

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР  
ім. Б.І. Веркіна

КАРПОВ Денис Сергійович



УДК 538.945; 537.9

**ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ МЕЗОСКОПІЧНОЇ  
СИСТЕМИ НАДПРОВІДНИХ КВАНТОВИХ БІТІВ, ЩО ВЗАЄМОДІЮТЬ  
З РЕЗОНАТОРОМ**

01.04.02 – теоретична фізика

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України.

**Науковий керівник:** доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Шевченко Сергій Миколайович,**  
Фізико-технічний інститут низьких температур  
ім. Б.І. Веркіна НАН України,  
завідувач відділу надпровідних  
і мезоскопічних структур.

**Офіційні опоненти:** член-кореспондент НАН України,  
доктор фізико-математичних наук, професор  
**Ямпольський Валерій Олександрович,**  
Інститут радіофізики та електроніки  
ім. О.Я. Усикова НАН України,  
завідувач відділу теоретичної фізики.

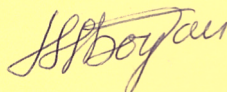
доктор фізико-математичних наук, професор  
**Ходусов Валерій Дмитрович,**  
Харківський національний університет  
імені В.Н. Каразіна,  
завідувач кафедри теоретичної ядерної фізики та  
вищої математики імені О. І. Ахієзера  
фізико-технічного факультета.

Захист відбудеться «11» грудня 2018 року о 15<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.175.02 при Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України за адресою: 61103, м. Харків, проспект Науки, 47.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України за адресою: 61103, м. Харків, проспект Науки, 47.

Автореферат розісланий « 8 » листопада 2018 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 64.175.02,  
доктор фізико-математичних наук

 Богдан М.М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Дослідження квантово-механічних властивостей мезоскопічних систем на основі надпровідних кубітів є перспективним з точок зору як фундаментальної, так і прикладної науки. Такі системи являють собою структури на основі надпровідних плівок Al, Nb або NbN, у яких присутні вставки з діелектрика або наномістки, ширина яких набагато менше довжини. Комбінація надпровідник-діелектрик-надпровідник називається контактом Джозефсона, що вносить нелінійні ефекти в систему. Наявність наномістків призводить до виникнення ефекту проковзування фази.

Інтерес фундаментальної науки до таких мезоскопічних структур пов'язаний з можливістю створювати на їх основі ефективні системи з квантовою поведінкою, так звані кубіти. Властивості кубітів описується за допомогою рівнянь квантової оптики і, у порівнянні з суто квантово-оптичними системами, кубіти мають ряд істотних переваг. Основною особливістю надпровідних кубітів є відносно проста масштабованість структур і керованість параметрами систем, можливість вивчати систему у режимі сильного зв'язку. Для створення таких структур використовуються відпрацьовані методи електронної літографії. Керування і детектування відбувається за допомогою планарних або об'ємних електромагнітних резонаторів. Квантованість кубітів дозволяє моделювати і вивчати різні аспекти квантової теорії інформації і квантової інженерії. Одними з перспективних напрямків досліджень мезоскопічних систем є вивчення різних аспектів маніпулювання і зчитування станів кубітів, а також підготовка фундаменту для створення квантового комп'ютера.

Квантово-механічні ефекти в мезоскопічних системах на основі надпровідних кубітів активно вивчаються останні кілька десятиліть як теоретично, так і експериментально. Такі системи можна розглядати як штучні атоми. Їм властиві квантові рівні енергії і квантова когерентність, що дозволяє використати їх як базис для вивчення фундаментальних квантових явищ. Експериментальний прогрес, що був досягнутий останнім часом, дозволяє контролювати кубіти в широкому діапазоні параметрів і вивчати низку квантово-оптичних ефектів в одномірних твердотільних квантових структурах: надвипромінювання, перенос станів від одного кубіта до іншого за допомогою фотона, магнітно-індуктоване проходження одиночного фотона тощо.

Одним з перспективних напрямків у цій області залишається вивчення взаємодії багатомодового резонатора і кубіта, відкритого хвилеводу і кубіта. Більшість робіт, на сьогодні, зосереджені на системах, у яких вивчають один кубіт або взаємодія кубіта з однією модою резонатора, наступним же кроком у розвитку цього напрямку досліджень є вивчення двох і більше кубітних систем, які взаємодіють із декількома модами резонатора.

Саме це коло нових важливих наукових завдань, які мають фундаментальне і прикладне значення, вирішується в даній дисертаційній роботі, що робить її тему, безсумнівно, **актуальною**.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана у відділі надпровідних і мезоскопічних структур Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна Національної академії наук України і є складовою частиною наступних проектів:

- «Експериментальні та теоретичні дослідження квантових когерентних явищ в нових типах надпровідників та надпровідних структур» (номер державної реєстрації 0112U002640, термін виконання 2012 – 2016 рр.);
- «Квантові ефекти в системах з кубітами на основі однозонних та багатозонних надпровідників» (номер державної реєстрації 0114U005155, виконання 2013-2014 рр.);
- «Надпровідні і мезоскопічні мікроструктури та прилади сучасної квантової електроніки на їх основі» (номер державної реєстрації 0117U002291, термін виконання 2017-2021 р.);

**Мета і завдання дослідження.** Мета дисертаційної роботи полягає у виявленні особливостей взаємодії штучних дворівневих систем на базі надпровідних квантових бітів з електромагнітним полем резонатора у випадках класичного та квантового сигналу. Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні завдання:

- аналітичні вирази для квантових рівнів енергії кубіта, який розміщений у резонаторі, при його взаємодії з декількома модами резонатора з різною амплітудою сигналів;
- описати фізичні процеси у гібридній системі, яка складається з резонатора та кубіту, при проходженні слабого електромагнітного сигналу;
- дослідити вплив різних параметрів мезоскопічної системи кубіта-резонатора на коефіцієнт проходження електромагнітної хвилі;
- виявити величину внеску у розв'язок рівнянь Максвелла-Блоха атомно-фотонних кореляторів наступного наближення, так званого напівквантового наближення;
- з'ясувати залежність коефіцієнта проходження електромагнітного сигналу і особливості динамічної поведінки системи кубіту-резонатора від шумової температури;
- розробити метод для знаходження коефіцієнтів відбиття і проходження фотона через хвилевід, що пов'язаний із двома системами кубітами-резонаторами;

**Об'єктом дослідження** є процеси відбиття та проходження класичних електромагнітних і однофотонних сигналів через систему, яка складається із хвилеводу, резонатора і кубіта.

**Предметом дослідження** є залежності коефіцієнтів відбиття та проходження електромагнітних і однофотонних сигналів від температури, параметрів кубіта і резонатора, у тому числі і релаксаційних коефіцієнтів.

**Методи дослідження.** Для рішення поставлених у дисертації завдань використовуються як аналітичні, так і чисельні методи теоретичної фізики конденсованого стану. При описі властивостей об'єктів використовується модифіковане рівняння Ліувілля – фон Неймана з урахуванням впливу

дисипативного оточення – рівняння Ліндблада. Для опису стаціонарного стану системи і еволюції її параметрів у часі використовується ланцюг рівнянь Максвелла-Блоха у квазікласичному і напівквантовому наближеннях. Крім того, у дисертаційній роботі автором був застосований оригінальний аналітичний метод опису проходження однофотонного сигналу через хвилевід з кубітами.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Вперше знайдено явний вираз для коефіцієнта проходження електромагнітного сигналу крізь систему кубіт-резонатор у випадку двомодового резонатору. Показано, що у випадку взаємодії кубіта з високоамплітудним і слабоамплітудним сигналами можливе посилення або ослаблення вихідного сигналу. Встановлено, що кубіт виступає в якості квантового нелінійного об'єкту.

2. Вперше встановлено вплив параметрів релаксації кубіта та резонатора на коефіцієнт проходження електромагнітного сигналу через систему кубіт-резонатор. Показано, що у системі кубіт-резонатор можливе суттєве посилення вихідного сигналу завдяки створенню інверсної заселеності енергетичних рівнів. Показано, що відмінна від абсолютного нуля температура системи призводить до зменшення абсолютного значення коефіцієнту проходження.

3. Вперше знайдено внесок двокореляторної поправки в рівняннях Максвелла-Блоха для опису еволюції системи кубіта-резонатора. Показано, що врахування в рівняннях Максвелла-Блоха кореляторів взаємодії квантових полів кубіта та резонатора суттєво збільшує точність теоретичного опису реальної системи. Встановлено, що коефіцієнт проходження сигналу через резонатор несе в собі інформацію щодо температурного стану кубіта.

4. Вперше вирішено задачу проходження однофотонних сигналів через хвилевід, пов'язаний з системою кубіт-резонатор. Запропоновано оригінальний підхід до розв'язку задач проходження одиночного фотону через хвилевід, що базується на методі неермітового гамільтоніана і матриці розсіювання. Показано, що швидкість фотонного випромінювання залежить від взаємного розміщення систем кубітів-резонаторів. Встановлено, що в системі можливі резонанси з асиметричним профілем, які залежать від частоти вхідного фотону.

**Практичне значення отриманих результатів.** Знайдені у дисертації залежності коефіцієнта проходження сигналу через систему від типових параметрів кубіта та резонатора можуть бути використані для створення посилювача або атенюатора на основі такої системи. Розрахунки впливу температури кубіту та резонатора на коефіцієнт проходження, приведені у дисертації, можуть бути корисними для встановлення реальної температури під час експериментів. Показано, що врахування двокореляторної поправки в рівняннях Максвелла-Блоха для опису еволюції системи кубіта-резонатора суттєвим чином деталізує характеристики фізичних процесів у системі, що дає змогу пояснити дані низки експериментальних досліджень.

**Особистий внесок здобувача.** У всіх роботах, що були виконані у співавторстві і увійшли до дисертації, автор брав активну участь на всіх етапах

наукових досліджень, а саме: у постановці завдань, у виконанні розрахунків, у трактуванні і обговоренні отриманих результатів, формулюванні висновків і написанні статей, та оприлюдненні їх на конференціях і семінарах. Дисертантом особисто показано, що коефіцієнт проходження сигналу через резонатор із кубітом є функцією величини зв'язку та релаксаційних параметрів системи. Здобувач самостійно встановив області параметрів максимального посилення сигналу у відповідній системі, розрахована та проаналізована температурна залежність коефіцієнта проходження сигналу. Автором самостійно виконано аналітичні розрахунки внеску атомно-фотонних кореляторів другого порядку у рівняння Максвелла-Блоха та виявлено допустимі межі використання квазікласичного та напівквантового наближення. Таким чином, особистий внесок здобувача є визначальним.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи доповідалися особисто дисертантом на таких вітчизняні і міжнародних наукових конференціях і школах:

- 3rd International Conference for Young Scientists «Low temperature physics» (ICYS-LTP-2012, Kharkiv, Ukraine, May 14–18, 2012);
- 4th International Conference for Young Scientists «Low temperature physics» (ICYS-LTP-2013, Kharkiv, Ukraine, June 3–7, 2013);
- Introduction to Quantum System and Device 2013 (IQSD-2013, Espoo, Finland, June 11–14, 2013);
- 5th International Conference for Young Scientists «Low temperature physics» (Kharkiv, Ukraine, June 2–6, 2014);
- 6th International Conference for Young Scientists «Low temperature physics» (ICYS-LTP-2015, Kharkiv, Ukraine, June 2–6, 2015);
- 3rd International Conference on Nanophysics and Nanoelectronics, "Mesoscopic Structures: Fundamentals and Applications" (Novosibirsk, Russia, June 22–27, 2015);
- 7th International Conference for Young Scientists «Low temperature physics» (ICYS-LTP-2016, Kharkiv, Ukraine, June 6 – 10, 2016);
- 13th biennial European Conference on Applied Superconductivity, (EUCAS 2017, Geneva, Switzerland, September 20–24, 2017).

**Публікації.** Результати дисертації представлені в 16 наукових працях: 5 статей в провідних фахових іноземних і вітчизняних наукових журналах та 1 стаття в працях міжнародної конференції [1-6], і 10 тез статей в працях міжнародних конференцій [7-16].

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із анотацій, вступу, оглядового розділу, чотирьох оригінальних розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний об'єм роботи складає 146 сторінки. Вона містить 34 рисунки та список використаних джерел з 175 найменувань на 15 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **анотаціях** державною і англійською мовами стисло викладено основний зміст і висновки дисертації. Представлено основні результати досліджень із зазначенням наукової новизни та практичного значення. Сформульовано найсуттєвіші положення по кожному із розділів дисертації.

У **вступі** дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми, визначено мету і задачі досліджень та методи їх досягнення, сформульовано основні положення і результати роботи, їхня наукова новизна і практичне значення, наведено дані про особистий внесок дисертанта, апробацію роботи і описано структуру дисертації.

**Перший розділ** «Теоретичні основи квантових мезоскопічних структур (огляд)» містить огляд літератури за темою дисертації. В ньому представлено короткий опис експериментальних та теоретичних робіт з дослідження надпровідних мезоскопічних систем на основі кубітів, а також встановлюється місце проведеного у дисертації дослідження серед вже розв'язаних задач.

У розділі наведені основні рівняння, які використовувались для опису транспортних властивостей електромагнітних сигналів через структуру з мезоскопічними системами типу кубіт, копланарний резонатор та хвилевід. Зокрема, записано узагальнену форму Марковського рівняння (рівняння Ліндблада), що дозволяє врахувати дисипацію і декогеренцію в необоротних процесах для квантових вимірів:

$$\frac{d}{dt}\hat{\rho} = \frac{1}{i\hbar}[H\hat{\rho}] + \sum_{\alpha} L_{\alpha}[\hat{\rho}], \quad (1)$$

де  $\hat{\rho}$  – оператор щільності станів системи,  $H$  – гамільтоніан, що описує систему кубіта-резонатора,  $\sum_{\alpha} L_{\alpha} = L_k + L_{\downarrow} + L_{\uparrow} + L_{\phi}$  – оператори Ліндблада, які несуть в собі інформацію про дисипативний зв'язок з оточенням. Одним із відомих видів гамільтоніана системи є  $\hat{H} \propto \hat{\sigma}_z$  ( $\hat{\sigma}_z$  - це дворівнева z-матриця Паулі), коли оператори Ліндблада (правий доданок у рівнянні (1)) неермітові і описують дисипацію або декогеренцію. В цьому випадку оператори Ліндблада пропорційні  $L \propto \hat{\sigma}_{\pm}, a / a^{\dagger}$ , де  $\hat{\sigma}_{\pm} = \frac{1}{2}(\hat{\sigma}_x \pm i\hat{\sigma}_y)$ , а  $a / a^{\dagger}$  – оператор знищення/народження фотонів. Мезоскопічні системи на основі кубітів можна описувати в рамках спінової моделі, як ефективну дворівневу систему. Копланарний резонатор, що є пристроєм детектування та керування кубітів, описується як квантовий резонатор.

У **другому розділі** «Система кубіт-резонатор. Двічі одягнені стани» теоретично описано збудження і поширення електромагнітних сигналів через систему, яка складається з кубіта та резонатора. Вони схематично зображені на

рис.1:  $C_0$  – конденсатори;  $M$  – індуктивний зв'язок кубіта з резонатором; зліва направо подається сигнал (суцільна хвиляста лінія); амплітуда вихідного сигналу відрізняється від амплітуди вхідного (пунктирна хвиляста лінія); також сигнал може відбиватися (пунктирна хвиляста лінія на лівій частині малюнка). Сигнали розглядаються класичними.

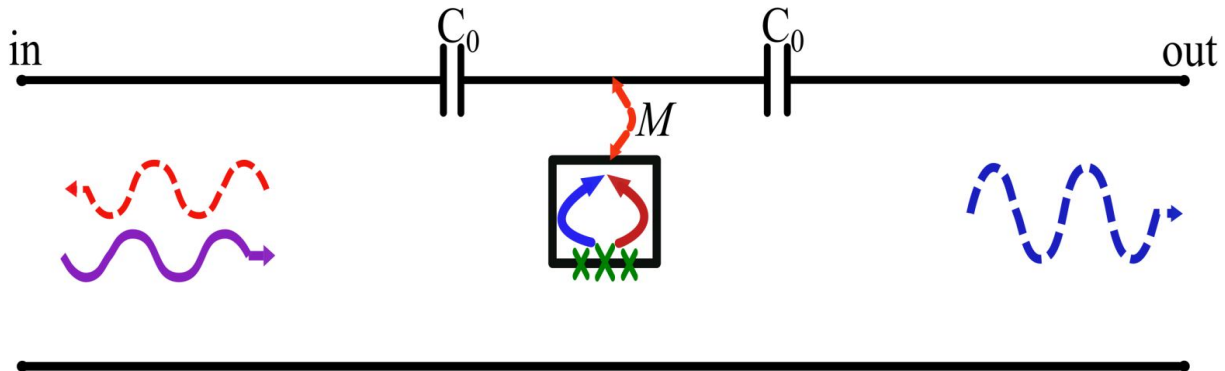


Рис. 1. Схематичне зображення кубіта в резонаторі.

Даний розділ присвячений опису кубіта, що взаємодіє із двома електромагнітними сигналами: високоамплітудним сигналом  $\omega_d$  та слабким (пробним) сигналом  $\omega_p$ . Така взаємодія лежить в основі, так названої, двосигнальної спектроскопії або пробної спектроскопії кубіта. Тобто, кубіт взаємодіє із сигналом великої амплітуди, в порівнянні із втратами резонатора, і другим, пробним, слабким сигналом, відповідний по амплітуді до втрат. Пробний сигнал дозволяє реконструювати одягнені стани кубіта. На рис. 2 відображено наступне: (а) сигнал з великою амплітудою  $A_d$  взаємодіє із дворівневою системою (кубіт); (б) рівні енергії змінюються; (в) одягнений кубіт взаємодіє із пробним сигналом; (г) коли відстань між рівнями збігається із частотою пробного сигналу, амплітуда вихідного сигналу збільшується або послабляється. Кубіт можна описати в термінах одягнених станів, інакше кажучи, ми одержуємо одягнену дворівневу систему з енергетичною відстанню, пропорційною амплітуді  $A_d$  додаткової гармоніки.

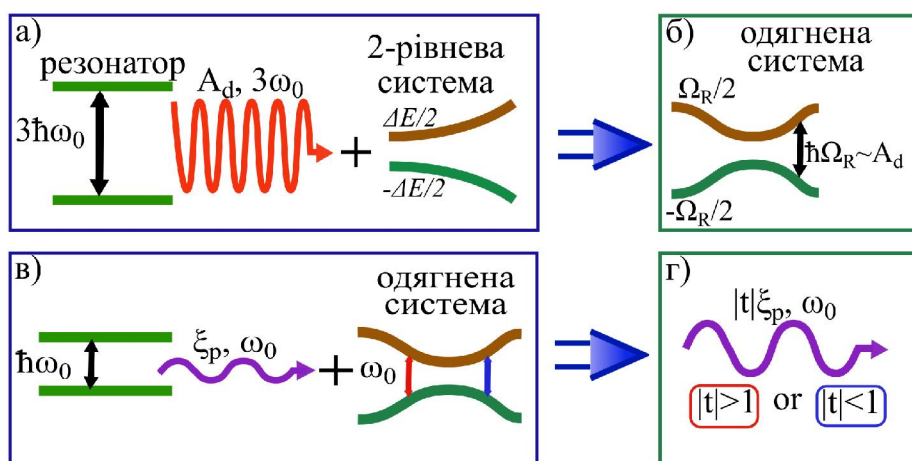


Рис. 2. Схема взаємодії між кубітом і резонатором.



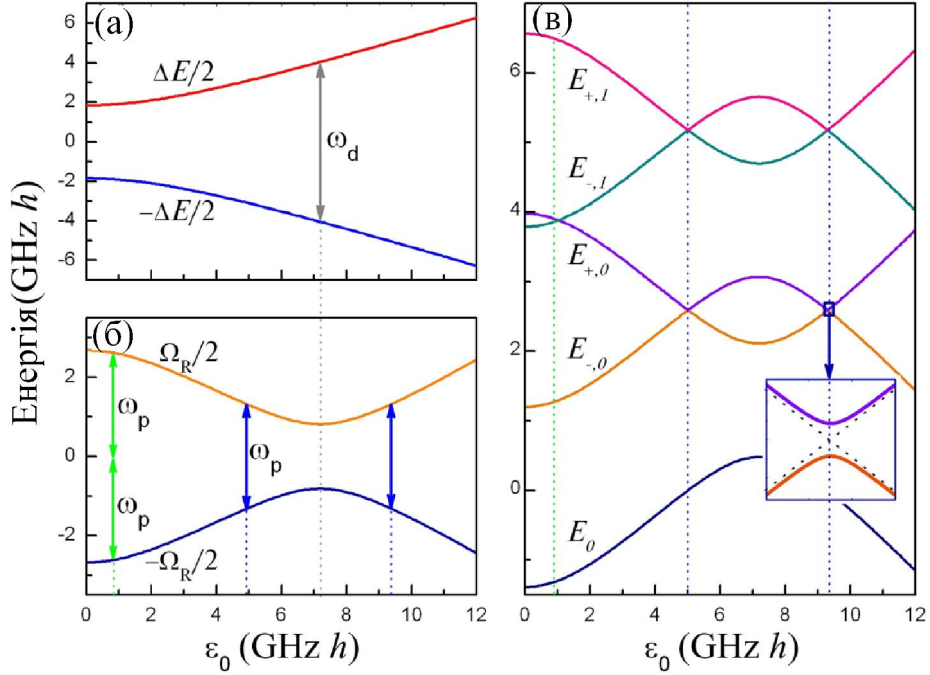


Рис. 3. Рівні енергії (а) кубіта, (б) «одягненого» кубіта, (с) двічі «одягненого» кубіта.

Рівні кубіта  $\pm\Delta E/2$ , побудовані на малюнку рис.3(а), при досягненні різниці рівнів порядку частоти накачування  $\omega_d$ , кубіт резонансно збуджується. Положення резонансу,  $\hbar\omega_d = \Delta E$ , відповідає зближенню «одягнених» рівнів системи. «Одягнені» рівні кубіта,  $\pm\Delta\tilde{E}/2 = \pm\hbar\Omega_R/2$ , входячи у резонанс із другим (пробним) сигналом,  $\hbar\omega_p = \Delta\tilde{E}$ . Це і багатофотонне збудження продемонстроване пунктирними лініями на малюнках рис.3(б) і рис.3(в).

Експериментально такі системи реалізуються завдяки взаємодії з декількома резонаторами або гармоніками того самого резонатора. У розділі показано, як у випадку взаємодії із двома сигналами, опис одягненої системи кубіт-резонатор можна розширити до, так званих, двічі одягнених станів. Гамільтоніан кубіту у «двічіодягненому» наближенні приймає вигляд

$$H_{full} = \hbar \frac{\delta\tilde{\omega}_{qb}}{2} \tilde{\sigma}_z + \hbar\delta\omega_r a^\dagger a + \hbar\tilde{g} (a\tilde{\sigma}^\dagger + a^\dagger\tilde{\sigma}) + \xi_p (a + a^\dagger), \quad (2)$$

де  $\delta\tilde{\omega}_{qb} = \Delta\tilde{E}/\hbar - \omega_p$  – відстроювання частоти «вдягненого» кубіта від пробного сигналу;  $\delta\omega_r = \omega_r - \omega_p$  – відстроювання частоти резонатора від пробного сигналу;  $\tilde{g} = g_1 \frac{\varepsilon_0}{\Delta E} \frac{\tilde{\Delta}}{\Delta\tilde{E}}$  – перенормований зв'язок кубіта та резонатора у випадку двічі «одягненої» системи;  $g_1$  – зв'язок кубіта та резонатора;  $\varepsilon_0$  – керуючий магнітний потік;  $\Delta E = \sqrt{\Delta^2 + \varepsilon_0^2}$  – рівні енергії

кубіта;  $\tilde{\sigma} = \frac{1}{2}(\tilde{\sigma}_x - i\tilde{\sigma}_y)$ ;  $\tilde{\varepsilon} = \Delta E - \hbar\omega_d$  – величина, яка дозволяє змінювати робочу точку у випадку «одягненого» кубіта;  $\tilde{\Delta} = \Delta A_d / 2\Delta E$  – відстань між рівнями «одягненого» кубіта;  $\Delta\tilde{E} = \sqrt{\tilde{\Delta}^2 + \tilde{\varepsilon}^2}$  – рівні енергії «одягненого» кубіта;  $\xi_p$  – амплітуда пробного сигналу;  $A_d$  – амплітуда сигналу накачки. Одягнений кубіт – це ефективна система, в якій завдяки взаємодії кубіта і резонатора відбулися процеси перенормування енергетичних станів. Умови обміну енергією фотонним полем пробного сигналу і полем «одягненого» кубіта мають такий вигляд

$$\hbar\omega_p = E_{\pm,n} - E_0, \quad (3)$$

$$\omega_{r,n} \pm \sqrt{\tilde{g}^2(n+1) + \left(\frac{\delta\tilde{\omega}_{qb}}{2}\right)^2} + \frac{\delta\tilde{\omega}_{qb}}{2} = \omega_p - \omega_r. \quad (4)$$

При слабкому пробному сигналі і слабкому зв'язку кубіта з резонатором ми маємо два типи резонансних умов:  $n=0$ ,  $\delta\tilde{\omega}_{qb} = 0$  – частоти пробного сигналу і Рабі частота кубіта рівні  $\omega_p = \Omega_R = \frac{\Delta\tilde{E}}{\hbar}$ ;  $n=1$ ,  $\delta\tilde{\omega}_{qb} = \omega_p$  – двофотонні процеси при подвоєній частоті пробного сигналу рівної Рабі частоті  $2\omega_p = \frac{\Delta\tilde{E}}{\hbar}$ .

У розділі детально вивчено ефект збільшення або послаблення амплітуди вихідного сигналу і запропонована ідея застосування даного ефекту в реалістичній системі. Із цією метою був розроблений теоретичний формалізм для опису проходження сигналу через систему кубіт-резонатор. Було розглянуто, як посилення і загасання вхідного сигналу залежать від параметрів системи (добротність резонатора, амплітуда сильного сигналу, час релаксації та інше). Загальна ідея полягає в тому, щоб знайти значення і співвідношення для параметрів системи та отримати максимальне посилення. У розділі систематично вивчається вплив таких параметрів як час когерентності, втрати резонатора, зв'язок і інших.

У **третьому розділі** дисертації «Напівквантове наближення. Порівняння квазікласичного і напівквантового наближень» опираючись на результати робіт нашої групи та провідних світових наукових груп у напрямку вивчення кубітів, демонструється опис системи кубіт-резонатор у дисперсному та резонансному режимах при різних наближеннях. Розглядається наближення для рівнянь Максвелла-Блоха (напівквантове і квазікласичне) і їхній опис системи. Розглянуто систему кубіт-резонатор, яка описується наступним гамільтоніаном

$$\frac{H_{rf}}{\hbar} = (\delta\omega_r + \chi\sigma_z)a^\dagger a + \frac{\delta\omega_q + \chi}{2}\sigma_z + \xi(a^\dagger + a) + \frac{\Omega}{2}(\sigma + \sigma^\dagger). \quad (5)$$

У рівнянні (5) застосовані наступні позначення:  $\delta\omega_q = \omega_q - \omega_p$  – відстроювання частоти кубіта від пробного сигналу;  $\delta\omega_r = \omega_r - \omega_d$  – відстроювання частоти резонатора від сигналу накачки;  $\xi$  – амплітуда пробного сигналу;  $\Omega$  – амплітуда сигналу накачки;  $\chi \approx -\frac{g^2 E_c}{\Delta_{qr}(\Delta_{qr} - E_c)}$  – величина зв'язку кубіта з резонатором у дворівневому наближенні;  $\Delta_{qr} = \omega_q - \omega_r$ ;  $E_c$  – зарядова енергія кубіта;  $\sigma_z$  – атомний оператор Паулі;  $a^\dagger / a$  – фотонний оператор знищення/народження;  $\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_x - i\sigma_y)$ .

На початку були отримані спрощені аналітичні формули для коефіцієнтів проходження у квазікласичному наближенні, що опускає корелятори виду  $\langle AB \rangle$ , де  $A, B$  атомні або фотонні оператори. Розв'язок такої системи у першому наближенні по малості амплітуди  $\xi_p$  пробного сигналу виглядає таким чином:

$$\langle a \rangle = \frac{\xi_p}{\hbar} \frac{\delta\tilde{\omega}'_{qb}}{\langle \sigma_z \rangle g^2 - \delta\tilde{\omega}'_{qb} \delta\tilde{\omega}'_r}, \quad (6)$$

$$\langle \sigma_z \rangle = -\tilde{\Gamma}_- / \tilde{\Gamma}_+. \quad (7)$$

Тут були застосовані наступні позначення:  $\delta\omega'_r = \omega_r - \omega_p - i\frac{\kappa}{2}$ ,  $\delta\omega'_q = \omega_q - \omega_p - i\frac{\Gamma_2}{z_0}$ ,  $z_0 = \tanh\left(\frac{\hbar\omega_q}{2kT}\right)$ ,  $\Gamma_2 = \Gamma_\phi = \frac{\Gamma_1}{2}$  – дисипативні феноменологічні коефіцієнти кубіту,  $\tilde{\Gamma}_\pm = \tilde{\Gamma}_\uparrow \pm \tilde{\Gamma}_\downarrow$  – перенормованні дисипативні феноменологічні коефіцієнти одягненого кубіту,  $\tilde{\Gamma}_{\downarrow/\uparrow}$  – дисипація пов'язанна з релаксацією у основний стан,  $\tilde{\Gamma}_\uparrow$  – дисипація пов'язана з переходом до збудженого стану. Рівняння (6) та (7) отримані аналітично та дозволяють аналізувати фізичні процеси у системі. Важно відмітити, що рівняння (7) демонструє, що середнє значення атомного оператора  $\sigma_z$  залежить від домінуючих дисипативних процесів у одягненій системі.

Квазікласичне наближення дозволяє описувати більшість квантово-механічних ефектів, пов'язаних з проходженням сигналів через одягнений кубіт. Проте цього наближення може бути недостатньо. Із цієї причини були поліпшені обчислення і ураховані наступні корелятори для опису кубіт-резонаторних систем.

У напівквантовому наближенні врахування кореляторів виду  $\langle AB \rangle$  призводить до збільшення системи Максвелл-Блоха. Така система є більш повною та дозволяє описувати експериментальні вимірювання також кількісно.

Важливо відзначити, що температура кубіта входить у формули (6) та (7) і впливає на спостережувані величини. На рис.4 амплітуда вихідного сигналу  $A$  побудована як функція пробної частоти  $\omega$  і амплітуди  $\Omega$  для випадку, коли частота кубіта не збігається із частотою накачування ( $\omega_q \neq \omega_d$ ). На вставці представлений графік у рамках напівквантового наближення, основний графік відповідає квазікласичному наближенню. Із рівнянь (6) та (7) маємо наступну умову зміщення положення резонансу у системі від частоти резонатора.

$$\delta\omega_r = -\langle \sigma_z \rangle \frac{g^2}{\Delta} \equiv -z_0 \chi, \quad (8)$$

де  $z_0$  відповідно несе інформацію про теплове збурення кубіта.

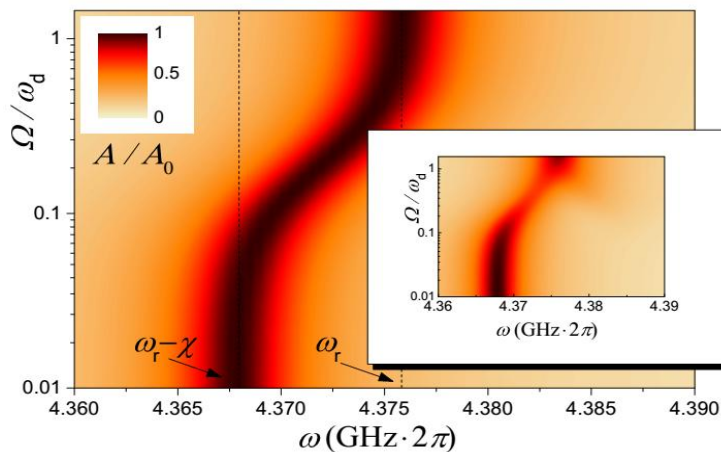


Рис. 4. Зсув резонансної частоти для кубіт-резонаторної системи.

У розділі розглянуто систему кубіт-резонатор, з акцентуванням увагу на найбільш вдалу, з погляду практичного застосування, систему кубіта - трансмон. Отримані результати демонструють, що найбільш простий підхід - квазікласична теорія, коли допускається, що всі корелятори факторизуються - має перевагу у вигляді одержання прозорих аналітичних рівнянь і формул.

Також ефективність квазікласичного підходу доводиться описом відповідних експериментів. З іншого боку, справедливості квазікласичної теорії вимагає перевірки і уточнення. Особливо вимагає уточнення квазікласичне наближення, коли важлива еволюція системи у часі. Як показано в розділі, тут істотні переваги має напівквантовий підхід, що враховує двооператорні кубіт-фотонні корелятори.

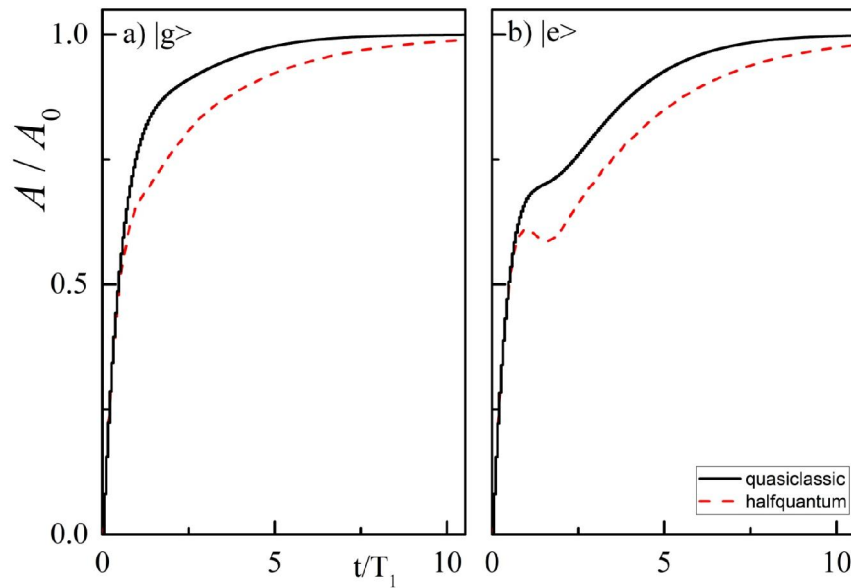


Рис. 5. Еволюція амплітуди вихідного сигналу  $A$  в часі.

На рис. 5 це відображено: суцільна чорна крива відповідає квазікласичному наближенню. Пунктирна червона крива відповідає напівквантовому наближенню. По осі абсцис відкладений час із моменту початку вимірів квадратури, що нормоване на час релаксації  $T_1$ . Правий малюнок, а), відображає зміну в часі амплітуди  $A$ , коли кубіт був приготовлений в основному  $|g\rangle$  стані. Лівий графік, б), демонструє залежність амплітуди  $A$ , коли кубіт приготовлений у збудженому  $|e\rangle$  стані.

Крім того, при важливості впливу температури на систему, напівквантове наближення описує вплив температури на виміри квадратури переданого поля з більшою точністю в порівнянні із квазікласичним наближенням. Через переплетення кореляторів кубіта-резонатора, коефіцієнт проходження сигналу резонатора несе інформацію про температуру кубіта (формула (8)).

У **четвертому розділі** дисертації «Взаємодія кубіта з одиночними фотонами» представлена техніка теоретичного опису взаємодії кубітів з фотонним сигналом в одномірному хвилеводі. Важливо відзначити, що в загальному виді даний підхід дозволяє враховувати неідентичність кубітів і будь-яке їхнє розташування у хвилеводі. Схожа ідея була запропонована для опису розповсюдження фотонів у зв'язаному оптичному резонаторі. Запропонований підхід заснований на рішенні завдання розсіювання і знаходженні коефіцієнтів поширення фотонів через хвилевід з кубітами. Вирази для коефіцієнтів проходження і відбиття ми будемо шукати за допомогою побудови матриці розсіювання, ґрунтуючись на проекційному формалізмі і методі неермітового гамільтоніана. Хвильова функція системи розглядається як сума функцій двох Гільбертових на півпросторів

$$|\Psi\rangle = P|\Psi\rangle + Q|\Psi\rangle = |\Psi_P\rangle + |\Psi_Q\rangle. \quad (9)$$

А рівняння Шредінгера приймає вигляд

$$(P+Q)H(P+Q)(|\Psi_P\rangle+|\Psi_Q\rangle)=E(|\Psi_P\rangle+|\Psi_Q\rangle). \quad (10)$$

Тоді, користуючись умовами повноти та ізолюваності напівпросторів можна знайти вирази для гамільтоніану у обраній частині простору

$$H_{eff}(E)=H_{QQ}+H_{QP}\frac{1}{E-H_{PP}+i\varepsilon}H_{PQ}, \quad (11)$$

де  $i\varepsilon$  введено з урахуванням дійсних власних значень гамільтоніана  $H_{PP}$ . А хвильова функція системи складається з хвильових функцій фотона у початковому стані, хвильової функції кубітної підсистеми та хвильової функції фотона після взаємодії

$$|\Psi\rangle=|in\rangle+|\Psi_{qubit}\rangle+|\Psi_{photon}\rangle, \quad (12)$$

$$|\Psi\rangle=|in\rangle+\frac{1}{E-H_{eff}}H_{QP}|in\rangle+\frac{1}{E-H_{PP}+i\varepsilon}H_{PQ}\frac{1}{E-H_{eff}}H_{QP}|in\rangle.$$

Метод неермітового гамільтоніана дуже зручний для рішення квантово-механічних завдань у теорії розсіювання. Цей формалізм був представлений для опису ядерних реакцій, а пізніше був адаптований і дороблений для застосування в інших областях фізики (наприклад, опис загальних флуктуацій провідників у мезоскопічних системах, транспорт електронів крізь твердотільні наноструктури, квантовий хаос у відкритих системах, флуктуації Еріксона в Рідберговських атомах. В роботі розглянуто систему, у якій кожний кубіт поміщений у фотонний резонатор. Це фізично обмежує число мод, з якими він може взаємодіяти й, тим самим, підвищує час життя кубіта. При цьому самі резонатори обмінюються фотоном безпосередньо із хвилеводом, здійснюючи, тим самим, непрямий зв'язок кубіта із хвилеводом. Повний гамільтоніан, що описує систему, включає фотонний резонатор з фундаментальною частотою  $\omega_c$ , розташований у хвилеводі, по якому можуть поширюватися фотони з довільною частотою  $\omega_k$ , а також кубіт із власною частотою  $\Omega$ . Параметр взаємодії резонатора із хвилеводом позначений як  $\zeta_l$ , відповідно, і резонатора з кубітом як  $\lambda_l$ . Кубіт описується в рамках спінової моделі, а фотон у хвилеводі розглядаємо у фоковському поданні. Гамільтоніан системи має такий вигляд:

$$H=\frac{1}{2}\hbar\Omega\sigma_z+\hbar\omega_c a^\dagger a+\sum_k\hbar\omega_k c_k^\dagger c_k+\sum_k\hbar\xi_1(c_k^\dagger a+c_k a^\dagger)+\hbar\lambda_1(a^\dagger+a)\sigma_x. \quad (13)$$

Резонатор накачується  $N$  фотонами. Фотон або поглинається кубітом, або переходить у хвилевід. Система була обмежена наступними станами:

- $N$  фотонів у резонаторі, кубіт в основному стані  $|g\rangle$ , нуль фотонів у хвилеводі  $|0_w\rangle \Rightarrow |1\rangle = |0_w\rangle \otimes |g, N\rangle$ ;
- $N-1$  фотонів у резонаторі, кубіт у збудженому стані  $|e\rangle$ , нуль фотонів у хвилеводі  $|0_w\rangle \Rightarrow |2\rangle = |0_w\rangle \otimes |e, N-1\rangle$ ;
- $N-1$  фотонів у резонаторі, кубіт в основному стані  $|g\rangle$ , фотон у хвилеводі  $|1_w\rangle \Rightarrow |K_1\rangle = |0_w\rangle \otimes |g, N-1\rangle$ ;
- $N-2$  фотонів у резонаторі, кубіт у збудженому стані  $|e\rangle$ , фотон у хвилеводі  $|1_w\rangle \Rightarrow |K_2\rangle = |1_w\rangle \otimes |e, N-2\rangle$ ;

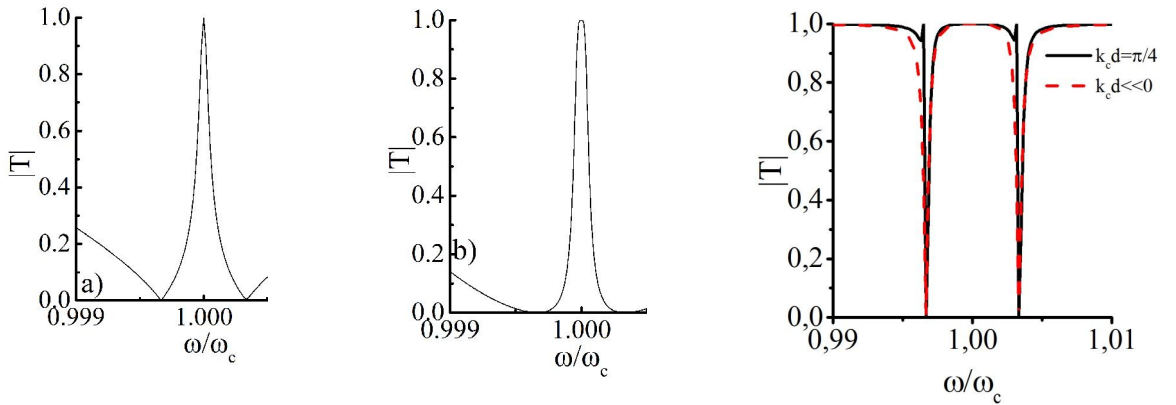


Рис. 6. Амплітудно-частотні характеристики в слабкому дисперсійному режимі при малих (а) і великих (б) ( $k_c d = \pi/2$ ) відстанях між резонаторами. Частота кубітів відповідає частоті резонаторів  $\Omega = \omega_c$ .

Розглянуто фотонну взаємодію одно- та двокубітної системи у відкритому хвилеводі. Розглядається проходження одиночного фотона. Це дозволяє стверджувати, що спостережувані ефекти мають чисто квантомеханічну природу. У випадку одномірного хвилеводу більшу роль грають відстані між об'єктами, що вимагає звернути увагу на особливості впливу цієї відстані на процеси розсіювання одиночного фотона. Для однокубітної системи було проаналізовано залежність коефіцієнтів відбиття та проходження від величини зв'язку кубіта з резонатором, та резонатора з хвилеводом:

$$t_{11} = \frac{(\omega - \Omega_{1+})(\omega - \Omega_{1-})}{(\omega - \Omega_{1+})(\omega - \Omega_{1-}) - i\Gamma(\omega - \Omega)}, \quad (14)$$

$$r_{11} = \frac{i\Gamma(\omega - \Omega)}{(\omega - \Omega_{1+})(\omega - \Omega_{1-}) - i\Gamma(\omega - \Omega)}, \quad (15)$$

$$\Omega_{1\pm} = \frac{\Omega + \omega_c}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{4\lambda^2 + (\Omega - \omega_c)^2}, \quad (16)$$

де  $\Omega/\omega_c$  - частоти кубіта та резонатора відповідно;  $\omega$  - частота вхідного фотона. Параметр взаємодії резонатора із хвилеводом позначений як  $\Gamma$ , відповідно, і резонатора з кубітом як  $\lambda$ .

Були отримані вирази для коефіцієнтів проходження, які відображають залежність амплітудно-частотної характеристики систему від відстані між кубіт-резонаторними підсистемами для двокубітної системи (рис. 6). При відстанях менш  $\pi/2$  і порівнянних з довжиною хвилі фундаментальних мод резонатора виникає резонанс із асиметричним профілем (рис. 6). У системі конкурують два хвильових процеси. Відбувається інтерференція хвильових функцій, пов'язаних з кожною парою кубіт-резонатор і ми спостерігаємо резонанс Фано.

Модель неермітового гамільтоніану описує раніше відомі ефекти, такі, як залежність швидкості випускнення фотона в резонатор від відстані між кубітами, поява Фано резонансів на частотах з урахуванням Рабі розчеплення в чистому квантово-механічному випадку. Це відображає, що спостережувані ефекти мають місце навіть у випадку поширення одиночного фотона в системі. Також даний розрахунок ураховує ефект не миттєвої взаємодії фотона із двома резонаторами, що спричиняється появу інтерференції хвильових функцій віртуальних (недетектованих) фотонів. Було показано, що внутрішні резонанси системи залежать не тільки від її конфігурації, але і від частоти фотона, що налітає.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішене важливе завдання теоретичної фізики конденсованого стану, а саме: теоретично описано квантово-механічні властивості мезоскопічних систем на основі надпровідних кубітів при їхній взаємодії з електромагнітними і однофотонними сигналами. Установлено вплив параметрів такої системи на коефіцієнти проходження і відбиття сигналів.

Основними оригінальними результатами дисертаційної роботи є:

1. Знайдено явний вираз коефіцієнта проходження електромагнітного сигналу крізь резонатор, який зв'язується з кубітом. Кубіт взаємодіє з двома сигналами – з високоамплітудним та слабоамплітудним. Встановлено, що кубіт виступає в якості квантового нелінійного об'єкту і можливе посилення або ослаблення вихідного сигналу.

2. Встановлено вплив параметрів релаксації системи кубіт-резонатор на амплітуду вихідного сигналу. Показано, що у системі кубіт-резонатор можливо створити інверсію заселеності енергетичних рівнів та суттєве



посилення вихідного сигналу. Показано, що відмінна від абсолютного нуля температура системи призводить до зменшення абсолютного значення коефіцієнту проходження.

3. Знайдено внесок двокореляторної поправки в рівняннях Максвелла-Блоха для опису еволюції взаємодії двомодового резонатору та кубіту. Показано, що врахування в рівняннях Максвелла-Блоха кореляторів взаємодії квантових полів кубіта та резонатора суттєво збільшує точність теоретичного опису реальної системи. Встановлено, що температуру кубіта можливо визначити завдяки коефіцієнту проходження сигналу через резонатор.

4. Virішено задачу проходження однофотонних сигналів через систему хвилевід-кубіт-резонатор. Встановлено вплив кубіта на коефіцієнта проходження фотону через хвилевід, пов'язаний з системою кубіт-резонатор. Запропоновано оригінальний аналітичний метод для розв'язку задач проходження одиночних фотонів через хвилевід, що базується на методі неермітового гамільтоніану і матриці розсіювання. Показано, що швидкість фотонного випромінювання залежить від взаємного розміщення систем кубітів-резонаторів. Встановлено, що в системі можливі резонанси з асиметричним профілем, які залежать від частоти вхідного фотону.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Amplification and attenuation of the transmitted signal by doubly-dressed states / S.N. Shevchenko, G. Oelsner, Ya.S. Greenberg, P. Macha, **D.S. Karpov**, M. Grajcar, U. Hubner, A.N. Omelyanchouk, E. Il'ichev // Phys. Rev. B. – 2014. – V. 89, No.18. – P. 184504-1–184504-10.

2. Signal amplification in a qubit-resonator system / **D.S. Karpov**, G. Oelsner, S.N. Shevchenko, Ya.S. Greenberg, E. Ilichev // Low Temp. Phys. – 2016. – T. 42, № 3. – P. 189–195.

3. Landau-Zener-Stuckelberg-Majorana lasing in circuit QED / P. Neillinger, S.N. Shevchenko, J. Bogár, M. Reháč, G. Oelsner, **D.S. Karpov**, U. Hübner, O. Astafiev, M. Grajcar, E. Il'ichev // Phys. Rev. B. – 2016. – V. 94, No. 9 – P. 094519-1–094519-10.

4. Scattering of a single photon on a two-qubit structure with resonators / N. Sultanov, **D. S. Karpov**, Ya.S. Greenberg, S.N. Shevchenko, A. A. Shtygashev, // ФНТ. – 2017. – Т. 43, № 7. – P. 1003–1010.

5. Shevchenko S. N. Thermometry and memcapacitance with qubit-resonator system, **D. S. Karpov**, S. N. Shevchenko // Thermometry and memcapacitance with qubit-resonator system // Phys. Rev. Applied. – V. 10, No. 1.- P. 014013-1–014013-11.

6. Transport properties of a microwave photon in a system with two artificial atoms / A.N. Sultanov, **D.S. Karpov**, Ya.S. Greenberg, B.I. Ivanov, S.N. Shevchenko // 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering “APEIE-2016”, October 3–6, 2016 : book of abstr. – Russia, Novosibirsk, 2016. – P. 118–121.

7. Photon transport in qubit-resonator structures / A. Sultanov, **D.S. Karpov**, Ya. S. Greenberg, S.N. Shevchenko // VII International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics”, June 6–10, 2016 : book of abstr. – Ukraine, Kharkiv, 2016. – P. 46.
8. Study of microwave transport in solid-state hybrid qubit-resonator structure / A. Sultanov, **D.S. Karpov**, Ya. S. Greenberg, S.N. Shevchenko // XIV All-Russian School-Seminar on Physics of Condensed Matter, November 12–19, 2015 : book of abstr. – Russia, Voroneg, 2015. – P. 35.
9. Amplification in the doubly-dressed system / **D.S. Karpov**, S.N. Shevchenko, G. Oelsner, Ya.S. Greenberg, P. Macha, M. Grajcar, A.N. Omelyanchouk, E. Il'ichev // 3rd International Conference on Nanophysics and Nanoelectronics ”Mesoscopic Structures: Fundamentals and Applications”. – June 22–27, 2015 : book of abstr. – Russia, Novosibirsk, 2015. – P. 14.
10. Karpov D.S. Strong driving regime of the qubit-resonator system / **D.S. Karpov**, S.N. Shevchenko, A.N. Omelyanchouk, E. Il'ichev // VI International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics”, June 1–5, 2015 : book of abstr. – Ukraine, Kharkiv, 2015. – P. 39.
11. Karpov D.S. Theoretical study of the signal amplification in the qubit-resonator system / **D.S. Karpov**, S.N. Shevchenko // V International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics”, June 2–5, 2014 : book of abstr. – Ukraine, Kharkiv, 2014. – P. 45.
12. Karpov D.S. Amplification and attenuation of the transmitted signal by qubit's dressed states / **D.S. Karpov**, S.N. Shevchenko // IV International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics”, June 3–7, 2013 : book of abstr. – Ukraine, Kharkiv, 2013. – P. 31.
13. Karpov D.S. Qubit's dressed states in resonator / **D.S. Karpov**, S.N. Shevchenko // III International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics”, May 14–18, 2012 : book of abstr. – Ukraine, Kharkiv, 2012. – P. 67.
14. Карпов Д.С. Исследование микроволнового транспорта в твердотельной гибридной структуре кубит-резонатор / Я.С. Гринберг, А.Н. Султанов, **Д.С. Карпов** // 16 Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества “СПФКС–16”, 12–19 Ноября, 2015 : тезисы. – Россия, Екатеринбург, 2015. – С. 217.
15. Karpov D.S. Quantum memcapacitance with transmon-resonator system / **D.S. Karpov**, S.N. Shevchenko, A. Fedorov // 3th biennial European Conference on Applied Superconductivity “EUCAS 2017”, September 17–21, 2017. – Switzerland, Geneva, 2017. Access mode: <https://www.symporg-registrations.com/symporg/frontend/reg/absViewDocumentFE.csp?popup=1&documentID=7356&eventID=112>

## АНОТАЦІЯ

**Карпов Д.С. Особливості електродинаміки мезоскопічної системи надпровідних квантових бітів, що взаємодіють з резонатором. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика. – Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України, Харків, 2018.

Дисертація присвячена теоретичному дослідженню особливостей взаємодії дворівневих систем – квантових бітів – з електромагнітним полем резонатора у випадках класичного і квантового сигналу. Знайдено явні вирази для коефіцієнта проходження електромагнітного сигналу через систему кубіт-резонатор в разі двомодового резонатора. Показано, що взаємодія кубіта з двома сигналами produce до посилення або ослаблення вихідного сигналу. Встановлено, що кубіт виступає в якості квантового нелінійного об'єкта. В роботі запропоновано оригінальний підхід до вирішення завдань проходження одиночного фотона через хвилевід, заснований на методі неермітового гамільтоніана і матриці розсіювання. Показано, що швидкість фотонного випромінювання залежить від взаємного розташування систем кубітів-резонаторів. Встановлено, що в системі можливі резонанси з асиметричним профілем, які залежать від частоти вхідного фотона.

**Ключові слова:** кубіт; квантова інтерферометрія; напівквантове наближення; квазікласичне наближення; рівняння Ліндблада; рівняння Максвелла-Блоха; система кубіт-резонатор.

## АННОТАЦИЯ

**Карпов Д.С. Особенности электродинамики мезоскопических системы сверхпроводящих квантовых битов, взаимодействующих с резонатором.– Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика. – Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины, Харьков, 2018.

Диссертация посвящена теоретическому исследованию особенностей взаимодействия искусственных двухуровневых систем на основе сверхпроводящих квантовых битов с электромагнитным полем резонатора в случаях классического и квантового сигнала. Найденные явные выражения для коэффициента прохождения электромагнитного сигнала через систему кубит-резонатор в случае двомодового резонатора. Показано, что в случае взаимодействия кубита с высокоамплитудным и слабоамплитудным сигналами возможно усиление или ослабление выходного сигнала. Установлено, что кубит выступает в качестве квантового нелинейного объекта.

Установлено влияние параметров релаксации кубита и резонатора на коэффициент прохождения электромагнитного сигнала через систему кубит-резонатор. Показано, что в системе кубит-резонатор возможно существенное

усиление выходного сигнала благодаря созданию инверсной заселенности энергетических уровней. Найдено, что отличная от абсолютного нуля температура системы приводит к уменьшению абсолютного значения коэффициента прохождения. В работе учтен и найден вклад двокорреляторной поправки в уравнениях Максвелла-Блоха для описания эволюции системы кубита-резонатора. Показано, что учет в уравнениях Максвелла-Блоха корреляторов взаимодействия квантовых полей кубита и резонатора существенно увеличивает точность теоретического описания реальной системы. Установлено, что коэффициент прохождения сигнала через резонатор несет в себе информацию о температурном состоянии кубита.

В работе решена задача прохождения однофотонных сигналов через волновод, связанного с системой кубит-резонатор. Предложен оригинальный подход к решению задач прохождения одиночного фотона через волновод, основанный на методе неэрмитового гамильтониана и матрицы рассеяния. Показано, что скорость фотонного излучения зависит от взаимного расположения систем кубитов-резонаторов. Установлено, что в системе возможные резонансы с асимметричным профилем, которые зависят от частоты входного фотона.

**Ключевые слова:** кубит; квантовая интерферометрия; полуквантовое приближения; квазиклассическое приближение; уравнения Линдблада; уравнения Максвелла-Блоха; система кубит-резонатор.

## ABSTRACT

**Karpov D.S. Features of the electrodynamic of the mesoscopic system of superconducting quantum bits interacting with a resonator. – Manuscript.**

Thesis for a candidate's degree in physics and mathematics in speciality 01.04.02 – theoretical physics. – B.I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering, NAS of Ukraine, Kharkov, 2018.

The thesis is devoted to a theoretical study of the features of the interaction of two-level systems – quantum bits – with the electromagnetic field of a resonator in cases of a classical and quantum signal. Explicit expressions are found for the coefficient of transmission of an electromagnetic signal through the qubit resonator system in the case of a dual-mode resonator. It is shown that in the case of the interaction of a qubit with two signals, the output signal can be amplified or weakened. It is established that the qubit acts as a quantum nonlinear object. The problem of passing single-photon signals through a waveguide connected with a qubit-resonator system have been solved. An original approach to solving problems of passing a single photon through a waveguide based on the method of a non-hermitischer Hamiltonian and a scattering matrix is proposed. It has been established that in the system there are possible resonances with an asymmetric profile, which depend on the frequency of the input photon.

**Keywords:** qubit; quantum interferometry; semi-quantum approximation; semiclassical approximation; Lindblad equation; Maxwell-Bloch equation; qubit-resonator system.