ОСОБЛИВОСТІ ХВИЛЬОВОГО ТА ВХІДНОГО ІМПЕДАНСІВ В РАДІОТЕХНІЦІ ТА КВАНТОВІЙ МЕХАНІЦІ

Гіндікіна М. А., аспірантка; Нелін Є. А., д.т.н., професор
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Сучасна проблематика радіотехніки обумовлена інтенсивним розвитком інформаційно-телекомунікаційних технологій на основі новітніх пристроїв обробки сигналів. Ці пристрої в значній мірі базуються на штучних хвильових бар'єрних структурах, до яких належать одно- та двобар'єрні, одно- та двоямні, кристалоподібні структури.

Традиційно бар'єрні задачі вирішують зшиванням рішень на межах [1]. У підході на основі хвильового імпедансу середовища граничні умови враховано автоматично, що суттєво спрощує моделювання. Як відомо, хвильовий імпеданс характеризує реакцію середовища на хвильове збурювання. Імпедансний підхід дозволяє узагальнено розглядати хвильові структури різної природи, зокрема квантово-механічні [2].

Універсальність має й вхідний імпеданс. Аналогічно хвильовому імпедансу вхідний імпеданс характеризує реакцію структури на хвильове збурювання. Хвильові структури звичайно характеризують частотними залежностями *S*-параметрів. На відміну від *S*-параметрів вхідний импеданс не залежить від середовища на вході, що помітно розширює можливості аналізу й синтезу структури. Особливий інтерес становить аналіз квантово-механічного вхідного імпедансу, який взагалі не розглядається.

Хвильові середовища поділяють на дисперсійні з синусоїдною хвилею та реактивні, в яких хвиля реактивно загасає [3]. В радіотехніці у переважній більшості середовище дисперсійне, в квантовій механіці — реактивне. Приклад реактивного середовища в радіотехніці — замежевий хвилевод. Рис. 1 ілюструє електромагнітний аналог квантово-механічного тунельного потенціального бар'єра.

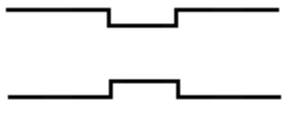

Рисунок 1. Хвилевод зі звуженим замежевим відрізком.

Квантово-механічні хвильовий імпеданс і хвильове число визначаються формулами

$$Z = 2\sqrt{2(E-V)/m}\,, \quad k = \sqrt{2m(E-V)}/\hbar\,,$$

де E, V та m — енергія, потенціальна енергія та ефективна маса електрона; $\hbar = h/2\pi$, h — постійна Планка. Якщо $E < V$, Z і k уявні, що відповідає реактивному середовищу. Для цього випадку у фази прямої хвилі має бути знак «+» (в радіотехніці «–»). При $k = \mathrm{i}|k|$ $\exp(\mathrm{i}kx) = \exp(-|k|x)$ — амплітуда хвилі експоненційно зменшується.

В кристалоподібних структурах дисперсійний та реактивний характер чергуються відповідно в дозволених та заборонених зонах, що забезпечує максимальну різницю високого та низького рівнів сигналів при їх обробці.

Особливості залежностей активної й реактивної складових вхідного імпедансу структури обумовлені насамперед її власними (резонансними) значеннями енергії (для квантово-механічних структур) або частоти. Вхідний імпеданс характеризує «прозорість» структури. Повна прозорість відповідає резонансному проходженню.

Можливості підходу на основі вхідного імпедансу розглянемо на прикладі двобар'єрної структури (ДБС), яку широко застосовують в різних технічних областях. Ключовий ефект ДБС — резонансне проходження хвиль з коефіцієнтом проходження $T = 1$. Квантово-механічна ДБС з резонансним тунелюванням електронів (РТЕ) — базова структура наноелектроніки.

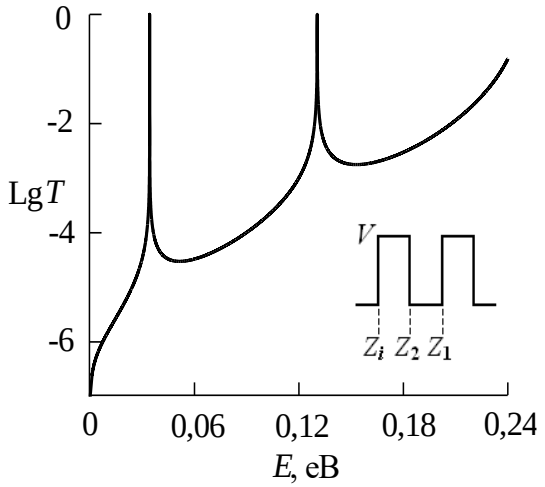

Рисунок 2. Залежність коефіцієнта проходження ДБС. V=0,24еВ, товщина бар'єра та ширина ями 2,5нм, $m = m' = m_0$.

Послідовно знайшовши вхідні імпеданси $Z_{1,2}$ на межах бар'єрів, знайдемо вхідний імпеданс Z_i ДБС (врізка рис. 2). Залежність на рис. 2 ілюструє РТЕ при двох рівнях енергії. На рис. 3 приведені імпедансні характеристики цієї ДБС. Знаком «–» перед $\mathrm{Im}\, Z_i$ враховано зміну знаку фази прямої хвилі. Характер залежності $\mathrm{Re}\, Z_i$ повторює характер залежності T. Поблизу власних рів-нів $\mathrm{Re}\, Z_i$ значно збільшується, що відповідає зростанню інтенсивності хвилі, яка проходить крізь ДБС. Удалечині від власних рівнів $\mathrm{Im}\, Z_i$ має ємнісний характер, причому $\mathrm{Im}\, Z_i >> \mathrm{Re}\, Z_i$.

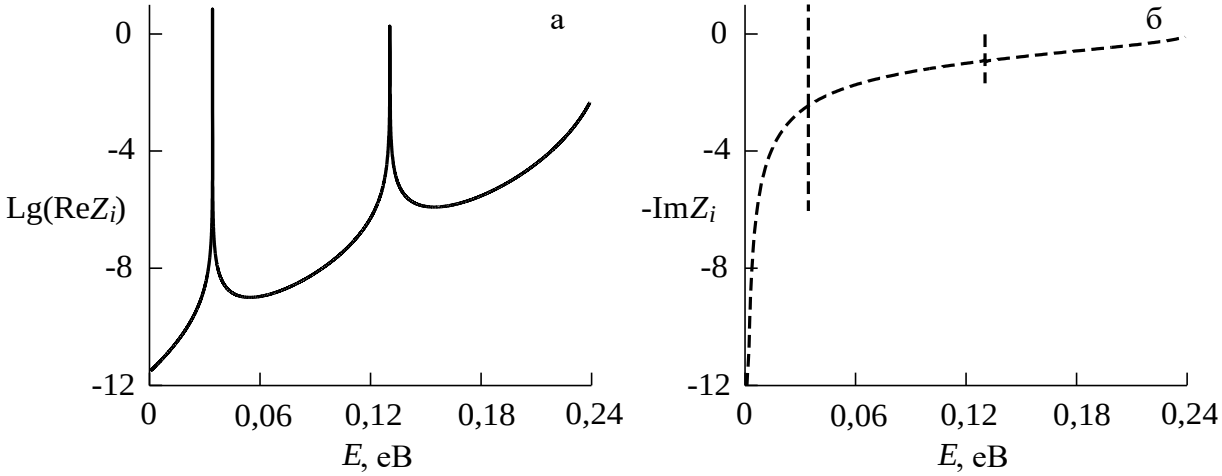

Рисунок 3. Залежності вхідного імпедансу ДБС: а — активна; б — реактивна складові.

На рис. 4 приведено характеристики поблизу першого власного рівня.

Імпедансна умова РТЕ визначається узгодженням Z_i з імпедансом зовнішнього середовища: $\mathrm{Re}\, Z_i = 1$, $\mathrm{Im}\, Z_i = 0$. Цій умові відповідає точка I. Залежність $\mathrm{Im}\, Z_i$ дозволяє знайти додаткову умову РТЕ: точка II при імпедансі зовнішнього середовища з однієї з сторін ДБС $\mathrm{Re}\, Z_{i\mathrm{II}}$.

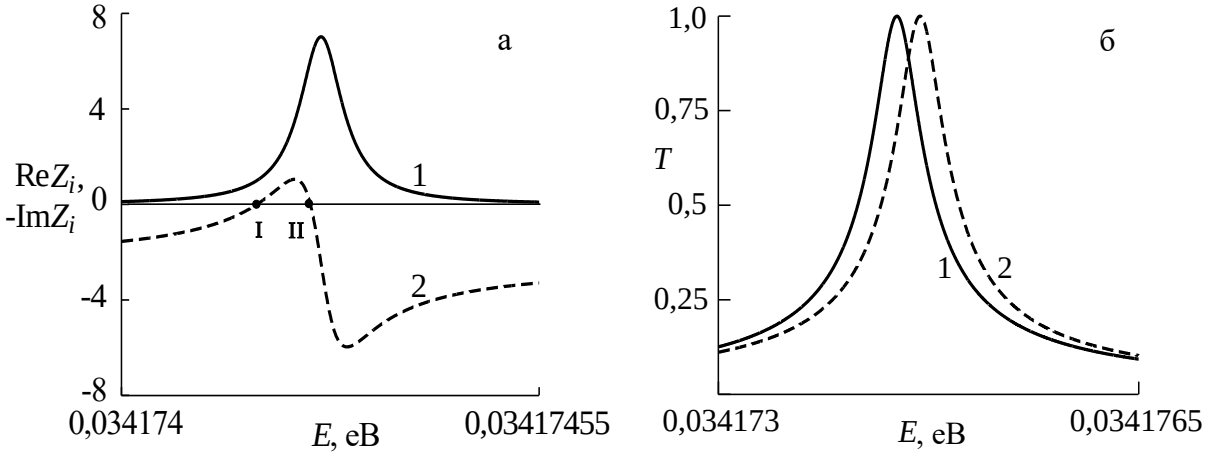

Рисунок 4. Характеристики ДБС поблизу першого власного рівня: а — активна (1) та реактивна (2) складові; б — коефіцієнт проходження для випадків I і II (відповідно 1 і 2).

Вхідні імпедансні характеристики дозволяють проаналізувати хвильові властивості бар'єрних структур, встановити імпедансні умови резонансного проходження хвиль. У результаті аналізу особливостей вхідних імпедансних характеристик встановлено додаткову до відомої умову РТЕ для ДБС.

Перелік посилань

1. 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.

2. Нелин Е. А. Импедансная модель для "барьерных" задач квантовой механики / Е. А. Нелин // УФН. — 2007. — Т. 177, №3. — С. 307—313.

3. Крауфод Ф. Волны / Ф. Крауфод. — М.: Наука, 1974. — 528 с.

Анотація

Вхідні імпедансні характеристики дозволяють проаналізувати хвильові, зокрема резонансні, властивості бар'єрних структур. У результаті аналізу вхідних імпедансних характеристик двобар'єрної структури знайдено додаткову до відомої умову резонансного тунелювання електронів.

Ключові слова: хвильовий імпеданс, вхідний імпеданс, двобар'єрна структура.

Аннотация

Входные импедансные характеристики позволяют проанализировать волновые, в частности резонансные, свойства барьерных структур. В результате анализа входных импедансных характеристик двухбарьерной структури найдено дополнительное к известному условие резонансного туннелирования электронов.

Ключевые слова: волновой импеданс, входной импеданс, двухбарьерная структура.

Abstract

Input impedance characteristics enable us to analyze wave and in particular resonance properties of barrier structures. By the analysis of double-barrier structure input impedance characteristics the additional for known condition for resonance electron tunneling were found.

Keywords: wave impedance, input impedance, double-barrier structure.