UED Journal of Sciences, Humanities & Education – ISSN 1859 - 4603

TẠP CHÍ KHOA HỌC XÃ HỘI, NHÂN VĂN VÀ GIÁO DỤC

SỰ PHỤ THUỘC CỦA HỆ SỐ HẤP THỤ PHI TUYẾN SÓNG ĐIỆN TỪ TRONG DÂY LƯỢNG TỬ HÌNH TRỤ HỐ THẾ PARABOL VÀO CÁC THAM SỐ CỦA DÂY LƯỢNG TỬ

Nhận bài:
16 – 10 – 2015
Chấp nhận đăng:
30 – 11 – 2015
http://jshe.ued.udn.vn/

Hoàng Đình Triển

Tóm tắt: Trên quan điểm lý thuyết trường lượng tử, bài toán hấp thụ phi tuyến sóng điện từ bởi điện tử giam cầm trong dây lượng tử hình trụ hố thế parabol cho trường hợp tán xạ điện tử-phonon âm được nghiên cứu bằng phương pháp phương trình động lượng tử. Biểu thức giải tích cho sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ phi tuyến sóng điện từ bởi điện tử giam cầm trong dây lượng tử hình trụ hố thế parabol vào các tham số của dây lượng tử như bán kính dây, tần số hiệu dụng của hố thế đã được thu nhận cho trường hợp tán xạ điện tử-phonon âm. Kết quả cho thấy hệ số hấp thụ phi tuyến sóng điện từ phụ thuộc không tuyến tính vào các tham số của dây lượng tử. Biểu thức giải tích được sử dụng tính số và bàn luận cho dây lượng tử hình trụ GaAs/ GaAsAl.

Từ khóa: dây lượng tử; hấp thụ phi tuyến; điện tử; sóng điện từ; phonon âm

1. Giới thiệu

Dây lượng tử là cấu trúc đặc trưng của hệ một chiều (1D). Đặc điểm chung của các loại dây lượng tử là chuyển động của điện tử bên trong nó bị giới hạn trong các hố thế giam cầm theo hai chiều ứng với các chiều bị giới hạn của dây. Sự giam cầm điện tử trong các dây lượng tử làm thay đổi đáng kể các tính chất vật lý của hệ, các hiệu ứng vật lý bên trong có nhiều sự khác biệt so với cấu trúc ba chiều và hai chiều. Ví dụ, tán xạ điện tử-phonon và tỉ lệ tán xạ [1,2], tính dẫn điện tuyến tính và phi tuyến [3,4],… Sự hấp thụ sóng điện từ cũng có những khác biệt.

Trên phương diện lý thuyết, bài toán hấp thụ sóng điện từ được xem xét dưới hai quan điểm khác nhau theo sự phát triển của vật lý hiện đại. Trên quan điểm lý thuyết cổ điển, bài toán này đã được giải quyết chủ yếu dựa trên việc giải phương trình động cổ điển Boltzmann [5]. Với quan điểm lý thuyết lượng tử, bài toán hấp thụ sóng điện từ đã được giải quyết bằng nhiều phương pháp khác nhau như lý thuyết hàm Green, lý thuyết nhiễu loạn, phương pháp Kubo-Mori mở rộng. Với hệ bán dẫn thấp chiều, bài toán hấp thụ tuyến tính sóng điện từ được đặc biệt phát triển nghiên cứu bằng phương pháp Kubo-Mori mở rộng như: hấp thụ sóng điện từ yếu trong hệ bán dẫn hai chiều [6], trong dây lượng tử [7].

Sự ra đời của laser vào đầu thập niên 60 của thế kỷ trước cho ta những nguồn bức xạ điện từ có cường độ lớn, độ đồng bộ cao với biên độ vectơ cường độ sóng điện từ vào khoảng 107 - 1.010V/cm, khi tương tác với vật liệu, các tính chất quang của vật liệu bắt đầu không những phụ thuộc vào bản chất của vật liệu mà còn phụ thuộc vào cường độ của trường laser. Từ đó, các hiện tượng mới xuất hiện gọi là hiệu ứng quang phi tuyến. Cả lý thuyết lẫn thực nghiệm, quang phi tuyến ngày càng được quan tâm nghiên cứu nhằm liên tục cải thiện sự đánh giá chính xác hấp thụ phi tuyến cũng như hệ số khúc xạ [8, 9,…]. Hấp thụ phi tuyến sóng điện từ trong bán dẫn khối (3D) đã được V. V. Pavlovich và E. M. Epshtein nghiên cứu và công bố vào năm 1977 [10], Trong thời gian gần đây, bài toán hấp thụ phi tuyến sóng điện từ trong các hệ bán dẫn hai chiều (2D) cũng đã được nghiên cứu [11]. Sự hấp thụ phi tuyến sóng

*** Liên hệ tác giả**
Hoàng Đình Triển
Trường Đại học Sư phạm, Đại học Đà Nẵng
Email: hoangtrien@gmail.com

điện từ trong các hệ bán dẫn một chiều đã được chúng tôi nghiên cứu và công bố trên nhiều các tạp chí khoa học trong và ngoài nước [12-15] trong đó có cả sự hấp thụ phi tuyến sóng điện từ trong dây lượng tử hình trụ hố thế parabol [13]. Tuy nhiên, trong công trình trên, chúng tôi chưa nghiên cứu cho trường hợp tán xạ điện tử - phonon âm. Để hoàn thiện hơn lý thuyết lượng tử về sự hấp thụ phi tuyến sóng điện từ trong hệ bán dẫn thấp chiều, trong bài báo này, chúng tôi nghiên cứu sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ phi tuyến sóng điện từ trong dây lượng tử hình trụ hố thế parabol vào các tham số đặc trưng của dây lượng tử cho trường hợp tán xạ điện tử-phonon âm.

2. Hàm phân bố điện tử trong dây lượng tử hình trụ hố thế parabol

Chúng ta xét mô hình dây lượng tử hình trụ hố thế parabol. Hàm sóng và phổ năng lượng được xác định

$$\Psi = \frac{e^{ikz}}{\sqrt{L}}\sqrt{\frac{2n!}{(n+|l|)!}}\frac{1}{a_0}e^{-\frac{r^2}{2a_0^2}}(\frac{r}{a_0})^{|l|}L_n^{|l|}(\frac{r^2}{a_0^2}) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{n,l}(\vec{p}) = \frac{p_z^2}{2m^*} + \omega_0^*(2n+|l|+1) \quad (2)$$

trong đó, $a_0 = \sqrt{1/m\omega_0^*}$ với ω_0^* là tần số hiệu dụng của hố thế, $L_n^{|l|}$ là đa thức Lagrangre tổng quát.

Bỏ qua tương tác của các hạt cùng loại, Hamiltonian của hệ điện tử-phonon trong dây lượng tử hình trụ hố thế parabol trong trường hợp tán xạ điện tử - phonon âm được viết như sau:

$$H = \sum_{n,l,\vec{p}}\varepsilon_{n,l}(\vec{p}-\frac{e}{c}\vec{A}(t))\,a^+_{n,l,\vec{p}}\,a_{n,l,\vec{p}} + \sum_{\vec{q}}\omega_{\vec{q}}\,b^+_{\vec{q}}b_{\vec{q}} + \\ + \sum_{n,l,n',l',\vec{p},\vec{q}} C_{\vec{q}}I_{n,l,n',l'}(\vec{q})a^+_{n,l,\vec{p}+\vec{q}}a_{n',l',\vec{p}}\,(b_{\vec{q}}+b^+_{-\vec{q}}), \quad (3)$$

trong đó $a^+_{n,l,\vec{p}}$ $(a_{n,l,\vec{p}})$ là toán tử sinh (huỷ) của một electron trong dây lượng tử, $b^+_{\vec{q}}$ $(b_{\vec{q}})$ là toán tử sinh (huỷ) một phonon ở trạng thái có vectơ sóng $\vec{q}$, $\omega_{\vec{q}}$ là tần số của phonon âm, $I_{n,l,n',l'}(\vec{q})$ là thừa số dạng được xác định như sau:

$$I_{n,l,n',l'}(\vec{q}) = \frac{2}{R^2}\int_0^R \psi_{n,l}(r)e^{iqr}\psi^*_{n',l'}(r)rdr, \quad (4)$$

Để thu được biểu thức của phương trình động lượng tử cho điện tử giam cầm trong dây lượng tử hình trụ hố thế parabol chúng ta bắt đầu từ phương trình động lượng tử cho toán tử số hạt điện tử trong dây lượng tử $n_{n,l,\vec{p}}(t) = \langle a^+_{n,l,\vec{p}}a_{n,l,\vec{p}}\rangle_t$ ta có:

$$i\frac{\partial n_{n,l,\vec{p}}(t)}{\partial t} = \langle[a^+_{n,l,\vec{p}}a_{n,l,\vec{p}}, H]\rangle_t \quad (5)$$

Từ phương trình (5), sử dụng hàm Hamiltonian (4) và thực hiện tính toán giải tích chúng ta thu được biểu thức của phương trình động lượng tử cho điện tử giam cầm trong dây lượng tử hình trụ hố thế parabol. Giải phương trình động lượng tử này bằng phương pháp xấp xỉ gần đúng, hàm phân bố không cân bằng của điện tử thu được:

$$n_{n,l,\vec{p}}(t) = -\sum_{\vec{q},n',l'}|C_{\vec{q}}|^2|I_{n,l,n',l'}|^2\sum_{k,l=-\infty}^{\infty}J_k(\frac{e\vec{E}_0,\vec{q}}{m\Omega^2})J_{k+l}(\frac{e\vec{E}_0,\vec{q}}{m\Omega^2})\frac{1}{l\Omega}e^{-il\Omega t}\times \\ \times\{-\frac{\bar{n}_{n,l,\vec{p}}(N_{\vec{q}}+1)-\bar{n}_{n',l',\vec{p}+\vec{q}}N_{\vec{q}}}{\varepsilon_{n',l',\vec{p}+\vec{q}}-\varepsilon_{n,l,\vec{p}}+\omega_{\vec{q}}-k\Omega+i\delta} \\ -\frac{\bar{n}_{n,l,\vec{p}}N_{\vec{q}}-\bar{n}_{n',l',\vec{p}+\vec{q}}(N_{\vec{q}}+1)}{\varepsilon_{n',l',\vec{p}+\vec{q}}-\varepsilon_{n,l,\vec{p}}-\omega_{\vec{q}}-k\Omega+i\delta}+ \\ +\frac{\bar{n}_{n',l',\vec{p}-\vec{q}}(N_{\vec{q}}+1)-\bar{n}_{n,l,\vec{p}}N_{\vec{q}}}{\varepsilon_{n,l,\vec{p}}-\varepsilon_{n',l',\vec{p}-\vec{q}}+\omega_{\vec{q}}-k\Omega+i\delta} \\ +\frac{\bar{n}_{n',l',\vec{p}-\vec{q}}N_{\vec{q}}-\bar{n}_{n,l,\vec{p}}(N_{\vec{q}}+1)}{\varepsilon_{n,l,\vec{p}}-\varepsilon_{n',l',\vec{p}-\vec{q}}-\omega_{\vec{q}}-k\Omega+i\delta}\} \quad (6)$$

3. Hệ số hấp thụ phi tuyến sóng điện từ bởi điện tử giam cầm trong dây lượng tử hình trụ hố thế parabol

Biểu thức tổng quát của mật độ dòng hạt tải và hệ số hấp thụ phi tuyến sóng điện từ được xác định bởi các biểu thức:

$$\vec{j}(t) = \frac{e}{m}\sum_{n,l,\vec{p}}(\vec{p}-\frac{e}{c}\vec{A}(t))n_{n,l,\vec{p}}(t) \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{8\pi}{c\sqrt{\chi_\infty}E_0^2}\langle\vec{j}(t)\vec{E}_0 sin\Omega t\rangle_t \quad (8)$$

Sử dụng hàm phân bố (6) thay vào biểu thức tổng quát mật độ dòng hạt tải (7) và hệ số hấp thụ phi tuyến sóng điện từ (8). Thực hiện các tính toán giải tích chúng ta thu được:

$$\alpha = \frac{8\pi^2\Omega}{c\sqrt{\chi_\infty}E_0^2}\sum_{n,l,n',l'}|I_{n,l,n',l'}(\vec{q})|^2\sum_{\vec{q},\vec{p}}|C_{\vec{q}}|^2\,N_{\vec{q}}$$
$$\times\sum_{k=-\infty}^{\infty}k[\bar{n}_{n,l,\vec{p}}-\bar{n}_{n',l',\vec{p}+\vec{q}}]J_k^2(\frac{eE_0\vec{q}}{m\Omega^2}) \qquad (9)$$
$$\times\{\delta(\varepsilon_{n',l',\vec{p}+\vec{q}}-\varepsilon_{n,l,\vec{p}}+\omega_{\vec{q}}-k\Omega)+[\omega_{\vec{q}}\to-\omega_{\vec{q}}]\},$$

trong đó $\delta(x)$ là hàm Delta-Dirac

Tần số phonon âm $\omega_{\vec{q}} = \Omega$ nên trong biểu thức của hệ số hấp thụ phi tuyến (9) ta có thể bỏ qua số hạng $\omega_{\vec{q}}$. Hệ số tương tác điện tử-phonnon âm được xác định viết [11]:

$$|C_{\vec{q}}|^2 \equiv |C_{\vec{q}}^{ac}|^2 = \xi^2 q/2\rho\upsilon_s V \qquad (10)$$

trong đó: V, ρ, υ_s, và ξ lần lượt là thể tích chuẩn hóa, mật độ tinh thể, vận tốc sóng âm và hằng số thế biến dạng. Sử dụng biểu thức của hàm phân bố không phụ thuộc thời gian của phonon âm $N_{\vec{q}}$; $k_bT/\upsilon_s\vec{q}$. Chuyển tổng thành tích phân và thực hiện các tính toán ta thu được biểu thức giải tích cho hệ số hấp thụ phi tuyến sóng điện từ bởi điện tử giam cầm trong dây lượng tử hình trụ hố thế parabol cho trường hợp tán xạ điện tử-phonon âm:

$$\alpha = \frac{\sqrt{2m\pi}e^2n_0^*\xi^2(k_bT)^{5/2}}{4c\sqrt{\chi_\infty}\rho\upsilon_s^2\Omega^3V}\sum_{n,l,n',l'}|I_{n,l,n',l'}(q)|^2\times$$
$$\times[1+\frac{3e^2E_0^2(k_bT)^2}{4m\Omega^4D_1}(\frac{D_1^2}{4(k_bT)^2}+\frac{3D_1}{4k_bT}+3)]\times \qquad (11)$$
$$\times\frac{D_1}{2k_bT}exp\{\frac{1}{2k_bT}D_1\}[1-exp\{\frac{\Omega}{k_bT}\}],$$

trong đó $D_1 = \omega_0^*(2n'-2n+|l'|-|l|)-\Omega$

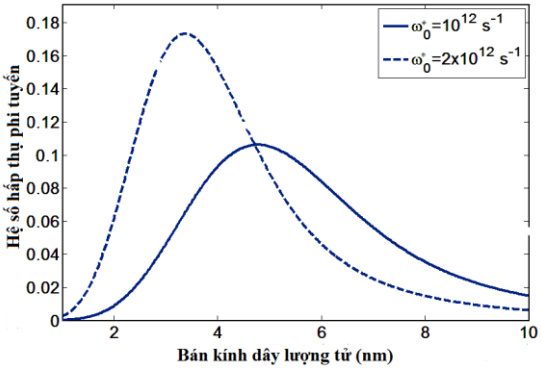
Như vậy, bằng phương pháp phương trình động lượng tử cho điện tử, biểu thức giải tích của hệ số hấp thụ phi tuyến sóng điện từ bởi điện tử giam cầm trong dây lượng tử hình trụ hố thế parabol đã thu được cho trường hợp tán xạ điện tử-phonon âm. Từ biểu thức thu nhận được, ta có thể thấy rằng hệ hấp thụ phi tuyến sóng điện từ trong dây lượng tử là một hàm phụ thuộc vào bán kính dây lượng tử, tần số hiệu dụng của hố thế,… Sự phụ thuộc này sẽ được đánh giá và bàn luận trong phần tính số.

4.Kết quả tính số và thảo luận

Để thấy được tường minh sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ phi tuyến sóng điện từ vào các tham số của dây lượng tử, biểu thức giải tích của hệ số hấp thụ phi tuyến sóng điện từ được thực hiện tính số cho dây lượng tử $GaAs/GaAsAl$, đây là vật liệu thường được sử dụng nhiều trong tính số. Các thông số được sử dụng tính số [7]:

$\xi = 13.5\,eV$, $\rho = 5.32\,gcm^{-3}$, $\upsilon_s = 5378\,ms^{-1}$,
ε_0=12.5, $\chi_\infty = 10.9$, $\chi_0 = 13.1$, $m = 0.066m_0$,
$m_0 = 9.1\times10^{-31}kg$, $\hbar\omega = 36.25\,meV$,
$k_b = 1.3807\times10^{-23}\,j/K$, $n_0 = 10^{23}\,m^{-3}$,
$e = 1.60219\times10^{-19}\,C$, $\hbar = 1.05459\times10^{-34}\,j.s$.

Hệ số hấp thụ phi tuyến sóng điện từ được xem như là các hàm phụ thuộc độc lập vào bán kính dây R, và tần số hiệu dụng của hố thế.



Hình 1. *Sự phụ thuộc của hệ số α vào bán kính dây R với các giá trị khác nhau của tần số hiệu dụng của hố thế ω_0^*.*

Hình 1 cho thấy sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ phi tuyến sóng điện từ vào bán kính dây lượng tử. Chúng ta thấy rằng hệ số hấp thụ phi tuyến sóng điện từ trong dây lượng tử hình trụ hố thế parabol phụ thuộc mạnh và không tuyến tính vào bán kính dây. Sự xuất hiện đỉnh hấp thụ tại một vị trí xác định của bán kính dây cho thấy không phải kích thước dây càng bé thì khả năng hấp thụ phi tuyến sóng điện từ càng tốt, mà khả năng hấp thụ tốt ứng với một giá trị bán kính dây xác định nào đó vào cỡ nano mét.

Hình 1 cũng cho thấy rằng tần số hiệu dụng ω_0^* của hố thế giam giữ điện tử trong dây lượng tử hình trụ hố thế parabol ảnh hưởng đáng kể đến sự hấp thụ phi tuyến sóng điện từ. Khi thay đổi giá trị của tần số hiệu dụng ω_0^* giá trị hệ số hấp thụ phi tuyến sóng điện từ thay đổi, đồng thời nó cũng làm dịch chuyển giá trị của bán kính dây mà ở đó sự hấp thụ tốt nhất.

5. Kết luận

Theo quan điểm của lý thyết trường lượng tử, trong bài báo này chúng tôi đã xem xét sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ phi tuyến sóng điện từ bởi điện tử giam cầm trong dây lượng tử hình trụ hố thế parabol trong trường hợp tán xạ điện tử - phonon âm. Biểu thức của hàm phân bố điện tử và hệ số hấp thụ phi tuyến sóng điện từ cho trường hợp tán xạ điện tử-phonon âm đã được thu nhận.

Hệ số hấp thụ sóng điện từ được tính số cho dây lượng tử GaAs/GaAsAl. Kết quả cho thấy hệ số hấp thụ sóng điện từ phụ thuộc mạnh vào các tham số của dây lượng tử. Hệ số hấp thụ phi tuyến sóng điện từ đạt giá trị cực đại khi bán kính dây có giá trị xác định vào cỡ nano mét. Khi thay đổi giá trị của tần số hiệu dụng của hố thế, đỉnh hấp thụ thay đổi cả về độ lớn lẫn giá trị bán kính dây mà ở đó có đỉnh hấp thụ.

Tài liệu tham khảo

[1] Antonyuk V. B., MalŠshukov A. G., Larsson M. and Chao K. A. (2004), Phys. Rev. B 69, pp. 155308-155314

[2] Brandes T. and Kawabata A. (1996), Phys. Rev. B 54, pp. 4444-4447

[3] Palasantzas G., Barnas J., and De Hosson J. Th. M. (2001), J. Appl. Phys. 8, pp. 8002-8005

[4] Souto E. , Nunes O. A. C., Fonseca A. L. A., Agrello D. A., da Silva Jr E. F. (2005), Physica status solidi (c) 2, pp. 3145-1348.

[5] Tsu R. and Esaki L. (1971), Appl. Phys. Lett., 19, pp. 246-248.

[7] N. Q. Bau, N. V. Nhan, and T. C. Phong (2002), J. Korean. Phys. Soc 41, pp. 149-154.

[8] N. Q. Bau, L. Dinh and T. C. Phong (2007), J. Korean. Phys. Soc 51, pp. 1325-1330.

[9] Chernoutsan K., Dneprovskii V., Gavrilov S., Gusev V., Muljarov E., Romano S., Syrnicov A., Shaligina O. and Zhukov E. (2002), Physica E 15, pp. 111-117

[10] Kang N. L., Lee H. J. and Choi S. D. (2003), Korean Phys. Soc.44, pp. 938-943

[11] Pavlovich V. V. and Epshtein E. M. (1977), Sov. Phys. Solid State 19, pp. 1760-1768.

[12] N. Q. Bau , D. M. Hung, N. B. Ngoc, J. Korean Phys. Soc. 54 (2009) 765

[13] N. Q. Bau and H. D. Trien, J. Korean Phys. Soc. 56 (2010) 120.

[14] Hoang Dinh Trien, Nguyen Vu Nhan (2011), Pier Letters, Vol. 20, pp. 87-96.

[15] Hoang Dinh Trien, Bui Thi Thu Giang, Nguyen Quang Bau (2010), VNU Journal of Science, Mathematics - Physics, Vol. 26, pp. 115-120

[16] Hoang Dinh Trien, Luong Van Tung, Ngyen Quang Bau (2013), VNU Journal of Science, Mathematics - Physics, Vol. 29, No, 1s, pp. 166-170.

THE DEPENDENCE OF THE NONLINEAR ABSORPTION COEFFICIENT OF ELECTROMAGNETIC WAVES IN CYLINDRICAL QUANTUM WIRE ON THE PARAMETERS OF THE QUANTUM WIRE

Abstract: From the perspective of the quantum field theory, the problem of the nonlinear absorption of a strong electromagnetic wave caused by confined electrons in the cylindrical quantum wire is theoretically examined by means of the quantum kinetic equation for electrons. In the case of electron-acoustic phonon scattering, there has been a record of an analytic expression for the dependence of the nonlinear absorption coefficient of a strong electromagnetic wave caused by confined electrons in cylindrical quantum wires on the parameters of the quamtum wire such as the radius R of the wire and the effective frequency of the potential well. The results show that the nonlinear absorption coefficient depends on the parameters of the quantum wire in a non-linear way. The analytic expression have been numerically calculated and discussed for the GaAs/GaAsAl cylindrical quantum wire.

Key words: quantum wire; nonlinear absorption; electron; electromagnetic wave; acoustic phonon