

### **Рецензія**

доктора фізико-математичних наук, професора, головного наукового співробітника відділу мікроконтактної спектроскопії

**Колесніченка Юрія Олексійовича**

на дисертаційну роботу **Рижова Артема Ігоровича** "Застосування інтерферометрії Ландау-Зінера-Штюкельберга-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»)

Мезоскопічні системи є перспективними кандидатами для реалізації квантових обчислень і можуть виступати в якості обчислювальних одиниць у квантових комп'ютерах. Окрім цього такого роду об'єкти дозволяють вивчати нові явища, важливі для фундаментальної фізики. Представлена дисертаційна робота присвячена вивченню динамічних процесів у дворівневих і багаторівневих квантових системах, які описують деякі мезоскопічні системи, вивченню та розробці нових підходів до їх опису, аналізу, спектроскопії, та контролю. Не дивлячись на те, що такі системи почали вивчати майже 100 років тому, це все ще є актуальною проблемою теоретичної і експериментальної фізики, особливо у зв'язку зі стрімким розвитком квантових технологій в останні роки, що потребує глибшого розуміння динаміки квантових дворівневих та багаторівневих систем. Автор, зокрема, теоретично описує поведінку *подвійної квантової точки* основаної на кремнії, *подвійної квантової точки* з долинними та орбітальними ступенями свободи, *надпровідникового потокового кубіта*. Головними методами дослідження є розв'язування рівняння Ліндблада, рівнянь балансу, використання інтерферометрії Ландау-Зінера-Штюкельберга-Майорани та адіабатично-імпульсної моделі. Порівняння та відповідність деяких теоретичних результатів дисертаційної роботи (положення та форма резонансних ліній на інтерференційній картині кремнієвої подвійної квантової точки) з експериментальними даними свідчить про наукову обґрунтованість та достовірність обраних інструментів теоретичної фізики.

## **Публікації у наукових журналах**

Результати дисертаційної роботи висвітлено у 3 статтях у провідних міжнародних наукових журналах Physical Review Research та Physical Review B, індексованих Scopus та Web of Science, з найвищими квантилями Q1. Згідно з вимогами Міністерства освіти і науки України щодо публікацій основного змісту дисертацій, такої кількості статей достатньо для здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія».

Дослідження, на яких базується **другий розділ** представлено у журналі Physical Review Research. Результати **третього розділу** опубліковано у журналі Physical Review B. Моделювання динаміки етапу перезаряджання детектора фотонів на основі потокового кубіта, наведене у частині **четвертого розділу**, опубліковано у журналі Physical Review B. Дисертант мав вирішальний вклад в ту частину досліджень, які увійшли до дисертаційної роботи.

## **Структура дисертації та основні результати**

Представлена дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів та висновків. Розглянемо більш детально кожний з розділів. Безперечною перевагою даної роботи є пов'язаність всіх розділів.

**Перший розділ** – це огляд та аналіз літератури за темою дисертації. В ньому розглянуто теоретичні та експериментальні аспекти дисертаційної роботи. У першому підрозділі наведено літературу, яка стосується рівнянь, теоретичних методів та моделей, що використовуються у дисертаційній роботі, наведені посилання на експерименти, опису яких присвячені деякі розрахунки: кремнієва подвійна квантова точка, яка використовує як орбітальні, так і долинні ступені свободи, та подвійна квантова точка на основі CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) транзистора. Було розглянуто детектор мікрохвильових фотонів, динаміка якого вивчається в останньому розділі.

**Другий розділ** присвячено дослідженню моделі реалізації квантових логічних операцій на основі нерезонансного збудження з переходами Ландау-Зінера-Штюкельберга-Майорани (ЛЗШМ). У цьому розділі досліджується динаміка багаторівневої квантової системи під впливом нерезонансного керуючого сигналу з великою амплітудою. Було описано методи визначення параметрів зовнішнього керуючого сигналу, необхідних для реалізації конкретної квантової логічної операції. Були розглянуті можливості прискорення виконання операцій. Було узагальнено розглянуту модель для реалізації квантових логічних операцій для багаторівневих квантових систем. Наведена теорія може використовуватись для великої кількості типів кубітів та не прив'язана до типу конкретної фізичної реалізації кубітів.

**Третій розділ** присвячено вивченню спектроскопії кремнієвої подвійної квантової точки (ПКТ). Було розглянуто чотирирівневий гамільтоніан ПКТ, обговорено, як підготувати стани ПКТ для низькочастотної ЛЗШМ-спектроскопії, одягнувши їх резонансним сигналом. Після застосування формул інтерферометрії ЛЗШМ до отриманої «одягненої» дворівневої квантової системи були обговорені отримані інтерференційні смуги та проаналізована форма резонансних ліній.

У **четвертому розділі** дисертаційної роботи розглядається ПКТ на основі CMOS транзистора. Було виведено гамільтоніан ПКТ, промодельована динаміка (ймовірності заселеностей кожного енергетичного рівня системи як функції часу) цієї квантової багаторівневої системи за допомогою розв'язку рівняння Ліндблада в усіх чотирьох режимах, які спостерігаються на експериментальній інтерферограмі ЛЗШМ. Отримана динаміка була проаналізована.

Також в цьому розділі на прикладі розрахунку динаміки етапу перезаряджання детектора мікрохвильових фотонів описується, як динаміка квантових багаторівневих систем з енергетичною релаксацією та ЛЗШМ переходами може бути обчислена за допомогою адіабатично-імпульсної моделі та формалізму рівнянь балансу.

## **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та їх достовірність**

Коректність та строгість методів теоретичної та математичної фізики забезпечують високий рівень обґрунтованості наукових положень та висновків, сформульованих в дисертації. Результати чисельного моделювання збігаються в граничних випадках з наближеними аналітичними результатами. Результати теоретичного моделювання, що можуть бути порівняні із відповідними експериментальними даними мають із ними добру узгодженість. Достовірність одержаних результатів у мене не викликає сумнівів.

### **Зауваження до дисертаційної роботи**

1. У розділі 2 реалізації квантових логічних операцій розглядаються лише для моделей ізольованого кубіта та системи двох пов'язаних кубітів, ізольованих від навколишнього середовища. Було б корисно зазначити на що і як буде впливати факт наявності інших кубітів та навколишнього середовища при використанні результатів цього розділу до квантових систем із багатьма кубітами та зв'язком із навколишнім середовищем.
2. У розділі 3 збуджуючий сигнал має високочастотну «одягаючу» компонентну та низькочастотну спектроскопічну компоненту. З тексту не зовсім зрозуміло, чи можливо було б спостерігати інтерференційну картину на рис. 3.5, якщо збуджуючий сигнал мав би тільки низькочастотну спектроскопічну компоненту.
3. У розділі 4 автор використовує наближену адіабатично-імпульсну модель та формалізм рівнянь балансу для опису динаміки багаторівневих систем. Було б корисно більш детально дізнатись за яких умов ці наближені методи можуть використовуватись: для яких типів квантових систем, для квантових систем з якою характерною структурою енергетичних рівнів, для яких типів динамік.

Однак, зазначені зауваження жодним чином не впливають на позитивну оцінку роботи.

### **Загальні висновки**

Робота Рижова Артема Ігоровича “Застосування інтерферометрії Ландау-Зінера-Штюкельберга-Майорани для контролю динаміки квантових систем” містить низку нових актуальних результатів. Достовірність та новизна отриманих результатів не викликає сумнівів. Деякі з отриманих результатів підтверджуються відповідними експериментальними дослідженнями. Робота добре написана, структурована і відповідає 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. Таким чином, роблю висновок, що дисертант Рижов Артем Ігорович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – “Фізика та астрономія” з галузі знань 10 – “Природничі науки”.

Головний науковий співробітник відділу  
мікроконтактної спектроскопії  
ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України,  
доктор фізико-математичних наук,  
професор



Юрій КОЛЕСНІЧЕНКО

Підпис Ю.О. Колесніченка засвідчую.

Вчений секретар

ФТІНТ ім. Б.І Веркіна НАН України  
канд. фіз.-мат. наук



Олександр КАЛИНЕНКО