



CỘNG HƯỞNG CYCLOTRON – TẠP CHẤT TRONG SILICENE DƯỚI ẢNH HƯỞNG CỦA ĐIỆN TRƯỜNG KHÔNG ĐỐI

Hoàng Thị Duyên¹, Nguyễn Ngọc Hiếu², Lê Thị Thu Phương^{1*}

¹Khoa Vật lý, Trường Đại học Sư phạm, Đại học Huế

²Viện nghiên cứu và phát triển công nghệ cao, Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng

Tóm tắt: Chúng tôi nghiên cứu cộng hưởng cyclotron – tạp chất thông qua phổ hấp thụ trong silicene đơn lớp đặt trong trường sóng điện từ và từ trường vuông góc. Ảnh hưởng của một điện trường không đối cũng được khảo sát. Hệ số hấp thụ phi tuyến được tính toán bằng lý thuyết nhiễu loạn khi xét đến sự tán xạ điện từ – tạp chất. Từ đó, sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ sóng điện từ vào năng lượng photon được khảo sát. Kết quả cho thấy điện trường và từ trường ảnh hưởng mạnh lên phổ cộng hưởng của silicene đơn lớp. Khi tăng giá trị của điện trường thì giá trị của hệ số hấp thụ tại các đỉnh cộng hưởng tăng, còn khi tăng giá trị của từ trường thì giá trị của hệ số hấp thụ tại các đỉnh cộng hưởng giảm. Ngoài ra, sử dụng phương pháp Profile chúng tôi thấy rằng độ rộng vạch phổ hấp thụ (FWHM) gần như không đổi ở nhiệt độ thấp và phụ thuộc vào điện trường cho cả quá trình hấp thụ một photon và hai photon.

Từ khóa: cộng hưởng cyclotron – tạp chất, silicene, phổ hấp thụ, độ rộng vạch phổ, đỉnh cộng hưởng

1 Mở đầu

Silicene là một mạng 2 chiều của các nguyên tử silic sắp xếp trong một mặt phẳng có cấu trúc tổ ong tương tự graphene. Khái niệm silicene được sử dụng lần đầu bởi Guzman-Verri và Lew Yan Voon [1]. Do có cấu trúc tương tự graphene nên silicene cũng có một số tính chất vật lý đặc biệt giống graphene: các hạt tải là các Dirac fermion không khối lượng, phổ năng lượng tuyến tính gần điểm K, độ linh động điện tử lớn (tuy nhỏ hơn graphene nhưng lớn hơn rất nhiều so với silic khối). Điểm khác biệt cơ bản là các nguyên tử silic không nằm trong cùng mặt phẳng, thể hiện tính bất đối xứng qua mặt phẳng mạng gây nên tương tác spin – quỹ đạo (SOI) mạnh trong silicene tạo nên một khe năng lượng nhỏ (cỡ 1,55 meV) [2]. Ngoài ra, độ rộng khe năng lượng có thể được điều chỉnh bằng cách áp dụng một điện trường bên ngoài vuông góc với tấm silicene. Tuy có các tính chất vật lý tương đồng, nhưng xét về tiềm năng ứng dụng trong tương lai gần, silicene có ưu điểm hơn graphene bởi vì các linh kiện điện tử đang sử dụng hiện nay chủ yếu dựa trên công nghệ silic do vậy silicene sẽ tương thích tốt với các linh kiện này hơn graphene.

* Liên hệ: thuphuonghueuni@gmail.com

Việc nghiên cứu các tính chất chuyển tải quang – từ là cơ sở quan trọng cho các ứng dụng của vật liệu vào các thiết bị quang – điện tử, đặc biệt là với các vật liệu mới có nhiều tính chất nổi trội gần đây. Trong số các hiệu ứng chuyển tải lượng tử thì cộng hưởng cyclotron là một công cụ quan trọng để xác định các thông số của vật liệu với độ chính xác cao. Việc phân tích phổ cộng hưởng có thể thu nhận khối lượng hiệu dụng hạt tải, khoảng cách giữa các mức năng lượng Landau, thừa số Lande (g-factor) [3]. Cộng hưởng cyclotron đã được nghiên cứu chi tiết trong bán dẫn khối, các vật liệu thấp chiều truyền thống [4] và gần đây là trong graphene cả về lý thuyết [5] và thực nghiệm [6]. Tuy nhiên, cộng hưởng cyclotron trong silicene vẫn chưa được quan tâm nghiên cứu sâu rộng.

Trong công trình này chúng tôi tiến hành nghiên cứu lý thuyết cộng hưởng cyclotron trong silicene ở nhiệt độ thấp tính đến ảnh hưởng của tương tác điện tử – tạp chất khi tấm silicene được đặt trong một từ trường vuông góc và một sóng điện từ. Ảnh hưởng của một điện trường không đổi cũng được khảo sát. Sử dụng gần đúng nhiễu loạn, tính toán biểu thức tương minh của hệ số hấp thụ tính đến quá trình hấp thụ một và hai photon. Các kết quả giải tích được tính số với các tham số cụ thể để thấy được sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ và FWHM vào nhiệt độ. Bài báo được cấu trúc như sau. Trong mục 2, chúng tôi giới thiệu mô hình tính toán và cấu trúc điện tử của silicene khi đặt trong từ trường vuông góc và điện trường thẳng góc với trục z. Các kết quả tính số và thảo luận được trình bày ở mục 3. Cuối cùng, một số kết luận quan trọng được đưa ra ở mục 4.

2 Biểu thức giải tích của hệ số hấp thụ sóng điện từ trong silicene

Silicene là một lớp nguyên tử silicon 2D xếp thành mạng tổ ong gấp khúc nhỏ. Nếu bỏ qua SOI kiểu Rashba [7], rất nhỏ so với SOI thuần túy (intrinsic SOI), Hamiltonian năng lượng thấp đối với các fermion lân cận các điểm K và K' được cho bởi [2, 7]

$$H = v_F(\pi_x\sigma_x - \tau\pi_y\sigma_y) - (\tau s_z\lambda_{SO} - deE_z)\sigma_z, \quad (1)$$

trong đó, v_F là vận tốc Fermi, $\tau = +(-)$ là chỉ số vùng K (K'), $\sigma_i (i = x, y, z)$ là các ma trận Pauli chuẩn spin, $2d$ là khoảng cách giữa hai mạng con (sublattice) theo phương vuông góc với tấm silicene, E_z là điện trường không đổi đặt vào tấm silicene, λ_{SO} là cường độ SOI, $s_z = 1 (s_z = -1)$ mô tả spin lên (xuống), π_μ là thành phần $\mu (\mu = x, y)$ của toán tử xung lượng $\vec{\pi} = \vec{p} + e\vec{A}$, \vec{p} là toán tử xung lượng, \vec{A} là thế vectơ và e là điện tích điện tử. Giả sử có một từ trường vuông góc $\vec{B} = B\vec{e}_z$ được đặt vào tấm silicene. Với giả thiết chuẩn Landau $\vec{A} = (-By, 0, 0)$, Hamiltonian không

thứ nguyên và các giá trị riêng tương ứng đã được đưa ra chi tiết trong [2]. Năng lượng cho fermion trong trường hợp này là

$$E_{n,s_z,r}^{\pm} = r\hbar\omega_c \left\{ n + [\bar{\lambda}_{\pm}(s_z)]^2 \right\}^{1/2}. \quad (2)$$

Ở đây, $r = +1(-1)$ ký hiệu trạng thái điện tử (lỗ trống), n ($n \geq 1$) là chỉ số mức Landau (LL), $\bar{\lambda}_{\pm} = \lambda_{\pm} / \hbar\omega_c$ với $\lambda_{\pm}(s_z) = \mp\lambda_{SO}s_z + dE_z$ và $\omega_c = \sqrt{2}v_F / l_B$, ω_c là tần số cyclotron, $l_B = \sqrt{\hbar / eB}$ là độ rộng từ. Hàm riêng của một điện tử gần vùng K là

$$|\alpha\rangle = |n, s_z, r\rangle \equiv \psi_n^+(\xi) = \begin{pmatrix} \eta_1^+ \phi_n(\xi) \\ \eta_2^+ \phi_{n-1}(\xi) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

với $f_n(\xi)$ là hàm mô tả dao động điều hòa chuẩn hóa và

$$\eta_1^+ = \left[\frac{\lambda_+(s_z) + E_{n,s_z,r}^+}{2E_{n,s_z,r}^+} \right]^{1/2}, \quad \eta_2^+ = -r \left[\frac{E_{n,s_z,r}^+ - \lambda_+(s_z)}{2E_{n,s_z,r}^+} \right]^{1/2}. \quad (4)$$

Đối với một điện tử gần vùng K', các hàm riêng tương ứng với Hamiltonian (1) là [2]

$$\psi_n^-(\xi) = \begin{pmatrix} \eta_1^- \phi_{n-1}(\xi) \\ \eta_2^- \phi_n(\xi) \end{pmatrix} \quad (5)$$

với

$$\eta_1^- = -r \left[\frac{E_{n,s_z,r}^- + \lambda_-(s_z)}{2E_{n,s_z,r}^-} \right]^{1/2}, \quad \eta_2^- = \left[\frac{E_{n,s_z,r}^- - \lambda_-(s_z)}{2E_{n,s_z,r}^-} \right]^{1/2}. \quad (6)$$

Xét tương tác của điện tử với photon và các tạp chất gây ra sự chuyển dời giữa các mức Landau. Xác suất chuyển dời $W_{\alpha\alpha'}^{\ell}$ do tương tác giữa điện tử – photon – tạp chất trong silicene có dạng [2]

$$W_{\alpha\alpha'}^{(\ell)\pm} = \frac{2\pi n_i}{\hbar S_0} \sum_l \sum_q |U(q)|^2 \left| J_{n,n',r,r'}^{\pm}(s_z) \right|^2 J_{\ell}^2(a_0 q) \delta_{k_x, k_x' + q_x} \delta_{s_z, s_z'} \delta(E_{\alpha'}^{\pm} - E_{\alpha}^{\pm} - \ell\hbar\omega), \quad (7)$$

trong đó, n_i là nồng độ tạp chất, S_0 là diện tích của mẫu, $q = |k_x - k'_x|$ là vectơ sóng tán xạ, ω là tần số của sóng điện từ, $J_\ell(x)$ là hàm Bessel bậc ℓ của đối số x , $U(q)$ là hệ số Fourier cho bởi công thức $U(q) = 2\pi U_0 / q_s$, với $U_0 = e^2 / (4\pi\epsilon_r\epsilon_0)$, ϵ_r là hằng số điện môi, ϵ_0 là độ dẫn điện, q_s là độ lớn vectơ chẵn mô tả điện thế của tán xạ. Thừa số dạng $|J_{n,n',r,r'}^\pm(s_z)|$ được cho bởi [2]

$$|J_{n,n',r,r'}^+(s_z)|^2 = \frac{n_>!}{n_<!} u^{n_>-n_<} e^{-u} \left[\eta_1^+ \eta_1'^+ L_{n_<}^{n_>-n_<}(u) + \eta_2^+ \eta_2'^+ \sqrt{\frac{n_>}{n_<}} L_{n_<-1}^{n_>-n_<}(u) \right]^2, \tag{8}$$

$$|J_{n,n',r,r'}^-(s_z)|^2 = \frac{n_<!}{n_>!} u^{n_>-n_<} e^{-u} \left[\eta_2^- \eta_2'^- L_{n_<}^{n_>-n_<}(u) + \eta_1^- \eta_1'^- \sqrt{\frac{n_>}{n_<}} L_{n_<-1}^{n_>-n_<}(u) \right]^2, \tag{9}$$

với $u = l_B^2 q^2 / 2$, $n_< \equiv \min(n, n')$, $n_> \equiv \max(n, n')$ và $L_{n_<}^{n_>-n_<}$ là đa thức Laguerre liên kết.

Hệ số hấp thụ $\Gamma^{(\ell)}$ đối với quá trình ℓ -photon có thể được viết [8]

$$\Gamma^{(\ell)\pm} = \frac{16\pi\hbar n_0 \ell}{c\sqrt{\epsilon(\omega)} a^2 \omega} \left[1 - \exp\left(-\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right) \right] \sum_{\alpha,\alpha'} f(E_\alpha^\pm) [1 - f(E_{\alpha'}^\pm)] W_{\alpha\alpha'}^{(\ell)\pm}, \tag{10}$$

trong đó, $f(E_\alpha)$ là phân bố Fermi của điện tử, n_0 là mật độ điện tử, $a = E_0 / \omega$ với E_0 là biên độ sóng điện từ. Ta có thể thu được biểu thức tường minh cho hệ số hấp thụ bằng cách chuyển tổng q, α, α' thành tích phân như sau [2]

$$\sum_q \rightarrow \frac{S_0}{(2\pi l_B)^2} \int_0^\infty du \int_0^{2\pi} d\varphi, \tag{11}$$

$$\sum_{\alpha/\alpha'} \rightarrow \sum_{n,r,s_z,\pm/n',r',s'_z,\pm} \frac{L_x}{2\pi} \int_{-L_y/2l_B^2}^{L_y/2l_B^2} dk_x = \frac{S_0}{2\pi l_B^2} \sum_{n,r,s_z,\pm/n',r',s'_z,\pm}. \tag{12}$$

Trong tính toán này, chúng tôi chỉ xét các quá trình hấp thụ một và hai photon ($\ell = 1, 2$). Sử dụng các khai triển gần đúng cho các hàm Bessel ta được

$$J_1^2(a_0 q) = (a_0 q)^2, \quad J_2^2(a_0 q) = (a_0 q)^4 / 4, \tag{13}$$

với $a_0 = eE_0 / [2m^* (\omega^2 - \omega_c^2)]$, m^* là khối lượng hiệu dụng điện tử.

Tích phân theo u có thể tính toán bằng cách sử dụng tính chất trực giao của đa thức Laguerre. Sau khi tính toán ta có hệ số hấp thụ sóng điện từ cho vùng K

$$\begin{aligned} \Gamma^{(2)+} &= \frac{64S_0 U_0^2 \pi^2 a_0^2 n_0 n_i}{c \sqrt{\varepsilon(\omega)} a^2 \omega q_s^2 l_B^4} \left[1 - \exp\left(-\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right) \right] \sum_{n,n'} \sum_{r,r'} \sum_{s_2,+} f(E_{n,s_2,r}^+) [1 - f(E_{n',s_2,r'}^+)] \\ &\times \left\{ \left[(\eta_1^+ \eta_1^+)^2 (n_> + n_< + 1) - 2\eta_1^+ \eta_1^+ \eta_2^+ \eta_2^+ \sqrt{n_> n_<} + (\eta_2^+ \eta_2^+)^2 (n_> + n_< - 1) \right] \right. \\ &\times \delta(E_{n',s_2,r'}^+ - E_{n,s_2,r}^+ - \hbar\omega) + \frac{a_0^2}{l_B^2} \left[(\eta_1^+ \eta_1^+)^2 \{2 + 6n_< (n_< + 1) + (n_> - n_<) \right. \\ &\times (n_> + 5n_< + 3)\} - 4\eta_1^+ \eta_1^+ \eta_2^+ \eta_2^+ \sqrt{n_> n_<} (n_> + n_<) + (\eta_2^+ \eta_2^+)^2 \\ &\left. \left. \times [2 + 6(n_< - 1)n_< + (n_> - n_<)(n_> + 5n_< - 3)] \right] \delta(E_{n',s_2,r'}^+ - E_{n,s_2,r}^+ - 2\hbar\omega) \right\}. \end{aligned} \quad (14)$$

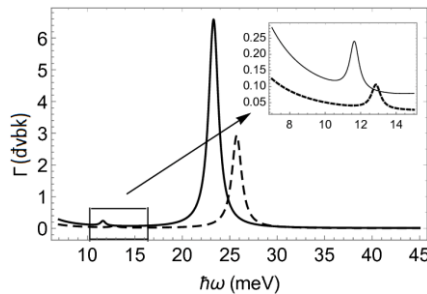
Tương tự, kết quả của vùng K' được cho bởi phương trình (14) với $E_{n,s_2,r}^+$, $E_{n',s_2,r'}^+$, η_1^+ , η_2^+ lần lượt được thay bằng $E_{n,s_2,r}^-$, $E_{n',s_2,r'}^-$, η_1^- , η_2^- .

3 Kết quả tính số và thảo luận

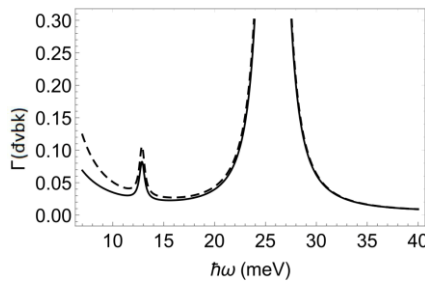
Trong mục này, chúng tôi thực hiện tính số các kết quả giải tích vừa thu được ở trên để làm rõ một số đặc trưng vật lý của phổ hấp thụ trong silicene đơn lớp. Các tham số sử dụng để tính toán số được cho như sau [1, 2, 9]: $E_0 = 10^5$ V/m, $n_0 = 5 \times 10^{15}$ m⁻², $\varepsilon_r = 4$, $\varepsilon_0 = 8.86 \times 10^{-12}$ C²/Nm², $n_i = 10^{13}$ m⁻², $v_F = 5.42 \times 10^5$ m.s⁻¹, $q_s = 5 \times 10^8$ m⁻¹ [2] và $\lambda_{SO} = 3.9$ meV [2]. Các kết quả tính toán cho trường hợp không có mặt điện trường không đổi đã được thu nhận và thảo luận trong công trình gần đây [10]. Trong công trình này, chúng tôi tập trung khảo sát ảnh hưởng của điện trường không đổi lên quá trình hấp thụ quang - từ và cộng hưởng cyclotron - tạp chất trong silicene đơn lớp, tức là so sánh kết quả thu được giữa trường hợp $E_z = 0$ và $E_z \neq 0$. Sau đây, chúng tôi xét hai trường hợp của điện trường $eE_z = 0$ và $eE_z = 3.9$ meV/d. Đồng thời, chỉ xét các dịch chuyển xảy ra trong vùng K.

Hình 1 chỉ ra phổ hấp thụ như là một hàm của năng lượng photon tại từ trường $B = 10$ T, nhiệt độ $T = 4$ K với hai giá trị khác nhau của điện trường $eE_z = 0$ và $eE_z = 3.9$ meV/d. Từ phổ hấp thụ này có thể thấy mỗi đường cong có 2 đỉnh cực đại ứng với các giá trị khác nhau của năng lượng photon. Đối với trường hợp $eE_z = 0$, đỉnh thứ nhất định vị tại giá trị năng lượng

photon $\hbar\omega = 12.8691$ meV; giá trị năng lượng này thỏa mãn điều kiện $E_{2,1,1} - E_{1,1,1} = 2\hbar\omega$. Đỉnh thứ hai định vị tại giá trị năng lượng photon $\hbar\omega = 25.7383$ meV; giá trị năng lượng này thỏa mãn điều kiện $E_{2,1,1} - E_{1,1,1} = \hbar\omega$ ($E_{1,1,1} = 62.346$ meV, $E_{2,1,1} = 88.0843$ meV ứng với bộ dịch chuyển của mức Landau $n = 1, n' = 2$). Hai đỉnh này mô tả quá trình dịch chuyển điện tử từ mức $|1,1,1\rangle$ đến mức $|2,1,1\rangle$ bằng cách hấp thụ hai photon và một photon. Tương tự, ta cũng thu được các điều kiện tương tự đối với trường hợp $eE_z = 3.9$ meV/d. Đây chính là điều kiện dò tìm cộng hưởng cyclotron có công thức chung $\Delta E = \ell\hbar\omega$ với ΔE là hiệu năng lượng của điện tử giữa hai mức Landau đầu và cuối, $\ell = 1$ và 2 tương ứng quá trình hấp thụ một và hai photon. Trong trường hợp này, tán xạ đàn hồi điện tử – tạp chất được xem như là một tác động nhiễu loạn lên xác suất dịch chuyển điện tử. Do đó, các đỉnh cực đại này được gọi là các đỉnh cộng hưởng cyclotron – tạp chất. Ta cũng thấy rằng vị trí đỉnh cộng hưởng bị dịch chuyển khi có mặt điện trường không đổi; giá trị của hệ số hấp thụ tại các đỉnh cộng hưởng khi có điện trường $eE_z = 3.9$ meV/d lớn hơn nhiều khi $eE_z = 0$. Điều đó chứng tỏ điện trường có ảnh hưởng mạnh đến phổ hấp thụ.



Hình 1. Sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ Γ vào năng lượng photon $\hbar\omega$ tại từ trường $B = 10$ T, nhiệt độ $T = 4$ K với hai giá trị khác nhau của điện trường $eE_z = 0$ (đường đứt nét) và $eE_z = 3.9$ meV/d (đường liền nét).

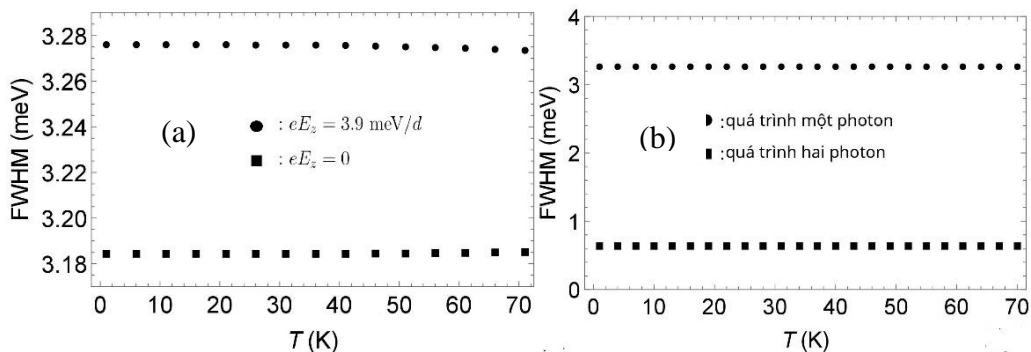


Hình 2. Sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ Γ vào năng lượng photon $\hbar\omega$ tại từ trường $B = 10$ T với các giá trị khác nhau của nhiệt độ $T = 1$ K (đường liền nét) và $T = 4$ K (đường đứt nét).

Để thấy ảnh hưởng của nhiệt độ lên phổ hấp thụ, trên Hình 2 chúng tôi biểu diễn hệ số hấp thụ theo năng lượng photon với các giá trị khác nhau của nhiệt độ. Đồ thị cho thấy vị trí đỉnh cộng hưởng gần như nhau tại nhiệt độ $T = 1$ K và $T = 4$ K. Điều đó chứng tỏ ở miền nhiệt độ thấp, nhiệt độ không ảnh hưởng đến vị trí đỉnh cộng hưởng trong silicene đơn lớp. Sau đây, chúng tôi khảo sát sự thay đổi của độ rộng phổ của đỉnh cộng hưởng cụ thể khi nhiệt độ thay đổi.

Hình 3 mô tả sự phụ thuộc của độ rộng vạch phổ FWHM vào nhiệt độ. Khi tăng nhiệt độ trong khoảng từ 0,1 K đến 70 K, FWHM dường như vẫn không thay đổi. Điều này cho thấy tác động nhiệt không đóng góp quan trọng trong silicene, nghĩa là silicene có tính ổn định nhiệt độ cao và các quá trình tán xạ trong silicene đơn lớp được kích hoạt rất yếu. Sự phụ thuộc rất yếu của FWHM vào nhiệt độ cũng được quan sát thấy trong graphene đơn lớp [11, 12] cho thấy sự giống nhau về ảnh hưởng của nhiệt độ lên các tính chất hấp thụ quang – từ của graphene và silicene đơn lớp.

Hình 3(a) cho thấy điện trường ảnh hưởng mạnh lên độ rộng vạch phổ FWHM. Giá trị của FWHM đối với quá trình hấp thụ một photon khi có điện trường $eE_z = 3,9$ meV/d lớn hơn so với khi điện trường $eE_z = 0$. Cụ thể, khi $eE_z = 0$, FWHM xấp xỉ giá trị 3,184 meV, khi $eE_z = 3,9$ meV/d FWHM xấp xỉ giá trị 3,275 meV. Cho đến nay, chúng tôi vẫn chưa tìm được cơ chế lý thuyết để giải thích cho sự gia tăng giá trị của FWHM khi có mặt điện trường.



Hình 3. Sự phụ thuộc của độ rộng vạch phổ FWHM vào nhiệt độ T tại từ trường $B = 10$ T: (a) trường hợp hấp thụ một photon khi không có điện trường không đổi (chấm hình vuông) và có mặt điện trường không đổi $eE_z = 3,9$ meV/d (chấm hình tròn); (b) trường hợp có mặt điện trường không đổi $eE_z = 3,9$ meV/d đối với quá trình hấp thụ một photon (chấm hình tròn) và quá trình hấp thụ hai photon (chấm hình vuông).

Hình 3(b) cho thấy FWHM tại các đỉnh cộng hưởng ứng với quá trình hấp thụ hai photon nhỏ hơn nhiều so với quá trình hấp thụ một photon. Đối với quá trình hấp thụ một photon, FWHM xấp xỉ giá trị 3,184 meV; đối với quá trình hấp thụ hai photon, FWHM xấp xỉ giá trị 0,6244 meV. Nguyên nhân là do xác suất tán xạ của một photon lớn hơn hai photon. Tuy nhiên, đóng góp của các quá trình hai photon là đáng kể và không thể bỏ qua.

4 Kết luận

Trong công trình này, chúng tôi đã nghiên cứu cộng hưởng cyclotron – tạp chất trong silicene đơn lớp khi đặt trong trường sóng điện từ và từ trường vuông góc, có xét đến ảnh hưởng của một điện trường không đổi. Kết quả khảo sát sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ vào năng lượng photon cho thấy sự xuất hiện của các đỉnh cộng hưởng cyclotron. Sử dụng phương pháp Profile chúng tôi đã vẽ được đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của độ rộng phổ của đỉnh cộng hưởng điện từ – tạp chất vào nhiệt độ. Điện trường không đổi ảnh hưởng mạnh lên phổ hấp thụ của silicene đơn lớp và FWHM của các đỉnh cộng hưởng gần như không đổi khi thay đổi nhiệt độ. Quá trình hấp thụ hai photon cho đóng góp đáng kể vào phổ hấp thụ, cho thấy tầm quan trọng của các quá trình hấp thụ nhiều photon và việc nghiên cứu các quá trình này là cần thiết trong lĩnh vực quang phi tuyến. Các kết quả trên là cơ sở cho các nghiên cứu ứng dụng của vật liệu mới silicene trong chế tạo các thiết bị quang – điện tử nano.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 103.01-2016.83.

Tài liệu tham khảo

1. Feng W., Liu C. -C. and Yao Y. (2011), Quantum Spin Hall Effect in Silicene and Two-Dimensional Germanium, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 076802.
2. Shakouri Kh., Vasilopoulos P., Vargiamidis V. and Peeters F. M. (2014), Spin and valley-dependent magnetotransport in periodically modulated silicene, *Phys. Rev. B* **90**, 125444.
3. Bhat J. S., Kubakaddi S. S. and Mulimani B. G. (1991), Cyclotron-phonon resonance in quasi-two-dimensional semiconducting structures, *J. Appl. Phys.* **70**, 2216.
4. Phong T. C., Phuong L. T. T., Phuc H. V. (2012), Cyclotron-resonance line-width due to electron-LO-phonon interaction in cylindrical quantum wires, *Superlattices Microstructures* **52**, 16.

5. Hien N. D., Lam V.T., Phong T.C, Phuong L. T. T. (2015), Influence of phonon confinement on the optically detected electrophonon resonance linewidth in parabolic quantum wells, *Physica E* 71, 79.
6. An K. -S., Imanaka Y., Kim Y., Takamasu T., Takehana K. (2014), Substrate dependence of cyclotron resonance on large-area CVD graphene, *Cur. Appl. Phys.* **14**, S119
7. Tabert C. J. and Nicol E. J. (2013), Valley-Spin Polarization in the Magneto-Optical Response of Silicene and Other Similar 2D Crystals, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 197402.
8. Margulis V. A. (1983), Nonlinear cyclotron-phonon resonance in semiconductors, *Sov. Phys. Semicond.* **17**, 571.
9. Liu C. -C., Jiang H., and Yao Y. (2011), Low-energy effective Hamiltonian involving spin-orbit coupling in silicene and two-dimensional germanium and tin, *Phys. Rev. B* **84**, 195430.
10. Binh N. V. Q., Hieu N. N., Nguyen C. V. , Phuc H. V., Hoi B. D., Phuong L. T. T., Phong T. C. (2019), Nonlinear optical absorption and cyclotron-impurity resonance in monolayer silicene, *Physica E* Vol. 105, 168.
11. Orlita M., Faugeras C., Plochocka P., Neugebauer P., Martinez G., Maude D. K., Barra A.-L., Sprinkle M., Berger C., de Heer W. A., and Potemski M. (2008), Approaching the Dirac Point in High-Mobility Multilayer Epitaxial Graphene, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 267601.
12. Hoi B. D., Phong T. C., Phuong L. T. T. (2018), Magneto-optical absorption and cyclotron-phonon resonance in graphene monolayer, *J. Appl. Phys.* **123**, 094303.

CYCLOTRON-IMPURITY RESONANCE IN SILICENE MONOLAYER UNDER A STATIC ELECTRIC FIELD

Hoang Thi Duyen¹, Nguyen Ngoc Hieu², Le Thi Thu Phuong^{1*}

¹Khoa Vat ly, Truong Dai hoc Su pham, Dai hoc Hue

²Vien nghien cuu va phat trien cong nghe cao, Truong Dai hoc Duy Tan, Da Nang

Abstract. We investigate the cyclotron-impurity resonance through the absorption spectrum in monolayer silicene in the presence of an electromagnetic wave and a perpendicular magnetic field. The influence of an external static electric field is also taken into account. The nonlinear absorption coefficient (NAC) is calculated using the perturbation theory in the case of electron-impurity scattering. The dependence of NAC on the photon energy is considered. The results show that the external static electric and magnetic field strongly affect the resonance spectrum in monolayer silicene. When the electric field increases, the value of NAC at the resonant peaks increases. Whereas, it decreases with the increase in the magnetic field. On the base of the Profile method, the full width at half maximum (FWHM) of the resonant peaks is obtained, and it is nearly unchanged with temperature in the low-temperature region. In addition, FWHM depends on the external electric field for both the one- and two-photon absorption process.

Keywords: cyclotron-impurity resonance, silicene, absorption spectrum, full width, resonant peak