

Ảnh hưởng của trường bức xạ laser lên hấp thụ sóng điện từ yếu bởi điện tử giam cầm trong siêu mạng hợp phần (tán xạ điện tử - phonon quang) : \ Luận văn ThS. Vật lý: 60 44 01 \ Nguyễn Thị Tuyết Mai ; Nghd. : TS. Đinh Quốc Vương

Bằng phương pháp phương trình động lượng tử, nghiên cứu lý thuyết ảnh hưởng của trường bức xạ Laser lên sự hấp thụ sóng điện từ yếu bởi điện tử giam cầm trong siêu mạng hợp phần đã nhận được biểu thức giải tích cho hệ số hấp thụ sóng điện từ. Hệ số hấp thụ phụ thuộc phi tuyến vào các tham số đặc trưng cho cấu trúc của siêu mạng hợp phần cũng như phụ thuộc vào biên độ và tần số của sóng điện từ yếu và trường bức xạ laser. Các kết quả được tính toán số cho siêu mạng hợp phần GaAs - Al_{0.3}Ga_{0.7}As cho thấy trong các điều kiện xác định, hệ số hấp thụ có thể chuyển thành hệ số gia tăng. Đây là kết quả mới có khác biệt so với bài toán tương tự nhưng trong bán dẫn khối và trong siêu mạng hợp phần trường hợp hấp thụ một sóng.

I. MỞ ĐẦU

Bài toán vật lý nghiên cứu hấp thụ phi tuyến sóng điện từ yếu bởi điện tử giam cầm trong bán dẫn khối cũng như trong siêu mạng hợp phần đã được thực hiện trong các công trình [3,4,5]. Bài toán vật lý trên cũng đã được mở rộng khi xét đến sự có mặt của từ trường ngoài trong [3,4]. Tuy nhiên, đối với sự có mặt của trường bức xạ laser vẫn còn bỏ ngỏ. Do đó trong bài báo này chúng tôi nghiên cứu ảnh hưởng của trường bức xạ laser lên hấp thụ sóng điện từ yếu bởi điện tử giam cầm trong siêu mạng hợp phần. Các kết quả nhận được chỉ ra rằng hệ số hấp thụ có thể nhận giá trị âm, nghĩa là hệ số hấp thụ có thể chuyển thành hệ số gia tăng.

II. PHƯƠNG TRÌNH ĐỘNG LƯỢNG TỬ

Khảo sát hệ tương tác hệ điện tử-phonon trong siêu mạng hợp phần trong trường hợp có mặt hai sóng điện từ được mô tả dưới dạng véc tơ cường độ điện trường $\vec{E}(t) = \vec{E}_{01} \sin(\Omega_1 t) + \vec{E}_{02} \sin(\Omega_2 t)$ với $\vec{E}_{01}$ và Ω_1 tương ứng là biên độ điện trường và tần số của sóng điện từ yếu, $\vec{E}_{02}$ và Ω_2 tương ứng là biên độ và tần số của bức xạ laser, t là

thời gian. Thê véc tơ tương ứng có dạng $\vec{A}(t) = \frac{\vec{E}_{01}c}{\Omega_1} \cos(\Omega_1 t) + \frac{\vec{E}_{02}c}{\Omega_2} \cos(\Omega_2 t)$.

Hamiltonian của hệ điện tử-phonon trong siêu mạng hợp phần được viết dưới dạng:

$$H = H_0 + U \quad (1)$$

trong đó:

$$H_0 = \sum_{n, \vec{p}_\perp} \varepsilon_n \left(\vec{p}_\perp - \frac{e}{\hbar c} \vec{A}(t) \right) a_{n, \vec{p}_\perp}^+ a_{n, \vec{p}_\perp} + \sum_{\vec{q}} \hbar \omega_{\vec{q}} b_{\vec{q}}^+ b_{\vec{q}} \quad (2)$$

$$U = \sum_{\vec{q}} \sum_{n, n', \vec{p}_\perp} C_{\vec{q}} I_{n, n'}(q_z) a_{n, \vec{p}_\perp + \vec{q}_\perp}^+ a_{n, \vec{p}_\perp} (b_{\vec{q}} + b_{-\vec{q}}^+) \quad (3)$$

với $a_{n,\vec{k}_\perp}^+$, $a_{n,\vec{k}_\perp}$ là toán tử sinh, hủy điện tử ở trạng thái $|n, \vec{p}_\perp\rangle$; b_q^+ , b_q là toán tử sinh hủy phonon ở trạng thái $|\vec{q}\rangle$ với vectơ sóng $\vec{q}$, $\vec{q} = \vec{q}_\perp + \vec{q}_z$; $\vec{p}_\perp$ là vectơ xung lượng của điện tử trong mặt phẳng vuông góc với trục z của siêu mạng hợp phần; ω_q là tần số của phonon; $I_{n,n'}(q_z) = \int_0^{N.d} \psi_n^*(z) \psi_{n'}(z) e^{iq_z z} dz$ là thừa số dạng trong siêu mạng hợp phần; $\varepsilon_{n,\vec{p}_\perp}$ là năng lượng của điện tử trong siêu mạng hợp phần; C_q là hằng số tương tác phụ thuộc vào cơ chế tán xạ điện tử - phonon; c là vận tốc ánh sáng; $\hbar$ là hằng số Planck; e là điện tích của điện tử.

Sử dụng các phép biến đổi toán tử ta thu được phương trình động lượng tử cho hệ điện tử-phonon:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_{n,\vec{k}_\perp}(t)}{\partial t} = & -\frac{1}{\hbar^2} \sum_{n,q} |C_q| |I_{n,n'}(q_z)|^2 \sum_{l,s,m,f=-\infty}^{+\infty} J_l(\vec{a}_1 \vec{q}_\perp) J_s(\vec{a}_1 \vec{q}_\perp) J_m(\vec{a}_2 \vec{q}_\perp) J_f(\vec{a}_2 \vec{q}_\perp) \exp\{i[(s-l)\Omega_1 + (m-f)\Omega_2]t\} \times \\ & \times \int_{-\infty}^t dt_2 \left\{ \left[n_{n,\vec{p}_\perp}(t_2) N_q - n_{n,\vec{p}_\perp+\vec{q}_\perp}(t_2) (N_q + 1) \right] \exp\left\{ \frac{i}{\hbar} \left[\varepsilon_{n,\vec{p}_\perp+\vec{q}_\perp} - \varepsilon_{n,\vec{p}_\perp} - \hbar\omega_q - s\hbar\Omega_1 - m\hbar\Omega_2 + i\delta\hbar \right] (t-t_2) \right\} + \right. \\ & + \left[n_{n,\vec{p}_\perp}(t_2) (N_q + 1) - n_{n,\vec{p}_\perp+\vec{q}_\perp}(t_2) N_q \right] \exp\left\{ \frac{i}{\hbar} \left[\varepsilon_{n,\vec{p}_\perp+\vec{q}_\perp} - \varepsilon_{n,\vec{p}_\perp} + \hbar\omega_q - s\hbar\Omega_1 - m\hbar\Omega_2 + i\hbar\delta \right] (t-t_2) \right\} - \\ & - \left[n_{n,\vec{p}_\perp-\vec{q}_\perp}(t_2) N_q - n_{n,\vec{p}_\perp}(t_2) (N_q + 1) \right] \exp\left\{ \frac{i}{\hbar} \left[\varepsilon_{n,\vec{p}_\perp} - \varepsilon_{n,\vec{p}_\perp-\vec{q}_\perp} - \hbar\omega_q - s\hbar\Omega_1 - m\hbar\Omega_2 + i\hbar\delta \right] (t-t_2) \right\} - \\ & \left. - \left[n_{n,\vec{p}_\perp-\vec{q}_\perp}(t_2) (N_q + 1) - n_{n,\vec{p}_\perp}(t_2) N_q \right] \exp\left\{ \frac{i}{\hbar} \left[\varepsilon_{n,\vec{p}_\perp} - \varepsilon_{n,\vec{p}_\perp-\vec{q}_\perp} + \hbar\omega_q - s\hbar\Omega_1 - m\hbar\Omega_2 + i\hbar\delta \right] (t-t_2) \right\} \right\} \quad (4) \end{aligned}$$

ở đây, kí hiệu $\langle x \rangle_t$ được hiểu là trung bình thống kê của toán tử x; $n_{n,\vec{p}}(t)$ là hàm phân bố điện tử; $\vec{a}_1 = (e\vec{E}_{01} / m\Omega_1^2)$; $\vec{a}_2 = (e\vec{E}_{02} / m\Omega_2^2)$; $J_\mu(z)$ là hàm Bessel đối số thực; $N_q = \langle b_q^+ b_q \rangle_t$ là toán tử số hạt của điện tử; $n_{n,\vec{k}_\perp}(t) = \langle a_{n,\vec{k}_\perp}^+ a_{n,\vec{k}_\perp} \rangle_t$ là toán tử số hạt của điện tử; δ là tham số đưa vào do giả thiết đoạn nhiệt của tương tác.

III. HỆ SỐ HẤP THỤ PHI TUYẾN SÓNG ĐIỆN TỬ YẾU BỞI ĐIỆN TỬ GIAM CẮM TRONG SIÊU MẠNG HỢP PHẦN KHI CÓ MẶT HAI SÓNG ĐIỆN TỬ.

Từ phương trình động lượng tử (4), khai triển hàm Bessel và sử dụng phép chuyển phổ Fourier ta thu được biểu thức giải tích cho hệ số hấp thụ α trong trường hợp gần ngưỡng $|s\hbar\Omega_1 + m\hbar\Omega_2 - \hbar\omega_q| \ll \varepsilon$ với các cơ chế tán xạ khác nhau.

$$\text{Trường hợp tán xạ điện tử - phonon quang[1]: } C_q = \frac{2\pi e^2 \hbar \omega_0}{\varepsilon(q_\perp^2 + q_z^2) V_0} \left(\frac{1}{\chi_\infty} - \frac{1}{\chi_0} \right) \quad (5)$$

trong đó V_0 là thể tích chuẩn hóa (chọn $V_0 = 1$); ε là hằng số điện môi; χ_∞ là độ điện thẩm cao tần; χ_0 là độ điện thẩm tĩnh; ω_0 là tần số của phonon quang.

$$\alpha = \frac{16\pi^3 e^2 \Omega_2 k_B T}{c \varepsilon \sqrt{\chi_\infty} E_{02}^2} \left(\frac{1}{\chi_\infty} - \frac{1}{\chi_0} \right) \sum_{n,n} \left[(D_{0,1} - D_{0,-1}) - \frac{1}{2} (G_{0,1} - G_{0,-1}) + \frac{1}{4} (G_{-1,1} - G_{-1,-1} + G_{1,1} + G_{1,-1}) \right] \\ + \frac{3}{32} (H_{0,1} - H_{0,-1}) - \frac{1}{16} (H_{-1,1} - H_{-1,-1} + H_{1,1} + H_{1,-1}) + \frac{1}{64} (H_{-2,1} - G_{-2,-1} + G_{2,1} + G_{2,-1}) \} \quad (6)$$

trong đó:

$$D_{s,m} = \frac{B\pi}{(2\pi)^2} \left(\frac{\tilde{a}_2}{2} \right)^2 \exp\left(-\frac{\xi_{s,m}}{2k_B T}\right) \left(\frac{4m^* \xi_{s,m}^2}{\hbar^4} \right)^{\frac{3}{4}} K_{\frac{3}{2}} \left(\frac{\xi_{s,m}}{2k_B T} \right) \left[\exp\left(-\frac{\varepsilon_n}{k_B T}\right) - \exp\left(-\frac{\varepsilon_n - \xi_{s,m}}{k_B T}\right) \right] \quad (7)$$

$$G_{s,m} = \frac{B}{(2\pi)^2} \left(\frac{\tilde{a}_2}{2} \right)^2 a_1^2 \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4} \cos 2\gamma \right) \exp\left(-\frac{\xi_{s,m}}{2k_B T}\right) \left(\frac{4m^* \xi_{s,m}^2}{\hbar^4} \right)^{\frac{5}{4}} K_{\frac{5}{2}} \left(\frac{\xi_{s,m}}{2k_B T} \right) \left[\exp\left(-\frac{\varepsilon_n}{k_B T}\right) - \exp\left(-\frac{\varepsilon_n - \xi_{s,m}}{k_B T}\right) \right] \quad (8)$$

$$H_{s,m} = \frac{B}{(2\pi)^2} \left(\frac{\tilde{a}_2}{2} \right)^2 a_1^4 \left(\frac{3\pi}{8} + \frac{\pi}{4} \cos 2\gamma \right) \exp\left(-\frac{\xi_{s,m}}{2k_B T}\right) \left(\frac{4m^* \xi_{s,m}^2}{\hbar^4} \right)^{\frac{7}{4}} K_{\frac{7}{2}} \left(\frac{\xi_{s,m}}{2k_B T} \right) \left[\exp\left(-\frac{\varepsilon_n}{k_B T}\right) - \exp\left(-\frac{\varepsilon_n - \xi_{s,m}}{k_B T}\right) \right] \quad (9)$$

$$B = \frac{1}{(2\pi)^3} \frac{m^* n_0^*}{\hbar^3} \sqrt{2m^* k_B T \pi} \frac{\pi}{L_z} (2 + \delta_{n,n'}) \quad (10)$$

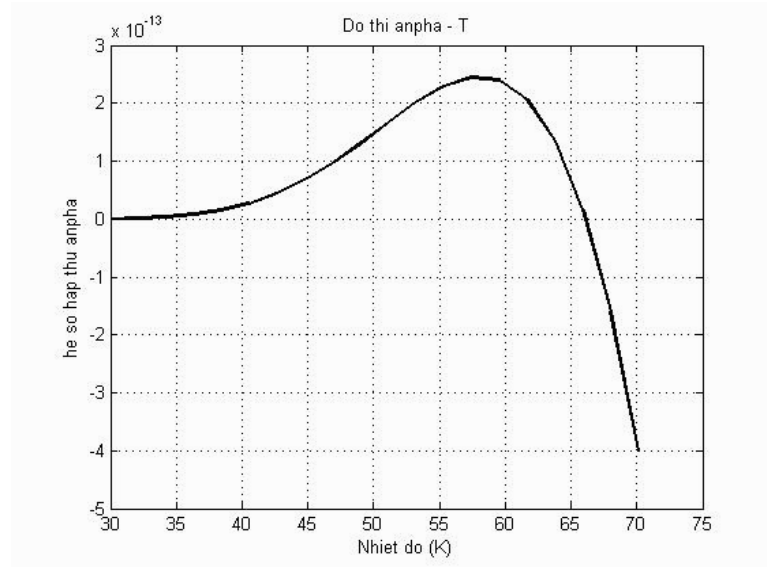
với $\xi_{s,m} = \hbar \omega_k (n' - n) + \hbar \omega_q - s \hbar \Omega_1 - m \hbar \Omega_2 + \Delta_n (\cos k_{\square}^n d - \cos k_{\square}^{n'} d)$, Δ_n là độ rộng vùng mini thứ n, d là chu kỳ siêu mạng; ε_n là các mức năng lượng trong hố thế biệt lập; m^* là khối lượng hiệu dụng của điện tử; L_z là độ rộng của hố thế biệt lập; k_B là hằng số Boltzmann; T là nhiệt độ tuyệt đối; $n_0^* = \frac{n_0 (e\pi)^{3/2} \hbar^3}{V_0 (m^* k_B T)^{3/2}}$, n_0 là nồng độ hạt tải; $K_\mu(z)$ là hàm Bessel biến dạng loại hai; γ là góc giữa hai vectơ sóng điện tử; $\delta_{n,n'}$ là kí hiệu Kronecker.

IV. KHẢO SÁT SỐ VÀ BÀN LUẬN

Trong phần này chúng tôi trình bày các kết quả khảo sát số cho một loại siêu mạng hợp phần GaAs - Al_{0.3}Ga_{0.7}As. Hệ số hấp thụ (2.50) với cơ chế tán xạ điện tử-phonon quang được coi như một hàm số phụ thuộc vào các tham số nhiệt độ, cấu trúc. Các tham số được sử dụng trong khảo sát là: $\Delta_n = 0.85.300 \text{ meV}$; $\rho = 5320 \text{ kg/m}^3$; $v_s = 5370 \text{ m/s}$; $L = 118 \text{ \AA}$; $\chi_\infty = 10.9$; $\chi_0 = 12.9$; $n_0 = 10^{20} \text{ m}^{-3}$; $E_0 = 3.5.10^6 \text{ V/m}$; $\hbar = 1.05459.10^{-34} \text{ J.s}$; $m = 0.067 m_0$; với m_0 là khối lượng của điện tử tự do, $d = 134 \text{ \AA}$ là chu kỳ của siêu mạng.

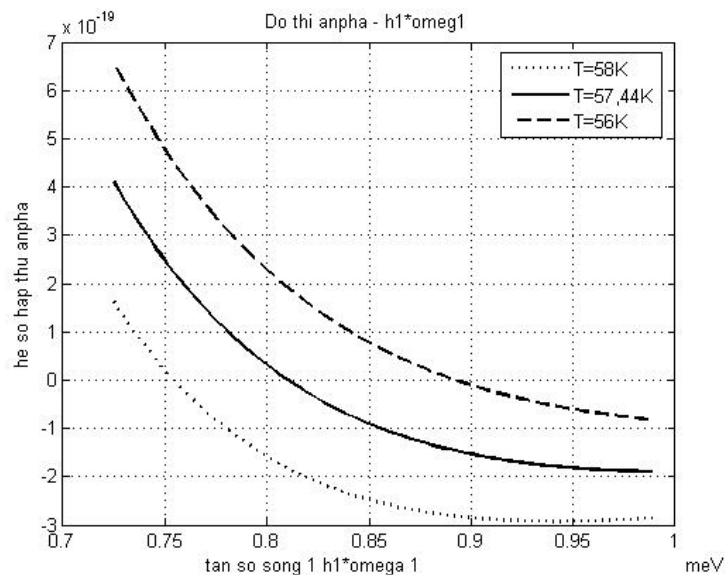
Trong trường hợp tán xạ điện tử-phonon quang, tiến hành khảo sát sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ vào năm tham số.

Hình 3.1 mô tả sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ vào nhiệt độ, nhìn vào đồ thị ta thấy trong vùng nhiệt độ từ 50K tới 65K sự phụ thuộc mạnh nhất nên trong các hình vẽ còn lại chúng tôi lựa chọn nhiệt độ trong vùng này.



Hình 3.1: sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ vào nhiệt độ.

Hình 3.2 thể hiện sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ vào năng lượng sóng điện từ yếu ở ba nhiệt độ khác nhau. Nhìn vào đồ thị ta thấy hệ số hấp thụ tỉ lệ nghịch với năng lượng sóng điện từ yếu và với cùng một giá trị nhiệt độ hệ số hấp thụ nhận giá trị dương, âm, thậm chí bằng không. Điều này có nghĩa là hệ số gia hấp thụ đã chuyển thành hệ số gia tăng và nó thể hiện sự khác biệt so với bán dẫn thông thường.

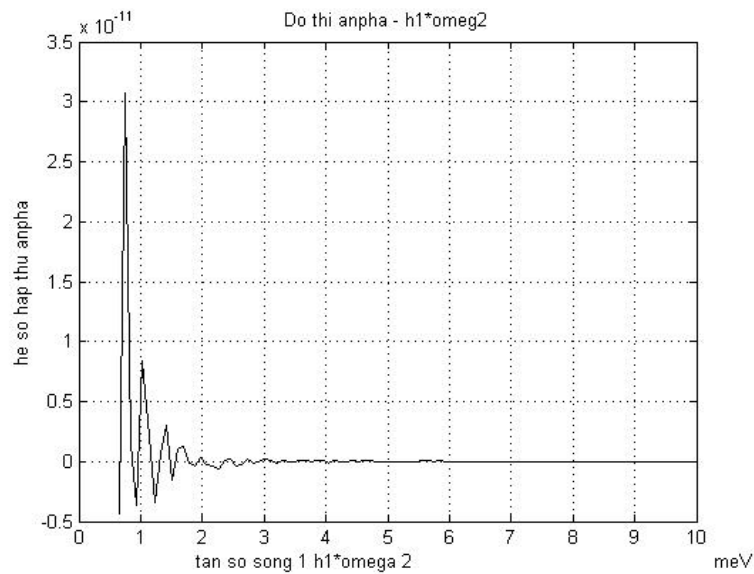


Hình 3.2 Sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ sóng điện từ yếu thụ vào năng lượng trường điện từ yếu

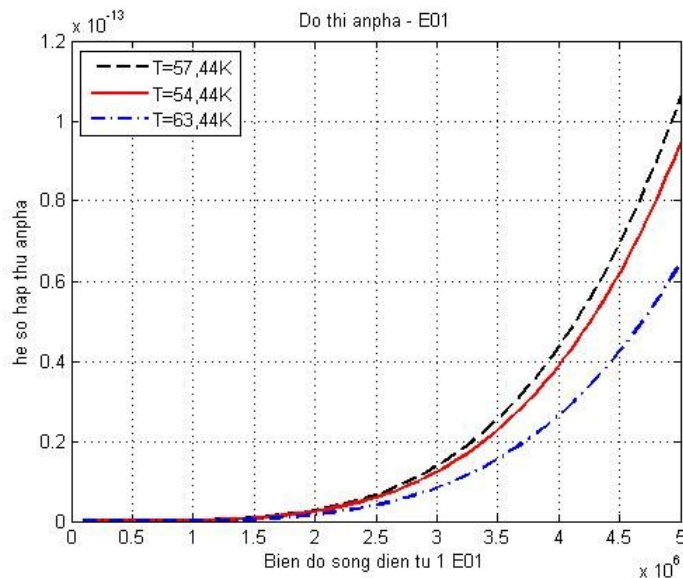
Hình 3.3 nghiên cứu ảnh hưởng của trường bức xạ laser lên hệ số hấp thụ, đồ thị có sự phụ thuộc phức tạp nhưng có biên độ suy giảm, các đỉnh cộng hưởng xem kẽ nhau.

Hình 3.4 mô tả sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ vào biên độ sóng điện từ yếu, đồ thị cho thấy biên độ sóng càng lớn thì sự hấp thụ càng mạnh.

Hình 3.5 xét đến ảnh hưởng của chiều dài hồ thế siêu mạng đến sự hấp thụ sóng điện từ. Đồ thị cho thấy khi chiều dài hồ thế càng nhỏ thì sự hấp thụ càng lớn.

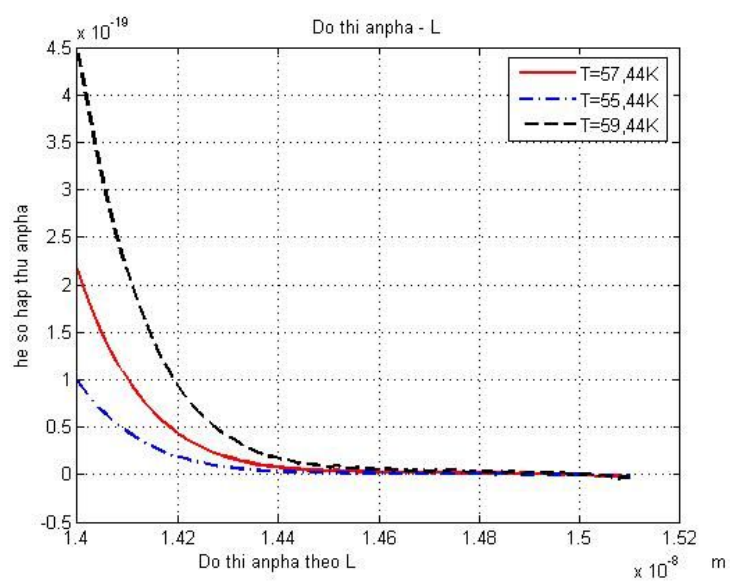


Hình 3.3: Sự phụ thuộc hệ số hấp thụ vào năng lượng trường laser



Hình 3.4: Đồ thị sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ vào

biên độ sóng điện từ



Hình 3.5. Đồ thị sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ vào chiều dài hồ thể L

KẾT LUẬN

Từ phương trình Hamiltonian của hệ điện tử-phonon, đã xây dựng phương trình động lượng tử và nhận được biểu thức cho hệ số hấp thụ sóng điện từ yếu bởi điện tử giam cầm trong siêu mạng hợp phần khi có mặt trường bức xạ laser. Trong trường hợp gần ngưỡng nhận được biểu thức giải tích cho hệ số hấp thụ cho cơ chế tán xạ điện tử-phonon quang. Kết quả cho thấy hệ số hấp thụ phụ thuộc phức tạp vào nhiệt độ của hệ, biên độ và tần số của sóng điện từ yếu và bức xạ laser. Ngoài ra còn phụ thuộc mạnh vào các tham số đặc trưng cho cấu trúc siêu mạng hợp phần. Các kết quả được tính toán số cho siêu mạng hợp phần GaAs - Al_{0.3}Ga_{0.7}As. Kết quả mới ở đây là trong các điều kiện xác định (nhiệt độ, năng lượng sóng...) hệ số hấp thụ có thể nhận giá trị âm nghĩa là hệ số hấp thụ trở thành hệ số gia tăng. Trong trường hợp giới hạn khi bỏ qua các số hạng phi tuyến kết quả trở về tương ứng với trường hợp hấp thụ tuyến tính.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Nguyễn Quang Báu, Đỗ Quốc Hùng, Vũ Văn Hùng, Lê Tuấn (2004), lý thuyết bán dẫn, NXB ĐHQG Hà Nội, Hà Nội.
2. Nguyễn Quang Báu, Nguyễn Vũ Nhân, Phạm Văn Bền (2007), Vật lý bán dẫn thấp chiều, NXB ĐHQG Hà Nội, Hà Nội.
3. E.M. Epstein, Radio physics, 18(1975) 785
4. E.M. Epstein, Lett. JETP, 13(1971) 511.
5. Nguyen Quang Bau, Chhoumm Navy, Vu Thanh Tam, Nguyen Vu Nhan, J. Science of VNU physics (1998).
6. Nguyen Quang Bau, Nguyen Vu Nhan, Tran Cong Phong, Nguyen The Toan. Communications in Physics, Vol.6, No.2(1996). 39 - 43.
7. Nguyen Quang Bau (2006), VNU Journal of Science, Mathematics - physics, (XXII)