)$$

Khai triển: $\omega_p^2 - \omega_1^2 \approx (\omega_p + \omega_1)(\omega_p - \omega_1) \approx 2\omega_1 \Delta_p$ và $\omega_c^2 - \omega_2^2 \approx (\omega_c + \omega_2)(\omega_c - \omega_2) \approx 2\omega_2 \Delta_c$. Khi đó, phương trình (11) được viết lại là:

$$x_1(t) \approx -\frac{(F_0/m)e^{-i\omega_p t}}{\omega(i\gamma_1 - 2\Delta_p) - \frac{\Omega_r^4}{\omega[i\gamma_2 - 2(\Delta_p + \Delta_c)]}}. \quad (11)$$

Công suất cơ học của lực $F(t)$ bị hấp thụ bởi dao động tử m_1 được tính bởi công thức:

$$P_1(t) = F(t)\dot{x}_1(t). \quad (12)$$

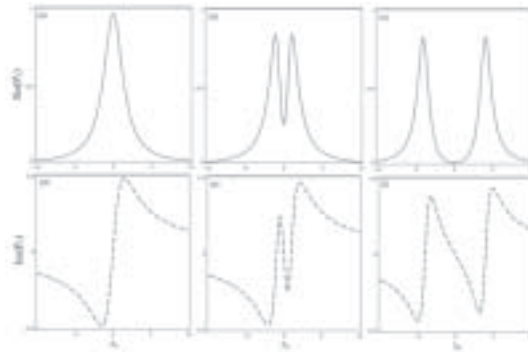
Công suất trung bình trong một chu kì dao động được cho bởi:

$$P_1(\omega_p) = \frac{\int_0^{2\pi/\omega_p} P_1(t)dt}{2\pi/\omega_p} = \frac{i\omega(F_0^2/m)}{\omega(i\gamma_1 - 2\Delta_p) - \frac{\Omega_r^4}{\omega[i\gamma_2 - 2(\Delta_p + \Delta_c)]}}. \quad (13)$$

Chúng ta khảo sát sự biến thiên của công suất cơ $P_1(\omega_p)$ theo độ lệch tần số Δ_p với các tham số khác được chọn trong đơn vị tần số là: $\gamma_1 = 3$, $\gamma_2 = 0.5$, $\omega = \sqrt{k/m} = 2$ và F/m được lấy bằng 10 lần lực trên đơn vị khối lượng. Phổ hấp thụ (đường liền nét) và tán sắc (đường đứt nét) của công suất cơ $P_1(\omega_p)$ dưới điều kiện cộng hưởng của trường liên kết $\Delta_c = 0$, được mô tả trên hình 4.

Từ Hình 4a chúng ta thấy, khi $\Omega_c = 0$ chúng ta thu được công suất hấp thụ của công suất cơ bởi dao động tử m_1 có cực đại tại tần số cộng hưởng, $\omega_p = \omega_1$. Khi tăng Ω_c tới giá trị 2, chúng ta thấy xuất hiện một độ trùng hợp tại tần số cộng hưởng trên công suất hấp thụ của $P_1(\omega_p)$ (Hình 4b). Tăng tần số liên kết Ω_c tới giá trị 4 dẫn tới sự triệt tiêu hoàn toàn công suất cơ như chúng ta thấy trên Hình 4d. Sự triệt tiêu hấp thụ tại tần số cộng hưởng trên công suất của $P_1(\omega_p)$ là kết quả của sự giao thoa triệt tiêu giữa các mode dao động của hệ con lắc lò xo được điều khiển bởi lực điều hoà bên ngoài, tương tự như sự giao thoa của biên độ xác suất dịch chuyển trong hệ nguyên tử mà dẫn tới hiệu ứng EIT.

Một kết quả quan trọng khác được mô phỏng bởi mô hình dao động cơ là hiện tượng tán sắc của dao động tử, như được mô tả bởi đường đứt nét trên Hình 4. Trong miền phổ hấp thụ suy giảm, chúng ta quan sát thấy đường cong tán sắc thường rất dốc (Hình 4e và f). Kết quả này trùng với kết quả được quan sát về EIT. Tính chất này được sử dụng để làm chậm sự lan truyền của ánh sáng trong môi trường nguyên tử. Do đó, có thể quan sát hiệu ứng lan truyền như vậy bằng cách khảo sát sự hấp thụ trong môi trường chứa một tập hợp các “nguyên tử tương tự dao động cơ”.



Hình 4. Phổ hấp thụ (đường liền nét) và tán sắc (đường đứt nét) của công suất cơ khi $\Delta_c = 0$ và $\Omega_c = 0$ [(a) và (d)], $\Omega_c = 2$ [(b) và (e)] và $\Omega_c = 4$ [(c) và (f)]. Các tham số khác: $\gamma_1 = 3$, $\gamma_2 = 0.5$ và $\omega = 2$. Tất cả các đại lượng được tính trong đơn vị tần số.

4. SỰ TƯƠNG TỰ DAO ĐỘNG ĐIỆN TỬ CỦA EIT

Tiếp theo, chúng ta khảo sát sự tương tự dao động điện tử của hiện tượng EIT dựa trên sự tương đương giữa hệ dao động cơ tắt dần được điều khiển bởi lực điều hoà bên ngoài với mạch dao động điện RLC được mắc với nguồn điện xoay chiều. Sự tương đương giữa các đại lượng điện và cơ được cho bởi Bảng 1.

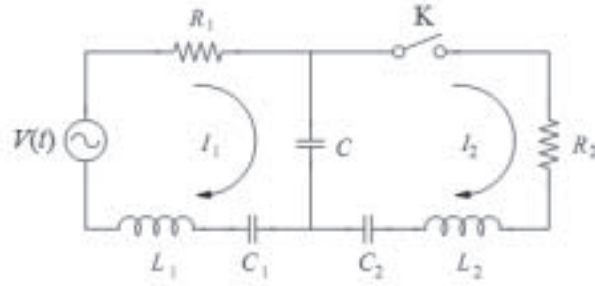
Bảng 1. Sự tương đương giữa các đại lượng cơ và điện.

Mô hình cơ	Mô hình điện
m	L
k	$1/C$
x	q
\dot{x}	I
γ	R/L
$F(t)$	$V(t)$

Đặc điểm của mạch dao động điện là chúng ta dễ dàng lắp ráp trong phòng thí nghiệm và có thể được sử dụng để chứng minh bằng thực nghiệm hiện tượng EIT bằng cách phân tích sự mất mát công suất điện trên điện trở. Cơ hệ dao động cơ ở Hình 2 tương đương với mạch dao động điện được mô tả như trên Hình 5, trong đó mạch điện gồm cuộn cảm L_2 và các tụ điện C_2 và C đóng vai trò là dịch chuyển liên kết, còn điện trở R_1 xác định sự mất mát dao động điện tương tự sự phân rã tự phát của trạng thái kích thích $|3\rangle$; mạch dao động $R_1L_1C_1$ tương đương với dịch chuyển $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ của nguyên tử và R_1 đóng vai trò là tốc độ phân rã tự phát của trạng thái kích thích $|1\rangle$. Tụ điện C nối chung giữa hai mạch đóng vai trò là trường laser liên kết kích thích dịch chuyển $|2\rangle \leftrightarrow |3\rangle$. Trong trường hợp này, trường laser dò được đặc trưng bởi nguồn điện xoay chiều có tần số thay đổi $V_p = V_0 e^{-i\omega_p t}$ đặt vào mạch $R_1L_1C_1$ (hay kích thích dịch chuyển $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$).

Rõ ràng, khi khoá K ngắt thì công suất của nguồn điện xoay chiều sẽ bị mạch $R_1L_1C_1$ hấp thụ mạnh nhất khi tần số nguồn điện xoay chiều trùng với tần số cộng hưởng của mạch điện (hay

cộng hưởng với dịch chuyển $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$). Tuy nhiên, khi khoá K đóng thì chúng ta sẽ thu được phổ hấp thụ công suất có dạng tương tự EIT.



Hình 5. Mạch điện RLC để mô phỏng EIT.

Kí hiệu các dòng điện trong hai mạch điện tương ứng là $I_1(t) = \dot{q}_1(t)$ và $I_2(t) = \dot{q}_2(t)$ với các chiều dòng điện được chọn như trên Hình 5. Chúng ta tìm được hệ các phương trình đạo hàm cho các điện tích $q_1(t)$ và $q_2(t)$ là:

$$\ddot{q}_1(t) + \gamma_1 \dot{q}_1(t) + \omega_1^2 q_1(t) - \Omega_c^2 q_2(t) = \frac{V_0}{L} e^{-i\omega_p t}, \quad (14a)$$

$$\ddot{q}_2(t) + \gamma_2 \dot{q}_2(t) + \omega_2^2 q_2(t) - \Omega_c^2 q_1(t) = 0. \quad (14b)$$

trong đó, $\gamma_1 = R_1 / L_1$, $\gamma_2 = R_2 / L_2$, $\omega_1 = 1 / \sqrt{L_1 C_{e1}}$, $\omega_2 = 1 / \sqrt{L_2 C_{e2}}$ và $\Omega_c = 1 / \sqrt{L_2 C}$ với các tụ điện tương đương là $C_{e1} = CC_1 / (C + C_1)$ và $C_{e2} = CC_2 / (C + C_2)$.

Chúng ta thấy dạng phương trình (14) giống với phương trình (8) nên chúng mô tả cùng một hiện tượng vật lí. Tương tự, chúng ta cũng thu được nghiệm có dạng:

$$q_1(t) \approx - \frac{(V_0 / L) e^{-i\omega_p t}}{\omega(i\gamma_1 + 2\Delta_p) - \frac{\Omega_r^4}{\omega[i\gamma_2 + 2(\Delta_p + \Delta_c)]}}. \quad (15)$$

Công suất của nguồn điện $V(t)$ bị hấp thụ bởi mạch $R_1 L_1 C_1$ được tính bởi công thức:

$$P_1(t) = V(t) \dot{q}_1(t). \quad (16)$$

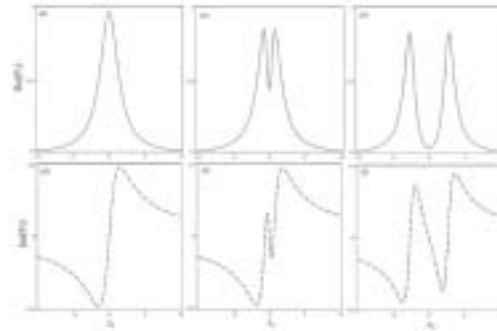
Công suất trung bình trong một chu kì dao động được cho bởi:

$$P_1(\omega_p) = \frac{\int_0^{2\pi/\omega_p} P_1(t) dt}{2\pi / \omega_p} = \frac{i\omega(V_0^2 / L)}{\omega(i\gamma_1 + 2\Delta_p) - \frac{\Omega_r^4}{\omega[i\gamma_2 + 2(\Delta_p + \Delta_c)]}}. \quad (17)$$

ở đây, chúng ta cũng đã chọn $L_1 = L_2 = L$ và $C_1 = C_2 = C$ do đó $\omega_1 = \omega_2$ và chúng ta cũng giả thiết $\omega_p \approx \omega_c$, hay khoảng cách tần số giữa các mức $|2\rangle - |1\rangle$ và $|3\rangle - |2\rangle$ xấp xỉ nhau.

Phổ hấp thụ (đường liền nét) và tán sắc (đường đứt nét) của công suất điện $P_1(\omega_p)$ dưới điều kiện cộng hưởng của trường liên kết $\Delta_c = 0$, được mô tả trên Hình 6. Các tham số khác được chọn

trong đơn vị tần số là: $\gamma_1 = 3$, $\gamma_2 = 0.5$, $\omega = \sqrt{k/m} = 3$ và V/L được lấy bằng 10 lần điện thế trên đơn vị độ tự cảm.



Hình 6. Phổ hấp thụ (đường liền nét) và tán sắc (đường đứt nét) của công suất điện khi $\Delta_c = 0$ và $\Omega_c = 0$ [(a) và (d)], $\Omega_c = 2$ [(b) và (e)] và $\Omega_c = 4$ [(c) và (f)]. Các tham số khác: $\gamma_1 = 3$, $\gamma_2 = 0.5$ và $\omega = 3$. Tất cả các đại lượng được tính trong đơn vị tần số.

Từ Hình 6 chúng ta thấy hiện tượng xảy ra đối với phổ hấp thụ và tán sắc của công suất điện tương tự như trên Hình 4: khi khoá K mở (tức là $\Omega_c = 0$) chúng ta thu được đỉnh hấp thụ cực đại tại tâm công tua hấp thụ của công suất điện bởi mạch dao động $R_1L_1C_1$. Khi khoá K đóng và tăng dần Ω_c chúng ta thấy sự hấp thụ của $P_1(\omega_p)$ bị triệt tiêu hoàn toàn (Hình 6b). Đồng thời, chúng ta quan sát thấy đường cong tán sắc thường rất dốc (Hình 6e và f) trong miền phổ hấp thụ triệt tiêu.

5. KẾT LUẬN

Trong công trình này, hiệu ứng EIT trong nguyên tử ba mức năng lượng cấu hình bậc thang đã được mô phỏng bởi hai hệ dao động cơ và dao động điện từ. Sự tương tự cơ của EIT đó là một hệ gồm hai dao động tử tắt dần được điều khiển bởi lực điều hoà bên ngoài; sự tương tự điện của EIT đó là hai mạch dao động RLC được duy trì bởi nguồn điện xoay chiều. Chúng tôi đã chỉ ra được rằng cả hai hệ dao động cổ điển có phổ hấp thụ và tán sắc rất giống với phổ EIT trong môi trường nguyên tử ba mức cấu hình bậc thang. Các sự tương tự cổ điển này của EIT cung cấp sự mô tả đơn giản và trực quan về các quá trình giao thoa lượng tử phức tạp xảy ra bên trong hệ nguyên tử và có thể được sử dụng để minh hoạ cho các quán sát thực nghiệm về hiệu ứng EIT cũng như các hiệu ứng kết hợp lượng tử khác.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Imamoglu, S.E. Harris, “Lasers without inversion: Interference of dressed lifetime broadened states”, *Opt. Lett.* **14**, 1344 (1989).
- [2]. K.J. Boller, A. Imamoglu, S.E. Harris, Observation of electromagnetically induced transparency, *Phys. Rev. Lett.* **66** (1991) 2593.
- [3]. M. Fleischhauer, A. Imamoglu and J.P. Marangos, “Electromagnetically induced transparency: Optics in coherent media”, *Rev. Mod. Phys.*, **77** (2005) 633-673.
- [4]. L. Hau, S. Harris, Z. Dutton, and C. Behroozi, “Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas”, *Nature*, **397** (1999) 594.
- [5]. D. Phillips, M. Fleischhauer, A. Mair, R. Walsworth, and M.D. Lukin, “Storage of light in atomic vapor”, *Phys. Rev. Lett.*, **86** (2001) 783.

- [6]. H. Wu, M. Xiao, and J. Gea-Banacloche, “Evidence of lasing without inversion in a hot rubidium vapor under electromagnetically-induced-transparency conditions”, *Phys. Rev. A* 78, 041802 (2008).
- [7]. H. Schmidt and R. J. Ram, “All-optical wavelength converter and switch based on electromagnetically induced transparency”, *Appl. Phys. Lett.*, 76, 3173–3175 (2000).
- [8]. G. Hétet, A. Peng, M. T. Johnsson, J. J. Hope, and P. K. Lam, “Characterization of electromagnetically-induced-transparency-based continuous-variable quantum memories”, *Phys. Rev. A* 77, 012323 (2008).
- [9]. P. Bermel, A. Rodriguez, S. G. Johnson, J. D. Joannopoulos, and M. Soljacic, “Single-photon all-optical switching using waveguide-cavity quantum electrodynamics”, *Phys. Rev. A*, 74, 043818 (2006).
- [10]. Le Van Doai, Dinh Xuan Khoa, and Nguyen Huy Bang, “EIT enhanced self-Kerr nonlinearity in the three-level lambda system under Doppler broadening”, accepted to publish in *Phys. Scr.*, (2015).
- [11]. D. Dragoman and M. Dragoman, “Quantum-Classical Analogies” (Springer, Berlin, 2004).
- [12]. P. R. Hemmer and M. G. Prentiss, “Coupled-pendulum model of the stimulated resonance Raman effect”, *J. Opt. Soc. Am. B* 5, 1613–1623 (1988).
- [13]. B. W. Shore, M. V. Gromovyy, L. P. Yatsenko, and V. I. Romanenko, “Simple mechanical analogs of rapid adiabatic passage in atomic physics”, *Am. J. Phys.*, 77, 1183–1194 (2009).
- [14]. Y. Zhu, D. J. Gauthier, S. E. Morin, Q. Wu, H. J. Carmichael, and T. W. Mossberg, “Vacuum rabi splitting as a feature of linear-dispersion theory: Analysis and experimental observations”, *Phys. Rev. Lett.*, 64, 2499–2502 (1990).
- [15]. Yong S Joe, Arkady M Satanin, and Chang Sub Kim, “Classical analogy of Fano resonances”, *Phys. Scr.* 74 (2006) 259–266.
- [16]. C. L. Garrido Alzar, M. A. G. Mart’inez, and P. Nussenzeig, “Classical analog of electromagnetically induced transparency”, *Am. J. Phys.*, 70, 37–41 (2002).
- [17]. Z. Bai, C. Hang, and G. Huang, “Classical analogs of double electromagnetically induced transparency”, *Opt. Comm.* 291 (2013) 253–258.
- [18]. Daniel Adam Steck, “Rb87 D Line Data”, <http://steck.us/alkalidata>.