

МІКРОЕЛЕКТРОННА ТА НАНОЕЛЕКТРОННА ТЕХНІКА

УДК 621.382

ОДНОБАР'ЄРНІ КРИСТАЛОПОДІБНІ СТРУКТУРИ*Нелін Є.А., Сергієнко О.В.*

Запропоновано однобар'єрні кристалоподібні структури з резонансним тунелюванням хвиль. Наведено характеристики, що ілюструють високу ефективність таких структур.

Вступ. Постановка задачі

Штучні періодичні кристалоподібні структури (КС), аналогічні природним кристалам, становлять основу нових інтегральних пристроїв обробки сигналів. До КС відносять напівпровідникові надграти, фотонні та фононні кристали. Базовий ефект нанодіапазону, що лежить в основі функціонування наноелектронних пристроїв — тунелювання електронів. Використання тунелювання електромагнітних та інших хвиль дозволить значно підвищити ефективність та розширити функціональні можливості пристроїв обробки сигналів [1]. В даній роботі запропоновано однобар'єрні КС з резонансним тунелюванням хвиль. Вибірність пристроїв на основі таких КС значно перевищує вибірність традиційних пристроїв.

Резонансно-тунельні кристалоподібні структури

Симетричний двобар'єрний потенціал є базовим для конструкцій наноелектронних пристроїв, а також для розуміння фізико-технічних принципів наноелектроніки. У структурах з таким потенціалом спостерігається незвичайне явище — резонансне тунелювання електронів (РТЕ), при якому коефіцієнт проходження дорівнює одиниці.

В [2] запропоновано симетричний однобар'єрний потенціал з РТЕ. Використання цього потенціалу розширює можливості наноелектронних пристроїв. Ідея селективних пристроїв на основі однобар'єрних структур така. Смуга пропускання відповідає РТЕ. Коефіцієнт проходження на резонансній частоті дорівнює одиниці. Поза смугою пропускання тунельний бар'єр має надзвичайно низьку прозорість, що забезпечує значне загасання сигналу. Однобар'єрні КС дозволяють сформувати вузькі дозволені зони, які відповідають високовибірним характеристикам пропускання.

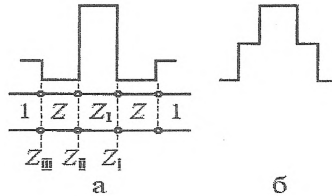
Для моделювання резонансно-тунельних однобар'єрних КС скористаємося концепцією імпедансу. Імпеданс характеризує силу реакції середовища на хвильове збурення. Концепція імпедансу лежить в основі моделі неоднорідної лінії передачі, яка дозволяє моделювати хвильові структури, у тому числі КС різної природи і розмірності [3]. Квантово-механічний імпеданс Z визначається формулою $Z=2\sqrt{2(E-V)/m}$, де E і V — кінетична і потенціальна енергія електрона; m — ефективна маса електрона. При тунелюванні $E < V$ і імпеданс уявний.

Симетричні однобар'єрні кристалоподібні структури

Резонансне тунелювання хвиль, як і резонансне проходження, обумовлене повною компенсацією відбитих хвиль в результаті формування власного компенсуючого джерела хвилі — резонансної області зі стоячою хвилею [2]. На рис. 1 зображено симетричний однобар'єрний потенціал і еквівалентну лінію передачі. Резонансна область утворена потенціальною ямою (рис. 1а) або потенціальним бар'єром меншої висоти (рис. 1б). В результаті отримаємо тришарові РТР-структури, де Р і Т відповідають резонансним і тунельним шарам. Для спрощення викладок імпеданси шарів прономовані до імпедансу зовнішнього середовища.

Рис. 1. Симетричний однобар'єрний потенціал і еквівалентна лінія передачі.

1, Z і Z_1 — відповідно імпеданси зовнішнього середовища, Р- і Т-областей; Z_1 — Z_{III} — нормовані вхідні імпеданси на межах Р- і Т-областей.



Знайшовши вхідні імпеданси Z_1 — Z_{III} , отримаємо вираз для коефіцієнта відбиття:

$$R = \frac{[(Z_1^2 - Z^4)A^2 + Z^2(1 - Z_1^2)]B - 2ZZ_1(Z^2 - 1)A}{[(Z^4 + Z_1^2)A^2 - 2Z(Z^2 + Z_1^2)A + Z^2(Z_1^2 + 1)]B + 2ZZ_1[(Z^2 - ZA + 1)A - Z]}$$

де $A = \text{th}(ika)$; $B = \text{th}(ik_1b)$, k, a — відповідно хвильове число і ширина Р-шару; k_1, b — аналогічно для Т-шару. Умовою для РТЕ є $R=0$. Звідси:

$$B = \frac{2ZZ_1(Z^2 - 1)A}{(Z_1^2 - Z^4)A^2 + Z^2(1 - Z_1^2)} \tag{1}$$

У випадку $Z = |Z_1|$ і $k = |k_1|$ з (1) отримаємо

$$\text{th}(2\pi\hat{b}) = \frac{\pm (Z^2 - 1)\sin(4\pi\hat{a})}{Z^2 + 1}$$

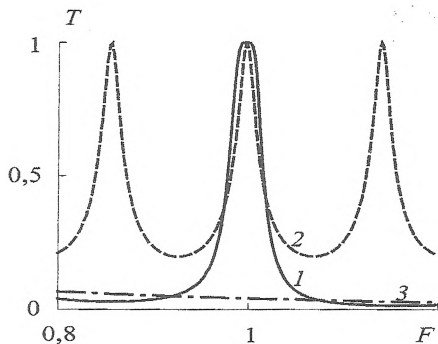
де знак "Λ" означає нормування до довжини хвилі λ_0 на резонансній частоті f_0 ; знаки "±" відповідають знакам Z_1 .

На рис. 2 приведені залежності коефіцієнта проходження $T = \sqrt{1 - |R|^2}$, що ілюструють резонансне тунелювання в такій РТР-структурі і її вибірність у порівнянні з резонатором Фабрі-Перо. Розмір резонансної порожнини резонатора дорівнює $2\hat{a} + 0,25$. Поза межами впливу Р-областей вибірність РТР-структури визначається коефіцієнтом проходження бар'єра. Вибірність РТР-структури на порядок перевищує вибірність резонатора Фабрі-Перо: мінімум коефіцієнта проходження дорівнює 0,2 для резонатора і 0,03/0,015 в області нижніх/верхніх частот для РТР-структури.

Рис. 2. Частотні залежності коефіцієнтів проходження:

1 — РТР-структури,
2 — резонатора Фабрі-Перо,
3 — Т-бар'єра. $Z=10$, $Z_1=Zi$,
(або $Z=0,1$, $Z_1=-Zi$), $\hat{a}=1,63$,
 $\hat{b}=0,36$; $F=f/f_0$.

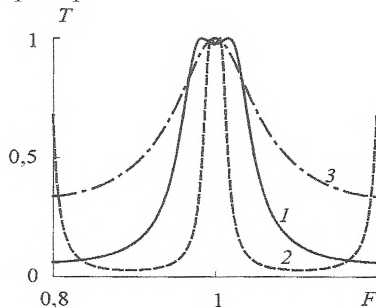
Імпеданс резонансної порожнини резонатора дорівнює Z ; імпеданс Т-бар'єра — Z_1 , товщина — \hat{b} .



Т-області відповідає КС в режимі забороненої зони. На рис. 3 приведені характеристики, що ілюструють вибірність РТР-структури з такою Т-областю. Р-область утворена шаром з відносним імпедансом $Z=10$, КС — чвертьхвильовими шарами, що чергуються, з відносними імпедансами $Z_1=5$ і $Z=10$. Вибірність РТР-структури істотно перевищує вибірність Т-області — КС при виконанні її з внутрішньою резонансною порожниною: мінімум коефіцієнта проходження дорівнює 0,33 для КС і 0,06/0,03 для РТР-структур 1/2. Для КС $Z/Z_1=2$, імпеданс зовнішнього середовища дорівнює Z . Залежність 2 ілюструє можливість формування характеристики з заданою смугою пропускання вибором розмірів Р-областей.

Рис. 3. Частотні залежності коефіцієнта проходження:

1 і 2 — РТР-структури, 3 — КС з внутрішньою напівхвильовою резонансною порожниною. Кількість чвертьхвильових шарів КС $N=5$, $\hat{a}=0,5$ (1) і $\hat{a}=4$ (2).



Несиметричні одnobар'єрні кристалопоподібні структури

Внаслідок симетрії одnobар'єрних КС, як і традиційних структур з внутрішньою резонансною порожниною, формується набір близько розташованих резонансних частот. В багатьох випадках необхідне широкосмугове подавлення сигналів. Формування дозволених зон КС, які відповідають смугам пропускання, обумовлене протифазною інтерференцією хвиль, відбитих елементами КС. Уведення в КС асиметрії, при якій ці умови виконуються в основній зоні і порушуються в додаткових, дозволить сформу-

вати лише основну зону. Характеристика пропускання буде односмуговою.

На рис. 4 приведені різні варіанти несиметричних РТ-структур. Позначимо їх відповідно РТа-РТг. РТа — потенціальна структура для електронів. РТб-РТг — структури фотонних і фононних кристалів, а також надграт в режимі надбар'єрного проходження електронів. Варіанти Р-областей: а — потенціальна яма або бар'єр (позначений штриховою лінією) в режимі надбар'єрного проходження; б — чвертьхвильовий шар; в — два чвертьхвильових шари; г — чвертьхвильовий шар і шар завтовшки l . Варіанти Т-областей: а — тунельний бар'єр; б-г — КС в режимі забороненої зони. Розглянемо РТа-структуру (рис. 4а). Для РТЕ в Р-області мають виконуватися умови балансу амплітуд і фаз. За умовами балансу амплітуд $|r| = |r_1|$, де r і r_1 — коефіцієнти відбиття відповідно від лівої та правої площин резонатора. Згідно умови балансу фаз $2ka + \varphi + \varphi_1 = 2\pi n$, де φ і φ_1 — фази коефіцієнтів відбиття r і r_1 відповідно; $n=1, 2, \dots$

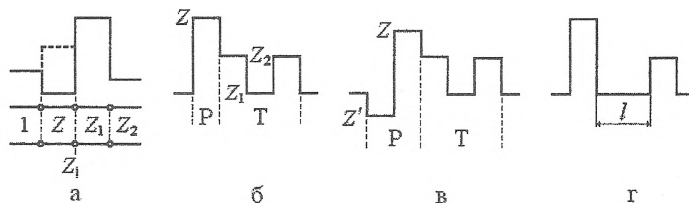


Рис. 4. Потенціальна (а) і імпедансні (б-г) залежності РТ-структур. а: Z_2 — імпеданс зовнішнього середовища справа від структури; Z_1 — вхідний імпеданс Т-області; б: Z — імпеданс Р-шару, $Z_{1,2}$ — імпеданси шарів Т-області; в: Z і $Z' = Z^{-1}$ — імпеданси шарів Р-області.

Виходячи з еквівалентної схеми рис. 4а, маємо $r = (Z-1)/(Z+1)$ і $r_1 = (Z-Z_1)/(Z+Z_1)$. У випадку $Z_2=Z$, що при $m_2=m$ відповідає симетричному Т-бар'єру, з умов балансу амплітуд і фаз відповідно отримаємо

$$|B| = \frac{|(Z-1)Z_1\sqrt{Z}|}{\sqrt{(Z+|Z_1|^2)(Z^3+|Z_1|^2)}}, \quad \text{tg}(2ka) = \frac{2Z|Z_1|}{(Z^2-|Z_1|^2)|B|}. \quad (2)$$

При $(Z-1)(Z-|Z_1|) < 0$ значення $2ka$ зміщені на π радіан.

Співвідношення (2) дозволяють синтезувати резонансно-тунельну РТ-структуру з симетричним Т-бар'єром.

Рис. 5 ілюструє вибірність РТ-структур у порівнянні з резонатором Фабрі-Перо у вигляді КС з внутрішньою напівхвильовою резонансною порожниною. Т-область утворена чвертьхвильовими шарами, що чергуються, з імпедансами $Z_1=1$ і $Z_2=1,4$; $N=15$. Кількість шарів резонатора Фабрі-Перо $N=17$, імпеданси шарів $Z_1=1$ і $Z_2=1,68$. Значення імпедансу Z_2 для резона-

тора Фабрі-Перо відповідає співпадінню значень мінімумів залежностей коефіцієнтів проходження РТб-структури і резонатора Фабрі-Перо. Ширина характеристик за рівнем 0,5 для цих структур приблизно однакова. На відміну від резонатора Фабрі-Перо, характеристики РТ-структур у діапазоні частот від 0 до $2f_0$ мають однорезонансний характер, що суттєво розширює смуги подавлення.

Уведення додаткового напівхвильового шару в РТг-структурі дозволило звужити характеристику відповідно в 1,8 рази і в 1,6 рази у порівнянні з РТб- і РТв-структурами. При розширенні цього шару відбувається подальше звуження характеристики. Можливість синтезу вузькосмугових характеристик становить значний інтерес, оскільки такі характеристики забезпечують високу локалізацію частинок-хвиль.

Висновки

Резонансне тунелювання в однобар'єрних КС забезпечує високовибірну вузькосмугову фільтрацію сигналів. Розглянуті рішення можуть бути застосовані для більш складних структур різної природи та розмірності.

Література

1. Шварцбург А. Б. Туннелирование электромагнитных волн — парадоксы и перспективы // УФН. 2007. Т. 177. №1. С. 43 — 58.
2. Нелин Е. А. Импедансная модель для “барьерных” задач квантовой механики // УФН. 2007. Т. 177. №3. С. 307—313.
3. Нелин Е. А. Моделирование и повышение избирательности кристаллоподобных структур // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып.11. С. 70 — 74.

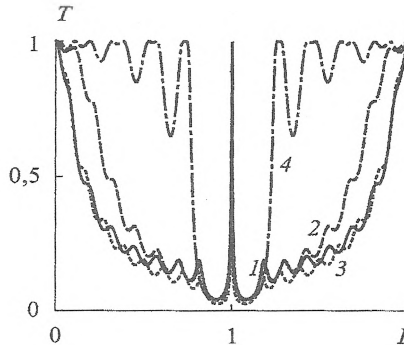


Рис. 5. Частотні залежності коефіцієнта проходження РТ-структур варіантів б–г (1–3) і резонатора Фабрі-Перо (4).
Параметри Р-області: б — $Z=15$; в — $Z=4$; г — $Z=15$, $l=\lambda_0/2$.

Ключові слова: кристаллоподібні структури, однобар'єрні структури, резонансне тунелювання електронів	
Нелин Е.А., Сергиенко А.В.	Nelin E.A., Sergiyenko A.V.
Однобарьерные кристаллоподобные структуры	One-barrier crystal-like structures
Предложены однобарьерные кристаллоподобные структуры с резонансным тунелированием волн. Приведены характеристики, иллюстрирующие высокую эффективность таких структур.	Are offered one-barrier crystal-like structures with resonant tunnel waves. The characteristics illustrating high efficiency of such structures are resulted.