



DOI: <https://doi.org/10.52714/dthu.ns.3547.2032>

HỆ SỐ HẤP THỤ QUANG TRONG CHẤM LƯỢNG TỬ CÓ THỂ NĂNG ĐIỀU HÒA

Nguyễn Thị Ngọc Nguyên¹ và Huỳnh Vĩnh Phúc^{2*}

¹Sinh viên Khoa Sư phạm Khoa học tự nhiên, Trường Đại học Đồng Tháp, Việt Nam

²Khoa Sư phạm Khoa học tự nhiên, Trường Sư phạm, Trường Đại học Đồng Tháp, Việt Nam

*Tác giả liên hệ, Email: hvphuc@dthu.edu.vn

Lịch sử bài báo

Ngày nhận: 22/6/2026; Ngày nhận chỉnh sửa: 08/9/2026; Ngày duyệt đăng: 15/9/2026

Tóm tắt

Bài báo tập trung nghiên cứu hệ số hấp thụ quang học (OAC) trong chấm lượng tử hình cầu (SQD) vật liệu GaAs dưới tác động của thế giam giữ điều hòa. Bằng cách áp dụng phương pháp Nikiforov-Uvarov (NU), phương trình Schrödinger được giải để thu được các biểu thức giải tích tường minh cho hàm sóng và phổ năng lượng của electron. Dựa trên lý thuyết nhiễu loạn phụ thuộc thời gian bậc một, biểu thức tổng quát của OAC cho cả chuyển mức nội vùng (intra-band) và liên vùng (inter-band) đã được thiết lập. Các kết quả tính toán số và đồ thị bằng phần mềm Mathematica cho thấy OAC phụ thuộc mạnh mẽ vào các tham số vật lý của hệ. Cụ thể, khi bán kính chấm (r_0) tăng, cường độ hấp thụ cực đại giảm đáng kể do sự thay đổi mức độ khu trú của hàm sóng. Ngược lại, nhiệt độ (T) tăng dẫn đến sự gia tăng cường độ hấp thụ theo phân bố Fermi-Dirac. Đặc biệt, các đỉnh hấp thụ chỉ xuất hiện khi thỏa mãn quy tắc chọn lọc $\Delta\ell=\pm 1$. Kết quả cũng chỉ ra rằng các chuyển mức liên vùng xảy ra ở vùng năng lượng cao hơn và có cường độ lớn hơn hàng chục lần so với chuyển mức nội vùng. Những phát hiện này cung cấp cơ sở lý thuyết quan trọng cho việc thiết kế và tối ưu hóa các thiết bị quang điện tử hiện đại như laser chấm lượng tử, cảm biến và pin mặt trời hiệu suất cao.

Từ khóa: Chấm lượng tử hình cầu (SQD), hệ số hấp thụ quang học (OAC), phương pháp Nikiforov-Uvarov (NU), thế giam giữ điều hòa.

Trích dẫn: Huỳnh, V. P., & Nguyễn, T. N. N. (2026). Hệ số hấp thụ quang trong chấm lượng tử có thể năng điều hòa. *Tạp chí Khoa học Đại học Đồng Tháp - Chuyên san Khoa học Tự nhiên, Online First*, 1-10. <https://doi.org/10.52714/dthu.ns.3547.2032>

Copyright © 2026 The author(s). This work is licensed under a CC BY-NC 4.0 License.

OPTICAL ABSORPTION COEFFICIENT IN SPHERICAL QUANTUM DOTS WITH HARMONIC CONFINEMENT POTENTIAL

Nguyen Thi Ngoc Nguyen¹ và Huynh Vinh Phuc^{2*}

¹*Student, Faculty of Natural Science Education, Dong Thap University, Vietnam*

²*Faculty of Natural Sciences Teacher Education, School of Education, Dong Thap University, Vietnam*

**Corresponding author, Email: hvphuc@dtu.edu.vn*

Article history

Received: 22/6/2026; Received in revised form: 08/9/2026; Accepted: 15/9/2026

Abstract

This paper focuses on investigating the optical absorption coefficient (OAC) in GaAs spherical quantum dots (SQDs) under the influence of a harmonic confinement potential. By applying the Nikiforov-Uvarov (NU) method, the Schrödinger equation is solved to obtain explicit analytical expressions for the electronic wave functions and energy spectra. Based on first-order time-dependent perturbation theory, the general expressions of the OAC for both intra-band and inter-band transitions have been established. Numerical results and graphical representations generated using Mathematica software indicate that the OAC is strongly dependent on the physical parameters of the system. Specifically, as the dot radius (r_0) increases, the peak absorption intensity significantly decreases due to shifts in the localization level of the wave function. Conversely, an increase in temperature (T) leads to an enhancement in absorption intensity following the Fermi-Dirac distribution. Notably, absorption peaks only emerge when the selection rule $\Delta\ell=\pm 1$ is satisfied. The results also reveal that inter-band transitions occur at higher energy regions and possess intensities dozens of times greater than those of intra-band transitions. These findings provide a crucial theoretical basis for designing and optimizing modern optoelectronic devices, such as quantum dot lasers, sensors, and high-efficiency solar cells.

Keywords: *Harmonic confinement potential, Nikiforov-Uvarov (NU) method, optical absorption coefficient (OAC), spherical quantum dot (SQD).*

1. Mở đầu

Trong vài thập kỷ trở lại đây, các hệ bán dẫn có kích thước nano đã trở thành đối tượng nghiên cứu được quan tâm rộng rãi do biểu hiện nhiều hiệu ứng lượng tử đặc trưng cùng tiềm năng ứng dụng trong các thiết bị quang điện tử và quang tử học (Goel & cs., 2025; Phuc, 2026a; Tan & cs., 2020; Zhang & cs., 2010). Trong đó, chấm lượng tử (Quantum Dots - QDs) nổi bật bởi khả năng giam giữ hạt tải điện theo cả ba chiều không gian, tạo nên phổ năng lượng rời rạc tương tự như nguyên tử, vì vậy chúng thường được gọi là “nguyên tử nhân tạo” (Klimov & cs., 1999; Luque & cs., 2013; Wehrenberg & cs., 2002). Chính đặc điểm này cho phép điều chỉnh các tính chất điện thông qua việc thay đổi. Đặc biệt, khả năng điều chỉnh linh hoạt các đặc tính quang - điện tử thông qua việc kiểm soát kích thước, hình dạng và thành phần vật liệu, từ đó mở ra triển vọng ứng dụng trong laser, cảm biến, pin mặt trời hay công nghệ thông tin lượng tử (Chen & cs., 2021; García de Arquer & cs., 2021; Sargent, 2008; Wu & cs., 2015; Yoffe, 2001). Trong các đặc trưng vật lý của QDs, tính chất quang học giữ vai trò cốt lõi vì chúng ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả hoạt động của các linh kiện thực tế (Al-Douri & cs., 2023; Chistyakov & cs., 2017). Các công trình gần đây cho thấy sự đa dạng trong cấu trúc nano giúp điều khiển linh hoạt các thông số quang - điện tử, trở thành nền tảng cho nhiều hướng phát triển trong công nghệ quang - điện tử và môi trường (Al-Douri & cs., 2023; Bich & cs., 2025; Hoa & cs., 2026). Đặc biệt việc điều chỉnh phổ hấp thụ quang học thông qua sự thay đổi của cơ chế giam giữ mang lại khả năng thiết kế các vật liệu với tính chất mong muốn trên một dải phổ rộng (Phong & cs., 2026; Phuc, 2026b). Khi chấm lượng tử được sắp xếp thành mạng, sự kết hợp giữa hiệu ứng giam giữ vi mô và sự ghép nối vĩ mô tạo nên các hiện tượng mới liên quan đến truyền dẫn điện tích và hấp thụ quang, có ý nghĩa thực tế cho các thiết bị quang điện tử hiện đại (Chistyakov & cs., 2017). Trong bối cảnh đó, hệ số hấp thụ quang học (Optical Absorption Coefficient - OAC) là một đại lượng quan trọng. Việc nghiên cứu chi tiết OAC có thể giúp làm sáng tỏ bản chất quá trình vi mô, đồng thời cung cấp công cụ để tối ưu hóa các tính chất quang học của QDs (Phuc, 2026b). Về mặt lý thuyết, mô hình thể giam giữ đã được đề xuất để mô tả QDs. Các mô hình đơn giản như thế hố vuông (Ugajin, 1996) thường hữu ích trong việc minh họa cơ chế lượng tử hóa nhưng lại không phản ánh được sự phức tạp thực tế. Ngược lại, thể giam giữ điều hòa (parabolic potential) được xem là một trong những mô hình phù hợp hơn, bởi tính chất giải thích thuận lợi và khả năng mô phỏng gần đúng sự giam giữ thực tế trong QDs (Çakır & cs., 2012). Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng, thể điều hòa không chỉ cho phép khai thác bài toán ở dạng giải tích mà còn mô tả tốt sự phụ thuộc của phổ năng lượng và OAC vào các tham số vật lý của hệ, đồng thời mở ra khả năng phân tích các hiệu ứng quang học tuyến tính và phi tuyến. Xuất phát từ cơ sở trên, việc nghiên cứu hệ số hấp thụ quang học với thể giam giữ điều hòa vừa mang ý nghĩa lý thuyết, vừa có giá trị thực tiễn. Nghiên cứu này hướng đến việc xây dựng mô hình lý thuyết để xác định phổ năng lượng và hàm sóng của hạt tải điện trong QDs, từ đó thiết lập biểu thức cho hệ số hấp thụ quang học và khảo sát sự phụ thuộc của nó vào các tham số như số lượng tử, bán kính chấm và nhiệt độ. Những kết quả nano bán dẫn còn cung cấp định hướng cho việc thiết kế, chế tạo và ứng dụng QDs trong các thiết bị quang điện tử thế hệ mới.

Các nghiên cứu trước đã khảo sát hấp thụ quang trong chấm lượng tử hình cầu với thế parabol và nhiều thế giam giữ khác (Çakır & cs., 2012; Aghoutane & cs., 2018; Bich & cs., 2025; Phong & cs., 2026; Phuc, 2026b). Khác với việc chỉ nhắc lại phổ dao động từ điều hòa đã biết, nghiên cứu này tập trung xây dựng phần tử ma trận lưỡng cực cho các trạng thái kích thích, khảo sát thống nhất các chuyển mức nội vùng và liên vùng, và phân tích ảnh hưởng của kích thước hữu hiệu cùng nhiệt độ thông qua xác suất chiếm chỗ. Đây là phạm vi đóng góp chính của bài báo.

2. Mô hình toán học

Xét một chấm lượng tử bán dẫn (SQD) trong đó dao động của hạt chi phối bởi thế giam giữ điều hòa. Thế điều hòa được xác định bởi: Dạng parabol là gần đúng bậc hai của thế giam giữ tron quanh vị trí cân bằng và thường được dùng để mô tả gần đúng chấm lượng tử tự tổ chức (Çakır & cs., 2012). Trong mô hình này, r_0 là bán kính giam giữ hữu hiệu, được quy ước bởi $V(r_0) = V_{0e}$; do đó $\omega^2 = 2V_{0e} / m^* r_0^2$. Vì vậy, r_0 đi vào Hamiltonian gián tiếp thông qua tần số ω , thay vì là một biên cứng của miền nghiệm.

$$V(r) = \frac{1}{2} m^* \omega^2 r^2, \quad (1)$$

trong đó m^* là khối lượng electron. Chuyển động của hạt tải có khối lượng hiệu dụng m^* trong trường thế này được mô tả bởi phương trình Schrödinger:

$$\left[\frac{-\hbar^2}{2m^*} \nabla^2 + V(r) \right] \psi_{n\ell m}(r, \theta, \phi) = E_{n\ell} \psi_{n\ell m}(r, \theta, \phi), \quad (2)$$

trong đó ∇^2 là toán tử Laplace. Áp dụng phương pháp tách biến $\psi(r, \theta, \phi) = R_{n\ell}(r) Y_{\ell m}(\theta, \phi)$. Với $Y_{\ell m}(\theta, \phi)$ là các hàm cầu điều hòa, ta thu được phương trình xuyên tâm với $R = G/r$:

$$\frac{d^2 G}{dr^2} + \frac{2m^*}{\hbar^2} [E - V_{eff}] = 0, \quad (3)$$

trong đó thế năng hiệu dụng bao gồm cả số hạng giam giữ và số hạng ly tâm:

$$V_{eff}(r) = V(r) + \frac{\hbar^2 \ell(\ell+1)}{2m^* r^2}. \quad (4)$$

Phương trình (3) có thể được biến đổi về dạng

$$\frac{d^2 G}{dr^2} + \frac{-\xi_1 r^2 + \xi_2 r - \xi_3}{r^2} G = 0. \quad (5)$$

Với các tham số được định nghĩa là: $\xi_1 = \frac{1}{4}$, $\xi_2 = \frac{\epsilon}{2}$, $\xi_3 = \frac{\ell(\ell+1)}{4}$. Bằng cách sử dụng phương pháp Nikiforov-Uvarov, biểu thức hàm sóng và năng lượng được xác định dưới dạng:

$$R_{n\ell}(r) = A_{n\ell} r^\ell e^{-r^2/2\alpha^2} L_n^{\ell+1/2} \left(\frac{r^2}{\alpha^2} \right), \quad (6)$$

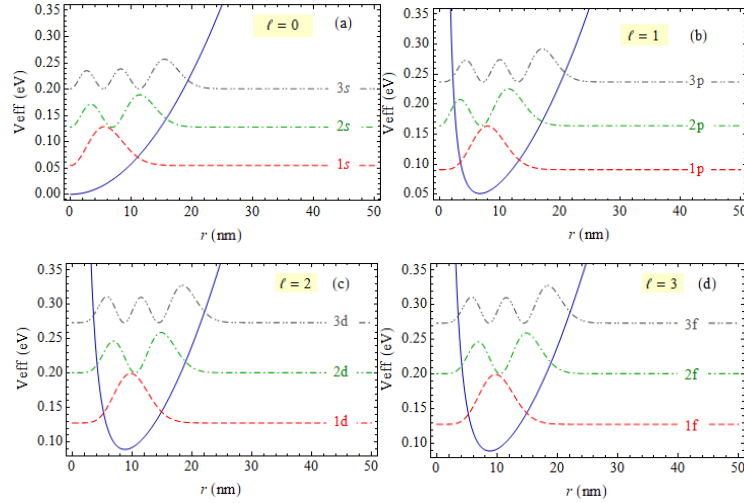
trong đó $A_{n\ell}$ là hằng số chuẩn hóa, được cho bởi công thức:

$$A_{n\ell} = \sqrt{\frac{2}{\alpha^{2\ell+3}} \frac{n!}{(n+\ell+\frac{1}{2})!}}. \quad (7)$$

Các giá trị riêng năng lượng tương ứng được tìm như sau:

$$E_{n_p} = \left(n_p + \frac{3}{2} \right) \hbar \omega, \quad (n_p = 0, 1, 2, \dots), \quad (8)$$

ở đây, ta định nghĩa $n_p = 2n + \ell$ là số lượng tử chính, n là số nút của hàm sóng xuyên tâm.



Hình 1. Thế năng hiệu dụng $V_{\text{eff}}(r)$ và mật độ xác suất tương ứng cho các trạng thái điện tử với (a) $\ell = 0$, (b) $\ell = 1$, (c) $\ell = 2$, (d) $\ell = 3$. Các tính toán thực hiện cho một SQD với $m_e^* = 0.067 m_0$, $V_{0e} = 228\text{meV}$, và $r_0 = 7\text{nm}$.

Kết quả cho thấy thế năng hiệu dụng được tạo thành từ sự kết hợp giữa thế giam giữ điều hòa và thế ly tâm. Với $\ell = 0$, thành phần ly tâm triệt tiêu nên thế năng có dạng parabol với cực tiểu tại tâm chấm lượng tử ($r = 0$). Ngược lại, đối với $\ell = 1, 2, 3$ thế ly tâm tạo ra rào thế mạnh ở vùng gần tâm. Khi ℓ tăng, rào thế ly tâm càng lớn, làm cho cực tiểu của thế năng dịch chuyển dần ra xa tâm hệ. Mật độ xác suất xuyên tâm phản ánh rõ tính chất lượng tử hóa thông qua số nút của hàm sóng. Trạng thái 1s không có nút, trong khi các trạng thái 2s và 3s lần lượt có một và hai nút. Đồng thời, khi số lượng tử chính n tăng, mật độ xác suất mở rộng về phía bán kính lớn hơn, cho thấy electron ở các mức năng lượng cao có xu hướng phân bố xa tâm hơn. Ảnh hưởng của số lượng tử quỹ đạo ℓ cũng thể hiện rõ tại vùng gần $r = 0$. Với $\ell = 0$, mật độ xác suất tại tâm có giá trị hữu hạn; ngược lại, đối với $\ell = 1, 2, 3$ mật độ xác suất triệt tiêu hoàn toàn tại tâm do tác động của rào thế ly tâm và điều kiện biên của phương trình Schrödinger. Nhìn chung, các kết quả cho thấy các số lượng tử (n, ℓ) quyết định cấu trúc thế năng và sự khu trú không gian của electron trong chấm lượng tử GaAs. Sự gia tăng số lượng tử quỹ đạo làm tăng ảnh hưởng của hiệu ứng ly tâm, từ đó đẩy electron ra xa vùng lõi và thể hiện rõ đặc trưng giam giữ lượng tử mạnh của hệ nano bán dẫn. Cần lưu ý rằng V_{0e} là giá trị của riêng thế điều hòa tại $r = r_0$. Đường biểu diễn trong Hình 1 là thế hiệu dụng $V_{\text{eff}}(r)$; vì vậy, với $\ell > 0$, rào ly tâm có thể làm V_{eff} lớn hơn V_{0e} ở vùng r nhỏ.

3. Hệ số hấp thụ quang học (OAC)

Đối với một hệ lượng tử tương tác với bức xạ kích thích có năng lượng photon là $\hbar\Omega$, cường độ ánh sáng tương ứng có thể được biểu diễn dưới dạng $I_0 = c\epsilon_0 n_r \Omega^2 A_0^2 / 2$, trong đó A_0 ký hiệu cho biên độ của thế vector, n_r là chiết suất của môi trường nền, ϵ_0 là hằng số điện môi chân không, và c là vận tốc ánh sáng. Dựa trên cấu trúc toán học này, hệ số hấp thụ quang học (OAC) được xác định từ biểu thức tiêu chuẩn:

$$\alpha(\Omega) = \frac{\hbar\Omega}{I_0 V} \sum_{i,f} W_{fi} [f(E_i) - f(E_f)], \quad (9)$$

trong đó V là thể tích của hệ, phép lấy tổng được thực hiện trên tất cả các trạng thái đầu $|i\rangle = |n, \ell, m\rangle$ và trạng thái cuối $|f\rangle = |n', \ell', m'\rangle$. Ở đây, $f(E_{i/f}) = [1 + \text{Exp}((E_{i/f} - E_F)/$

$k_B T) \Big]^{-1}$ biểu thị xác suất chiếm chỗ của trạng thái đầu/trạng thái cuối, với E_F là năng lượng Fermi và $k_B T$ là năng lượng nhiệt. Xác suất chuyển mức được xác định:

$$W_{fi} = \frac{2\pi}{\hbar} (\Omega A_0)^2 |d_{fi}|^2 \delta(E_{fi} - \hbar\Omega), \quad (10)$$

trong đó $d_{fi} = e \langle f | \mathbf{e} \cdot \mathbf{r} | i \rangle$ là yếu tố ma trận lưỡng cực; Ở đây, $\mathbf{e}$ là vectơ đơn vị dọc theo hướng phân cực của trường bức xạ.

Xét độ chênh lệch năng lượng giữa hai trạng thái: $E_{fi} = E_f - E_i$. Đối với ánh sáng phân cực dọc theo trục z , toán tử lưỡng cực được giản lược thành $\mathbf{e} \cdot \mathbf{r} = r \cos \theta$, và yếu tố ma trận lưỡng cực trở thành:

$$d_{fi} = ef \langle r \cos \theta | i \rangle = e \cdot \delta_{m',m} I_\theta \cdot I_r, \quad (11)$$

trong đó

$$I_\theta = \sqrt{\frac{(\ell+1)^2 - m^2}{(2\ell+3)(2\ell+1)}} \delta_{\ell',\ell+1} + \sqrt{\frac{\ell^2 - m^2}{(2\ell-1)(2\ell+1)}} \delta_{\ell',\ell-1}, \quad (12)$$

$$I_r = N_{n'\ell'} N_{n\ell} (-1)^{n'+n} \Gamma(\lambda+1) \times \sum_{k=0}^{\min(n'+n)} \binom{\lambda-\beta'}{n'-k} \binom{\lambda-\beta}{n-k} \binom{n+k}{n}. \quad (13)$$

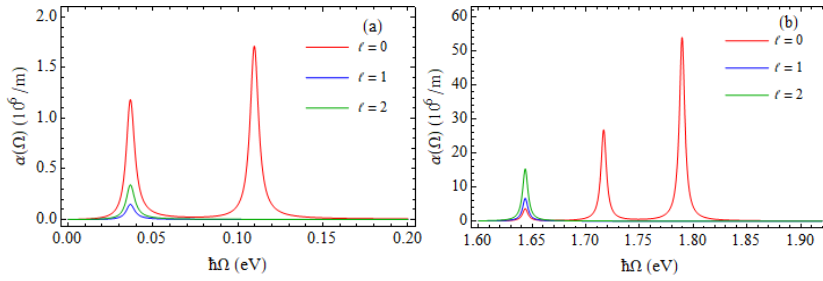
$$\text{Với } \lambda = \frac{\ell'+\ell}{2} + 1, \beta' = \ell' + \frac{1}{2}; \beta = \ell + \frac{1}{2}.$$

Như vậy phương trình (11) mô tả về sự hấp thụ quang học trong hệ thống lượng tử. Nó cho thấy sự hấp thụ chỉ phát sinh khi cả điều kiện chiếm giữ thống kê lượng tử, thông qua $\Delta f = f(E_i) - f(E_f)$, và điều kiện bảo toàn năng lượng thông qua $\delta(E_{fi} - \hbar\Omega)$ được thỏa mãn. Cường độ hấp thụ được quyết định thêm bởi yếu tố ma trận lưỡng cực d_{fi} , mã hóa tính đối xứng và độ phù không gian của các hàm sóng, cũng như trạng thái phân cực của ánh sáng tới. Ngoài ra, các hàm delta trong phương trình (12) cho thấy các dịch chuyển giữa hai trạng thái $|i\rangle$ và $|f\rangle$ tuân theo quy tắc chọn lọc $\ell' = \ell \pm 1$. Tích phân xuyên tâm được thực hiện trên miền $0 < r < \infty$ của dao động tử điều hòa; r_0 không được dùng làm cận tích phân. Với chuyển mức nội vùng, E_i và E_f thuộc cùng một vùng năng lượng. Với chuyển mức liên vùng, năng lượng photon còn gồm năng lượng vùng cấm và năng lượng giam giữ của electron và lỗ trống; phần tử ma trận được tính với khối lượng hiệu dụng và tham số giam giữ tương ứng của hai hạt.

4. Kết quả và thảo luận

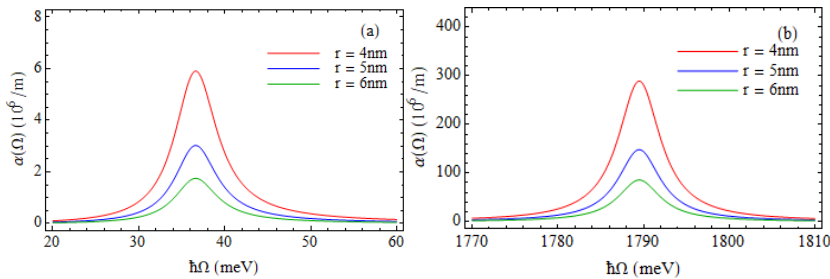
Sau đây, chúng tôi trình bày các kết quả về hệ số hấp thụ quang học (OAC) trong một chấm lượng tử đơn (SQD), sử dụng các tham số vật liệu sau (Aghoutane & cs., 2018; Li, 2000): khối lượng electron hiệu dụng $m_e^* = 0.067 m_0$ và khối lượng lỗ trống nhẹ hiệu dụng $m_h^* = 0.079 m_0$, trong đó m_0 là khối lượng của electron tự do; năng lượng vùng cấm $E_g = 1.607$ eV; chiết suất $n_r = 3.2$; và tỷ lệ tiềm năng giam giữ $V_{0h} = 0.67 V_{0e}$. Các giá trị m_e^* , m_h^* , E_g và n_r là tham số GaAs lấy từ các tài liệu đã dẫn; $V_{0e} = 228$ meV và $r_0 = 4-7$ nm được chọn trong miền thường dùng cho chấm lượng tử GaAs để minh họa ảnh hưởng của độ giam giữ. Theo quy ước $V(r_0) = V_{0e}$, hai tham số V_{0e} và r_0 xác định ω .

Dựa trên nội dung hình vẽ và các tính toán từ các nguồn tài liệu (Bich & cs., 2025; Phong & cs., 2026; Phuc, 2026b), ta có thể nhận xét về sự ảnh hưởng của các số lượng tử n và ℓ đối với phổ hệ số hấp thụ quang học (OAC):



Hình 2. Quang phổ OAC do các quá trình chuyển mức nội vùng (intra-band) và (b) liên vùng (inter-band). Các kết quả được trình bày tại $m = 0$, $V_{0e} = 228$ meV, $r_0 = 7$ nm, $E_F = -0.22$ eV và $T = 300$ K.

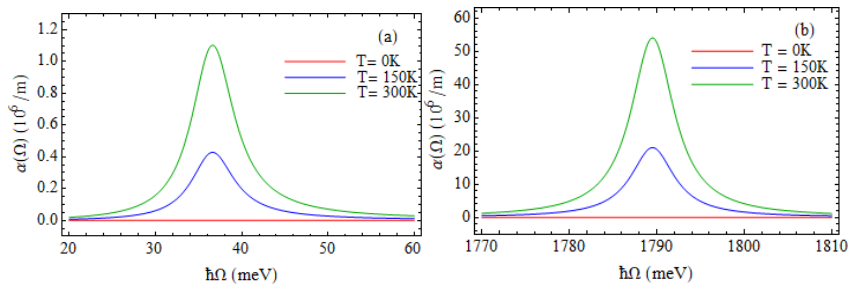
Quang phổ hệ số hấp thụ quang học (OAC) do dịch chuyển nội vùng (hình a) trong chấm lượng tử hình cầu (SQD) với thế giam giữ điều hòa chỉ xuất hiện ở miền năng lượng kích thích thấp (từ 0.00 eV đến 0.20 eV). Về mặt lý thuyết, vị trí năng lượng của các đỉnh hấp thụ được xác định bởi điều kiện cộng hưởng $\hbar\Omega = E_f - E_i$, phụ thuộc trực tiếp vào cấu trúc phổ năng lượng lượng tử hóa $E = \hbar\omega(2n + \ell + 3/2)$. Sự biến đổi của số lượng tử quỹ đạo ℓ (từ 0 đến 2) gây ra sự dịch chuyển rõ rệt của các vạch cộng hưởng trên trục năng lượng do sự thay đổi khoảng cách giữa các mức năng lượng của hệ. Bên cạnh đó, cường độ đỉnh hấp thụ duy trì ở mức thấp, tuân theo quy tắc chọn lọc $\Delta \ell = \pm 1$ và tỷ lệ với bình phương phần tử ma trận lưỡng cực $|d_{fi}|^2$, nơi số nút hàm sóng xuyên tâm n đóng vai trò cốt lõi điều khiển mức độ xen phủ không gian hạt tải điện. Ở quá trình dịch chuyển liên vùng (hình b) cho thấy phổ OAC liên vùng của chấm lượng tử hình cầu phụ thuộc mạnh vào các số lượng tử n và ℓ . Sự thay đổi ℓ làm dịch chuyển vị trí các đỉnh cộng hưởng do biến đổi năng lượng trạng thái, đồng thời ảnh hưởng đến cường độ hấp thụ thông qua phần tử ma trận lưỡng cực. Trong khi đó, n chi phối cấu trúc xuyên tâm của hàm sóng và độ xen phủ electron-lỗ trống, từ đó tác động đến xác suất chuyển mức. Các đỉnh hấp thụ xuất hiện trong vùng 1,6 – 1,9 eV với cường độ cực đại khoảng $60 \times 10^6 m^{-1}$, phản ánh đặc trưng của các chuyển mức liên vùng trong hệ. Xu hướng phân tách rõ miền năng lượng nội vùng và liên vùng phù hợp với các nghiên cứu trước về chấm lượng tử hình cầu (Aghoutane & cs., 2018; Çakır & cs., 2012). Điểm được nhấn mạnh ở đây là sự đóng góp của các trạng thái kích thích thông qua độ chồng lấp xuyên tâm và quy tắc chọn lọc.



Hình 3. Quang phổ OAC do các chuyển mức (a) nội vùng (intra-band) và (b) liên vùng (inter-band) $|1, 0\rangle \rightarrow |1, 1\rangle$ đối với các giá trị khác nhau của r_0 với $m = 0$. Các kết quả được trình bày tại $V_{0e} = 228$ meV, $E_F = -0.3$ eV và $T = 300$ K.

Đối với chuyển mức $|1,0\rangle \rightarrow |1,1\rangle$, khi r_0 tăng từ 4 nm lên 6 nm, cường độ đỉnh giảm ở cả phổ nội vùng và liên vùng. Theo quan hệ $\omega = \sqrt{2V_{0e} / m^* r_0^2}$, r_0 lớn làm giam giữ yếu hơn và hàm sóng phân bố rộng hơn, qua đó làm thay đổi độ chồng lấp và phần tử ma trận lưỡng cực. Xu hướng phụ thuộc kích thước này phù hợp với các nghiên cứu trước về hấp thụ quang

trong chấm lượng tử (Aghoutane & cs., 2018; Çakır & cs., 2012). Kết quả cho thấy khả năng điều chỉnh phổ bằng kích thước trong phạm vi mô hình lý thuyết.



Hình 4. Quang phổ OAC do các mức (a) nội vùng (intra-band) và (b) liên vùng (inter-band) $|1, 0\rangle \rightarrow |1, 1\rangle$ đối với các giá trị khác nhau của T tại $m = 0$. Các kết quả được trình bày tại $r_0 = 7\text{ nm}$, $E_F = -0.3\text{ eV}$, và $V_{0e} = 228\text{ meV}$.

Nhiệt độ làm thay đổi biên độ phổ thông qua hiệu xác suất chiếm chỗ $f(E_i) - f(E_f)$, nhưng không làm thay đổi vị trí cộng hưởng trong mô hình hiện tại. OAC bằng không tại $T = 0\text{ K}$ trong Hình 4 không phải vì chuyển mức quang bị cấm ở nhiệt độ không, mà do mức Fermi được chọn thấp hơn các trạng thái ban đầu nên $f(E_i) = f(E_f) = 0$. Nói chung, nếu trạng thái đầu bị chiếm và trạng thái cuối còn trống thì hấp thụ vẫn xảy ra tại $T = 0\text{ K}$. Mô hình chỉ xét ảnh hưởng của nhiệt độ qua phân bố Fermi–Dirac và dùng độ rộng mức cố định; sự thay đổi phân bố phonon và tán xạ electron–phonon chưa được tính hiện vi. Đây là một giới hạn của nghiên cứu.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng biểu thức hệ số hấp thụ quang cho chấm lượng tử GaAs hình cầu với thể giam giữ điều hòa, bao gồm các chuyển mức nội vùng và liên vùng giữa các trạng thái kích thích. Phân tử ma trận lưỡng cực cho thấy các chuyển mức tuân theo $\Delta\ell = \pm 1$ và phụ thuộc vào độ chồng lấp xuyên tâm. Kết quả xác nhận sự tách biệt về miền năng lượng giữa hấp thụ nội vùng và liên vùng, đồng thời cho thấy kích thước hữu hiệu và xác suất chiếm chỗ chỉ phối cường độ đỉnh. Các xu hướng này phù hợp với các công trình trước về chấm lượng tử hình cầu, trong khi đóng góp của bài báo là phân tích thống nhất các trạng thái kích thích trong cùng mô hình. Kết quả chỉ có ý nghĩa định hướng vì mô hình một hạt chưa xét tương tác Coulomb, phi parabol vùng năng lượng và tán xạ electron–phonon phụ thuộc nhiệt độ.

Tài liệu tham khảo

- Aghoutane, N., El-Yadri, M., El Aouami, A., Feddi, E., Dujardin, F., El Haouari, M., Duque, C. A., Nguyen, C. V., & Phuc, H. V. (2018). Refractive index changes and optical absorption involving $1s$ – $1p$ excitonic transitions in quantum dot under pressure and temperature effects. *Applied Physics A*, 125(1), 17. <https://doi.org/10.1007/s00339-018-2306-x>
- Al-Douri, Y., Khan, M. M., & Jennings, J. R. (2023). Synthesis and optical properties of II–VI semiconductor quantum dots: a review. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(11), 993. <https://doi.org/10.1007/s10854-023-10435-5>
- Bich, T. N., Hoa, L. T., & Phuc, H. V. (2025). Optical absorption coefficient in quantum dot with Kratzer potential. *Laser Physics*, 35(11), 115901. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/ae1947>
- Çakır, B., Yakar, Y., & Özmen, A. (2012). Refractive index changes and absorption coefficients in a spherical quantum dot with parabolic potential. *Journal of Luminescence*, 132(10), 2659–2664. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2012.03.065>

- Chen, M., Lu, L., Yu, H., Li, C., & Zhao, N. (2021). Integration of Colloidal Quantum Dots with Photonic Structures for Optoelectronic and Optical Devices. *Advanced Science*, 8(18), 2101560. <https://doi.org/10.1002/advs.202101560>
- Chistyakov, A. A., Zvaigzne, M. A., Nikitenko, V. R., Tameev, A. R., Martynov, I. L., & Prezhdo, O. V. (2017). Optoelectronic Properties of Semiconductor Quantum Dot Solids for Photovoltaic Applications. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 8(17), 4129-4139. <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.7b00671>
- Goel, N., Kushwaha, A., Raj, M., A. A., Chaurasiya, R., Shinde, N. B., Pradhan, A., & Upadhyay, R. K. (2025). Growth of single-crystalline 2D materials for advanced quantum sensing devices. *Applied Physics Reviews*, 12(3). <https://doi.org/10.1063/5.0232976>
- Hoa, L. T., Hieu, N. N., Bich, T. N., Hoa, V. T., & Phuc, H. V. (2026). Excited-state optical absorption in modified Kratzer–ring-shaped quantum dots. *Physica B: Condensed Matter*, 730, 418495. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physb.2026.418495>
- Klimov, V. I., Schwarz, C. J., McBranch, D. W., Leatherdale, C. A., & Bawendi, M. G. (1999). Ultrafast dynamics of inter- and intraband transitions in semiconductor nanocrystals: Implications for quantum-dot lasers. *Physical Review B*, 60(4), R2177-R2180. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.60.R2177>
- Li, E. H. (2000). Material parameters of InGaAsP and InAlGaAs systems for use in quantum well structures at low and room temperatures. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 5(4), 215-273. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1386-9477\(99\)00262-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1386-9477(99)00262-3)
- Luque, A., Martí, A., Mellor, A., Fuertes Marrón, D., Tobías, I., & Antolín, E. (2013). Absorption coefficient for the intraband transitions in quantum dot materials. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(4), 658-667. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pip.1250>
- Phong, T. C., Bich, T. N., & Phuc, H. V. (2026). Intra- and inter-band optical absorption in spherical quantum dots under inversely quadratic Hellmann potential. *Physics Letters A*, 567, 131211. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physleta.2025.131211>
- Phuc, H. V. (2026a). Excited-states optical transitions in Hartmann quantum dots. *Applied Physics A*, 132(6), 478. <https://doi.org/10.1007/s00339-026-09663-3>
- Phuc, H. V. (2026b). Intra- and inter-band optical absorption from excited states in inversely quadratic Hellmann-ring-shaped quantum dots. *Communications in Theoretical Physics*, 78(8), 085701. <https://doi.org/10.1088/1572-9494/ae64c9>
- Sargent, E. H. (2008). Solar Cells, Photodetectors, and Optical Sources from Infrared Colloidal Quantum Dots. *Advanced Materials*, 20(20), 3958-3964. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adma.200801153>
- Tan, T., Jiang, X., Wang, C., Yao, B., & Zhang, H. (2020). 2D Material Optoelectronics for Information Functional Device Applications: Status and Challenges. *Advanced Science*, 7(11), 2000058. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/advs.202000058>
- Ugajin, R. (1996). Magneto-optics in a square-well quantum dot. *Physical Review B*, 53(11), 6963-6966. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.53.6963>
- Wehrenberg, B. L., Wang, C., & Guyot-Sionnest, P. (2002). Interband and Intraband Optical Studies of PbSe Colloidal Quantum Dots. *The Journal of Physical Chemistry B*, 106(41), 10634-10640. <https://doi.org/10.1021/jp021187e>
- Wu, J., Chen, S., Seeds, A., & Liu, H. (2015). Quantum dot optoelectronic devices: lasers, photodetectors and solar cells. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 48(36), 363001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/36/363001>
- Yoffe, A. D. (2001). Semiconductor quantum dots and related systems: Electronic, optical, luminescence and related properties of low dimensional systems. *Advances in Physics*,

50(1), 1-208. <https://doi.org/10.1080/00018730010006608>
Zhang, Z. Y., Hogg, R. A., Lv, X. Q., & Wang, Z. G. (2010). Self-assembled quantum-dot superluminescent light-emitting diodes. *Advances in Optics and Photonics*, 2(2), 201-228. <https://doi.org/10.1364/AOP.2.000201>