
МІКРОЕЛЕКТРОННА ТА НАНОЕЛЕКТРОННА ТЕХНІКА

УДК 621.3.049

ІМПЕДАНСНА МОДЕЛЬ ДЛЯ НАНОЕЛЕКТРОННИХ СТРУКТУР

Ахмедов Р.С., Нелін Є.А.

Розглянуто використання імпедансної моделі для моделювання наноелектронних квантово-механічних структур. Приведено характеристики, що ілюструють ефективність такого підходу.

Вступ. Постановка задачі

До просторово-періодичних структур з квантовими розмірами (період сумірний з довжиною хвилі електрона) відносять природні структури — кристалічні ґрати твердих тіл, а також штучні — напівпровідникові надґрати (НГ). Кристалічні ґрати утворені періодично розташованими в їх вузлах атомами або молекулами. НГ — періодично-шаруваті структури, які складаються з шарів напівпровідників завтовшки 10...100 нм і відмінною шириною забороненої зони. Ці структури становлять основу наноелектронних напівпровідникових пристроїв обробки сигналів [1].

Особливості проектування наноелектронних пристроїв пов'язані з аналізом і синтезом НГ з складним потенціалом і заданими характеристиками. Традиційно для моделювання квантово-механічних структур використовують матричну модель зшиванням рішень в середовищах з різними властивостями. В [2] введено поняття імпедансу для квантово-механічної хвилі. Ця модель вносить важливий фізичний зміст, має значну спільність, як заснована на імпедансі, дозволяє скористатись апаратом теорії ліній передачі й спростити моделювання. Незважаючи на явні переваги, такий підхід до вирішення квантово-механічних задач не одержав поширення.

У даній роботі імпедансна модель використана для моделювання типових двобар'єрних структур, у яких спостерігається резонансне тунелювання електронів (РТЕ). РТЕ лежить в основі функціонування наноелектронних пристроїв обробки сигналів.

Особливості конструцій та характеристик надґрат

НГ — періодичні багат шарові структури, в яких періодичний потенціал кристалічних ґрат додатково просторово модульований потенціалом цієї структури. Ширина потенціальних бар'єрів НГ — тунельна, що забезпечує свободу руху електронів по нормалі до шарів. У НГ типу квантових проводів рух електронів обмежений у двох напрямках і вільний у третьому. У НГ типу квантових точок досягається тривимірна локалізація носіїв струму. Найбільш широке використання має НГ на основі шарів $GaAs$ і $Al_xGa_{1-x}As$. Ширина забороненої зони $AlGaAs$ збільшується зі збільшенням x . Потенціал такої НГ сформований за рахунок різниці у ширині заборонених зон її шарів: вузькозонні шари $GaAs$ розміщені між широкозонними $AlGaAs$ з утворенням прямокутних квантових ям для електронів і дірок.

Штучна періодичність НГ радикально змінює електронні властивості напівпровідника. Внаслідок тунелювання електронів крізь періодичні потенціальні бар'єри, утворені шарами *AlGaAs*, зонна діаграма однорідного напівпровідника розщеплюється на міні-зони. Положення і ширина міні-зон залежать від співвідношення товщин напівпровідникових шарів.

За рахунок сумірності періода НГ і довжини електронної хвилі електрони виявляють хвильові властивості (мають місце квантові розмірні ефекти). У поодинокій потенціальній ямі електрон може знаходитися лише на одному з власних рівнів ями, які відповідають резонансу електронної хвилі (як і електромагнітної в резонаторі). У двобар'єрній структурі власні рівні потенціальної ями, розміщеної між бар'єрами, відповідають РТЕ, при якому коефіцієнт проходження дорівнює одиниці. Цей ефект є базовим для формування міні-зон. Він пояснюється компенсацією хвильових неоднорідностей на границях середовищ з різними властивостями полем стоячої хвилі. Таким чином, падаюча хвиля проходить ці межі як однорідне середовище.

Імпедансна модель для квантово-механічних структур

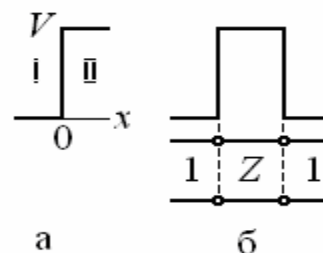
Для визначення квантово-механічного імпедансу розглянемо проходження електроном границі між середовищами I і II з різними потенціалами. Розташуємо границю між середовищами з потенціальною сходинкою заввишки V в точці $x=0$ (рис. 1а). У середовищі I хвильова функція визначається виразом

$$\Psi = \exp(ikx) + r\exp(-ikx), \quad (1)$$

де $k = \sqrt{2mE}/\hbar$, m — ефективна маса електрона, E — енергія електрона; r — коефіцієнт відбиття. Перший доданок в (1) відповідає падаючій хвилі, другий — відбитій. Згідно [2] $r = (1-\rho)/(1+\rho)$, де $\rho = \sqrt{m_1(E-V)/m_{II}E}$, m_I і m_{II} — ефективні маси електрона відповідно в середовищах I і II.

Рис. 1.

Потенціальна сходинка (а) та симетричний потенціальний бар'єр і лінія передачі для його моделювання (б): 1 і Z — нормовані імпеданси зовнішнього середовища і бар'єра.



Вираз (1) аналогічний формулі для струму в лінії передачі з розподіленими параметрами (довгій лінії). При цьому $\rho = Z_H/Z$, де Z_H — імпеданс навантаження; Z — хвильовий імпеданс лінії. З порівняння виразів для коефіцієнта відбиття у випадку квантово-механічної і електромагнітної хвиль витікає, що квантово-механічний імпеданс $Z \sim \sqrt{(E-V)/m}$. Абсолютне значення квантово-механічного імпедансу визначається з рівності густини потоку імовірності в квантово-механічному середовищі і середньої потуж-

ності в еквівалентній лінії передачі: $Z=2\sqrt{2(E-V)/m}$.

В рамках імпедансної моделі аналіз квантово-механічної структури зводиться до аналізу неоднорідної лінії передачі. Оскільки характеристики відбиття і проходження залежать не від абсолютних значень імпедансу середовищ, а від їх відношення, використання нормованого імпедансу дозволяє спростити моделювання.

Аналіз неоднорідної лінії передачі виконується послідовним розрахунком нормованого вхідного опору, починаючи з крайнього правого відрізка. Нормований вхідний опір i -го відрізка визначається формулою

$$Z_{\text{вхі}} = Z_i \frac{Z_{\text{вхі-1}} - Z_i \text{th}(ik_i l_i)}{Z_i - Z_{\text{вхі-1}} \text{th}(ik_i l_i)}, \quad (2)$$

де $Z_i = \sqrt{m(E-V_i)m_i E}$; m — ефективна маса електрона в зовнішньому середовищі; $Z_{\text{вхі-1}}$ — вхідний опір $i-1$ відрізка; $k_i = \sqrt{2m_i(E-V_i)}/\hbar$; l_i — довжина відрізка. Індекс i відноситься до параметрів i -го відрізка.

Коефіцієнт відбиття від структури визначається як

$$R = \frac{1 - Z_{\text{вх}}}{1 + Z_{\text{вх}}}, \quad (3)$$

де $Z_{\text{вх}}$ — вхідний опір еквівалентної лінії передачі. Модуль коефіцієнта проходження дорівнює

$$T = \sqrt{1 - |R|^2}. \quad (4)$$

Вирази (2) — (4) лежать в основі моделювання НГ. Програму моделювання розроблено в середовищі *MathCAD*.

Моделювання двобар'єрних структур

На рис. 2 зображено базову для наноелектроніки симетричну двобар'єрну структуру з прямокутною потенціальною ямою.

Ефективна маса електрона дорівнює $(0,067+0,083x)m_0$, де m_0 — маса спокою електрона. Значення V і x пов'язані співвідношеннями [3]:

$$V = \begin{cases} 0,75 x, & x < 0,45 ; \\ 0,75 x + 0,69 (x - 0,45)^2, & x > 0,45 . \end{cases}$$

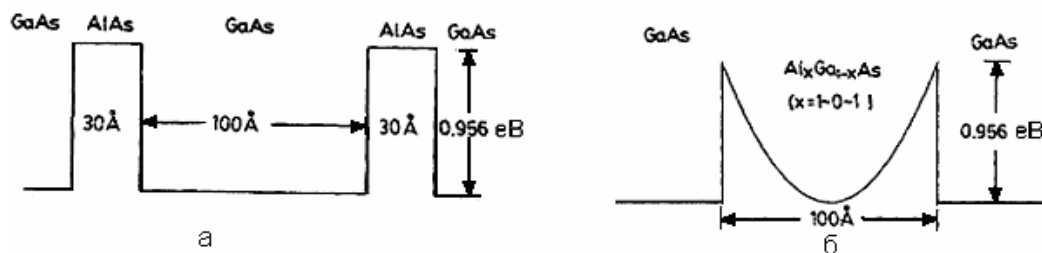


Рис. 2. Двобар'єрні структури з прямокутною (а) і з параболічною (б) ямою

Еквівалентна неоднорідна лінія передачі для двобар'єрної структури з прямокутною потенціальною ямою складається з трьох відрізків. На рис. 3 крива 1 відповідає характеристиці коефіцієнта проходження такої структури, розрахованої згідно імпедансної моделі. Характеристика співпадає з приведеною в [3], розрахованою матричним методом. Структура має п'ять власних значень енергії, кожне з яких відповідає РТЕ.

Для моделювання параболічної ями в двобар'єрній структурі, зображеній на рис. 2б, використовується кусочно-лінійна апроксимація. Кількість відрізків — 20. Крива 2 на рис. 3 відповідає розрахованій характеристиці коефіцієнта проходження двобар'єрної структури з такою ямою. Характеристика співпадає з приведеною в [3], розрахованою матричним методом. Структура має чотири власних значення енергії, при яких відбувається РТЕ.

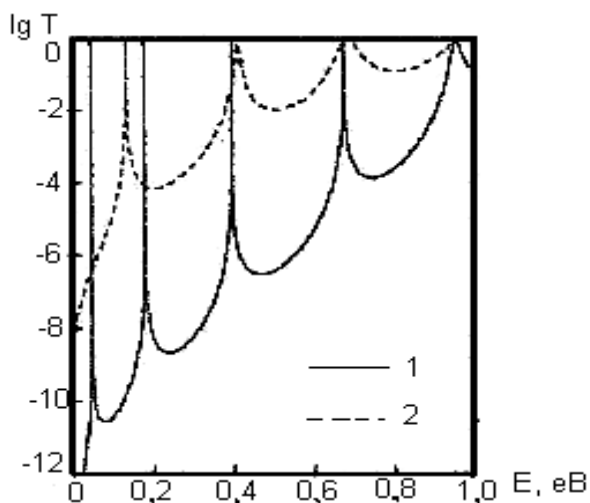


Рис.3. Залежності коефіцієнта проходження двобар'єрних структур 1 - з прямокутною ямою; 2 - з параболічною ямою.

Висновки

Імпедансна модель дозволяє виконати аналіз квантово-механічних структур з складною залежністю потенціалу. У порівнянні з матричною моделлю значно зменшується обсяг розрахункових програм - відпадає необхідність роздільно розглядати тунелювання і надбар'єрне проходження електронів. Цей метод дає такі ж результати, як і традиційно використовувана матрична модель, що дозволяє виконати тестові перевірки моделювання. Імпедансна модель може бути використана для проектування наноелектронних структур з залежностями потенціалу, який необхідний для досягнення заданих характеристик пристроїв.

Література

1. Нелин Е.А. Нанoeлектронные устройства на основе сверхрешеток // Вестник Киевского политехнического института (радиотехника). 1993. Вип.30. С. 3—15.
2. Khondker A. N., Khan M. R., Anwar A. F. M. Transmission line analogy of resonance tunneling phenomena: The generalized impedance concept // J.Appl.Phys. 1988. V.63, N. 10. P. 5191—5193.
3. Ando Y., Itoh T. Calculation of transmission tunneling current across arbitrary potential barriers // J.Appl.Phys. 1987. V. 61, N 4. P. 1497—1502.

Ахмедов Р.С., Нелин Е.А.

Импедансная модель для нанoeлектронных структур

Рассмотрено использование импедансной модели для моделирования нанoeлектронных квантово-механических структур. Иллюстрируется эффективность такого подхода.

Akhmedov R.S., Nelin E.A.

Impedance model for nanostructures

The application of the impedance model for nanoelectronic quantum-mechanical structures modelling is described. Characteristics illustrating the efficiency of the model are presented.