

АНОТАЦІЯ

Рижов А. І. Застосування інтерферометрії Ландау-Зінера-Штюкельберга-Майорани для контролю динаміки квантових систем. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія» (10 – Природничі науки). – Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна Національної академії наук України, Харків, 2024.

Дисертацію присвячено дослідженню динаміки квантових дворівневих і багаторівневих систем та розробці нових підходів до її опису та контролю з використанням рівняння Ліндблада, інтерферометрії Ландау-Зінера-Штюкельберга-Майорани, адіабатично-імпульсної моделі та рівнянь балансу.

У **вступі** коротко обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету та основні завдання дослідження, об'єкт, предмет та методи дослідження. Сформульовано наукову новизну та описано практичне значення отриманих результатів. Також у цьому розділі наведено інформацію про публікації, особистий внесок здобувача та апробацію результатів дисертації. Наведено інформацію про структуру та обсяг дисертації.

Розділ 1 присвячено огляду та аналізу літератури за темою дисертації.

Перехід ймовірності заселеності між енергетичними рівнями квантової системи під час проходження квазіперетину рівнів називається переходом Ландау-Зінера-Штюкельберга-Майорани (ЛЗШМ). Коли квантова система з квазіперетином рівнів знаходиться під впливом періодичного сильного збудження з достатньо великою амплітудою, відбувається послідовність ЛЗШМ переходів. Фаза, накопичена між переходами (відома як фаза Штюкельберга), може призвести до конструктивної або деструктивної інтерференції. Як наслідок, фізично спостережувані величини системи, такі як ймовірності заселеностей енергетичних рівнів, виявляють періодичну залежність від параметрів зовнішнього збудження. Це називається інтерферометрією ЛЗШМ.

Згідно з адіабатично-імпульсною моделлю, динаміку таких збуджуваних квантових систем можна розділити на два етапи еволюції: неадіабатичні

ЛЗШМ переходи між енергетичними рівнями поблизу квазіперетинів рівнів та адіабатичну еволюцію далеко від квазіперетинів. Аналітичні вирази матриць відповідних операторів еволюції дають змогу описувати та керувати динамікою цих збуджуваних систем.

У деяких випадках динаміка і релаксаційні процеси в багаторівневих квантових системах можуть бути добре описані формалізмом рівнянь балансу. Перевагою такого підходу є його відносна простота, порівняно з підходом рівняння Ліндблада.

Дисертацію присвячено вивченню квантових дворівневих та багаторівневих систем, а також підходів і методів їх опису та керування ними. Надано огляд та аналіз літератури, пов'язаної з рівнянням Ліндблада, рівнянням Ліувілля-фон Неймана, рівняннями Блоха, підходом рівнянь балансу, та іншими рівняннями, що можуть бути використані для вивчення квантових систем; а також літератури, пов'язаної з інтерферометрією ЛЗШМ, переходами ЛЗШМ, адіабатично-імпульсною моделлю (також відомою як метод матриць переходу), осциляціями Рабі, амплітудною спектроскопією. В цьому розділі надано огляд літератури, пов'язаної з кубітами, експериментальними реалізаціями надпровідникових кубітів та кубітів на основі кремнієвих подвійних квантових точок, в яких використовуються як орбітальні, так і долинні ступені свободи. Також було надано огляд літератури, пов'язаної з одно- та двокубітними квантовими логічними операціями (реалізованими як класично за допомогою осциляцій Рабі, так і альтернативним методом за допомогою переходів ЛЗШМ, якому присвячено цей розділ було проаналізовано), квантовими системами з подвійним збудженням та іншими квантовими системами, де є актуальною фізика ЛЗШМ.

Розділ 2 присвячено дослідженню альтернативної парадигми реалізації квантових логічних операцій на основі нерезонансного збудження з переходами ЛЗШМ.

Традиційна реалізація квантових логічних операцій і контролю базується на резонансних осциляціях Рабі ймовірності заселеності системи. Цей підхід має певні обмеження та ускладнення, пов'язані з обмеженнями наближення обертової хвилі та витоком ймовірностей заселеностей на рівні, що лежать

за межами області кубіта. ЛЗШМ переходи запроваджують альтернативу традиційним операціям, що основані на резонансному збудженні. Порівняно з традиційними осциляціями Рабі, основними відмінностями є нерезонансна частота збуджувального сигналу та мала кількість періодів у зовнішньому збуджувальному сигналі. У розглянутій альтернативній парадигмі збудження складається з періодів адіабатичної еволюції та коротких неадіабатичних переходів. Ймовірності заселеностей енергетичних рівнів, а також різниця фаз між ними можуть бути обрані шляхом зміни параметрів збудження (частоти та амплітуди), що забезпечує іншу парадигму контролю станом квантової системи.

У дисертації розвивається парадигму квантових логічних операцій на основі ЛЗШМ переходів, досліджуємо динаміку багаторівневої квантової системи під впливом ЛЗШМ збудження та оптимізуємо параметри для підвищення швидкостей квантових логічних операцій. За допомогою адіабатично-імпульсної моделі визначено параметри зовнішнього керуючого сигналу, необхідні для реалізації конкретної квантової логічної операції. Було описано гамільтоніан кубіта та його два основні базиси, демонструємо реалізації однокубітних операцій X , Y , Адамара та фазової операції, використовуючи як осциляції Рабі, так і ЛЗШМ переходи, і порівнюємо швидкість та точність, досягнуті за допомогою обох підходів. Досліджено спосіб збільшення швидкості та точності ЛЗШМ операцій за рахунок використання множинних переходів. Також було узагальнено розглянуту парадигму використання адіабатично-імпульсної моделі для реалізації квантових логічних операцій для багаторівневих квантових систем і описуємо реалізацію двокубітних операцій i SWAP та CNOT за допомогою двох ЛЗШМ переходів. Надано деякі деталі реалізації інших двокубітних операцій: SWAP, $\sqrt{\text{SWAP}}$, $\sqrt{i\text{SWAP}}$, CPhase(ϕ), CZ, CS.

Розділ 3 присвячено вивченню спектроскопії кремнієвої подвійної квантової точки (ПКТ), в якій використовуються як орбітальні, так і долинні ступені свободи.

Періодично збуджувана квантова система з квазіперетином рівнів зазнає як неадіабатичних переходів, так і фазових змін хвильової функції. Це призводить до появи когерентних інтерференційних смуг у ймовірностях

заселеностей системи. Для кубітів із квазіперетином енергетичних рівнів така ЛЗШМ інтерференція демонструє дугоподібні резонансні лінії. У випадку багаторівневої системи з квазіперетином двох нижніх рівнів продемонстровано, що форма резонансів може змінюватися від опуклих дуг до увігнутих серцеподібних і арфоподібних резонансних ліній. Дійсно, весь енергетичний спектр визначає форму таких резонансних смуг, і це також надає уявлення про спектроскопію низькочастотної системи.

Як конкретний приклад, це було розглянуто для кремнієвих долинно-орбітальних квантових точок, які є важливими для нової галузі вальєтроніки. Розглянуто чотирирівневий гамільтоніан кремнієвої долинно-орбітальної ПКТ. Обговорено, як підготувати стани ПКТ для низькочастотної ЛЗШМ-спектроскопії, одягнувши їх резонансним сигналом. Одягання дозволяє звести чотирирівневу систему до дворівневої. Це дає змогу застосувати формули інтерферометрії ЛЗШМ для дворівневих квантових систем. У дисертації були обговорені отримані інтерференційні смуги та проаналізована форма резонансних ліній. Для одягненої чотирирівневої системи вони матимуть арфоподібну форму. Також було проаналізовано окремий випадок із симетричним гамільтоніаном.

Розділ 4 присвячено опису квантових багаторівневих систем за допомогою рівняння Ліндблада, адіабатично-імпульсної моделі та методу рівнянь балансу.

Сильне збудження багаторівневої квантової системи дає змогу як характеризувати її стан, так і керувати ним. В цьому розділі вивчається сильно збуджувана дисипативна чотирирівнева ПКТ. Отримано її гамільтоніан та розв'язується рівняння Ліндблада. Ця система працює як пристрій «чотири в одному» з такими властивостями: інтерферометр ЛЗШМ; конденсатор з квантовим підсиленням, мікрохвильовий детектор і двосторонній інтерферометр. Іншими словами, існує чотири різні режими ЛЗШМ: багатопрхідний, однопрхідний, двопрхідний і некогерентний. Розраховано ймовірності заселеностей кожного стану системи як функції часу для всіх режимів роботи. Отримані результати дають корисні уявлення щодо керування, характеристикації та ініціалізація станів багаторівневих квантових систем.

Також в цьому розділі описується як використовувати адіабатично-імпульсну модель і підхід рівнянь балансу для опису квантових багаторівневих систем. Адіабатично-імпульсна модель може описувати динаміку багаторівневих квантових систем з ЛЗШМ переходами без релаксації. Підхід на основі рівнянь балансу може описувати квантові багаторівневі системи з енергетичною релаксацією. Поєднання адіабатично-імпульсної моделі та методу рівнянь балансу дозволяє в деяких випадках описати динаміку багаторівневих квантових систем з енергетичною релаксацією та ЛЗШМ переходами.

Була розрахована динаміка (залежність ймовірностей заселеностей адіабатичних енергетичних рівнів від часу, або, в даному випадку, від зовнішнього магнітного потоку) детектора мікрохвильових фотонів на основі потокового кубіта для стадії перезарядки детектора. Отримана динаміка досить добре узгоджується (за винятком околиць точок квазіперетину) з результатами, отриманими чисельним розв'язком рівняння Ліндблада.

Результати даної роботи мають одночасно значення для прикладного застосування, для розробки та створення нових пристроїв для квантових обчислень, і фундаментальне значення для розвитку розуміння фізичної поведінки складних квантових систем. Так, запропоновані методи реалізацій квантових логічних операцій можуть бути безпосередньо використані для постановки новітніх експериментів. Механізми та підходи, що розвинуті в роботі, після деякого доповнення експериментальними методиками, можуть безпосередньо бути застосовані для виконання квантових логічних операцій на певних типах реалізацій квантових комп'ютерів. Продемонстрований метод застосування інтерферометрії ЛЗШМ для одягнених квантових багаторівневих систем може використовуватись для визначення низки параметрів квантової системи на основі її експериментальних інтерферограм ЛЗШМ, тобто для спектроскопії цієї системи. Продемонстрований метод застосування адіабатично-імпульсної моделі з формалізмом рівнянь балансу за певних умов може використовуватись для визначення параметрів на етапі перезарядки детектору мікрохвильових фотонів на основі потового кубіту. Побудований опис та метод розрахунку динаміки подвійної квантової точки за допомогою розв'язання рівняння Ліндблада може бути використаний

для опису та кращого розуміння будь-яких подібних відкритих квантових багаторівневих систем.

Ключові слова: Кубіт, дворівнева система, квантова інтерференція, інтерферометрія Ландау-Зінера-Штյюкельберга-Майорани, перехід Ландау-Зінера-Штյюкельберга-Майорани, квантові переходи, неадіабатичний перехід, матриця переходу, адіабатично-імпульсна модель, квантова логічна операція, надпровідність, надплинність, спін, матриця густини, динаміка квантових систем.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації:

1. S. N. Shevchenko, **A. I. Ryzhov**, and Franco Nori, "Low-frequency spectroscopy for quantum multilevel systems", *Physical Review B* **98**, 195434 (2018), DOI: 10.1103/PhysRevB.98.195434, Q1
2. **A. I. Ryzhov**, O. V. Ivakhnenko, S. N. Shevchenko, M. F. Gonzalez-Zalba, Franco Nori, "Alternative fast quantum logic gates using nonadiabatic Landau-Zener-Stückelberg-Majorana transitions", *Physical Review Research* **6**, 033340 (2024), DOI: 10.1103/PhysRevResearch.6.033340, Q1
3. O. A. Ilinskaya, **A. I. Ryzhov**, and S. N. Shevchenko, "Flux qubit based detector of microwave photons", *Physical Review B* **110**, 155414 (2024), DOI: 10.1103/PhysRevB.110.155414, Q1

Наукові праці, які засвідчують апробацію результатів:

4. **A. I. Ryzhov**, S. N. Shevchenko, "Modeling and study of the evolution of a four-level quantum system", Student conference on Applied Physics "Actual problems of modern physics", 24 Nov, 2017, Kharkiv, Ukraine, Abstracts, p. 55 (2017).
5. **A. I. Ryzhov**, S. N. Shevchenko, "Resonant excitations of a single qubit: diabatic and adiabatic regimes", International Advanced Study Conference «Condensed Matter and Low Temperature Physics 2020», (CM<P 2020), 8-14 June, 2020, Kharkiv, Ukraine, Abstracts, p. 175 (2020).

6. **A. I. Ryzhov**, S. N. Shevchenko, Franco Nori, "Resonant interferometry and spectroscopy of a double quantum dot system", XI Conference of Young Scientists "Problems of Theoretical Physics", ("Problems of Theoretical Physics"), 21-23 December, 2020, Kyiv, Ukraine, Online, Abstracts, p. 25 (2020).
7. **A. I. Ryzhov**, S. N. Shevchenko, Franco Nori, "Low-frequency spectroscopy for quantum multilevel systems", American Physics Society March meeting 2021 ("APS March meeting"), 15-19 March, 2021, USA, Online, Abstracts, p. C29.00001 (2021).
8. **A. I. Ryzhov**, O. V. Ivakhnenko, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, "Landau-Zener-Stückelberg-Majorana quantum logic gates", II International Advanced Study Conference "Condensed Matter and Low Temperature Physics 2021", (CM<P 2021), 6-12 June, 2021, Kharkiv, Ukraine, Online, Abstracts, p. 211 (2021).
9. **A. I. Ryzhov**, M. P. Liul, S. N. Shevchenko, M. F. Gonzalez-Zalba, and Franco Nori, "Four regimes of excitations of a double quantum dot", International Symposium on Novel maTerials and quantum Technologies (ISNTT2021), 14-17 December, 2021, Atsugi, Japan, Online, Abstracts, p. 145 (2021).
10. **A. I. Ryzhov**, O. V. Ivakhnenko, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, "Fast Landau-Zener-Stückelberg-Majorana quantum logic gates", American Physics Society March meeting 2022 ("APS March meeting"), 14-18 March, 2022, Chicago, USA, Online, Abstracts, p. Q38.00011 (2022).
11. **A. I. Ryzhov**, O. V. Ivakhnenko, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, "Non-resonant quantum logic gates", American Physics Society March meeting 2023 ("APS March meeting"), 20-22 March, 2023, Las Vegas, USA, Online, Abstracts, p. UU05.00009 (2023).
12. **A. I. Ryzhov**, O. V. Ivakhnenko, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, "Two-qubit nonadiabatic quantum logic gates", III International Conference "Condensed Matter and Low Temperature Physics", (CM<P 2023), 5-11 June, 2023, Kharkiv, Ukraine, Online, Abstracts, p. 197 (2023).

13. **A. I. Ryzhov**, O. V. Ivakhnenko, S. N. Shevchenko, M. F. Gonzalez-Zalba, and Franco Nori, "Fast quantum logic gates using nonadiabatic Landau-Zener-Stückelberg-Majorana transitions", American Physics Society March meeting 2024 ("APS March meeting"), 4-8 March, 2024, Minneapolis, USA, Online, Abstracts, p. DD03.00005 (2024).

ABSTRACT

Ryzhov A. I. Application of Landau-Zener-Stückelberg-Majorana interferometry for the control of the dynamics of quantum systems. — Qualification scientific work printed as manuscript.

Dissertation for a Doctor of Philosophy degree in speciality 104 – «Physics and Astronomy» (10 – Natural Sciences). – B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering, NAS of Ukraine, Kharkiv 2024.

The dissertation is devoted to the study of the dynamics of quantum two-level and multilevel systems and the development of new approaches to its description and control using the Lindblad equation, Landau-Zener-Stückelberg-Majorana interferometry, adiabatic-impulse model and rate equation approach.

In the **introduction** I briefly justify the relevance of the dissertation topic, defined purpose and main tasks of the research, objects, subject, and research methods. The scientific novelty is formulated and the practical value of the obtained results is described. Also, this chapter includes the information about the publications, personal applicant's contribution, and approbation of the dissertation results. The information about the structure and volume of the dissertation is also given.

The **chapter 1** is devoted to the review and analysis of the literature related to the topic of the dissertation.

A transition of the occupation probability between energy levels of a quantum system during the passage of an avoided crossing of the levels is known as a Landau-Zener-Stückelberg-Majorana (LZSM) transition. When a quantum system with an avoided-level crossing is subject to periodic strong driving with sufficiently large amplitude, a sequence of LZSM transitions occurs. The phase accumulated between transitions (known as the Stückelberg phase) may result in constructive or destructive interference. As the result, the physical observables of the system, like the occupation probabilities of the energy levels, exhibit periodic dependence on the parameters of the external driving. This is referred to as LZSM interferometry.

According to the adiabatic-impulse model, the dynamics of such driven quantum systems can be split into two evolution stages: non-adiabatic LZSM transitions between the energy levels in the vicinity of the level anticrossings and adiabatic evolution far from the anticrossings. The analytical expressions of the

matrices of the corresponding evolution operators allows to describe and control the dynamics of these driven systems.

In some cases the dynamics and relaxation processes in the multilevel quantum systems can be well described by the rate equation formalism. The advantage of such approach is its relative simplicity, compared to the Lindblad master equation approach.

The dissertation is devoted to studying quantum two-level and multilevel systems and the approaches and methods for describing and controlling them. We provide the review analysis and the literature related to the Lindblad master equation, Liouville-von Neumann master equation, Bloch equations, rate equation approach, and other equations that can be used to study quantum systems; and the literature related to LZSM interferometry, LZSM transitions, adiabatic-impulse model (also known as the transition matrix method), Rabi oscillations, and amplitude spectroscopy. We also provide an overview of the literature related to qubits, experimental realizations of superconducting qubits and qubits based on silicon double quantum dots, exploiting both orbital and valley degrees of freedom. We provide an overview of the literature related to one- and two-qubit quantum logic gates (realized both classically by Rabi oscillations and by an alternative method, using LZSM transitions, researched in this chapter), quantum systems with double driving signal and other quantum systems where LZSM physics is relevant.

The **chapter 2** is devoted to the study of an alternative paradigm for implementing quantum logic gates based on non-resonant driving with LZSM transitions.

A conventional realization of quantum logic gates and control is based on resonant Rabi oscillations of the occupation probability of the system. This approach has certain limitations and complications, connected with the limitations of the rotating-wave approximation and leakage of the occupation probabilities to levels that lie outside the qubit subspace. LZSM transitions provide an alternative to conventional gates based on resonant driving. Compared to traditional Rabi oscillations, the main differences are a non-resonant driving frequency and a small number of periods in the external driving signal. In the considered alternative paradigm the driving consists of the periods of adiabatic evolution and short non-

adiabatic transitions. The energy-level occupation probabilities, as well as the phase difference between them, can be chosen by varying the driving parameters (the driving frequency and amplitude), which provides a different paradigm for control of the quantum system.

We further develop the paradigm of quantum logic gates, based on LZSM transitions, explore the dynamics of a multi-level quantum system under LZSM drive and optimize the parameters for increasing the quantum logic gates speed. We define the parameters of the external driving required for implementing a specific quantum logic gate using the adiabatic-impulse model. We describe the qubit Hamiltonian and its two main bases, demonstrate the implementations of single-qubit X, Y, Hadamard, and phase gates implementations using both Rabi oscillations and LZSM transitions, and compare the speed and fidelities achieved with both paradigms. We explore the way of increasing the gate speed and fidelity of the LZSM gates by using multiple transitions. We generalize the considered paradigm of using the adiabatic-impulse model to realize quantum logic gates for multi-level quantum systems, and describe the realization of two-qubit iSWAP and CNOT gates with two LZSM transitions. We also provide some details for implementing other two-qubit gates: SWAP, $\sqrt{\text{SWAP}}$, $\sqrt{i\text{SWAP}}$, $\text{CPhase}(\phi)$, CZ, CS.

The **chapter 3** is devoted to the study of the spectroscopy for a silicon double quantum dot (DQD), exploiting both orbital and valley degrees of freedom.

A periodically driven quantum system with avoided level crossing experiences both non-adiabatic transitions and wave-function phase changes. These result in coherent interference fringes in the system's occupation probabilities. For qubits with repelling energy levels, such LZSM interference displays arc-shaped resonance lines. In the case of a multi-level system with an avoided level crossing of the two lower levels, we demonstrate that the shape of the resonances can change from convex arcs to concave heart-shaped and harp-shaped resonance lines. Indeed, the whole energy spectrum determines the shape of such resonance fringes and this also provides insight on the slow-frequency system spectroscopy.

As a particular example, we consider this for valley-orbit silicon quantum dots, which are important for the emerging field of valleytronics. We consider a four-state Hamiltonian for a silicon orbital-valley DQD. We discuss how to prepare

the DQD states for low-frequency LZSM spectroscopy by dressing them with a resonant signal. The dressing allows to reduce the four-level system to a two-level one. This allows to adopt the formulas of the LZSM interferometry for the two-level quantum systems. We discuss the interference fringes obtained, and analyze the shape of the resonant lines. For a dressed four-level system, they have a harp-shaped form. We also analyze a particular case with a symmetric Hamiltonian.

The **chapter 4** is devoted to the description of the quantum multi-level systems with the Lindblad master equation, the adiabatic-impulse model, and the rate equation approach.

Strong driving of a multi-level quantum system allows to both characterize and control its state. We study a strongly driven dissipative four-level DQD. We obtain its Hamiltonian and solve the Lindblad master equation. It is demonstrated that this system works as a four-in-one device with the following features: LZSM interferometer; quantum-enhanced capacitor, microwave detector, and which-way interferometer. In other words, there are four different LZSM regimes: multi-passage, single-passage, double-passage, and incoherent one. We calculated occupation probabilities of each system's state as functions of time for all operation regimes. The gained results provide useful insights about controlling, characterizing, and initializing the multi-level quantum systems states.

We also describe how to use the adiabatic-impulse model and the rate equation approach for description of quantum multilevel systems. The adiabatic-impulse model can describe the dynamics of multilevel quantum systems with LZSM crossings without relaxation. The rate equation approach can describe quantum multilevel systems with the energy relaxation. By combination of the adiabatic-impulse model and the rate equation approach it is possible in some cases to describe the dynamics of multilevel quantum systems with energy relaxation and LZSM crossings.

We calculate the dynamics (the dependence of the adiabatic energy-level occupations on time, or, in this case on the external magnetic flux) of the detector of microwave photons, based on the flux qubit for the reset stage of the detector. The obtained dynamics is in a sufficiently good agreement (excluding the vicinities of the anticrossing points) with the results obtained by numerically solving of the Lindblad master equation.

The results of this work have value both for applications, for the development and creation of new devices for quantum computing, and fundamental value for the development of understanding of the physical behavior of complex quantum systems. Thus, the proposed methods for implementing quantum logic gates can be directly used to set up new experiments. The mechanisms and approaches developed in this work, after some supplementation with experimental techniques, can be directly applied to perform quantum logic gates on certain types of implementations of quantum computers. The demonstrated method of applying the LZSM interferometry to dressed quantum multilevel systems can be used to determine a number of parameters of a quantum system based on its experimental LZSM interferograms, i.e., for spectroscopy of this system. The demonstrated method of applying the adiabatic-impulse model with the rate equation formalism under certain conditions can be used to determine the parameters at the reset stage of the microwave photon detector based on a flux qubit. The constructed description and method of calculating the dynamics of a double quantum dot by solving the Lindblad master equation can be used to describe and better understand any similar open quantum multilevel systems.

Keywords: Qubit, two-level system, quantum interference, Landau-Zener-Stückelberg-Majorana interferometry, Landau-Zener-Stückelberg-Majorana transition, quantum transitions, non-adiabatic transition, transfer matrix, adiabatic-pulse model, quantum logic operation, superconductivity, superfluidity, spin, density matrix, quantum system dynamics.

LIST OF PUBLICATIONS OF THE CANDIDATE BY THE TOPIC OF THE DISSERTATION

Scientific works in which the main results of the dissertation are published:

1. S. N. Shevchenko, **A. I. Ryzhov**, and Franco Nori, "Low-frequency spectroscopy for quantum multilevel systems", *Physical Review B* **98**, 195434 (2018), DOI: 10.1103/PhysRevB.98.195434, Q1
2. **A. I. Ryzhov**, O. V. Ivakhnenko, S. N. Shevchenko, M. F. Gonzalez-Zalba, Franco Nori, "Alternative fast quantum logic gates using nonadiabatic Landau-Zener-Stückelberg-Majorana transitions", *Physical Review Research* **6**, 033340 (2024), DOI: 10.1103/PhysRevResearch.6.033340, Q1

3. O. A. Ilinskaya, **A. I. Ryzhov**, and S. N. Shevchenko, "Flux qubit based detector of microwave photons", *Physical Review B* **110**, 155414 (2024), DOI: 10.1103/PhysRevB.110.155414, Q1

Scientific works certifying the approbation of the results:

4. **A. I. Ryzhov**, S. N. Shevchenko, "Modeling and study of the evolution of a four-level quantum system", Student conference on Applied Physics "Actual problems of modern physics", 24 Nov, 2017, Kharkiv, Ukraine, Abstracts, p. 55 (2017).
5. **A. I. Ryzhov**, S. N. Shevchenko, "Resonant excitations of a single qubit: diabatic and adiabatic regimes", International Advanced Study Conference «Condensed Matter and Low Temperature Physics 2020», (CM<P 2020), 8-14 June, 2020, Kharkiv, Ukraine, Abstracts, p. 175 (2020).
6. **A. I. Ryzhov**, S. N. Shevchenko, Franco Nori, "Resonant interferometry and spectroscopy of a double quantum dot system", XI Conference of Young Scientists "Problems of Theoretical Physics", ("Problems of Theoretical Physics"), 21-23 December, 2020, Kyiv, Ukraine, Online, Abstracts, p. 25 (2020).
7. **A. I. Ryzhov**, S. N. Shevchenko, Franco Nori, "Low-frequency spectroscopy for quantum multilevel systems", American Physics Society March meeting 2021 ("APS March meeting"), 15-19 March, 2021, USA, Online, Abstracts, p. C29.00001 (2021).
8. **A. I. Ryzhov**, O. V. Ivakhnenko, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, "Landau-Zener-Stückelberg-Majorana quantum logic gates", II International Advanced Study Conference "Condensed Matter and Low Temperature Physics 2021", (CM<P 2021), 6-12 June, 2021, Kharkiv, Ukraine, Online, Abstracts, p. 211 (2021).
9. **A. I. Ryzhov**, M. P. Liul, S. N. Shevchenko, M. F. Gonzalez-Zalba, and Franco Nori, "Four regimes of excitations of a double quantum dot", International

Symposium on Novel maTerials and quantum Technologies (ISNTT2021), 14-17 December, 2021, Atsugi, Japan, Online, Abstracts, p. 145 (2021).

10. **A. I. Ryzhov**, O. V. Ivakhnenko, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, "Fast Landau-Zener-Stückelberg-Majorana quantum logic gates", American Physics Society March meeting 2022 ("APS March meeting"), 14-18 March, 2022, Chicago, USA, Online, Abstracts, p. Q38.00011 (2022).
11. **A. I. Ryzhov**, O. V. Ivakhnenko, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, "Non-resonant quantum logic gates", American Physics Society March meeting 2023 ("APS March meeting"), 20-22 March, 2023, Las Vegas, USA, Online, Abstracts, p. UU05.00009 (2023).
12. **A. I. Ryzhov**, O. V. Ivakhnenko, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, "Two-qubit nonadiabatic quantum logic gates", III International Conference "Condensed Matter and Low Temperature Physics", (CM<P 2023), 5-11 June, 2023, Kharkiv, Ukraine, Online, Abstracts, p. 197 (2023).
13. **A. I. Ryzhov**, O. V. Ivakhnenko, S. N. Shevchenko, M. F. Gonzalez-Zalba, and Franco Nori, "Fast quantum logic gates using nonadiabatic Landau-Zener-Stückelberg-Majorana transitions", American Physics Society March meeting 2024 ("APS March meeting"), 4-8 March, 2024, Minneapolis, USA, Online, Abstracts, p. DD03.00005 (2024).



Артем РИЖОВ