

Перепутывание двух дипольно-связанных кубитов, индуцированное квантовым полем резонатора со средой Керра

Е.К. Башкиров¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34а, Самара, Россия, 443086

Аннотация

В настоящей работе рассмотрена динамика двух дипольно-связанных сверхпроводящих кубитов, взаимодействующих с модой квантового электромагнитного поля идеального резонатора со средой Керра. Показано, что при определенных условиях керровская нелинейность и прямое диполь-дипольное взаимодействие кубитов могут приводить к существенному увеличению максимальной степени перепутывания кубитов, индуцированного полем резонатора.

Ключевые слова

Сверхпроводящие кубиты, среда Керра, диполь-дипольное взаимодействие, согласованность

1. Введение

Описание динамики естественных и искусственных двухуровневых атомов (кубитов), таких как сверхпроводящие кольца, взаимодействующих с микроволновыми полями копланарных резонаторов, является одной из наиболее актуальных проблем современной физики квантовых вычислений. Исследования таких физических систем позволили создать прообразы квантовых компьютеров и квантовых сетей. Дальнейший прогресс в данной области требует изучения наиболее эффективных схем генерации и контроля перепутывания состояний кубитов. Теоретические исследования систем кубитов, взаимодействующих с выделенными модами резонаторов, основаны на модели Джейнса-Каммингса и ее обобщениях. В последние годы были рассмотрены многочисленные обобщения МДК. В частности, изучалась динамика кубитов в модели с керровской средой. Экспериментально такая модель была реализована на сверхпроводящих кубитах в копланарных резонаторах [1]. В нашей работе [2] было исследовано влияние керровской нелинейности на динамику перепутывания двух сверхпроводящих кубитов, взаимодействующих с модой поля копланарного резонатора. Хорошо известно, одним из наиболее эффективных механизмов увеличения степени перепутывания кубитов является диполь-дипольное взаимодействие. Поэтому представляет значительный интерес обобщить результаты работы [2] на случай двухкубитной модели Джейнса-Каммингса со средой Керра при наличии диполь-дипольного взаимодействия.

В настоящей работе мы исследуем влияние диполь-дипольного взаимодействия на динамику перепутывания двух сверхпроводящих кубитов, резонансно взаимодействующих с модой квантового микроволнового поля резонатора с керровской средой.

2. Модель и её точное решение

В работе рассмотрена система двух идентичных дипольно-связанных сверхпроводящих кубита, резонансно взаимодействующих с модой квантового поля со средой Керра. Гамильтониан взаимодействия такой модели быть записан как

$$H = \hbar g(\sigma_1^+ a + a^+ \sigma_1^- + \sigma_2^+ a + a^+ \sigma_2^-) + \chi a^{+2} a^2 + \hbar J(\sigma_1^+ \sigma_2^- + \sigma_2^+ \sigma_1^-), \quad (1)$$

где использованы стандартные для квантовой оптики и квантовой информатики обозначения и g – константа кубит-фотонной связи, χ – константа керровской нелинейности и J – параметр диполь-дипольного взаимодействия.

Предположим, что в начальном состоянии первый кубит возбужден, а второй находится в основном состоянии ($|+, -\rangle$), а поле находится в фоковском состоянии $|n\rangle$ ($n = 0, 1, 2 \dots$)

Нами найдено в представлении “одетых” состояний, т.е. собственных функций гамильтониана (1), точное решение уравнения Шредингера. На основе точного решения вычислена полная матрица плотности системы и редуцированная матрица плотности кубитов. Редуцированная матрица плотности кубитов использована для вычисления аналитического выражения для параметра перепутывания кубитов – согласованности $C(t)$. Результаты численного моделирования временной зависимости согласованности представлены на рис. 1.

3. Результаты и обсуждение

Отрицательность представлена на рис. 1 как функция безразмерного времени gt для фиксированного числа фотонов в моде резонаторного поля $n=1$ и различных значений безразмерных параметров керровской нелинейности χ и диполь-дипольного взаимодействия α . На рис. 1а показано поведение согласованности для модели без керровской среды. При этом сплошная линия соответствует $J=0$, а штриховая линия соответствует $J=0.1g$. Из рис. 1а хорошо видно, что в отсутствие керровской нелинейности включение диполь-дипольного взаимодействия кубитов приводит к существенному увеличению максимальной степени перепутывания кубитов. На рис. 1б показано поведение согласованности для тех же значений интенсивности диполь-дипольного взаимодействия, но для резонатора с керровской нелинейностью $\chi=0.1g$. В рассматриваемом случае прямое диполь-дипольное взаимодействие кубитов практически не влияет на максимальную степень перепутывания кубитов, но уменьшает период огибающей осцилляций Раби согласованности. Полученные результаты могут быть полезны при выборе оптимальных режимов функционирования квантовых устройств, таких как квантовые компьютеры и квантовые сети

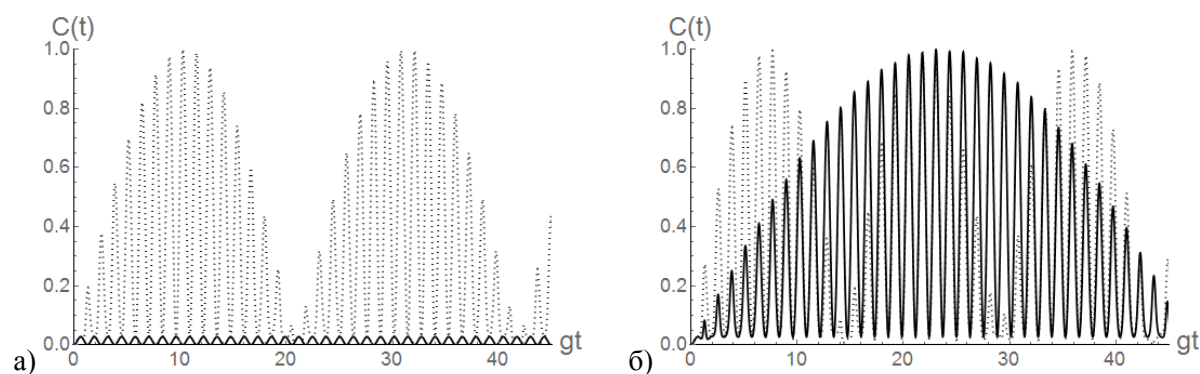


Рисунок 1: Согласованность как функция безразмерного времени gt в отсутствии (а) и при наличии керровской нелинейности (б)

4. Литература

- [1] Kirchmair, G. Observation of quantum state collapse and revival due to the single-photon Kerr effect / G. Kirchmair // Nature. – 2013. – Vol. 495. – P. 205-209.
- [2] Evseev, M.M. Thermal entanglement in Tavis–Cummings model with Kerr nonlinearity / M.M. Evseev, E.K. Bashkirov // International Conference on Information Technology and Nanotechnology. IEEE Publisher. – 2020. DOI: 10.1109/ITNT49337.2020.9253347.