

Эффекты статистики фотонов при смещении волн на единичном кубите

Погосов В.В. * ^{1,2}, Дмитриев А.Ю.^{3,4}, Астафьев О.В.^{5,3,6}

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие “Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова”, Москва, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук

³ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)”, Долгопрудный, Россия

⁴ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский технологический университет ”МИСиС”, Москва, Россия

⁵ Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

⁶ Университет Лондона, Лондон, Великобритания

Статья поступила в редакцию 01.09.2022

Одобрена после рецензирования 19.10.2022

Принята к публикации 31.10.2022

Аннотация

Рассматривается теоретически смещение волн при облучении одиночного сверхпроводникового кубита двумя фотонными полями. Первый сигнал — это классический монохроматический сигнал (накачка), а второй — неклассический свет. В частности, мы рассматриваем два примера неклассического света: (1) широкополосный сжатый свет, который может генерировать вырожденный параметрический усилитель, и (2) периодически возбуждаемую квантовую суперпозицию фокковских состояний с 0 и 1 фотонами, которая может порождаться источником одиночных фотонов (кубитом-источником) при накачке его соответствующими импульсами. Показано, что смещение классических и неклассических фотонных полей приводит к появлению боковых пиков в рассеянном излучении из-за упругого многофотонного рассеяния на пробном кубите, который выступает в роли нелинейного элемента. Продемонстрировано, что структура боковых пиков качественным образом отличается от ситуации, когда смешиваются два классических монохроматических сигнала с немного отличающимися частотами. Наиболее интересной особенностью является отсутствие некоторых боковых пиков, отвечающих отдельным многофотонным процессам, которые оказываются невозможными из-за особенностей статистики падающей волны. Сделан общий вывод о том, что анализ амплитуд пиков можно использовать для исследования статистики фотонов в неклассической моде, что потенциально может найти применение в квантовой сенсорике.

Ключевые слова: кубит, фотон, нелинейные оптические процессы, смещение волн, квантовая статистика

Введение

Смещение волн - хорошо известное явление в области нелинейной оптики, которое имеет различные применения. Этот эффект проявляется в генерации волн с новыми частотами в результате взаимодействия между входящими двумя или тремя волнами, которая сохраняет общую энергию фотонов. Смещение волн обычно проявляется в нелинейной среде, характеризующейся ненулевой восприимчивостью второго или более высокого порядка. Недавний прогресс в методах миниатюризации и управлении квантовыми полями привел к возможности реализации нелинейных эффектов на уровне одной искусственной квантовой системы. Прогресс в этом направлении имеет важное значение в контексте квантовой обработки информации и квантовой сенсорики.

Одной из перспективных платформ для построения квантовых устройств являются сверхпроводящие квантовые схемы. В частности, сверхпроводящие системы предлагают режимы, недоступные для естественных атомов, что позволяет реализовать различные необычные явления квантовой оптики как в конфигурациях на чипе, так и в открытом пространстве.

* Автор, ответственный за переписку: Вальтер Валентинович Погосов, walter.pogosov@gmail.com

Смешение волн на единичном кубите

Примером нелинейного оптического явления является смешение волн на одном искусственном атоме (кубите), что было продемонстрировано экспериментально в серии статей [1] - [3]. Атом играет роль нелинейного элемента, обеспечивающего взаимодействие между микроволнами. В работе [3] было продемонстрировано волновое смешение непрерывных классических сигналов на сверхпроводящем кубите, связанном с копланарным волноводом, и наблюдалось существование узких боковых пиков разных порядков нелинейности, которые были приписаны упругому многофотонному рассеянию. Хотя как экспериментальные, так и теоретические результаты [3] были получены для классических сигналов, было высказано предположение, что амплитуды боковых пиков, в целом, должны быть чувствительны к статистике фотонов падающих волн, и эта особенность может быть использована для исследования их статистических свойств. Данное предположение может быть реализовано путем смешивания классических и неклассических сигналов на атоме, что, согласно указанной гипотезе, должно позволить восстановить информацию о квантовой статистике в неклассической моде.

Смешение классического и неклассического света

В данной работе мы теоретически рассматриваем смешение волн в указанной постановке, то есть с участием неклассического фотонного поля. Мы рассматриваем динамику одиночного кубита, облучаемого одновременно когерентной волной и неклассическим светом с близкими несущими частотами. Рассмотрены два примера неклассического поля, создаваемого либо вырожденным параметрическим усилителем, либо источником одиночных фотонов.

Построено описание динамики единичного кубита под действием соответствующих накачек (классической и неклассической). Для этого были выведены обобщенные уравнения Максвелла-Блоха, для которых были аналитически получены квазистационарные решения, соответствующие установившемуся решению для кубита.

Обнаружено, что структура пиков в спектре рассеянного сигнала не идентична случаю волнового смешения двух непрерывных когерентных волн — например, некоторые пики вовсе отсутствуют. Для случая однофотонного источника при смешении с когерентным сигналом мы получаем трехпиковый спектр. Для сжатого света из вырожденного параметрического усилителя в одной моде и классической накачки в другой мы получаем только пики, содержащие четное число фотонов, а остальные пики отсутствуют. В случае сжатого света с конечной шириной полосы, вклад в амплитуды боковых пиков вносят только многофотонные процессы с участием коррелированных пар сжатого поля. Такие ограничения носят еще более строгий характер для фокских состояний с 0 и 1 фотонами, так что в этом случае появляется только один боковой пик, что и приводит к появлению трехпикового спектра.

Заключение

Мы теоретически рассмотрели смешение волн между классическим монохроматическим сигналом и неклассическим светом. Перемешивание происходит за счет взаимодействия двух фотонных полей на одном кубите, что порождает упругие многофотонные процессы. Были рассмотрены два конкретных примера неклассического света: широкополосный сжатый свет, который может создаваться вырожденным параметрическим усилителем, и периодически возбуждаемая суперпозиция фокских состояний с 0 и 1 фотонами, которые могут генерироваться однофотонным источником.

Спектр излучаемого света, содержащий боковые пики, связанные с нелинейностями разных порядков, отличается от аналогичного спектра в случае облучения кубита двумя классическими накачками. Причина в том, что неклассические фотонные поля характеризуются нулевой заселенностью определенных фокских состояний.

Таким образом, амплитуды боковых пиков можно использовать для исследования неклассической статистики света. Ключевая идея состоит в том, что свет, статистические свойства которого должны быть определены, должен быть смешан с классическим сигналом на одном искусственном атоме. Отсутствие некоторых пиков в упругом спектре излучаемого света по сравнению со случаем смешения двух классических сигналов показывает, что первый сигнал является сильно неклассическим.

Список литературы

- [1] Dmitriev, A. Yu., Shaikhaidarov, R., Antonov, V. N., Hönigl-Decrinis, T., Astafiev, O. V. Quantum wave mixing and visualisation of coherent and superposed photonic states in a waveguide // Nature Communications. – 2017. – № 8. – 1352.

- [2] Hönigl-Decrinis, T., Antonov, I. V., Shaikhaidarov, R., Antonov, V. N., Dmitriev, A. Yu., Astafiev, O. V. Mixing of coherent waves in a single three-level artificial atom // Physical Review A. – 2018. – № 98. – 041801(R).
- [3] Dmitriev, A. Yu., Shaikhaidarov, R., Hönigl-Decrinis, de Graaf, S.E., Antonov, V. N., Astafiev, O. V. Probing photon statistics of coherent states by continuous wave mixing on a two-level system // Physical Review A. – 2019. – № 100. – 013808.