

TÍNH CHẤT HẤP THỤ QUANG TỬ TRONG HỔ LƯỢNG TỬ KIỂU PÖSCHL-TELLER

LƯƠNG VĂN TÙNG¹, HUỖNH VĨNH PHÚC², LÊ DÌNH³

¹Trường Đại học Sài Gòn, Email: lvtht1961@gmail.com

²Trường Đại học Đồng Tháp, Email: hvphuc@dthu.edu.vn

³Trung tâm VLLT@VLTT, Trường DHSP, Đại học Huế, Email: ledinh@dhsphue.edu.vn

Tóm tắt: Trong bài báo này chúng tôi khảo sát sự hấp thụ quang trong hố lượng tử kiểu Pöschl-Teller khi có mặt từ trường ngoài. Kết quả tính số được áp dụng cho cả hai loại vật liệu GaAs và GaSb. Kết quả cho thấy rằng khoảng cách giữa hai mức năng lượng trong cả hai loại vật liệu này giảm theo độ rộng và tăng theo độ cao của hố lượng tử. Hiệu năng lượng trong GaSb luôn lớn hơn trong GaAs. Vị trí của đỉnh hấp thụ dịch về phía năng lượng thấp khi bề rộng của hố lượng tử tăng và dịch về phía năng lượng cao khi độ cao của hố lượng tử và từ trường tăng lên, phù hợp với một số công trình đã công bố trước đây.

Từ khóa: Hố lượng tử kiểu Pöschl-Teller, hệ số hấp thụ quang tử.

1 GIỚI THIỆU

Các tính chất hấp thụ quang của các cấu trúc thấp chiều được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu nhiều trong những năm gần đây [1]. Một trong những lý do chính là các hệ này có sự giam giữ lượng tử tương đối mạnh, có nhiều tiềm năng ứng dụng trong các thiết bị quang điện tử [2]. Schulz và các đồng tác giả [1] đã khảo sát tính điện tử và tính chất quang của hố lượng tử InGaN/GaN. Kết quả thu được cho thấy rằng trong khi các trạng thái điện tử chủ yếu được định vị dựa vào bề rộng của hố lượng tử, thì các trạng thái của lỗ trống được định vị bằng các dao động hợp kim ngẫu nhiên. Những hiệu ứng nội địa hóa này ảnh hưởng đáng kể đến các tính chất quang học lượng tử, dẫn đến sự mở rộng đáng kể của hiệu hai mức năng lượng thấp nhất.

Tính đối xứng của thế giam giữ Pöschl-Teller đã được chứng minh là dễ dàng điều khiển bằng việc chọn các tham số phù hợp [3]. Vì tính chất đối xứng có quyết định đến các tính chất điện tử và tính chất hấp thụ quang của cấu trúc hố lượng tử, nên thế giam giữ Pöschl-Teller tỏ ra là có nhiều ưu điểm. Các khảo sát về độ thay đổi chiết suất tỉ đối [3] cũng như hệ số hấp thụ, dao động đa hài bậc hai và hệ số chỉnh lưu quang học [4] cho thấy rằng cấu trúc hố lượng tử Pöschl-Teller có những đặc điểm phù hợp tốt với những

tiến bộ gần đây trong công nghệ chế tạo nano.

Trong một số công bố gần đây, chúng tôi đã khảo sát hệ số hấp thụ quang từ trong hổ lượng tử Pöschl-Teller [5] và hổ lượng tử Pöschl-Teller cải biên [6]. Kết quả cho thấy rằng tính chất hấp thụ quang từ của hổ lượng tử Pöschl-Teller phụ thuộc mạnh vào các tham số của hổ lượng tử cũng như từ trường ngoài. Trong công trình này, chúng tôi mở rộng khảo sát đối với hổ lượng tử với thế giam giữ kiểu Pöschl-Teller [7] với mong muốn cung cấp một kết quả có hệ thống hơn về các tính chất quang từ của cấu trúc hổ lượng tử với thế giam giữ quan trọng này.

2 HỆ SỐ HẤP THỤ QUANG TỪ

Khi có một từ trường tĩnh được đặt vào hổ lượng tử theo phương z , $\vec{B} = (0, 0, B)$, hàm sóng và phổ năng lượng của electron được xác định bởi biểu thức [5]

$$|\alpha\rangle = \frac{e^{ik_y y}}{\sqrt{L_y}} \phi_N(x - x_0) \psi_n(z), \quad (1)$$

$$E_\alpha = E_{N,n} = \left(N + \frac{1}{2}\right) \hbar\omega_c + E_n, \quad (2)$$

trong đó $N = 0, 1, 2, \dots$ là chỉ số mức Landau, L_y và k_y lần lượt là độ dài chuẩn hóa và số sóng theo phương y , $\phi_N(x - x_0)$ là hàm sóng dao động điều hòa với $x_0 = -\hbar k_y / (m_e \omega_c)$ là tâm tọa độ dao động, m_e là khối lượng hiệu dụng của electron, ω_c là tần số cyclotron. Thành phần theo phương z của hàm sóng, $\psi_n(z)$, được xác định từ nghiệm của phương trình Schrödinger

$$-\frac{\hbar^2}{2m_e} \frac{\partial^2 \psi_n(z)}{\partial z^2} + [E_n - U(z)] \psi_n(z) = 0. \quad (3)$$

Trong bài báo này chúng tôi sử dụng thế giam giữ kiểu Pöschl-Tell [7]

$$U(z) = -U_0 \cosh^{-2} \left(\frac{z}{L} \right), \quad (4)$$

trong đó U_0 và L lần lượt là độ cao và bề rộng của hố thế. Thay phương trình (4) vào phương trình (3) ta thu được biểu thức của hàm sóng

$$\psi_n(z) = C_n \left(\cosh \frac{z}{L} \right)^{-2\lambda} F \left(-\lambda + \chi, -\lambda - \chi, \frac{1}{2} : \xi \right) \quad \text{với } n \text{ chẵn} \quad (5)$$

$$\psi_n(z) = C_n \left(\cosh \frac{z}{L} \right)^{-2\lambda} \sqrt{\xi} F \left(-\lambda + \chi + \frac{1}{2}, -\lambda - \chi + \frac{1}{2}, \frac{3}{2} : \xi \right) \quad \text{với } n \text{ lẻ.} \quad (6)$$

Trong đó, C_n là hằng số chuẩn hóa, $\lambda = \frac{1}{4} \left(\sqrt{\frac{8m_e U_0 L^2}{\hbar^2} + 1} - 1 \right)$, $\chi = \sqrt{-\frac{m_e E_n L^2}{2\hbar^2}}$, $\xi = -\sinh^2(z/L)$, F là hàm siêu bội, và phổ năng lượng tương ứng là

$$E_n = -\frac{\hbar^2}{2m_e L^2} \left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{8m_e U_0 L^2}{\hbar^2} + 1} - \left(n + \frac{1}{2} \right) \right]. \quad (7)$$

Hệ số hấp thụ quang tử được tính như sau [8]

$$K(\Omega) = \frac{2\pi\Omega}{\epsilon_0 c V} \sum_{\lambda', \lambda} |M_{\lambda', \lambda}|^2 \delta(E_{\lambda'} - E_{\lambda} - \hbar\Omega), \quad (8)$$

trong đó ϵ_0 là hằng số điện, V là thể tích của hệ, và yếu tố ma trận dịch chuyển quang được xác định bởi biểu thức

$$M_{\lambda', \lambda} = \frac{e\hbar}{m_e} \frac{\langle \lambda' | p_x | \lambda \rangle}{E_{\lambda'} - E_{\lambda}} = \frac{e\hbar}{m_e} \frac{B_{N', N}}{\Delta E} \delta_{n', n} \delta_{k'_y, k_y} \quad (9)$$

với e là điện tích nguyên tố, $\Delta E = E_{\lambda'} - E_{\lambda}$ là hiệu năng lượng giữa hai trạng thái, và moment lưỡng cực xung lượng, $B_{N', N}$, được xác định bởi

$$B_{N', N} = \langle N' | p_x | N \rangle = \frac{i\hbar}{\alpha_c \sqrt{2}} \left(\sqrt{N+1} \delta_{N', N+1} - \sqrt{N} \delta_{N', N-1} \right), \quad (10)$$

với $p_x = -i\hbar \partial / \partial x$ là toán tử xung lượng theo phương x . Tổng theo λ và λ' trong phương trình (8) được khai triển thành $\sum_{\lambda} \rightarrow \sum_{N, n} \sum_{k_y}$, với tổng theo k_y được xác định từ điều kiện biên tuần hoàn [9]

$$\sum_{k_y} \rightarrow \frac{L_y}{2\pi} \int_{-L_x/2\alpha_c^2}^{+L_x/2\alpha_c^2} dk_y = \frac{S}{2\pi\alpha_c^2}, \quad (11)$$

với $S = V/L$ là diện tích bề mặt của hệ. Thay các kết quả trên vào phương trình (8) ta được

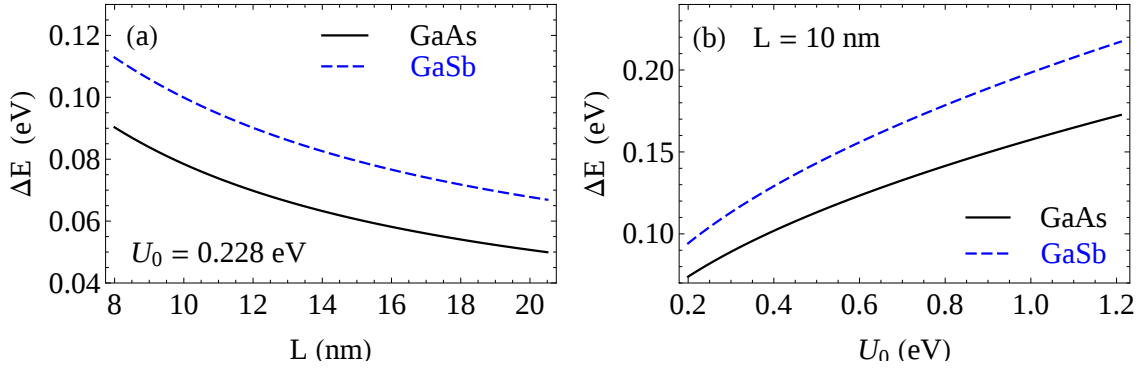
$$K(\Omega) = \frac{2\pi\hbar\alpha_S}{m_e^2 \Omega L \alpha_c^2} \sum_{N', N} |B_{N', N}|^2 \delta(\Delta E - \hbar\Omega), \quad (12)$$

trong đó $\alpha_S = e^2 / (4\pi\epsilon_0 \hbar c)$ là hằng số cấu trúc tinh tế Sommerfield. Các hàm Delta Dirac trong phương trình (12) được thay bằng các hàm Lorentz với độ rộng Γ .

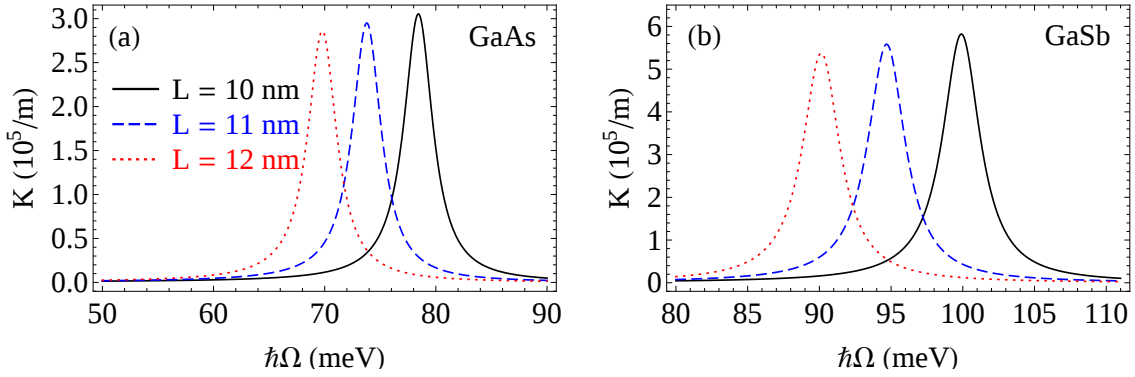
3 KẾT QUẢ TÍNH SỐ VÀ THẢO LUẬN

Trong phần này chúng tôi sẽ sử dụng phương trình (12) để tính số và vẽ đồ thị để khảo sát hệ số hấp thụ quang tử trong hố lượng tử được cấu tạo từ các vật liệu GaAs và GaSb với khối lượng hiệu dụng của electron lần lượt là [5]: $m_e = 0.067m_0$ trong GaAs và $m_e = 0.043m_0$ trong GaSb, với m_0 là khối lượng của electron tự do.

Trong hình 1 chúng tôi mô tả sự phụ thuộc của hiệu hai mức năng lượng ΔE vào các thông số của hố lượng tử. Kết quả được tính cho hai loại vật liệu khác nhau là GaAs và GaSb. Hình 1(a) cho thấy rằng khoảng cách giữa hai mức năng lượng giảm dần khi bề rộng của hố lượng tử tăng lên. Trong khi đó khoảng cách giữa hai mức năng lượng tăng khi độ cao của hố lượng tử tăng. Kết quả này là phù hợp với công trình đã công bố trước



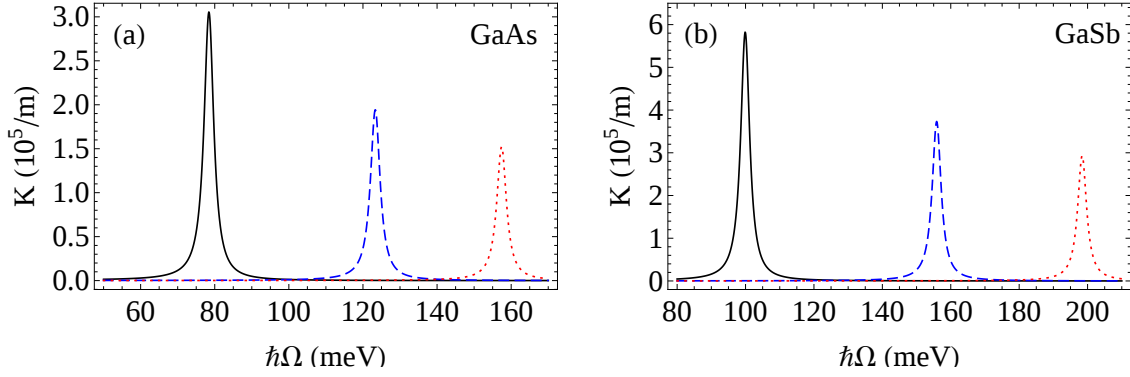
Hình 1: Sự phụ thuộc của hiệu năng lượng vào (a) độ rộng và (b) độ cao của hố lượng tử tại $B = 10$ T.



Hình 2: Sự phụ thuộc hệ số hấp thụ quang từ vào năng lượng photon tới trong (a) GaAs (b) GaSb tại $B = 10$ T, $U_0 = 0.228$ eV và $\Gamma = 0.5\sqrt{B}$ meV. Kết quả được tính cho các giá trị khác nhau của L : đường liền, đường gạch-gạch và đường chấm chấm lần lượt ứng với $L = 10, 11$ và 12 nm.

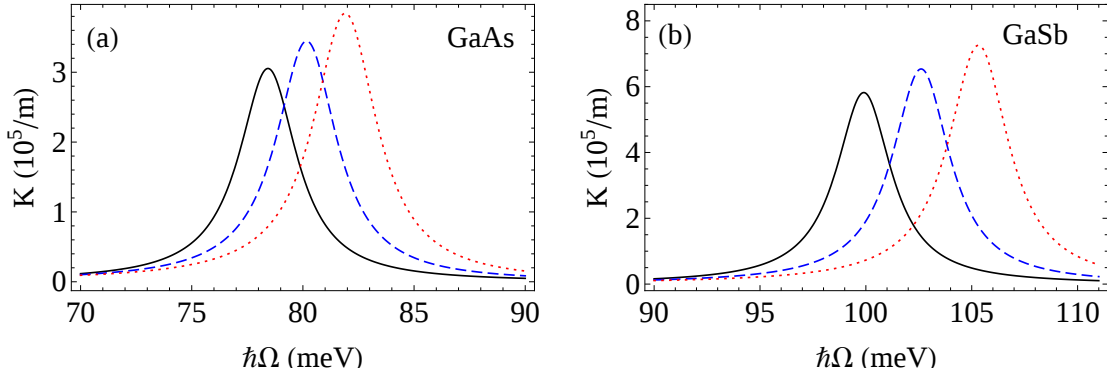
đây [10, 11]. Bên cạnh đó, khoảng cách giữa hai mức năng lượng trong GaSb luôn lớn hơn trong GaAs. Lý do là khối lượng hiệu dụng của electron trong GaSb nhỏ hơn trong GaAs. Hình 2 mô tả sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ vào năng lượng photon tới với các giá trị khác nhau của bề rộng hố lượng tử. Kết quả cho thấy rằng khi bề rộng của hố lượng tử tăng lên thì vị trí của đỉnh cộng hưởng dịch chuyển về phía năng lượng thấp. Điều này được giải thích là do khoảng cách giữa hai mức năng lượng giảm khi L tăng (xem Hình 1). Bên cạnh đó, do khoảng cách giữa hai mức năng lượng trong GaSb lớn hơn trong GaAs, nên các đỉnh cộng hưởng trong GaSb luôn nằm phía có năng lượng cao hơn so với trong GaAs. Hay nói cách khác, năng lượng của photon bị hấp thụ trong GaSb luôn lớn hơn trong GaAs.

Hình 3 mô tả sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ vào năng lượng photon tới với các giá trị khác nhau của U_0 . Kết quả cho thấy rằng trong cả hai trường hợp GaAs và GaSb, vị trí của đỉnh hấp thụ dịch về phía năng lượng cao hơn khi độ cao của hố thế tăng. Điều này



Hình 3: Sự phụ thuộc hệ số hấp thụ quang từ vào năng lượng photon tới trong (a) GaAs (b) GaSb tại $B = 10$ T, $L = 10$ nm và $\Gamma = 0.5\sqrt{B}$ meV. Kết quả được tính cho các giá trị khác nhau của U_0 : đường liền, đường gạch-gạch và đường chấm chấm lần lượt ứng với $U_0 = 0.228, 0.6$ và 1.0 eV.

được giải thích từ việc ΔE tăng lên khi U_0 tăng như được trình bày ở Hình 1(b).



Hình 4: Sự phụ thuộc hệ số hấp thụ quang từ vào năng lượng photon tới trong (a) GaAs (b) GaSb tại $U_0 = 0.228$ eV, $L = 10$ nm và $\Gamma = 0.5\sqrt{B}$ meV. Kết quả được tính cho các giá trị khác nhau của từ trường: đường liền, đường gạch-gạch và đường chấm chấm lần lượt ứng với $B = 10, 11$ và 12 T.

Trong Hình 4, chúng tôi mô tả sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ quang từ vào năng lượng photon tới với các giá trị khác nhau của từ trường. Khi từ trường tăng lên thì vị trí của đỉnh hấp thụ dịch chuyển về phía năng lượng cao hơn. Điều này được giải thích như sau: khi từ trường tăng lên, tần số cyclotron ω_c sẽ tăng, dẫn đến khoảng cách giữa hai mức năng lượng tăng, do đó giá trị của năng lượng của photon được hấp thụ tăng lên. Ngoài ra, chúng ta cũng thấy rằng khi từ trường tăng lên thì độ cao của hệ số hấp thụ tăng lên. Điều này được giải thích từ việc hệ số hấp thụ tỉ lệ với bán kính cyclotron α_c^{-2} như được trình bày ở phương trình (12). Khi từ trường tăng lên thì bán kính cyclotron giảm, do đó hệ số hấp thụ tăng lên khi từ trường tăng. Kết quả này phù hợp với một số công bố trước đây trong các mô hình hố lượng tử với thể giam giữ khác [12].

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này chúng tôi đã đưa ra được biểu thức giải tích của hệ số hấp thụ quang từ trong hổ lượng tử với thể giam giữ kiểu Pöschl-Teller. Khoảng cách giữa hai mức năng lượng giảm theo độ rộng và tăng theo độ cao của hổ lượng tử. Chúng tôi đã khảo sát sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ vào năng lượng photon tới với các giá trị khác nhau của độ cao và bề rộng của hổ lượng tử cũng như từ trường. Kết quả cho thấy rằng vị trí của đỉnh hấp thụ dịch về phía năng lượng thấp khi bề rộng của hổ lượng tử tăng và dịch về phía năng lượng cao khi độ cao của hổ lượng tử và từ trường tăng lên. Kết quả thu được là phù hợp với một số công trình đã công bố trước đây trong một số mô hình hổ lượng tử với thể giam giữ khác nhau.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được hỗ trợ bởi đề tài mã số B2018.PSD.01.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. Schulz, M. A. Caro, C. Coughlan, E. P. O'Reilly, Phys. Rev. B 91 (2015) 035439.
- [2] E. Leobandung, L. Guo, S. Y. Chou, Appl. Phys. Lett. 67 (1995) 2338.
- [3] H. Yildirim, M. Tomak, J. Appl. Phys. 99 (2018) 093103.
- [4] H. Yildirim, M. Tomak, Phys. Rev. B 72 (2005) 115340.
- [5] K. D. Pham, L. V. Tung, D. V. Thuan, C. V. Nguyen, N. N. Hieu, H. V. Phuc, J. Appl. Phys. 126 (2019) 124301.
- [6] K. D. Pham, L. Dinh, C. V. Nguyen, N. N. Hieu, P. T. Vinh, L. T. N. Tu, H. V. Phuc, Appl. Phys. A 125 (2019) 166.
- [7] I. I. Gol'dman, V. D. Krivchenkov, Problems in Quantum Mechanics, Pergamon Press Ltd., 1961.
- [8] L. Matthes, P. Gori, O. Pulci, F. Bechstedt, Phys. Rev. B 87 (2013) 035438.
- [9] P. Vasilopoulos, Phys. Rev. B 33 (1986) 8587.
- [10] H. V. Phuc, N. D. Hien, L. Dinh, T. C. Phong, Superlattices Microstruct. 94 (2016) 51.
- [11] K. D. Pham, L. Dinh, P. T. Vinh, C. A. Duque, H. V. Phuc, C. V. Nguyen, Superlattices Microstruct. 120 (2018) 738.
- [12] H. V. Phuc, L. Dinh, T. C. Phong, Superlattices Microstruct. 59 (2013) 77.

Title: MAGNETO-OPTICAL ABSORPTION PROPERTIES OF PÖSCHL-TELLER-TYPE QUANTUM WELL

Abstract: In this work, we study the optical absorption in the Pöschl-Teller-type quantum well in the presence of the magnetic field. The numerical calculation is evaluated for both GaAs and GaSb materials. The numerical results showed that the energy separation decreases with the well-width and increases with the well-high in both two of these materials. The energy separation in GaSb is larger than that in GaAs. The position of the absorption peak shifts to the lower energy origin when the well-width increases and shifts to the higher one when the well-high and the magnetic field increase. This result is in good agreement with those reported in previous works.

Keywords: Pöschl-Teller-type quantum well, magneto-optical absorption coefficient.