

ВХІДНІ ІМПЕДАНСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛОПОДІБНИХ СТРУКТУР

Гіндікіна М. А., магістрантка; Нелін Є. А., д.т.н., проф.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

Кристалоподібні структури (КС) з спектральними властивостями, аналогічними зонним властивостям кристалів, становлять основу нових пристроїв обробки сигналів. До КС відносяться напівпровідникові надграти (НГ) для квантово-механічних хвиль, фотонні кристали для електромагнітних хвиль, фононні кристали для акустичних хвиль. Фотонні і фононні кристали скоротимо як $\Phi(n)K$.

Традиційно КС аналізують матричним методом зшиванням рішень на границях з умов безперервності функції, що характеризує хвилю, і її похідної [1]. У підході на основі хвильового імпедансу середовища [2] граничні умови враховано автоматично, що суттєво спрощує моделювання.

Як відомо, хвильовий імпеданс середовища характеризує реакцію середовища на хвильове збурювання. Оскільки поняття хвильового імпедансу середовища універсальне, імпедансний підхід дозволяє узагальнено розглядати хвильові структури різної природи. Універсальність має й вхідний імпеданс. Аналогічно хвильовому імпедансу середовища вхідний імпеданс структури характеризує реакцію структури на хвильове збурювання.

Хвильові структури звичайно характеризують частотними залежностями S -параметрів, а не вхідного імпедансу. S -параметри залежать від імпедансу середовища на вході структури. Вхідні імпедансні характеристики не залежать від середовища на вході, що помітно розширює можливості аналізу й синтезу структури [3].

У доповіді розглянуто особливості вхідних імпедансних характеристик необмежених і обмежених КС.

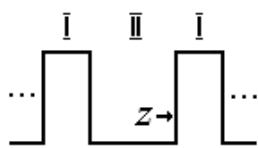


Рисунок 1. Імпедансна залежність необмеженої КС.

На рис. 1 показано імпедансну залежність необмеженої КС, утворену шарами I і II, що чергуються; z — вхідний імпеданс у прямому напрямку на правій межі між шарами II і I. Для спрощення перетворень імпеданси нормовано до імпедансу шару II. Позначимо параметри шарів I і II індексами a і b .

Нормований імпеданс бар'єра НГ дорівнює

$$Z_a = \sqrt{\frac{(E - V)m_b}{Em_a}},$$

де E і V — повна і потенціальна енергії електрона; V — $m_{a,b}$ ефективна маса електрона. Для $\Phi(n)K$ $Z_{a,b} = \text{const}$.

Згідно [4]

$$z = \sqrt{\psi} + i\eta, \quad (1)$$

$$\psi = 1 - \eta^2 - 2\eta B^{-1}, \quad \eta = \frac{1 - Z_a^2}{2(B^{-1} + Z_a A^{-1})},$$

де $A = \text{th}(ik_a a)$; $B = \text{tg}k_b b$, k_a і k_b — хвильові числа, a і b — товщини шарів I і II відповідно. У випадку НГ $k_a = \sqrt{2m_a(E - V)} / \hbar$, $k_b = \sqrt{2m_b E} / \hbar$, $\hbar = h / 2\pi$, h — постійна Планка.

На рис. 2 і 3 приведено залежності активної і реактивної складових вхідного імпедансу обмежених КС, розраховані згідно моделі лінії передачі. Штрих-пунктирною лінією показано залежності для необмежених КС згідно (1), що являють собою чергування смуг, в яких $\text{Re } z > 0$ і $\text{Re } z = 0$,

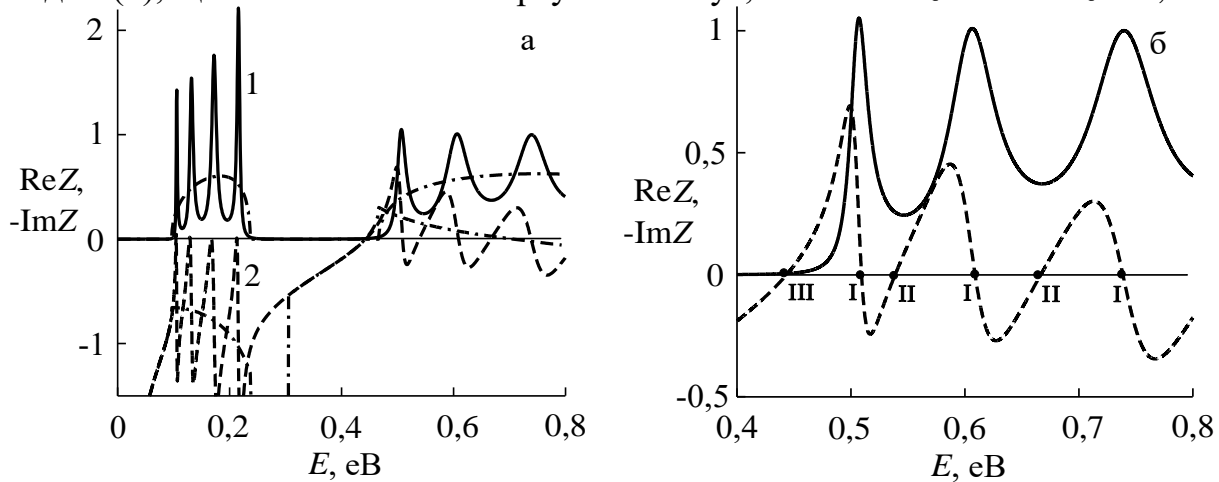


Рисунок 2. Залежності активної (1) і реактивної (2) складових вхідного імпедансу обмежених НГ GaAs/Al_xGa_{1-x}As. $m_a = (0,0665 + 0,0835x)m_0$, $m_b = 0,0665m_0$, де m_0 — маса електрона; $V = 0,3\text{eV}$, $V = 0,7731x$, $a = 6t$, $b = 10t$, $t = 2,82665\text{\AA}$ (товщина моношару GaAs у напрямку [100]): а — кількість бар'єрів (шарів AlGaAs) $N = 5$; б — фрагмент залежностей.

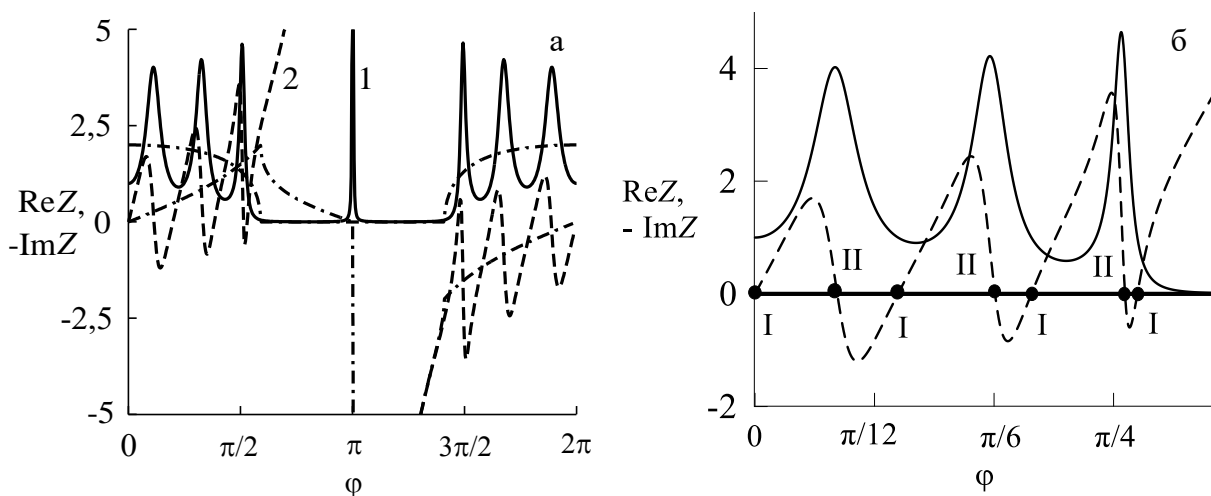


Рисунок 3. Залежності активної (1) та реактивної (2) складових вхідного імпедансу обмежених Ф(н)К. $\varphi = k_a a = k_b b$, $Z_a = 4$, число шарів I $N = 4$; б — фрагмент залежностей.

відповідно дозволених і заборонених зон. Знак «-» реактивної складової

обумовлений протилежністю знаків фази прямої хвилі в квантовій механіці і в радіотехніці. В дозволених зонах активна і реактивна складові вхідного імпедансу обмежених КС «пульсують» відносно залежностей необмежених КС. Границі зон необмеженої і обмеженої КС добре узгоджуються.

Розглянемо детально фрагменти залежностей (рис. 2, б і 3, б). Звернемо увагу на точки I — III, в яких $\text{Im}Z = 0$.

При виконанні умови

$$\text{Re}Z = Z_c, \quad (2)$$

де Z_c — хвильовий імпеданс середовища на вході КС, КС узгоджені з середовищем на вході.

Точка III знаходиться в забороненій зоні. Виконання умови (2) для цієї точки відповідає резонансному тунелюванню електронів крізь ПГ з формуванням вузькосмугової характеристики проходження.

Виконання умови (2) для точок I і II відповідає резонансному проходженню крізь КС, причому в точках I $\text{Re}Z = 1$, а в точках II $\text{Re}Z \neq 1$. Таким чином, резонансне проходження в точках I відбувається без трансформації імпедансу середовища на виході КС, а точках II — з трансформацією.

Аналіз вхідних імпедансних характеристик КС дозволяє встановити параметри резонансного проходження крізь КС. Причому, якщо точки I можна знайти і при аналізі S-параметрів, то точки II і III лише при аналізі вхідних імпедансних характеристик.

Перелік посилань

1. Markos P. 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. Гиндикина М. А. Входные импедансные характеристики барьерных структур / М. А. Гиндикина, М. В. Водолазская, Е. А. Нелин // Известия вузов. Радиоэлектроника. — 2015. — Т. 58, № 7. — С. 48–56.

4. Нелин Е. А. Импедансные характеристики кристаллоподобных структур / Е. А. Нелин // ЖТФ. — 2009. — Т. 79, № 7. — С. 27–31.

Анотація

Виконано аналіз особливостей вхідних імпедансних характеристик необмежених і обмежених кристаллоподібних структур. Встановлено умови резонансного проходження хвиль.

Ключові слова: вхідний імпеданс, кристаллоподібна структура.

Аннотация

Выполнен анализ особенностей входных импедансных характеристик неограниченных и ограниченных кристаллоподобных структур. Установлены условия резонансного прохождения волн.

Ключевые слова: входной импеданс, кристаллоподобная структура.

Abstract

Analysis of the unlimited and limited crystal-like structures input impedance characteristics is fulfilled. Conditions for wave resonance passage is found.

Keywords: input impedance, crystal-like structure.