



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра радіоконструювання та виробництва радіоапаратури

Нелін Є. А., Ляшок А. В.

«Моделювання мікро- та наноструктур»

Навчальний посібник

Рекомендовано вченою радою радіотехнічного факультету

Київ
2016

УДК 621.3.049

Моделювання мікро- та наноструктур: навчальний посібник для студентів радіотехнічного факультету спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка, спеціалізація «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки» / Уклад.: Є.А. Нелін, А.В. Ляшок — К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2016. — 76 с.

Гриф надано вченою радою радіотехнічного факультету
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
(Протокол № 11/2016 від 28 листопада 2016)

Рекомендовано навчально-методичною комісією радіотехнічного факультету
(Протокол № 11/2016 від 25 листопада 2016)

Навчальне видання

Моделювання мікро- та наноструктур
Навчальний посібник
для студентів радіотехнічного факультету,
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка,
спеціалізація «Інтелектуальні технології мікросистемної
радіоелектронної техніки

Укладач: *Нелін Євгеній Андрійович, док. тех. наук., професор*
Ляшок Аліна Вікторівна, канд. тех. наук., асистент

Рецензент: *Мірських Георгій Олександрович, канд. тех. наук., доцент*

Відповідальний редактор: *Нелін Євгеній Андрійович, док. тех. наук., професор*

ЗМІСТ

ВСТУП

1. Електронний дидактичний демонстраційний матеріал
2. Методичні вказівки до виконання практичних робіт
3. Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи з переліком тем

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

ВСТУП

Сучасна проблематика радіотехніки пов'язана з інтенсивним розвитком інформаційно-телекомунікаційних радіотехнологій на основі новітніх пристроїв оброблення сигналів, мікро- та наносистемної радіоелектронної техніки. Пристрої оброблення сигналів нового покоління в значній мірі базуються на штучних хвильових бар'єрних структурах, до яких належать одно- та двобар'єрні, одно- та двоямні структури, кристалоподібні структури (КС) — напівпровідникові надграти для квантово-механічних хвиль, електромагнітні та фотонні кристали для електромагнітних хвиль радіо та оптичного діапазонів, фононні кристали для акустичних хвиль.

У бар'єрних структурах особливу значимість має резонансне проходження, особливо тунелювання, хвиль з коефіцієнтом проходження, що дорівнює одиниці [1]. Оскільки при звичайному тунелюванні коефіцієнт проходження надзвичайно малий, комбінація режимів резонансного й звичайного тунелювання забезпечує максимальну різницю високого і низького рівнів при фільтрації або керуванні сигналами. КС, як і кристали, характеризуються зонними спектральними властивостями з максимальним коефіцієнтом проходження в дозволених зонах і мінімальним в заборонених.

До важливих резонансних ефектів відноситься також резонансна локалізація хвиль, що відбувається в дисперсивному середовищі, обмеженому з двох сторін напівнескінченними реактивними середовищами (терміни «дисперсивне» і «реактивне» середовище відповідають [2]). У реактивному середовищі хвильове число уявне, у результаті хвиля не поширюється, її амплітуда експоненційно (без розсіювання енергії) зменшується. Як резонансне проходження, так і резонансна локалізація обумовлені формуванням у структурі резонансної стоячої хвилі.

У різних технічних областях широко використовують двобар'єрні структури (ДБС). Квантово-механічна ДБС із резонансним тунелюванням електронів [1] — базова структура наноелектроніки. ДБС лежить в основі резонансного тунельного діода з N -подібною вольт-амперною характеристикою й, відповідно, від'ємним диференціальним опором [3]. Резонансне тунелювання

крізь ДБС використовують також для електромагнітних [4, 5] та акустичних [6] хвиль. На основі ДБС конструюють оптичні мікрорезонатори [1, 7].

Значний інтерес становить квантово-механічна двоямна структура (ДЯС) із двоямним потенціалом [8, 9]. ДЯС використовується для моделювання квантово-механічних систем з двома станами (two-state systems [10]). У зв'язку з бурхливим розвитком квантової інформатики ДЯС має особливе значення, оскільки її нижній і верхній стани (власні значення енергії) аналогічні значенням «0» і «1» біта в класичній інформатиці.

Традиційно бар'єрні задачі вирішують зшиванням рішень на границях з умов безперервності функції, що характеризує хвилю, і її похідної [1]. У підході на основі хвильового імпедансу середовища (зокрема, для квантово-механічного [11, 12]) граничні умови враховано автоматично, що суттєво спрощує моделювання; у багатьох випадках рішення має аналітичний характер. У цьому підході для аналізу структур використовується апарат теорії ліній передачі, що дозволяє об'єднати моделювання структур на основі бар'єрів і ям (наприклад, потенціальних ям для квантово-механічних хвиль).

Для прикладної мікро- та наноелектроніки значну актуальність мають моделі хвильових мікро- та наноструктур, що дозволяють безпосередньо перейти до синтезу, аналізу й конструюванню пристроїв оброблення сигналів на основі математичного апарата радіотехнічних кіл.

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. Крауфорд Ф. Волны / Ф. Крауфорд. — М.: Наука, 1974. — 528 с.
3. Nguyen H. S. Realization of a double-barrier resonant tunneling diode for cavity polaritons / H. S. Nguyen, D. Vishnevsky, C. Sturm et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2013. — Vol. 110. — 236601.
4. Seo K. C. Spin filtering in an electromagnetic structure / K. C. Seo, G. Ihm, K.-H. Ahn et al. // *J. Appl. Phys.* — 2004. — Vol. 95, No. 11. — P. 7252–7254.
5. Hayashi S. Observation of resonant photon tunneling in photonic double barrier structures / S. Hayashi, H. Kurokawa, H. Oga // *Opt. Rev.* — 1999. — Vol. 6, No. 3. — P. 204–210.
6. Qiu C. Mode-selecting acoustic filter by using resonant tunneling of two-dimensional double phononic crystals / C. Qiu, Z. Liu, J. Mei et al. // *Appl. Phys. Lett.* — 2005. — Vol. 87, No. 10. — P. 104101–104103.
7. Городецкий М. Л. Основы теории оптических микрорезонаторов / М. Л. Городецкий — М.: МГУ, 2010. — 203 с.
8. Basdevant J.-L. Lectures on quantum mechanics / J.-L. Basdevant — N. Y.: Springer, 2007. — 308 p.
9. Jelic V. The double well potential in quantum mechanics: a simple, numerically exact formulation / V. Jelic, F. Marsiglio // *Eur. J Phys.* — 2012. — Vol. 33, No 6. — P. 1651–1666.
10. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике. Квантовая механика (вып. 8, 9) / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. — М: Мир. — 1978. — 524 с.
11. Khondker A. N. Transmission line analogy of resonance tunneling phenomena: The generalized impedance concept / A. N. Khondker, M. Rezwan Khan, A. F. M. Anwar // *J. Appl. Phys.* — 1988. — Vol. 63, No. 10. — P. 5191–5193.
12. Нелин Е. А. Импедансная модель для «барьерных» задач квантовой механики / Е. А. Нелин // *УФН.* — 2007. — Т. 177, №3. — С. 307–313.

13. Korvink J., Haber O. MEMS a practical guide to design, analysis, and applications / J. Korvink, O. Haber. — N. Y.: William Andrew, Inc., Springer, 2006. — 965 p.

УДК 621.3.049

Моделювання мікро- та наноструктур: навчальний посібник для студентів радіотехнічного факультету спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка, спеціалізація «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки» / Уклад.: Є.А. Нелін, А.В. Ляшок — К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2016. — 76 с.

Гриф надано вченою радою радіотехнічного факультету
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
(Протокол № 11/2016 від 28 листопада 2016)

Рекомендовано навчально-методичною комісією радіотехнічного факультету
(Протокол № 11/2016 від 25 листопада 2016)

Навчальне видання

Моделювання мікро- та наноструктур
Навчальний посібник
для студентів радіотехнічного факультету,
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка,
спеціалізація «Інтелектуальні технології мікросистемної
радіоелектронної техніки

Укладач: *Нелін Євгеній Андрійович, док. тех. наук., професор*
Ляшок Аліна Вікторівна, канд. тех. наук., асистент

Рецензент: *Мірських Георгій Олександрович, канд. тех. наук., доцент*

Відповідальний редактор: *Нелін Євгеній Андрійович, док. тех. наук., професор*

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
03056, Київ, вул. Політехнічна, 12, корп. 17
Тел./факс (044) 204-92-93