

РЕЗОНАНСНІ ЕФЕКТИ В ПОДИНОКИХ ТА ПЕРІОДИЧНИХ
БАР'ЄРНИХ МІКРО- І НАНОСТРУКТУРАХ

Азарх Л. П., магістрант; Чайка Є. О., магістрант;

Нелін Є. А., д.т.н., професор

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Як узагальнено зазначено в [1], «Ми живемо в світі резонансів». Мікро- та наноструктури у вигляді поодиноких хвильових неоднорідностей і ґрат неоднородностей, таких як одно-, дво-, трибар'єрні і кристалоподобні структури — надґрати (НГ), фотонні, електромагнітні й фононні кристали становлять основу пристроїв обробки сигналів нового покоління. Функціонування бар'єрних структур базується на резонансному проходженні, зокрема резонансному тунелюванні, хвиль. При резонансному проходженні коефіцієнт проходження $T = 1$. Термін «бар'єр» будемо використовувати узагальнено як хвильову неоднорідність у вигляді шару простору з хвильовим імпедансом, що відрізняється від хвильового імпедансу зовнішнього середовища. У такому розумінні цей термін об'єднує імпедансні бар'єр та яму для хвиль будь-якої природи, зокрема потенціальні бар'єр та яму для квантово-механічних хвиль.

Розглянемо особливості резонансних ефектів в поодинокому бар'єрі та в обмеженій періодичній бар'єрній (багатобар'єрній) структурі.

Традиційно бар'єрні задачі вирішують зшиванням рішень на межах [2]. Імпедансний підхід [3, 4] суттєво спрощує моделювання, дає новий погляд на фізичні явища, зокрема резонанси в бар'єрних структурах.

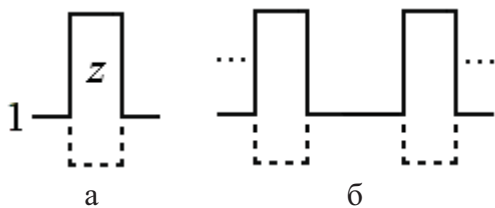


Рисунок 1. Поодинокий бар'єр (а) та багатобар'єрна структура (б), z та 1 — нормовані хвильові імпеданси бар'єра, зовнішнього середовища та шару між бар'єрами багатобар'єрної

На рис. 1 наведено імпедансні моделі структур. Для спрощення перетворень хвильові та вхідні імпеданси нормовано до хвильового імпедансу зовнішнього середовища. Суцільна лінія відповідає випадку $z > 1$, а штрихова — $z < 1$. Будемо виходити з моделі довгої лінії (ДЛ) без втрат. В рамках цієї моделі поодинокий бар'єр, а також бар'єри та проміжки між ними багатобар'єрної структури моделюються від-

різками лінії передачі з відповідними хвильовим імпедансом та хвильовим числом. Аналіз зводиться до знаходження вхідного імпедансу структури, коефіцієнта відбиття та, виходячи з закону збереження енергії, — коефіцієнта проходження.

Вхідний імпеданс відрізка ДЛ дорівнює

$$z_{\text{вх}} = \frac{1 + iz \operatorname{tg} \varphi}{1 + iz^{-1} \operatorname{tg} \varphi},$$

де $\varphi = \beta l$, β — хвильове число, l — довжина відрізка. У результаті перетворень для коефіцієнта проходження бар'єра отримуємо

$$t = \frac{1}{\sqrt{1 + (\tilde{z} \sin \varphi)^2}}, \quad (1)$$

де $\tilde{z} = (z - z^{-1}) / 2$.

На рис. 2, а наведено залежності згідно (1). Максимуми при $F = 1, 2, \dots$ відповідають резонансам в бар'єрі, зумовленим виконанням умов $l = \lambda n / 2$, $n = 1, 2, \dots$, де λ — довжина хвилі. При резонансі в бар'єрі формується стояча хвиля, збурення якої компенсують неоднорідності хвильових збурень падаючої хвилі на межах бар'єра, так що падаюча хвиля проходить ці межі як однорідне середовище; вхідний імпеданс бар'єра узгоджений з хвильовим імпедансом зовнішнього середовища: $z_{\text{вх}} = 1$.

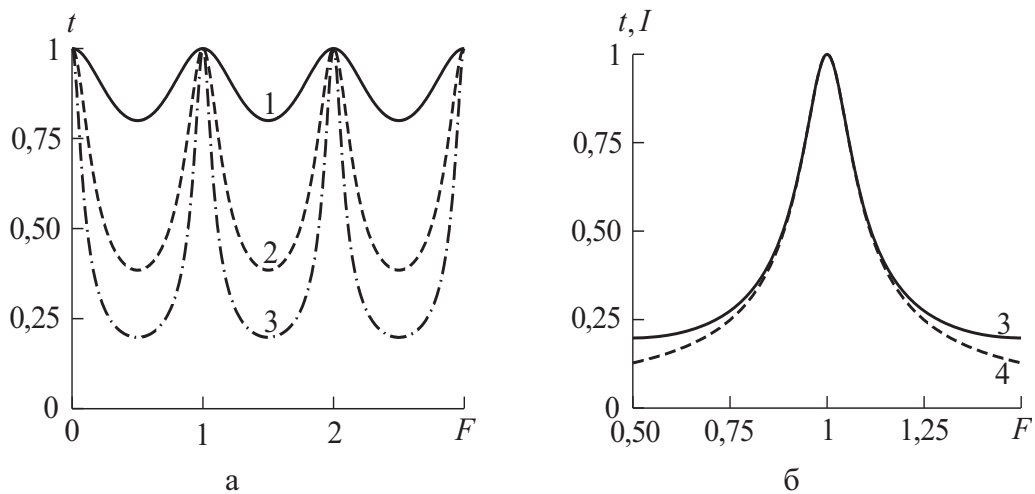


Рисунок 2. Залежності коефіцієнта проходження поодинокого бар'єра у широкому (а) та вузькому (б) діапазонах, $F = f / f_0$, f_0 — резонансна частота півхвильового резонатора, $z = 2$ або $0,5$ (1), 5 або $0,2$ (2), 10 або $0,1$ (3), універсальна резонансна крива (4).

У вузькому відносно частоти f_0 діапазоні частот $\sin \varphi \approx \pi \delta$ і $t \approx 1 / \sqrt{1 + (\pi \tilde{z} \delta)^2}$, де $\delta = F - 1$. Рис. 2, б ілюструє відповідність (1) універсальній резонансній кривій $I = 1 / \sqrt{1 + (2Q\delta)^2}$, де $Q = \pi |\tilde{z}| / 2$ — добротність.

Для квантово-механічних хвиль $z = \sqrt{(E - V)m_b / Em_a}$, де E — енергія електрона, V — потенціальна енергія; $m_{a,b}$ — ефективні маси електрона в області бар'єра і ями.

Рис. 3, а ілюструє резонансне надбар'єрне проходження. На відміну від розглянутих резонансів, квантово-механічні резонанси несиметричні. Внаслідок зменшення коефіцієнта відбиття від меж бар'єра зі зростанням енергії добротність резонанса зменшується. В залежностях, наведених на рис. 3, б спостерігаються чотири власних значення енергії, які відповідають резонансному тунелюванню електронів. Потенціальні ями НГ утворюють

чотири зв'язаних резонатори. Зі збільшенням товщини бар'єрів зв'язок між резонаторами зменшується, у результаті смуга пропускання звужується.

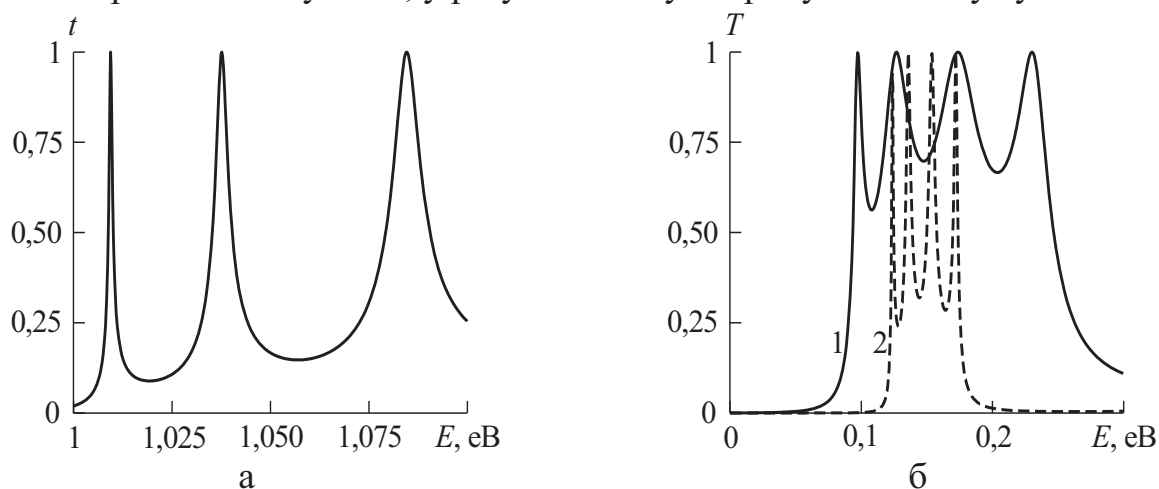


Рисунок 3. Залежності коефіцієнта проходження бар'єра (а): $V = 1$ еВ, товщина $a = 1$ нм, $m_a = 10m_0$, $m_b = m_0$, m_0 — маса електрона; та НГ GaAs/Al_xGa_{1-x}As (б): число бар'єрів 5, $m_a = (0,0665 + 0,0835x)m_0$, $m_b = 0,0665m_0$, $V = 0,3$ еВ, $V = 0,7731x$, $a = 5t$ (1) і $10t$ (2), ширина ями $10t$, $t = 2,82665\text{Å}$ (товщина моношару GaAs у напрямку [100]).

Перелік посилань

1. Limonov M. F. Fano resonances in photonics / M. F. Limonov, M. V. Rybin, A. N. Poddubny, Yu. S. Kivshar, // Nature Photonics. – 2017. – Vol. 11, No. 9. – P. 543-554.
2. Markos P., Soukoulis C. M. Wave Propagation From Electrons to Photonic Crystals and Left-Handed Materials / P. Markos, C. M. Soukoulis – Princeton and Oxford: Princeton University Press. – 2008. – 352 p.
3. Нелин Е. А. Импедансная модель для “барьерных” задач квантовой механики / Е. А. Нелин // УФН. – 2007. – Т. 177, №3. – С. 307–313.
4. Нелин Е. А. Импедансные характеристики кристаллоподобных структур / Е. А. Нелин // ЖТФ. – 2009. – Т. 79, № 7. – С. 27–31.

Анотація

Розглянуто особливості характеристик поодиноких резонансів в бар'єрі та зв'язаних резонансів в багатобар'єрній структурі.

Ключові слова: однобар'єрна структура, багатобар'єрна структура, резонансне проходження, резонансне тунелювання.

Аннотация

Рассмотрены особенности характеристик одиночных резонансов в барьере и связанных резонансов в многобарьерной структуре.

Ключевые слова: однобарьерная структура, многобарьерная структура, резонансное проходжение, резонансное тунелирование.

Abstract

Characteristics features of single resonances in a barrier and coupled resonances in a multi-barrier structure are considered.

Keywords: single-barrier structure, multi-barrier structure, resonant passage, resonant tunneling.