

Контроль запутанности пары взаимодействующих кубитов нерезонансным переменным полем

М.В. Бастрасова¹, В.О. Муняев¹

¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Гагарина 23, Нижний Новгород, Россия, 603952

Аннотация

Изучается запутанность и многофотонные переходы в системе связанных сверхпроводниковых потоковых кубитов под действием переменного нерезонансного поля (частота внешнего поля намного больше, чем частоты кубитных переходов). В рамках квазиэнергетического представления и теории возмущения Флоке найдены положения многофотонных переходов, а также показана их связь с поведением меры запутанности в системе.

Ключевые слова

кубит, запутанность, многофотонные резонансы, квазиэнергии, теория Флоке

1. Введение

В настоящее время ведутся активные исследования базовых элементов вычислительных систем нового поколения – кубитов [1]. Одним из перспективных типов кубитов являются сверхпроводниковые системы на джозефсоновских переходах [1], на базе которых недавно был создан первый алгоритмический квантовый компьютер и продемонстрировано квантовое превосходство. Для реализации квантовых вычислений важной научной задачей является контроль и управление запутанностью (entanglement), а также изучение многофотонных эффектов, возникающих за счет воздействия на систему взаимодействующих кубитов электромагнитных управляющих полей.

В данной работе нами изучается возможность управления запутанностью в системе двух связанных сверхпроводниковых потоковых кубитов путем воздействия на систему внешних электромагнитных полей (dc + ac) фиксированной частоты (нерезонансной относительно кубитным переходам). Для описания динамики и изучения многофотонных переходов нами использованы идеи квазиэнергетического представления [2], которое дает точные промежуточные состояния системы в переменном поле произвольной амплитуды. Аналитически в рамках теории возмущения Флоке по туннельным энергиям кубитов найдены условия возникновения многофотонных резонансов при произвольных амплитудах управляющих полей. Изучено влияние бозонного резервуара (эффектов диссипации) на характер многофотонных переходов, а также численно рассчитана мера запутанности [3] (concurrence) двух связанных кубитов. Установлено, что сближения квазиэнергетических уровней играют основную роль в формировании запутанности.

2. Краткое описание модели и подходов

Гамильтониан двух связанных сверхпроводниковых потоковых кубитов [1]:

$$\hat{H} = -\hat{H}_1 \otimes I - I \otimes \hat{H}_2 - J \sigma_x^{(1)} \otimes \sigma_x^{(2)}, \quad (1)$$

где $\hat{H}_i = \varepsilon_i \sigma_z^{(i)} + \Delta_i \sigma_x^{(i)}$ – гамильтониан i -го кубита ($i=1,2$), $\varepsilon_i(t) = \varepsilon_i^{dc} + \varepsilon_i^{ac} \cos(\omega t + \varphi)$ – внешнее поле (dc + ac), Δ_i – туннельные константы, J – энергия связи, $\sigma_x^{(i)}, \sigma_z^{(i)}$ – матрицы Паули.

Для четырехуровневой системы (1) в рамках квазиэнергетического представления найдено поведение квазиэнергетических уровней в переменном поле γ_j (Рисунок 1 а), а также в базисе Флоке методом теории возмущений по туннельным константам Δ_i (до 3 порядка малости)

получены условия возникновения пиков для вероятностей перехода связанных кубитов: $\bar{P}_{1 \rightarrow 2}: \varepsilon_2^{dc} + J + n\omega \approx 0$, $\bar{P}_{1 \rightarrow 3}: \varepsilon_1^{dc} + J + m\omega \approx 0$, $\bar{P}_{1 \rightarrow 4}: \varepsilon_1^{dc} + \varepsilon_2^{dc} + n\omega \approx 0$. Кроме того, изучено влияние эффектов диссипации и меры запутанности C (concurrence) в предположении, что каждый кубит приводится во взаимодействие с бозонным термостатом на основе численного решения уравнения Флоке-Маркова [3] для оператора матрицы плотности. Как видно из Рисунка 1, многофотонные резонансы имеют место именно в моменты сближения нескольких квазиуровней системы, когда и наблюдается максимальная запутанность в системе кубитов. Подавление запутанности, C , происходит при выполнении условий многофотонных переходов в сепарабельных подпространствах кубитах $1 \rightarrow 2$ и $1 \rightarrow 3$.

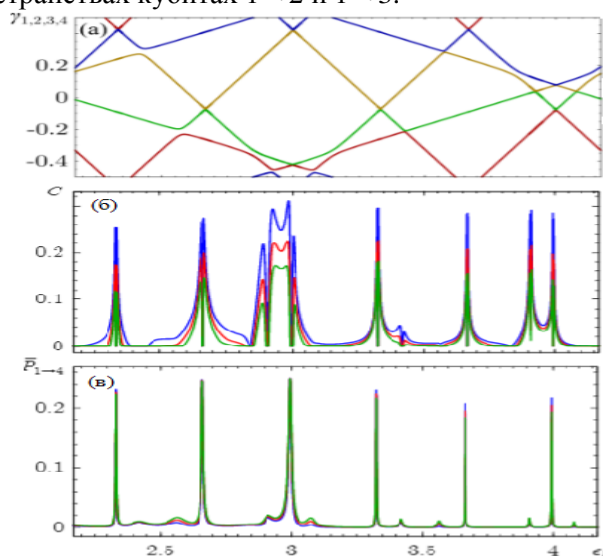


Рисунок 1: (а) Квазиэнергетические уровни γ_j в системе кубитов (1). Зависимость меры запутанности (б) и (в) вероятности перехода $\bar{P}_{1 \rightarrow 4}$ как функция ε_1^{dc} . Параметры системы: $\Delta_2 = 2\Delta_1 = 0.2$, $J = 0.15$, $\varepsilon_{1,2}^{ac} = 5$, $\omega = 1$

3. Заключение

В работе показано, что влияние диссипации в системе не влияет на найденные положения резонансов в рамках теории возмущения Флоке, а настройкой амплитуд внешних полей можно контролируемым образом управлять запутанностью в системе.

4. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-2740.2021.1.2.

5. Литература

- [1] Krantz, P. A Quantum Engineer's Guide to Superconducting Qubits / P. Krantz, M. Kjaergaard, F. Yan, T.P. Orlando, S. Gustavsson, W.D. Oliver // Applied Physics Reviews. – 2019. – Vol. 6. – P. 021318.
- [2] Shirley, J.H. Solution of the Schrödinger equation with a Hamiltonian periodic in time / J.H. Shirley // Phys. Rev. – 1965. – Vol. 138. – P. B979.
- [3] Скалли, М.О. Квантовая оптика / М.О. Скалли, М.С. Зубайри. – М.: Физматлит, 2003. – 510 с.