

# ФІЗИЧНІ, ХІМІЧНІ ТА ІНШІ ЯВИЩА, НА ОСНОВІ ЯКИХ МОЖУТЬ БУТИ СТВОРЕНІ СЕНСОРИ

---

## PHYSICAL, CHEMICAL AND OTHER PHENOMENA, AS THE BASES OF SENSORS

---

PACS 71.35; 73.20; 73.40  
УДК 535.34

### СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СПЕКТРОСКОПІЇ НАНОСИСТЕМ В УКРАЇНІ

*Сергій І. Покутній, Наталя М. Корсікова*

Іллічівський інститут Одеського національного університету імені І.І. Мечникова,  
вул. Данченка, 17а, м. Іллічівськ, Одеської обл., 68002, Україна  
тел: 380 (04868) 4-30-76, факс: 380 (04868) 6-01-54  
E-mail: pokutnyi\_sergey@inbox.ru

#### Анотація

### СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СПЕКТРОСКОПІЇ НАНОСИСТЕМ В УКРАЇНІ

*Сергій І. Покутній, Наталя М. Корсікова*

Аналізується сучасний стан та перспективи розвитку спектроскопії напівпровідникових наносистем. Наводяться проблеми теоретичної спектроскопії електронних та екситонних станів квазінульвимірних наносистем, які потребують подальшого розвитку. Досліджується механізм упровадження наносистемних технологій у сучасних умовах розвитку економіки України.

**Ключові слова:** напівпровідникові квантові точки, спектроскопія, екситонні та електронні стани, механізм наносистемних технологій, економічний розвиток.

#### Abstract

### THE PRESENT STATE OF SPECTROSCOPY AND THE PERSPECTIVES OF ITS DEVELOPMENT BY NANOSYSTEMS IN UKRAINE

*Sergiy I. Pokutnyi, Nataly N. Korsikova*

The present state and the perspectives of the development of the spectroscopy of semiconductor nanosystems are analysed. The problems of theoretical spectroscopy of electron and exciton states of quasin-zero-dimensional nanosystems requiring further development are provided. The mechanism of introduction of nanosystem technologies into the current economy of Ukraine is investigated.

**Keywords:** semiconductor quantum dots, spectroscopy, exciton and electron states, mechanism nanosystems technology, economic development.

## Анотація

## НАСТОЯЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СПЕКТРОСКОПИИ НАНОСИСТЕМ В УКРАИНЕ

Сергей И. Покутний, Наталья Н. Корсікова

Анализируется настоящее состояние и перспективы развития спектроскопии полупроводниковых наносистем. Приводятся проблемы теоретической спектроскопии электронных и экситонных состояний квазинульмерных наносистем, которые требуют дальнейшего развития. Исследуется механизм внедрения наносистемных технологий в настоящих условиях развития экономики Украины.

**Ключевые слова:** полупроводниковые квантовые точки, спектроскопия, экситонные и электронные состояния, механизм наносистемных технологий, экономическое развитие.

1. Інтенсивні дослідження квазинульвимірних напівпровідникових структур стимулюються як відкриттям ряду принципово нових фундаментальних явищ, так і наявністю великих прикладних можливостей (елементна база нанооптоелектроніки, нанофотоніки, лазерної техніки тощо). Тому нині широко вивчаються фізичні явища у низьковимірних системах, розробляються фізичні та хімічні методи дослідження та діагностики [1-9]. Сьогодні мікро- і нанооптоелектроніка вийшла на нанометровий рівень і інтенсивно розвивається далі. Світове визнання здобули своїми роботами українські наукові школи з експериментальної і теоретичної фізики низьковимірних напівпровідникових систем, засновані І.М. Ліфшицем, В.М. Аграновичем, В.Є. Лашкар'євим, М.П. Лисицею, В.Г. Литовченком, М.Ф. Дейченем, М.Д. Глинчуком, А.П. Шпаком, С.І. Пекарем, М.Г. Находкіним, А.Г. Наумовцем, М.С. Бродиним, В.І. Сугаковим, М.В. Ткачем, Е.А. Пашицьким, І.В. Блонським.

Оптичні та електрооптичні властивості подібних гетерофазних систем значною мірою визначаються енергетичним спектром просторово обмеженої електроннодіркової пари (екситона) (українські фізики М.Ф. Дейген, М.Д. Глинчук [10] (1963), М.П. Лисиця, М.Р. Куліш [11] (1966), В.М. Агранович [12] (1973), В.Г. Литовченко [13] (1976), С.І. Покутній [14,15] (1984), В.М. Ткач [16] (1989)). При цьому енергетичний спектр квазічастинок залежить від радіуса  $a$  напівпровідникової квантової точки (КТ). За цих умов вплив поверхні поділу КТ-діелектрична матриця може спричинити розмірне квантування енергетичного спектра електрона і дірки в КТ, пов'язане як з просторовим обме-

женням області квантування, так і з поляризаційною взаємодією носіїв заряду з поверхнею КТ [1-9, 14-16].

Дискретність енергетичного спектра електронів і дірок в КТ використовується для створення оптичних нанолазерів та інших приладів з високою температурною стабільністю частоти генерації [1-9]. Розміри КТ  $a$  повинні бути в діапазоні кількох нанометрів, щоб енергетичні зазори, які виникають між квантоворозмірними рівнями електронів і дірок  $\Delta E_{e(h)}$ , були порядку кількох  $kT_0$  при кімнатній температурі  $T_0$  (де  $k$  — постійна Больцмана). Це дає можливість усунути основну проблему сучасної мікро- і нанооптоелектроніки — “розмивання” рівнів носіїв заряду в енергетичному інтервалі порядку  $kT$ , яке призводить до деградації властивостей приладів у разі підвищення робочої температури  $T$  [1-4].

Основна причина кардинальної різниці фізичних властивостей напівпровідникових квазинульвимірних систем від властивостей напівпровідникових матеріалів обумовлюється тим, що внаслідок просторового обмеження та нанорозмірів КТ вирішальну роль відіграє розмірне квантування спектрів квазічастинок, зокрема, екситонів [1-9].

Можливість, змінюючи радіус  $a$  КТ, варіювати енергетичним спектром носіїв заряду  $E_{nl}^{e(h)}(a)$  (де  $n, l$  — головне і орбітальне квантові числа носіїв заряду), який до того ж має дискретну структуру, дає змогу розв'язати загальну проблему керування оптичними фундаментальними параметрами в квазинульвимірних структурах і в приладах на їх основі: шириною забороненої зони, ефективними масами носіїв і їх рухливостями, показником заломлення

та коефіцієнтом поглинання світла тощо [1-9, 14-20].

Такі гетероструктури привертають до себе увагу внаслідок їх нелінійних оптичних властивостей і перспектив застосування в нанооптоелектроніці та в квантовій електроніці (зокрема, як нових матеріалів, перспективних для створення елементів, що керують оптичними сигналами в інжекційних напівпровідникових нанолазерах і в оптичних бістабільних елементах та транзисторах) [1-9, 19, 20].

Прогрес у вивченні наносистем тісно пов'язаний з удосконаленням методів оптичної і автоіонної, тунельної, атомносилової спектроскопії, а також із розвитком теоретичних методів (зокрема, методів комп'ютерного моделювання).

Для визначення актуальних напрямів експериментальних досліджень наноструктур необхідно, хоча б у початковому наближенні, теоретично описати властивості досліджуваних об'єктів, щоб цілеспрямовано виявляти нові фізичні явища [1-9]. Оскільки оптичні властивості КТ визначаються переважно дискретними енергетичними спектрами квазічастинок [1-9, 14-20], то основним завданням теорії на даному етапі є дослідження впливу розмірного квантування, різноманітних взаємодій (кулонівської, поляризаційної, електрон- і екситон-фононої, обмінної, спин-орбітальної і т.п.) та електричного і магнітного полів на спектри електронів, дірок та екситонів [1-9, 14-20].

2. Зазначимо деякі проблеми у дослідженні наносистем, які потребують, на наш погляд, подальшого розвитку експериментальними та теоретичними методами [1-9, 14-20]:

1. Більшість підходів до опису фізичних властивостей напівпровідникових КТ умовно можна поділити на дві групи [1-5]: 1) опис з позиції твердого тіла в рамках зонної теорії в її одноелектронному наближенні [1-5]; 2) опис з позиції окремого атома у рамках квантово-хімічного кластерного підходу, в якому КТ вважають за велику молекулу [1].

У рамках першого підходу КТ розглядали як нанокристал сферичної форми, що має періодичну кристалічну структуру. Квазічастинкам (електрону, дірці та екситону), які рухались у КТ приписували певну ефективну масу, як і в масивному монокристалі. При цьому ефект розмірного квантування пояснювався рухом квазічастинки у потенціальній ямі нескінченної глибини, якою була КТ [1-5].

Питання про коректність такого підходу, межі його застосовності з боку малих розмірів  $a$  КТ та зміну параметрів монокристала при переході до розмірів  $a$  квантових масштабів залишаються неповністю розв'язаними.

2. У рамках простої моделі квазінульвимірної системи показано [1, 5, 9], що навіть для КТ CdS з малими радіусами  $a = 1,5$  нм кінетична енергія електрона дає у спектр екситону  $E_{n_e, 0, 0}^{t_h}(a)$  (де  $n_e, t_h$  — головні квантові числа електрона і дірки) внесок за порядком величини сумірний зі внесками, які вносять у спектр екситону енергії поляризаційної  $\bar{U}_{pol}^{n_e, 0, 0}(a)$  і кулонівської  $\tilde{V}_{eh}^{n_e, 0, 0, t_h}(a)$  взаємодій. В зв'язку з цим подання спектра екситону в КТ з радіусами  $a < a_{ex}$  (де  $a_{ex}$  — борівський радіус екситона в масивному напівпровіднику) лише виразом для кінетичної енергії електрона  $T_{nl}^e(a)$  є не зовсім виправданим. Актуальним було б перевірити співвідношення між цими внесками, що входять у спектр екситону у КТ, яка містять не лише напівпровідниковий матеріал CdS.

3. Вирази, що описують спектри квазічастинок  $E_{nl}^{e(h)}(a)$  у КТ, значною мірою залежать від виду функції розподілу КТ за радіусами  $a$  [1-9]. Важливо було б перевірити на експерименті, які функції розподілу (крім функції Ліфшиця-Слезова) описують розподіл КТ за радіусами  $a$ . Теоретичними методами актуально було б з'ясувати, яким чином вирази, що описують енергетичні спектри квазічастинок  $E_{nl}^{e(h)}(a)$  у КТ, залежать від таких функцій розподілу.

4. Проблема коректного врахування взаємодії носіїв заряду з самоіндукованим полем поляризації на поверхні поділу КТ-діелектрична матриця залишається актуальною і потребує подальших теоретичних досліджень [1, 2, 14-16]. Зокрема, досі ще не розв'язані задачі щодо усунення сингулярності кулонівського типу в енергії поляризаційної взаємодії  $U(r_e, r_h, a)$  квазічастинок зі сферичною поверхнею КТ при  $r_e, r_h \rightarrow a$  (де  $r_e, r_h$  — відстань електрону і дірки від центру КТ). Також не розв'язана задача, яка б уможливила урахувати плавний перехід діелектричної проникності  $\varepsilon(r)$ , як функції координати  $r$ , через поверхню поділу “КТ-діелектрична матриця” при розрахунках спектрів квазічастинок у квазінульвимірних системах [1].

5. У теоретичних розрахунках спектрів квазічастинок  $E_{nl}^{e(h)}(a)$  у рамках моделі зі скінчен-

ною глибиною потенціальної ями КТ виникає проблема врахування ефективних мас квазічастинок, як функцій їх координат ( $m_e = m_e(r_e)$  і  $m_h = m_h(r_h)$ ). Ця задача є ще й досі не розв'язаною для монотонно плавних функцій  $m_e(r_e)$  і  $m_h(r_h)$  [2].

3. Прогрес у дослідженні наносистем тісно пов'язаний з упровадженням інноваційної моделі розвитку вітчизняної економіки та удосконаленням відповідних організаційно-економічних механізмів використання інноваційних технологій в умовах реальної господарської діяльності.

Не дивлячись на низку прийнятих законодавчих актів в сфері регулювання інноваційної діяльності (закон України “Про основи державної політики в сфері науки і науково-технологічної діяльності”, концепція науково-технологічного розвитку України, закони України: “Про інноваційну діяльність”, “Про пріоритетні напрямки інноваційної діяльності в Україні”, “Про основи національної безпеки” та інші), українська економіка сьогодні характеризується низькими результативними показниками інноваційної активності при значному науковому потенціалі. Сьогодні втрачаються можливості розвивати належним чином наукові дослідження, оперативно впроваджувати їх результати у практику, реагувати на світові науково-технологічні досягнення і ефективно використовувати їх в національних інтересах [21].

Національні інтереси України потребують негайних заходів, які спрямовані не тільки на збереження, але і на розвиток науково-технологічного потенціалу, забезпечення його ефективного використання для подолання кризових явищ в економічному та соціальному розвитку. Інноваційна політика держави повинна бути направлена на розширення внутрішнього ринку технологій (в тому числі і нанотехнологій, які визначені, як один з пріоритетних напрямків) і стимулювання участі, як підприємців, так і розробників інновацій. При формуванні такої політики повинні бути враховані основні тенденції і закономірності світового ринку технологій і, безпосередньо, базових технологій інноваційної діяльності, до яких відносяться і нанотехнології [21].

В основу ефективного механізму впровадження інноваційної моделі має бути покладений принцип сполучення державної централі-

зованої політики з самостійністю підприємств в управлінні науково-технологічним розвитком. При цьому основними елементами державної складової у науково-технологічному розвитку, на наш погляд, повинні бути [22]:

1. Пряме фінансування початкових стадій інноваційного циклу (фундаментальні і пошукові дослідження, пріоритетні науково дослідні та конструкторські роботи), коли витрати помірні, а ризики найбільш високі.

2. Удосконалення механізму утворення і використання позабюджетних джерел для реалізації науково-технологічних проектів.

3. Стимулювання і страхування інвестицій недержавних фінансових структур.

4. Підтримка і стимулювання інвесторів, що вкладають кошти в наукомістке високотехнологічне виробництво.

5. Розвиток інноваційної ринкової інфраструктури.

6. Створення механізму формування єдиного поля науки та нанотехнології.

## Література

1. Покутній С.И. Теория экситонов в квазинульмерных полупроводниковых системах. — Одесса: Астропринт, 2003.
2. Ткач М.В. Квазічастинки у наногетеросистемах. Квантові точки та дроти. — Чернівці: Чернівецький національний університет, 2003.
3. Шпак А.П., Покутній С.І., Куницький Ю.А. Діагностика наносистем. Напівпровідникові квазінульвимірні системи. — Київ: Інститут металофізики НАНУ, 2004.
4. Шпак А.П., Покутній С.И., Куницкий Ю.А. Спектроскопия электронных и экситонных состояний в низкоразмерных системах. — Киев: Академперіодика, 2005.
5. Шпак А.П., Покутній С.И. // УФМ. — 2005. — 6, № 2. — С. 105-134. [Progr. Phys. Metals. — 2005. — 6, № 2. P. 105-134].
6. Шпак А.П., Покутній С.І., Куницький Ю.А. // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. — 2005. — 3, № 3. — С. 667-690.
7. Шпак А.П., Покутній С.І., Куницький Ю.А. // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. — 2005. — 3, № 4. — С. 877-892.
8. Шпак А.П., Покутній С.И., Куницкий Ю.А. Коллоидно-химические основы наноауки. — Киев: Академперіодика, 2005, гл. IX.
9. S.I. Pokutnyi. // Ukr. J. Phys. Rev. — 2006. — 3, № 1. — P. 46-69.
10. Дейген М.Ф., Глинчук М.Д. // ФТТ. — 1963. — 5, № 11. — С. 3250-3258.

11. Лисица М.П., Кулиш Н.Р., Геєц В.И., Коваль П.Н. // Опт. и спектр. — 1966. — **20**, № 3. — С. 508-520.
12. Агранович В.М., Лозовик Ю.Е. // Письма в ЖЭТФ. — 1973. — **17**, № 4. С. 209-211.
13. Litovchenko V.G. // Thin Sol. Films. — 1976. — **36**, № 1. — P. 205-213.
14. Pokutnyi S.I. Preprint Akad. Sc. USSR, Institute spectroscopy, № 1. — Moscow, 1984.
15. Покутний С.И. // ФТТ. — 1985. — **27**, № 1. — С. 48-56. [Phys. Sol. Stat. — 1985. — **27**, № 1. — P. 27-35].
16. Ткач Н.В., Головацкий В.А. // ФТТ. — 1990. — **32**, № 8. — С. 2512-2513.
17. S.I. Pokutnyi. // Phys. Lett. A. — 1992. — **168**, № 5, 6. — P. 433-436.
18. S.I. Pokutnyi. // Phys. Lett. A. — 1995. — **203**, № 5, 6. — P. 388-394.
19. S.I. Pokutnyi. // Phys. Lett. A. — 2005. — **342**. — P. 347-350.
20. S.I. Pokutnyi. // J. Appl. Phys. — 2004. — **98**, № 2. — P. 1115-1122.
21. Корсикова Н.М. Научно-технологическое развитие промышленного производства. — Одесса: Астропринт, 2005.
22. Захарченко В.И., Корсикова Н.М. Економіка: проблеми теорії та практики. Збірник наукових праць. — Вип. 137. — Дніпропетровськ: ДНУ. — 2002. — С. 100-108.