

ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ РОБОТИ КУБІТІВ

Вінницький національний технічний університет;

Анотація

Досліджено фізичні принципи функціонування кубітів - базових елементів квантових обчислень. Розглянуто основні матеріальні реалізації: надпровідникові, іонні, фотонні та топологічні кубіти. Проаналізовано явища суперпозиції, запутаності та декогеренції, що лежать в основі квантових алгоритмів. Наведено порівняльну характеристику параметрів різних типів кубітів та обґрунтовано перспективи їх вдосконалення.

Ключові слова: кубіт, квантові обчислення, суперпозиція, запутаність, декогеренція, надпровідність, іонні пастки, фотонні схеми.

Abstract

The physical principles of qubit operation - the basic elements of quantum computing - are investigated. Main material implementations are considered: superconducting, ion, photonic, and topological qubits. Phenomena of superposition, entanglement, and decoherence, which underlie quantum algorithms, are analyzed. A comparative characteristic of parameters of different qubit types is provided, and prospects for their improvement are substantiated.

Keywords: qubit, quantum computing, superposition, entanglement, decoherence, superconductivity, ion traps, photonic circuits.

Вступ

Сучасний етап розвитку інформаційних технологій неможливий без переходу від класичної до квантової парадигми обчислень. Основою цього переходу є кубіт - квантовий біт, здатний реалізувати принцип суперпозиції та запутаності. Розуміння фізичних принципів його роботи є критично важливим для проектування квантових комп'ютерів.

Мета роботи систематизація знань про основні фізичні реалізації кубітів, аналіз їх властивостей та визначення напрямів подальшого розвитку.

Результати дослідження

Основним результатом дослідження є комплексний аналіз фізичних принципів, що лежать в основі роботи різних типів кубітів. Ключовим поняттям є стан суперпозиції, який математично описується вектором у двовимірному гільбертовому просторі за формулою:

$$|a|^2 + |\beta|^2 = 1 \quad (1)$$

Геометрично цей стан зручно представляти за допомогою сфери Блоха, де кожна точка поверхні відповідає унікальному стану кубіта. Ця модель наочно демонструє відмінність від класичного біта, який може приймати лише два значення продемонстровано на рисунку 1.

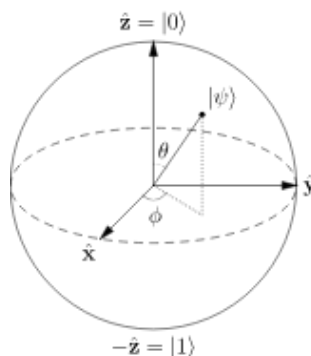


Рис. 1. Сфера Блоха – геометрична модель стану кубіта

Другим фундаментальним явищем є квантова заплутаність. Вона виникає, коли стани двох або більше кубітів стають нероздільними, навіть якщо частини системи рознесені в просторі. Це явище є основою для протоколів квантової криптографії, таких як BB84, та для прискорення обчислень у алгоритмах, як от алгоритм Шора для факторизації чисел.

Третім критичним аспектом є декогеренція - процес втрати квантових властивостей через взаємодію з навколишнім середовищем. Час когерентності є головним лімітуючим фактором для будь-якої фізичної реалізації кубіта. Саме боротьба з декогеренцією визначає архітектурні та матеріальні рішення при створенні квантових процесорів.

Проведений аналіз основних матеріальних платформ показав їх сильні та слабкі сторони. Надпровідникові кубіти, виконані на основі джозефсонівських переходів, є найбільш просунутими у сенсі інтеграції та масштабування. Вони управляються мікрохвильовими імпульсами і можуть бути виготовлені з використанням модифікованих технологій напівпровідникової промисловості продемонстровано на рисунку 2.

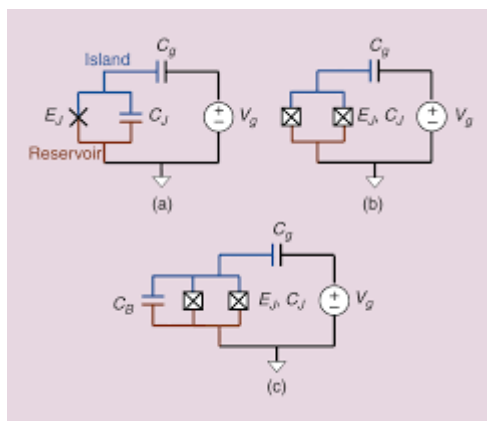


Рис. 2. Схематичне зображення надпровідникового трансмонного кубіта

Іонні кубіти, засновані на утриманні окремих атомів у електромагнітних пастках, демонструють рекордні часи когерентності та високу точність квантових операцій. Однак масштабування таких систем до сотень і тисяч кубітів є технологічно складною задачею.

Фотонні кубіти, що кодують інформацію у поляризації або фазі світла, практично не схильні до декогеренції і є ідеальними для передачі квантової інформації на відстань. Проте створення детермінованої логіки на їх основі залишається викликом.

Топологічні кубіти, реалізація яких пов'язана з неабелевими аніонами (майоранівськими ферміонами), пропонують принципово новий підхід. Вони теоретично захищені від локальних збурень, що обіцяє надзвичайно високу стійкість до помилок. На сьогодні це напрямок знаходиться на ранній стадії експериментальної перевірки що продемонстровано в таблиці 1.

Таблиця 1 - Порівняльна характеристика основних типів фізичних кубітів

Тип кубіта	Час когерентності	Точність операції (Fidelity)	Масштабованість	Ключовий технологічний виклик
Надпровідний	10-100 мкс	99-99.9%	Висока	Придушення шуму, охолодження
Іонний	1-10 с	>99.9%	Обмежена	Ускладнення пасток, контроль середовища
Фотонний	Дуже високий	Висока	Середня	Створення детермінованої логіки
Топологічний (теор.)	Дуже довгий	Теоретично висока	Потенційно висока	Експериментальна демонстрація

Таким чином, кожна з розглянутих платформ має свою нішу: надпровідникові системи - для швидкого масштабування, іонні - для високоточних обчислень і досліджень, фотонні - для комунікацій, топологічні - як перспектива створення стійких до помилок процесорів. Інтеграція різних типів кубітів у гібридних системах є одним із найперспективніших шляхів подолання існуючих обмежень.

Висновки

На основі проведеного дослідження можна зробити висновок, що фізичні принципи роботи кубітів ґрунтуються на фундаментальних явищах квантової механіки — суперпозиції, запутаності та декогеренції. Жодна з існуючих матеріальних реалізацій не є універсально ідеальною, що зумовлює розвиток кількох паралельних технологічних напрямів.

Найближчим часом очікується подальше збільшення кількості кубітів у надпровідникових процесах та покращення їх якості за рахунок нових матеріалів і архітектур. Розвиток іонних та фотонних технологій буде спрямований на інтеграцію у гібридні системи. Довгостроковою перспективою залишається пошук та впровадження топологічних кубітів, здатних забезпечити стійкість до помилок, необхідну для створення повноцінного універсального квантового комп'ютера. Розуміння цих принципів є запорукою успішного проектування майбутніх квантових пристроїв.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Arute, F., Arya, K., Babbush, R., et al. (2019). *Quantum supremacy using a programmable superconducting processor*. Nature, 574(7779), 505–510.
2. Preskill, J. (2018). *Quantum Computing in the NISQ era and beyond*. Quantum, 2, 79.
3. Kjaergaard, M., Schwartz, M. E., Braumüller, J., et al. (2020). *Superconducting qubits: Current state of play*. Annual Review of Condensed Matter Physics, 11, 369–395.
4. Bruzewicz, C. D., Chiaverini, J., McConnell, R., & Sage, J. M. (2019). *Trapped-ion quantum computing: Progress and challenges*. Applied Physics Reviews, 6(2), 021314.
5. Wang, J., Sciarrino, F., Laing, A., & Thompson, M. G. (2020). *Integrated photonic quantum technologies*. Nature Photonics, 14(5), 273–284.
6. Sarma, S. D., Freedman, M., & Nayak, C. (2021). *Majorana zero modes and topological quantum computation*. Nature Reviews Physics, 3(8), 606–621.
7. Google Quantum AI and Collaborators. (2023). *Suppressing quantum errors by scaling a surface code logical qubit*. Nature, 614(7949), 676–681.
8. Blais, A., Grimsmo, A. L., Girvin, S. M., & Wallraff, A. (2021). *Circuit quantum electrodynamics*. Reviews of Modern Physics, 93(2), 025005.

Георгіян Євгеній Геннадійович – студент групи 1KI-25МС, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: zena2zoomcon2661@gmail.com

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

Georgian Yevhenii Hennadiiovych – student of group 1KI-25MS, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: zena2zoomcon2661@gmail.com

Scientific advisor: **Martyniuk Volodymyr Valeriyovych** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia