

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

старшого наукового співробітника відділу радіофізики твердого тіла Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України, доктора фізико-математичних наук, доцента **Майзеліса Захара Олександровича**

на дисертаційну роботу **Рижова Артема Ігоровича**

«Застосування інтерферометрії Ландау-Зінера-Штյюкельберга-Майорани

для контролю динаміки квантових систем»,

яка подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»

(галузь знань 10 «Природничі науки»)

Актуальність теми дисертаційної роботи.

Представлена дисертаційна робота присвячена вивченню динаміки багаторівневих квантових систем та методів її опису і контролю за допомогою інтерферометрії Ландау-Зінера-Штյюкельберга-Майорани та інших методів, таких як адіабатично-імпульсна модель, метод рівнянь балансу. У рамках роботи автор розглядає кубіт, систему двох кубітів без прив'язки до реалізації, кремнієву подвійну квантову точку із долинно-орбітальними ступенями свободи, подвійну квантову точку на основі CMOS транзистора, детектор мікрохвильових фотонів на основі потокового кубіта.

Всі розглянуті теоретичні методи тісно пов'язані з експериментами, мають велике практичне значення для опису та контролю експериментів. Деякі теоретичні результати були підтверджені порівнянням з експериментальними даними, та мають добру узгодженість із ними. Теоретичні методи, що вивчаються у дисертаційній роботі, можуть бути застосовані до великої кількості різноманітних двох- та багаторівневих квантових систем, що є дуже актуальним сучасним напрямком досліджень, вважаючи актуальність експериментів по реалізації квантових комп'ютерів та експериментів, пов'язаних з іншими квантовими технологіями.

Актуальність досліджень дисертаційної роботи А.І. Рижова також підтверджується тим, що статті, на яких базується дисертація, були опубліковані в Physical Review журналах із квартилями Q1.

Таким чином, можна зробити висновок, що дисертаційна робота є актуальною одночасно з теоретичної та практичної точок зору.

Повнота викладу основних результатів дисертаційної роботи в опублікованих наукових працях.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у **трьох наукових журналах** (індексованих SCOPUS та Web of Science) квартиля Q1 та представлені на **десяти міжнародних конференціях**. Кількість опублікованих статей є достатньою для присудження ступеня доктора філософії.

Обґрунтованість і достовірність отриманих результатів.

Необхідно зазначити, що ті теоретичні результати, які було порівняно з експериментальними, мають добре узгодження із ними, що свідчить про правильність і доцільність обраних підходів. Результати роботи можна легко відтворити, базуючись на формулах викладених у роботі. У процесі дослідження автор використовує методи та підходи теоретичної фізики, які пройшли перевірку багатьма науковцями. Результати дисертаційної роботи опубліковано у рецензованих фахових виданнях і апробовано на чисельних міжнародних наукових конференціях.

Структура дисертаційної роботи.

Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох оригінальних розділів з рисунками, висновків і списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 152 сторінки. Робота містить 35 рисунків та список використаних джерел зі 170 найменувань на 17 сторінках.

Кожен розділ є структурованим і завершується висновками.

Анотація дисертації наведена українською та англійською мовами. У ній відображено зміст та основні наукові результати.

У **вступі** автор визначає основні завдання дослідження, мету та стисло описує актуальність вибору теми дослідження, зазначає об'єкт, предмет та методи дослідження. Окрім того, у цьому розділі сформульовано наукову новизну, описано практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про публікації, особистий внесок здобувача та апробацію результатів дисертації.

У **першому розділі** проведено огляд літератури за темою дисертаційної роботи, описано теоретичні та експериментальні основи дослідження. Зокрема були наведені посилання на роботи, що досліджують переходи та інтерферометрію Ландау-Зінера-Штյюкельберга-Майорани (ЛЗШМ), адіабатично-імпульсну модель, експериментальні та теоретичні роботи, пов'язані із реалізацією квантових логічних операцій за допомогою переходів ЛЗШМ, роботи, в яких вивчалися системи з подвійним збудженням, роботи, в яких детально розглядаються деякі певні типи кубітів. Було надано описи квантової системи та динаміки детектора мікрохвильових фотонів на основі потокового кубіта, які використовуються у

четвертому розділі. Наведені роботи присвячені рівнянням Ліувілля-фон Неймана, Ліндблада, Блоха, рівнянням балансу.

У **другому розділі** розглядається використання адіабатично-імпульсної моделі для реалізації квантових логічних операцій за допомогою переходів ЛЗШМ. Було детально розглянуто реалізації однокубітних операцій X , Адамара, двокубітних операцій i SWAP та CNOT. Було розглянуто метод оптимізації реалізації операцій, який покращує комбінацію швидкості та добротності операцій шляхом використання зовнішнього збуджуючого сигналу із багатьма перетинати квазіперетину рівнів енергій, із детальним алгоритмом пошуку параметрів зовнішнього збуджуючого сигналу. Наведено порівняння похибок квантових логічних операцій, реалізованих класичним методом за допомогою Рабі-імпульсу та альтернативним методом на основі ЛЗШМ переходів, що вивчається. Запропонований альтернативний метод та формули були розширені для застосування для багаторівневих систем. Окрім цього були наведені умови на збуджуючий сигнал для інших двокубітних операцій: SWAP, квадратний корінь із SWAP, квадратний корінь із i SWAP, CPhase, CZ, CS.

У **третьому розділі** розглядається спектроскопія багаторівневих квантових систем на прикладі кремнієвої долинно-орбітальної подвійної квантової точки, яка являє собою чотирирівневу квантову систему. Розглянуто як сигнал із подвійним збудженням використовується для процесу так званого одягання системи, розглянуті отримані одягнені рівні енергій дворівневої системи. За допомогою застосування результатів ЛЗШМ інтерферометрії для дворівневої системи було розраховано та проаналізовано форми резонансних смуг на інтерферограмах ЛЗШМ (графік залежності заселеності верхнього енергетичного рівня від амплітуди збуджуючого сигналу та енергетичної відстройки). Отримані теоретичні результати добре узгоджуються та підтверджуються експериментальними інтерферограмами.

У **четвертому розділі** була розглянута збуджувана подвійна квантова точка із дисипативним оточенням. На експериментальній інтерферограмі ЛЗШМ цієї системи спостерігаються чотири режими збудження: багатопрохідний, однопрохідний, двопрохідний і некогерентний. За допомогою розв'язку рівняння Ліндблада була обчислена та проаналізована динаміка (залежність ймовірностей заселеностей рівнів системи від часу) в усіх чотирьох режимах збудження. Також у цьому розділі було продемонстровано застосування адіабатично-імпульсної моделі та методу рівнянь балансу для опису деяких типів динамік квантових багаторівневих систем із дисипацією на прикладі динаміки процесу перезарядки

детектора мікрохвильових фотонів на основі потокового кубіта. Отримана динаміка добре узгоджується із точною динамікою, отриманою за допомогою вирішення більш складного рівняння Ліндблада.

Основні результати роботи висвітлено у розділі **висновки**.

Зауваження до дисертаційної роботи.

1. У другому розділі дисертації для реалізації операцій iSWAP, CNOT чисельно розв'язуються рівняння 2.82, 2.94, відповідно. Вважаю, що було б доцільно додати опис чисельних пакетів та інструментів, які використовувались для чисельного розв'язку цих рівнянь. Неясно, чи наведені рішення для значень параметрів збуджуючого сигналу є єдиними. Якщо ні, то було б раціонально вказати, за якими критеріями проводився відбір з існуючих рішень цих систем.
2. У другому розділі при розгляді двокубітних операцій був розглянутий гамільтоніан двох кубітів з XY-, ZZ-, JJ- типами взаємодії. Однак не було наведено прикладів систем кубітів з цими типами зв'язку між кубітами.
3. У другому розділі було б доцільно більш детально розкрити обмеження максимальної швидкості однокубітних квантових логічних операцій, реалізованих за допомогою збуджуючого сигналу з одним та двома перетинами області квазіперетину рівнів енергій кубіта.

Зауважень щодо повноти та достовірності викладення результатів, що суттєво вплинули б на оцінку дисертаційної роботи немає.

Загальні висновки.

Дисертаційна робота є цілісною завершеною науковою працею, що повністю відповідає заявленій спеціальності 104 «Фізика та астрономія». Отримані результати повністю відповідають заявленій меті дослідження.

Таким чином, оцінивши актуальність, зміст, наукову новизну, обґрунтованість і достовірність результатів, відповідність вимогам МОН України до робіт на здобуття ступеня доктора філософії вважаю, що дисертаційна робота «Застосування інтерферометрії Ландау-Зінера-Штюкельберга-Майорани для контролю динаміки квантових систем» відповідає всім вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 зі змінами від 21.03.2022 р. № 341, від 19.05.2023 р. № 502, від 03.05.2024 р. № 507. На мій погляд, Рижев Артем Ігорович

заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Офіційний опонент:

старший науковий співробітник
відділу радіофізики твердого тіла
Інституту радіофізики та електроніки
ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України,
доктор фізико-математичних наук, доцент

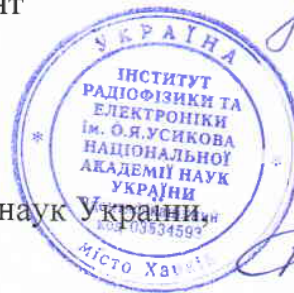
 Майзеліс З.О.

Підпис Майзеліса З.О. засвідчую

В.о. вченого секретаря

Інституту радіофізики та електроніки
ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України,

кандидат фізико-математичних наук



 Кривенко О.В.