

КВАНТОВІ ТОЧКИ В НАПІВПРОВІДНИКАХ, ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В КВАНТОВИХ ОБЧИСЛЕННЯХ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У доповіді розглянуто квантові точки як один із найважливіших об'єктів сучасної нанофізики. Показано, що завдяки просторовому обмеженню руху носіїв заряду в таких структурах виникає дискретний енергетичний спектр, який можна описати простою квантово-механічною моделлю. Особливу увагу приділено практичному застосуванню квантових точок у квантових обчисленнях, зокрема як фізичній основі для реалізації к'юбітів. Наведено основні формули для оцінки енергетичних рівнів, виконано приклад обчислення для типової квантової точки та коротко розглянуто фактори, що обмежують роботу таких систем, насамперед декогеренцію та вплив фононів.

Ключові слова: квантова точка, напівпровідник, к'юбіт, енергетичні рівні, ефективна маса, декогеренція, квантові обчислення.

Abstract

This report considers quantum dots as one of the key objects of modern nanophysics. It shows that spatial confinement of charge carriers leads to a discrete energy spectrum that can be described by a simple quantum-mechanical model. Special attention is paid to the practical use of quantum dots in quantum computing, especially as a physical basis for qubits. The main formulas for estimating energy levels are presented, a numerical example for a typical quantum dot is calculated, and the main factors limiting the operation of such systems, primarily decoherence and phonon interaction, are briefly discussed.

Keywords: quantum dot, semiconductor, qubit, energy levels, effective mass, decoherence, quantum computing.

Вступ

Нанотехнології суттєво змінили сучасну фізику, оскільки на нанометрових масштабах класичні уявлення вже не є достатніми для опису властивостей речовини. Одним із найяскравіших прикладів таких систем є квантові точки — напівпровідникові наноструктури, у яких електрони або дірки обмежені в усіх трьох просторових напрямках. Через це енергія носіїв заряду стає квантуваною, а спектр — дискретним, подібно до спектра окремого атома. Саме тому квантові точки часто називають штучними атомами.

Інтерес до квантових точок зумовлений не лише їхньою фундаментальною фізикою, а й широкими прикладними можливостями. Такі структури використовують в оптоелектроніці, фотоніці та квантових технологіях, де вони можуть слугувати основою для створення к'юбітів — елементів квантового комп'ютера. Для спеціальності комп'ютерні науки ця тема є особливо важливою, оскільки дозволяє побачити, як фундаментальні закони фізики стають базою для технологій наступного покоління.

Разом із тим, практична реалізація квантових точок пов'язана з рядом труднощів. Головною проблемою є декогеренція, тобто втрата квантової узгодженості через взаємодію із зовнішнім середовищем. Найістотнішими джерелами таких втрат є фонони, зарядовий шум, домішки в матеріалі

та температурні коливання. Тому дослідження квантових точок є важливим не лише з теоретичної, а й з інженерної точки зору.

Теоретична частина

Квантову точку в першому наближенні можна розглядати як частинку в обмеженій області простору. Найпростіша модель — кубічна потенціальна яма зі стороною L . Для електрона з ефективною масою m^* енергетичні рівні у такій моделі визначаються формулою:

$$E_{n_x n_y n_z} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^* L^2} (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2),$$

де $n_x, n_y, n_z = 1, 2, 3, \dots$ — квантові числа.

Ця формула показує головну закономірність: чим менший розмір квантової точки, тим більший інтервал між рівнями. Саме залежність $E \sim 1/L^2$ робить нанорозмірні структури настільки чутливими до геометрії. Для напівпровідників важливу роль відіграє також ефективна маса носія заряду. Вона менша за масу вільного електрона, тому енергетичні розриви в реальних матеріалах можуть бути достатньо великими навіть для дуже малих об'єктів.

Для оцінки візьмемо типову квантову точку з матеріалу на основі GaAs, для якого $m^* \approx 0.067m_0$, де m_0 — маса вільного електрона. Нехай сторона точки $L = 10$ нм. Тоді для основного стану $(1, 1, 1)$ маємо:

$$E_{111} = \frac{3\hbar^2 \pi^2}{2m^* L^2}.$$

Підставляючи числові значення, одержуємо:

$$E_{111} \approx 167 \text{ меВ}.$$

Для першого збудженого стану, наприклад $(1, 1, 2)$, отримаємо:

$$E_{112} = \frac{6\hbar^2 \pi^2}{2m^* L^2} \approx 334 \text{ меВ}.$$

Отже, різниця між рівнями становить приблизно:

$$\Delta E = E_{112} - E_{111} \approx 167 \text{ меВ}.$$

Це означає, що квантова точка розміром 10 нм має дуже помітну дискретизацію енергії, яку можна використовувати для керування квантовим станом.

Таблиця 1. Оцінка енергетичних рівнів

Розмір точки L , нм	E_{111} , меВ	E_{112} , меВ	ΔE , меВ
5	668	1336	668
10	167	334	167
20	42	84	42

З таблиці видно, що зменшення розміру точки вдвічі збільшує енергетичні рівні у чотири рази, що повністю відповідає залежності $1/L^2$. Такий результат добре демонструє, чому квантові точки є керованими наноструктурами: змінюючи їхній розмір, можна змінювати електронні властивості матеріалу.

Застосування у квантових обчисленнях

Квантові точки розглядають як одну з платформ для створення к'юбітів. У найпростішому випадку к'юбіт може бути закодований у двох станах електрона: наприклад, у положенні в двох сусідніх точках або в його спіні. Перевага такого підходу полягає в тому, що ним можна керувати за допомогою електричних імпульсів, а сама структура добре сумісна з напівпровідниковими технологіями, які вже широко використовуються в мікроелектроніці.

Однак квантові обчислення вимагають не лише наявності двох станів, а й довгого часу збереження когерентності. Саме тут виникає основна проблема — декогеренція. У квантових точках вона пов'язана насамперед із взаємодією з акустичними та оптичними фононами. Дослідження показують, що навіть у добре контрольованих структурах фононні процеси залишаються важливим каналом втрат квантової інформації.

Порівняння з іншими платформами

Порівнюючи квантові точки з іншими платформами для квантових обчислень, зокрема з надпровідними к'юбітами, можна відзначити як переваги, так і обмеження. Квантові точки добре сумісні з технологіями напівпровідникової мікроелектроніки, що спрощує їх інтеграцію в майбутні квантові схеми. Водночас надпровідні к'юбіти зазвичай легше масштабувати в сучасних лабораторних установках, але вони також дуже чутливі до шумів і потребують складної криогенної інфраструктури. Тому квантові точки залишаються перспективною альтернативою, особливо там, де важлива сумісність із напівпровідниковими технологіями.

Температурний критерій

Щоб зрозуміти, за яких температур квантовий стан може зберігатися, корисно порівняти енергетичний розрив ΔE із тепловою енергією $k_B T$, де k_B — стала Больцмана. Для надійної роботи потрібно, щоб виконувалася умова:

$$k_B T \ll \Delta E.$$

Наприклад, якщо для квантової точки $\Delta E \approx 167$ меВ, то при кімнатній температурі $T \approx 300$ К тепловий масштаб становить близько 25 меВ. Це означає, що теплові збурення ще можуть суттєво впливати на систему. Саме тому квантові точки часто досліджують при низьких температурах, де теплові переходи помітно слабші, а квантові ефекти проявляються чіткіше.

Таблиця 2. Основні фактори декогеренції

Фактор	Вплив на систему
Фонони	Розсіювання енергії та втрата фази
Температура	Прискорення теплових переходів
Домішки	Додатковий зарядовий шум
Електромагнітне оточення	Збурення квантового стану

Таким чином, для практичного використання квантових точок у квантових обчисленнях необхідно не лише створити потрібну наноструктуру, а й забезпечити дуже точний контроль над середовищем, температурою та матеріальними параметрами.

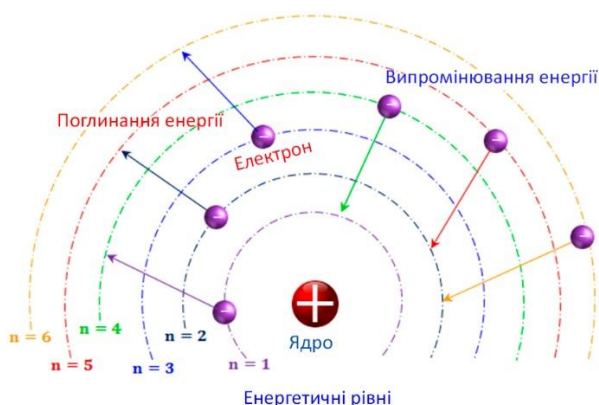


Рисунок 1 --Схема квантової точки з дискретними енергетичними рівнями.

Висновок

Квантові точки є важливим прикладом того, як у нанорозмірних системах класична картина світу змінюється на квантову. У таких структурах через просторове обмеження виникає дискретний спектр енергій, який можна описати простою моделлю частинки в ящику з ефективною масою. Виконаний розрахунок показує, що вже для розмірів порядку 10 нм енергетичні інтервали є достатньо великими, щоб їх можна було використовувати для керування квантовими станами.

Разом із тим, реальна реалізація к'юбітів на основі квантових точок ускладнюється декогеренцією, насамперед через взаємодію з фононами та зовнішнім шумом. Саме тому успіх таких систем залежить від точності виготовлення, якості матеріалу та ефективного охолодження. Отже, квантові точки поєднують фундаментальну фізику та перспективні технології, а їх дослідження має важливе значення для розвитку квантових обчислень і сучасної електроніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Loss, D., DiVincenzo, D. P. Quantum computation with quantum dots [Електронний ресурс] // Physical Review A. – 1998. – Vol. 57, No. 1. – P. 120–126. – Режим доступу: <https://link.aps.org/pdf/10.1103/PhysRevA.57.120>.
2. Semiconductor quantum dot qubits [Електронний ресурс] // MRS Bulletin. – 2013. – Vol. 38, Issue 10. – P. 794–801. – Режим доступу: <https://www.cambridge.org/core/journals/mrs-bulletin/article/semiconductor-quantum-dot-qubits/52F2DCC15822A36A28CF81316BF36C94>.
3. Unavoidable decoherence in semiconductor quantum dots [Електронний ресурс] // Physical Review B. – 2005. – Vol. 72. – 245309. – Режим доступу: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.72.245309>.
4. Phonon Decoherence In Quantum Dot Qubits [Електронний ресурс] // Proceedings of SPIE. – 2005. – Vol. 5815. – P. 53–61. – Режим доступу: <https://stars.library.ucf.edu/scopus2000/3545/>.
5. Quantum Dots and Their Multimodal Applications: A Review [Електронний ресурс] // PMC. – Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5445848/>.
6. Quantum Dots | Edward Flagg | West Virginia University [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://edwardflagg.faculty.wvu.edu/research/quantum-dots>.

Кончатна Яна Володимирівна – студентка групи ІКН-25Б, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: yaana.kochatna@gmail.com

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** — канд. техн. наук, доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Konchatna Yana Volodymyrivna – student of group 1CS-25B, Faculty of Intellectual Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: yaana.kochatna@gmail.com

Supervisor: **Martyniuk Volodymyr V.**— Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of general Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia