

HẤP THỤ HAI PHOTON TRONG CHẤM LƯỢNG TỬ VỚI THỂ YUKAWA

Thái Thị Đăng Khương¹, Nguyễn Bích Thảo¹, Nguyễn Văn Công¹ và Huỳnh Vĩnh Phúc^{2*}

¹Sinh viên, Khoa Sư phạm Khoa học tự nhiên, Trường Sư phạm, 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: Huỳnh Vĩnh Phúc, Email: hvphuc@dthu.edu.vn

Lịch sử bài báo

Ngày nhận: 21/3/2024; Ngày nhận chỉnh sửa: 09/5/2024; Ngày duyệt đăng: 10/5/2024

Tóm tắt

Chúng tôi nghiên cứu tính chất hấp thụ quang phi tuyến của chấm lượng tử có thể Yukawa, thông qua việc khảo sát quá trình hấp thụ hai photon (TPA) và sử dụng GaAs làm vật liệu minh họa. Kết quả nghiên cứu cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa dịch chuyển nội vùng và dịch chuyển liên vùng: chuyển tiếp nội vùng có phổ TPA hẹp hơn và giá trị cực đại cao hơn so với dịch chuyển liên vùng. Đáng chú ý, đỉnh hấp thụ tương ứng với $\ell = 2$ luôn nằm bên trái đỉnh tương ứng với $\ell = 1$. Hơn nữa, sự phụ thuộc của vị trí đỉnh hấp thụ vào bậc dịch chuyển, n , đối với các nội vùng và liên vùng là trái ngược nhau. Chúng tôi cũng quan sát thấy xu hướng dịch chuyển xanh trong phổ TPA với giá trị tăng dần của cả hai tham số R_0 và V_1 . Những phát hiện này hứa hẹn quan trọng cho sự phát triển của các thiết bị quang tử cải tiến bằng cách tối ưu hóa các đặc tính vật liệu của chấm lượng tử.

Từ khóa: Hấp thụ hai photon, chấm lượng tử, Tương tác electron-photon.

DOI: <https://doi.org/10.52714/dthu.13.8.2024.1353>

Trích dẫn: Thái, T. Đ. K., Nguyễn, B. T., Nguyễn, V. C., & Huỳnh, V. P. (2024). Hấp thụ hai photon trong chấm lượng tử với thể Yukawa. *Tạp chí Khoa học Đại học Đồng Tháp*, 13(8), 50-56. <https://doi.org/10.52714/dthu.13.8.2024.1353>.

Copyright © 2024 The author(s). This work is licensed under a CC BY-NC 4.0 License.

TWO-PHOTON ABSORPTION IN QUANTUM DOT WITH YUKAWA POTENTIAL

Thai Thi Dang Khuong¹, Nguyen Bich Thao¹, Nguyen Van Cong¹, and Huynh Vinh Phuc^{2*}

¹Student, Faculty of Natural Sciences Teacher Education, School of Education,
Dong Thap University, Cao Lanh 870000, Vietnam

²Faculty of Natural Sciences Teacher Education, School of Education,
Dong Thap University, Cao Lanh 870000, Vietnam

*Corresponding author: Huynh Vinh Phuc, Email: hvphuc@dthu.edu.vn

Article history

Received: 21/3/2024; Received in revised form: 09/5/2024; Accepted: 10/5/2024

Abstract

We study the nonlinear optical absorption properties of Yukawa potential quantum dots, especially focusing on the phenomenon of two-photon absorption (TPA) and using GaAs as illustrative material. The research results show a significant difference between intra-band and inter-band transitions: the intra-transitions have a narrower TPA spectrum and a higher maximum value because the transition energy has a smaller value compared to that of the interregional one. Notably, the peak corresponding to $\ell = 2$ is always located to the left of the peak corresponding to $\ell = 1$. Furthermore, the absorption peak position shows a different dependence on the displacement order, n , for intra- and inter-transitions. We also record a blue-shift trend in the TPA spectrum with increasing values of both parameters R_0 and V_1 . These findings hold important promises for the development of improved photonic devices by optimizing the material properties of quantum dots.

Keywords: Electron-photon interaction, quantum dots, two-photon absorption.

1. Giới thiệu

Trong lĩnh vực vật lý hệ thấp chiều đặc biệt là hệ chấm lượng tử, quá trình hấp thụ photon là một trong những hiện tượng cơ bản quan trọng, đóng vai trò chủ chốt trong việc hiểu và mô tả sự tương tác giữa ánh sáng và vật chất. Quá trình này không chỉ là trọng tâm của nghiên cứu về ánh sáng và quang học lượng tử, mà còn là một phần quan trọng của các lĩnh vực ứng dụng như công nghệ thông tin lượng tử và y học. Do đó tính chất hấp thụ quang tuyến tính và phi tuyến đã được nhiều nhà khoa học quan tâm nghiên cứu trong những năm gần đây (Nasa & Purohit, 2020; Tung & cs., 2018).

Trong số các hệ thấp chiều, các chấm lượng tử, bao gồm các chấm lượng tử hình cầu, thể hiện các tính chất quang học phụ thuộc vào kích thước của chúng, do sự giam giữ lượng tử. Khi kích thước của các chấm lượng tử giảm, độ rộng của vùng cấm tăng lên, dẫn đến sự dịch chuyển xanh trong quang phổ hấp thụ và phát xạ. Bên cạnh đó, các chấm lượng tử có phổ hấp thụ rộng, cho phép hấp thụ ánh sáng trên phạm vi rộng. Ngược lại, chúng phát ra ánh sáng ở khoảng bước sóng hẹp, được xác định bởi kích thước của chúng. Đặc tính này tỏ ra có lợi trong các ứng dụng như đèn LED và quang điện, trong đó khả năng hấp thụ và phát xạ ánh sáng hiệu quả là tối quan trọng. Do đó, nhiều nhà nghiên cứu đã tiến hành nghiên cứu sâu rộng về các hệ chấm lượng tử.

Mô hình thế Yukawa (Yukawa, 1935) một trong những đóng góp quan trọng nhất của lĩnh vực vật lý hạt cơ bản, đã thu hút sự quan tâm lớn từ cộng đồng nghiên cứu. Mô hình này được đề xuất bởi nhà vật lý người Nhật Bản Hideki Yukawa vào những năm đầu của thế kỷ 20, mô tả tương tác mạnh giữa các hạt nhân thông qua trao đổi của một hạt trung gian được gọi là meson π . Thế Yukawa đã chứng minh tính linh hoạt và hiệu quả của mình trong việc giải thích một loạt các hiện tượng tương tác hạt nhân.

Với sự kết hợp giữa hai yếu tố trên, chúng tôi tập trung vào việc nghiên cứu hấp thụ hai photon trong chấm lượng tử với thế Yukawa. Chúng tôi thảo luận về quá trình hấp thụ photon trong chấm lượng tử và sự ảnh hưởng của mô hình thế Yukawa trong quá trình này. Nghiên cứu này không chỉ mở ra cánh cửa cho việc hiểu rõ hơn về cơ chế của hấp thụ photon mà còn mang lại cái nhìn mới về tương tác giữa ánh sáng và vật chất trong lượng tử GaAs.

2. Hàm sóng và năng lượng.

Xét một chấm lượng tử với thế Yukawa được cho như sau (Bylicki & cs., 2007; Hamzavi & cs., 2012; Yukawa, 1935)

$$V(r) = -\frac{V_1 e^{-\delta r}}{r}, \tag{1}$$

trong đó $V_1 = V_0 R_0$ với V_0 và R_0 lần lượt là độ sâu của thế giam giữ và bán kính của chấm lượng tử với $\delta = 1/R_0$ là một tham số của thế giam giữ. Phương trình Schrodinger cho một electron bị giam giữ trong chấm lượng tử được viết như sau

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

trong đó m^* là khối lượng hiệu dụng của electron/lỗ trống và ∇^2 là toán tử Laplace trong hệ tọa độ cầu. Sử dụng phương pháp tách biến, ta tìm hàm sóng dưới dạng

$$\psi_{n\ell m}(r, \theta, \phi) = R_{n\ell}(r) Y_{\ell m}(\theta, \phi). \tag{3}$$

Thực hiện phép biến đổi $R_{n\ell}(r) = G_{n\ell}(r)/r$, ta thu được phương trình theo biến r như sau

$$\frac{d^2}{dr^2} G_{n\ell}(r) + \frac{2m^*}{\hbar^2} [E_{n\ell} - V_{hd}(r)] G_{n\ell}(r) = 0, \tag{2}$$

trong đó thế năng hiệu dụng được xác định như sau

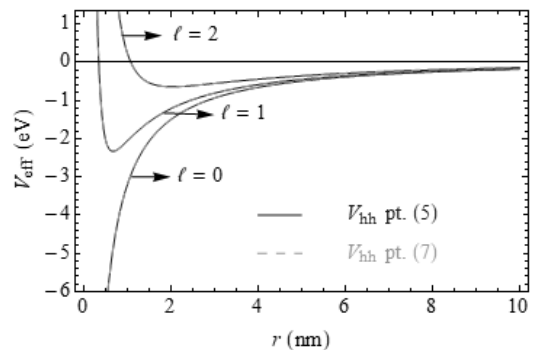
$$V_{hd}(r) = -\frac{V_1 e^{-\delta r}}{r} + \frac{\hbar^2 \ell(\ell+1)}{2m^* r^2}. \tag{5}$$

Để giải phương trình (4), chúng ta sẽ sử dụng gần đúng sau (Greene & Aldrich, 1976; M. Hamzavi & cs., 2013; Hamzavi & cs., 2012; Nikivorof & Uvarov, 1988)

$$\frac{1}{r} \approx 2\delta \frac{e^{-\delta r}}{1 - e^{-2\delta r}}. \tag{6}$$

Khi đó, thế hiệu dụng ở phương trình (5) trở thành

$$V_{hd} = -2\delta V_1 \frac{e^{-2\delta r}}{1 - e^{-2\delta r}} + \frac{\hbar^2 \ell(\ell+1)}{2m^*} \frac{4\delta^2 e^{-2\delta r}}{(1 - e^{-2\delta r})^2}. \tag{7}$$



Hình 1. Thế năng hiệu dụng, V_{hd} , ở phương trình (5) và dạng gần đúng của nó ở phương trình (7) với các giá trị khác nhau của ℓ đối với chấm lượng tử GaAs.

Hình 1 cho thấy rằng kết quả gần đúng ở phương trình (7) phù hợp tốt với thế năng hiệu dụng được cho ở phương trình (5). Thực hiện phép đổi biến $\xi = e^{-2\delta r}$, sau đó thay phương trình (7) vào phương trình (4), ta được

$$\frac{d^2 G_{n\ell}(\xi)}{d\xi^2} + \frac{1-\xi}{\xi(1-\xi)} \frac{dG_{n\ell}(\xi)}{d\xi} + \frac{-a_1\xi^2 + a_2\xi - a_3}{\xi^2(1-\xi)^2} G_{n\ell}(\xi) = 0, \quad (8)$$

trong đó ta đã kí hiệu

$$a_1 = \frac{m^*V_1}{\delta\hbar^2} + \frac{\epsilon}{4\delta^2}, \quad \epsilon = -\frac{2m^*E_{n\ell}}{\hbar^2}, \quad (9)$$

$$a_2 = \frac{\epsilon}{2\delta^2} + \frac{m^*V_1}{\delta\hbar^2} - \ell(\ell+1), \quad (10)$$

$$a_3 = \frac{\epsilon}{4\delta^2}. \quad (11)$$

Áp dụng phương pháp NU (M. Hamzavi & cs., 2013; Nikivorof & Uvarov, 1988; Tezcan & Sever, 2009), ta tìm được nghiệm của phương trình (8) như sau

$$G_{n\ell}(\xi) = N_{n\ell} \xi^{\lambda_1} (1-\xi)^{\lambda_2} P_n^{(2\lambda_1, 2\lambda_2-1)}(1-2\xi), \quad (12)$$

trong đó $\lambda_1 = \sqrt{\epsilon/4\delta^2}$, $\lambda_2 = \ell + 1$, và $P_n^{(\mu, \nu)}$ là đa thức Jacobi với $N_{n\ell}$ là hằng số chuẩn hóa, được tìm từ điều kiện chuẩn hóa

$$1 = \int_0^\infty |R_{n\ell}(r)|^2 r^2 dr = \int_0^1 |G_{n\ell}(r)|^2 dr. \quad (13)$$

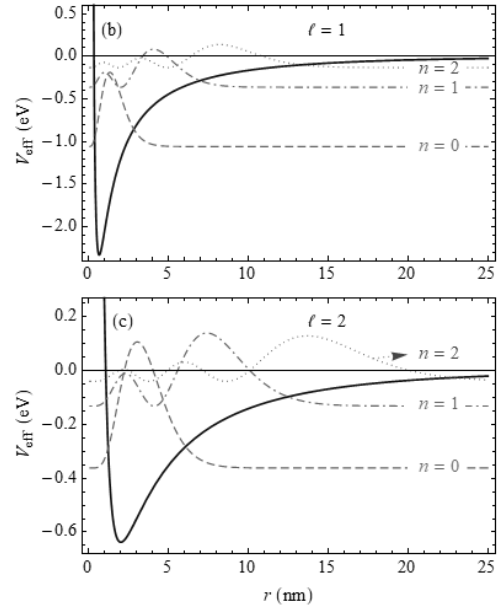
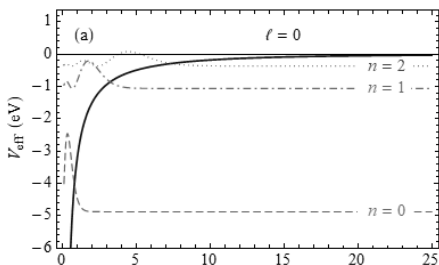
Thực hiện phép đổi biến $t = 1 - 2\xi$, ta được

$$1 = \frac{N_{n\ell}^2}{4\delta} \int_{-1}^1 \left(\frac{1-t}{2}\right)^{2\lambda_1-1} \left(\frac{1+t}{2}\right)^{2\lambda_2} \times \left[P_n^{(2\lambda_1, 2\lambda_2-1)}(t)\right]^2 dt. \quad (14)$$

Ta có công thức tích phân

$$\int_{-1}^1 \left(\frac{1-t}{2}\right)^{2\lambda_1-1} \left(\frac{1+t}{2}\right)^{2\lambda_2} \left[P_n^{(2\lambda_1, 2\lambda_2-1)}(t)\right]^2 dt = 2\Gamma(2\lambda_2+1) \left[\frac{(2\lambda_1+1)_n}{n!}\right]^2 J_0(n, \lambda_1, \lambda_2), \quad (15)$$

trong đó $(n)_k$ là kí hiệu Pochhammer, và



Hình 2. Thế hiệu dụng (đường liền đậm màu xanh dương) và mật độ xác suất tìm thấy electron trong chấm lượng tử GaAs với các giá trị khác nhau của ℓ : (a) $\ell = 0$, (b) $\ell = 1$, và (c) $\ell = 2$.

$$J_0(n, \lambda_1, \lambda_2) = \sum_{k=0}^n \frac{(-n)_k (a_0)_k \Gamma(b_0)}{k! (c_0)_k \Gamma(d_0)} \times {}_3F_2(-n, a_0, b_0; c_0, d_0; 1). \quad (16)$$

Trong đó $a_0 = n + 2\lambda_1 + 2\lambda_2$, $b_0 = 2\lambda_1 + k$, $c_0 = 2\lambda_1 + 1$, và $d_0 = 2\lambda_1 + 2\lambda_2 + k + 1$. Áp dụng công thức (15) ta thu được hệ số chuẩn hóa như sau

$$N_{n\ell} = \frac{n!}{(2\lambda_1+1)_n} \sqrt{\frac{2\delta}{\Gamma(2\lambda_2+1)J_0(n, \lambda_1, \lambda_2)}}, \quad (17)$$

Kết quả này là mới và chưa được trình bày ở công trình trước đây (Hamzavi & cs., 2012). Bên cạnh hàm sóng được thu nhận ở phương trình (12), việc giải phương trình (8) còn cho phép chúng ta thu nhận được phổ năng lượng của electron trong chấm lượng tử như sau

$$E_{n\ell} = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \left[\frac{m^*V_1}{\hbar^2(n+\ell+1)} - \delta(n+\ell+1) \right]^2. \quad (18)$$

Phương trình (18) có ý nghĩa vật lý với điều kiện

$$n + \ell \leq \sqrt{\frac{m^*V_1}{\hbar^2\delta}} - 1. \quad (19)$$

Từ điều kiện (19) ta thấy rằng số trạng thái của electron trong chấm lượng tử với thế Yukawa là hữu hạn. Số trạng thái phụ thuộc vào độ sâu và tham số δ của thế năng giam giữ.

Sự phụ thuộc vào r của thế năng hiệu dụng và xác suất tìm thấy electron, $|R_{n\ell}(r)|^2 r^2$, trong chấm

lượng tử GaAs đối với một vài trạng thái đầu tiên được minh họa ở Hình 2 (a)-(c). Ta thấy rằng, khi r tăng lên thể hiệu dụng V_{hd} có xu hướng tiệm cận đến giá trị zero. Đối với trường hợp $\ell = 0$, thể năng hiệu dụng tăng một cách đồng biến và không tồn tại tường thế năng ở bên trái. Trong khi đó đối với các trường hợp $\ell \neq 0$, luôn có tường bên trái và tồn tại một cực tiểu trong đồ thị của thể năng hiệu dụng. Độ sâu của V_{hd} càng giảm khi ℓ càng tăng lên. Lưu ý rằng hình dạng của V_{hd} , và do đó hàm sóng và năng lượng của electron trong chấm lượng tử, phụ thuộc vào các thông số của thể Yukawa, tức là phụ thuộc vào giá trị của V_0 và R_0 . Điều này ngụ ý rằng cả độ sâu của thể năng và bán kính của chấm lượng tử có ảnh hưởng lớn đến quá trình hấp thụ photon trong chấm lượng tử. Kết quả này sẽ được trình bày trong phần tiếp theo dưới đây.

3. Hệ số hấp thụ hai photon

Khi một chùm ánh sáng tới với tần số ω được chiếu vào hệ, tương tác electron-photon được biểu diễn thông qua Hamiltonian (Gong & cs., 2022)

$$H_{tt} = -\frac{e}{m^*} \vec{A}_l \cdot \vec{p}, \quad (20)$$

trong đó $\vec{A}_l = A_0 \vec{e}$ là thể vector của ánh sáng tới, A_0 là biên độ của thể vector của ánh sáng tới, và $\vec{p} = -i\hbar\nabla$ là toán tử xung lượng của electron. Quá trình hấp thụ hai photon xảy ra khi một electron hấp thụ đồng thời hai photon để dịch chuyển từ trạng thái có năng lượng thấp lên trạng thái có mức năng lượng cao hơn. Hệ số hấp thụ hai photon, K_2 , được tính toán thông qua xác suất chuyển dời hai photon, W_2 , như sau (Fedorov & cs., 1996; Gong & cs., 2022; Nathan & cs., 1985)

$$K_2 = \frac{4\hbar\omega}{I_0^2} W_2, \quad (21)$$

Trong đó $I_0 = 2c\epsilon_0 n_r \omega^2 A_0^2$ là cường độ của ánh sáng tới với c là vận tốc ánh sáng trong chân không, n_r là chiết suất của vật liệu, và ϵ_0 hằng số điện (Nguyen & cs., 2017). Xác suất chuyển dời hai photon của electron từ trạng thái ban đầu $|i\rangle$ đến trạng thái cuối $|f\rangle$ được tính bằng lý thuyết nhiễu loạn bậc hai như sau

$$W_2 = \frac{2\pi}{\Omega\hbar} \sum_{i,f} |M_{if}|^2 \delta(E_f - E_i - 2\hbar\omega), \quad (22)$$

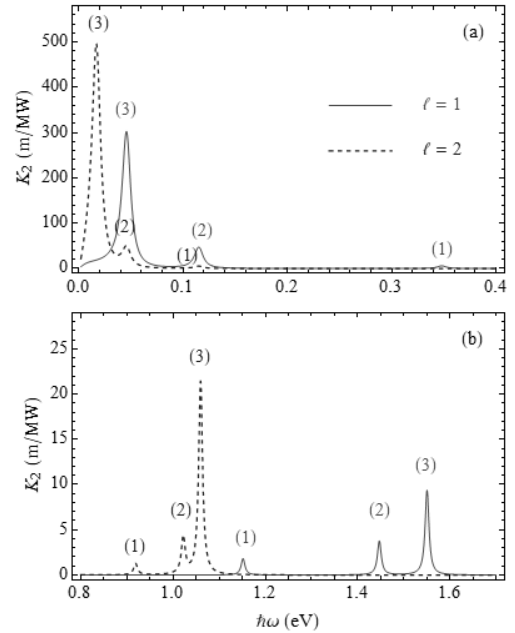
trong đó Ω là thể tích chuẩn hóa của hệ, và yếu tố ma trận dịch chuyển được tính thông qua Hamiltonian tương tác electron-photon như sau

$$M_{if} = \sum_{\zeta} \frac{\langle f | H_{tt} | \zeta \rangle \langle \zeta | H_{tt} | i \rangle}{E_{\zeta} - E_i - \hbar\omega - i\hbar\gamma_{\zeta}}. \quad (23)$$

Ở đây, chỉ số ζ để chỉ trạng thái trung gian và γ_{ζ} là nghịch đảo thời gian hồi phục. Ta thấy rằng kết quả thu được đối với hệ số hấp thụ hai photon ở

phương trình (21) là tương đối phức tạp. Để hiểu rõ hơn bản chất vật lý về sự ảnh hưởng của đặc trưng của vật liệu, các thông số của chấm lượng tử cũng như các thông số ngoài lên sự hấp thụ hai photon, một kết quả tính toán số là cần thiết. Kết quả này sẽ được chúng tôi trình bày dưới đây.

Để thực hiện tính toán số về hệ số hấp thụ hai photon trong chấm lượng tử, chúng tôi sử dụng các thông số đầu vào như sau cho vật liệu GaAs (Li, 2000): $m_e = 0.067m_0$ ($m_h = 0.082m_0$) là khối lượng hiệu dụng của electron và lỗ trống, với m_0 là khối lượng nghỉ của electron, $E_g = 1.61$ eV là độ rộng vùng cấm của GaAs, $n_r = 3.2$, và $\hbar\gamma_{\zeta} = 10$ meV.



Hình 3. Hệ số hấp thụ hai photon đối với quá trình dịch chuyển nội vùng (a) và dịch chuyển liên vùng (b) với các giá trị khác nhau của ℓ . Kết quả được tính tại $V_1 = 228$ meV và $R_0 = 15$ nm.

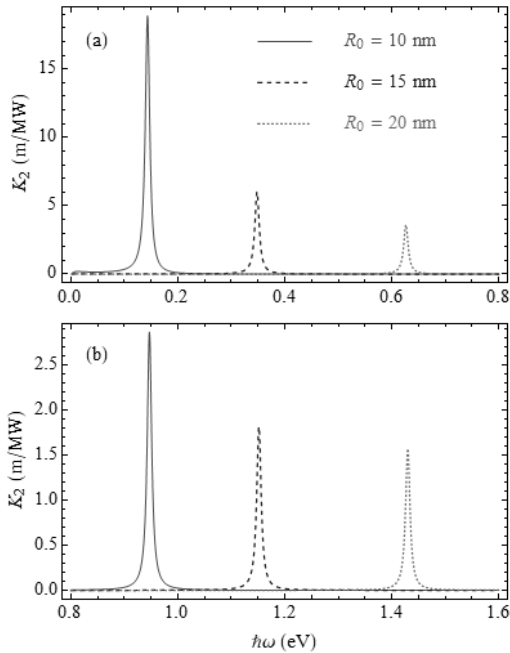
Trong hình 3, chúng tôi mô tả sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ hai photon vào năng lượng của photon tới với hai giá trị khác nhau của ℓ . Các nhãn (1), (2) và (3) tương ứng với dịch chuyển $n \rightarrow n + 1$ với $n = 0, 1, 2$. Vị trí của đỉnh hấp thụ, cũng là giá trị năng lượng của photon được hấp thụ, bằng giá trị của năng lượng dịch chuyển $\Delta E = E_{n'l'} - E_{nl} = 2\hbar\omega$. Bên cạnh đó chúng ta quan sát thấy rằng độ lớn của đỉnh hấp thụ giảm khi $\hbar\omega$ càng tăng. Mặt khác, năng lượng dịch chuyển đối với quá trình dịch chuyển nội vùng nhỏ hơn đáng kể so với năng lượng dịch chuyển đối với quá trình dịch chuyển liên vùng (từ vùng hóa trị lên vùng dẫn). Kết quả này được minh họa rõ ràng trên Hình 3 rằng vị trí của các đỉnh hấp thụ do dịch chuyển nội vùng (Hình 3(a)) nằm ở vùng năng lượng nhỏ hơn

so với vị trí của các đỉnh hấp thụ do dịch chuyển liên vùng (Hình 3 (b)). Kết quả tương tự cũng được tìm thấy trong hệ vòng lượng tử (Phuc, 2023).

Mặt khác, do ΔE tỉ lệ nghịch với ℓ , nên vị trí của đỉnh hấp thụ đối với trường hợp $\ell = 2$ luôn nằm bên trái của đỉnh hấp thụ đối với trường hợp $\ell = 1$. Kết quả này đúng với cả hai trường hợp dịch chuyển nội vùng và dịch chuyển liên vùng.

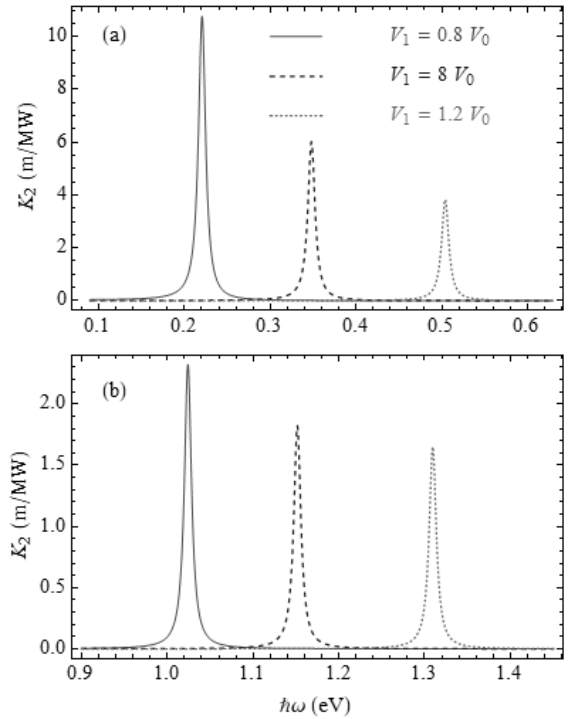
Một kết quả thú vị được quan sát thấy ở Hình 3 rằng sự phụ thuộc của vị trí đỉnh hấp thụ vào bậc dịch chuyển (tức là vào số lượng tử n) đối với dịch chuyển nội vùng và liên vùng là trái ngược nhau. Đối với quá trình dịch chuyển nội vùng, như được minh họa ở hình 3(a), khi bậc dịch chuyển tăng lên vị trí của đỉnh hấp thụ dịch chuyển về phía vùng năng lượng thấp. Kết quả này là do ΔE giảm khi n tăng lên (xem phương trình (18)). Ngược lại, đối với quá trình dịch chuyển liên vùng, khi bậc dịch chuyển tăng thì vị trí của đỉnh hấp thụ dịch chuyển về phía vùng năng lượng cao.

Đặc biệt, các đỉnh tương ứng với các dịch chuyển $|1, 1\rangle \rightarrow |2, 1\rangle$ và $|2, 1\rangle \rightarrow |3, 1\rangle$ (được đánh dấu bằng các đỉnh có nhãn màu đỏ (2) và (3) trong Hình 3(b)) nằm trong vùng ánh sáng khả kiến. Điều này cho thấy tiềm năng sử dụng của các chấm lượng tử được đặc trưng bởi các thông số được nêu trong Hình 3 để sản xuất đèn LED phát ra ánh sáng trong vùng khả kiến.



Hình 4. Hệ số hấp thụ hai photon đối với dịch chuyển $n = 0 \rightarrow n = 1$ với các giá trị khác nhau của R_0 : quá trình dịch chuyển nội vùng (a) và dịch chuyển liên vùng (b). Kết quả được tính tại $\ell = 1$ và $V_1 = 228$ meV.

Trong hình 4, chúng tôi mô tả sự phụ thuộc vào năng lượng photon tới của hệ số hấp thụ hai photon đối với dịch chuyển từ trạng thái $|0,1\rangle$ lên trạng thái $|1,1\rangle$. Kết quả được tính cho ba giá trị khác nhau của bán kính chấm lượng tử. Ta thấy rằng trong cả hai trường hợp dịch chuyển nội vùng và dịch chuyển liên vùng, khi R_0 tăng lên vị trí của đỉnh hấp thụ dịch chuyển về phía vùng năng lượng cao, đồng thời độ cao của đỉnh hấp thụ giảm xuống.



Hình 5. Hệ số hấp thụ hai photon đối với dịch chuyển $n = 0 \rightarrow n = 1$ với các giá trị khác nhau của V_1 : quá trình dịch chuyển nội vùng (a) và dịch chuyển liên vùng (b). Ở đây $\ell = 1$, $V_0 = 228$ meV và $R_0 = 15$ nm.

Hình 5 mô tả sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ hai photon vào năng lượng photon với các độ sâu khác nhau của thế năng giam giữ. Kết quả cho thấy rằng khi độ sâu của thế năng tăng lên thì vị trí của đỉnh hấp thụ dịch chuyển về phía vùng năng lượng cao trong cả hai trường hợp dịch chuyển nội vùng và dịch chuyển liên vùng. Điều này là do năng lượng dịch chuyển ΔE tăng khi V_1 tăng.

4. Kết luận

Chúng tôi đã khảo sát tính chất hấp thụ quang phi tuyến trong chấm lượng tử GaAs với thế giam giữ Yukawa. Kết quả tính số cho thấy rằng vị trí của đỉnh hấp thụ do dịch chuyển nội vùng luôn nằm ở vùng năng lượng thấp hơn so với dịch chuyển liên vùng. Trong đó độ cao của đỉnh hấp thụ nội vùng có giá trị lớn hơn so với đỉnh hấp thụ

liên vùng. Vị trí của đỉnh hấp thụ tương ứng với $\ell = 2$ luôn nằm bên trái so với trường hợp $\ell = 1$. Bên cạnh đó sự phụ thuộc của vị trí đỉnh hấp thụ vào bậc dịch chuyển đối với dịch chuyển nội vùng và liên vùng là trái ngược nhau. Khi tăng độ lớn của V_1 và R_0 đỉnh hấp thụ luôn dịch chuyển về phía vùng năng lượng cao. Tóm lại, nghiên cứu của chúng tôi về tính chất hấp thụ quang phi tuyến của chấm lượng tử với thế Yukawa mang lại nhiều cơ hội cho ứng dụng thực tế trong quang điện tử. Bằng cách tối ưu hóa các đặc tính của vật liệu chấm lượng tử, có thể thiết kế các thiết bị quang tử mới và pin mặt trời hiệu năng cao.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được hỗ trợ bởi đề tài mã số SPD2023.02.10.

Tài liệu tham khảo

- Bylicki, M., Stachów, A., Karwowski, J., & Mukherjee, P. K. (2007). The resonance levels of the Yukawa potential. *Chemical Physics*, 331(2), 346-350.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2006.11.003>
- Fedorov, A. V., Baranov, A. V., & Inoue, K. (1996). Two-photon transitions in systems with semiconductor quantum dots. *Physical Review B*, 54(12), 8627-8632.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.54.8627>
- Gong, R., Zhou, C., & Feng, X. (2022). Magnetic field dependent two-photon absorption properties in monolayer MoS₂. *Physical Review B*, 105(19), 195301.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.105.195301>
- Greene, R. L., & Aldrich, C. (1976). Variational wave functions for a screened Coulomb potential. *Physical Review A*, 14(6), 2363-2366.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.14.2363>
- Hamzavi, M., Ikhdair, S. M., & Thylwe, K. E. (2013). Equivalence of the empirical shifted Deng-Fan oscillator potential for diatomic molecules. *Journal of Mathematical Chemistry*, 51(1), 227-238.
<https://doi.org/10.1007/s10910-012-0075-x>
- Hamzavi, M., Movahedi, M., Thylwe, K.-E., & Rajabi, A. A. (2012). Approximate Analytical Solution of the Yukawa Potential with Arbitrary Angular Momenta. *Chinese Physics Letters*, 29(8), 080302.
<https://doi.org/10.1088/0256-307X/29/8/080302>
- Hamzavi, M., Thylwe, K. E., & Rajabi, A. A. (2013). Approximate Bound States Solution of the Hellmann Potential. *Communications in Theoretical Physics*, 60(1), 1.
<https://doi.org/10.1088/0253-6102/60/1/01>
- 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)
- Nasa, S., & Purohit, S. P. (2020). Linear and third order nonlinear optical properties of GaAs quantum dot in terahertz region. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 118, 113913.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physe.2019.113913>
- Nathan, V., Guenther, A. H., & Mitra, S. S. (1985). Review of multiphoton absorption in crystalline solids. *Journal of the Optical Society of America B*, 2(2), 294-316.
<https://doi.org/10.1364/JOSAB.2.000294>
- Nguyen, C. V., Hieu, N. N., Poklonski, N. A., Ilyasov, V. V., Dinh, L., Phong, T. C., . . . Phuc, H. V. (2017). Magneto-optical transport properties of monolayer MoS₂ on polar substrates. *Physical Review B*, 96(12), 125411.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.125411>
- Nikivorof, A. F., & Uvarov, V. B. (1988). Special Functions of Mathematical. Physics-A Unified Introduction with Applications. In: Basel, Birkhäuser.
- Phuc, H. V. (2023). Two-photon magneto-optical transitions in quantum rings. *Journal of Applied Physics*, 133(7).
<https://doi.org/10.1063/5.0138500>
- Tezcan, C., & Sever, R. (2009). A General Approach for the Exact Solution of the Schrödinger Equation. *International Journal of Theoretical Physics*, 48(2), 337-350.
<https://doi.org/10.1007/s10773-008-9806-y>
- Tung, L. V., Vinh, P. T., & Phuc, H. V. (2018). Magneto-optical properties of semi-parabolic plus semi-inverse squared quantum wells. *Physica B: Condensed Matter*, 539, 117-122.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.04.015>
- Yukawa, H. (1935). On the Interaction of Elementary Particles. I. *Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan. 3rd Series*, 17, 48-57.
https://doi.org/10.11429/ppmsj1919.17.0_48