

Эффекты статистики фотонов при смешении 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 смешение 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 фоковских состояний с 0 и 1 фотонами, которая может порождаться источником одиночных фотонов (кубитом-источником) при накачке его соответствующими импульсами. Показано, что смешение 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, смешение волн, квантовая статистика

Введение

Смешение 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. Смешение 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 фоковских 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 фоковских 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 фоковских 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., Hönl-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.

WAVE MIXING ON A SINGLE QUBIT: EFFECTS OF PHOTON STATISTICS

Pogosov W. V.^{1,2,*}, Dmitriev A. Yu.^{3,4}, Astafiev O.V.^{5,3,6}

¹ Dukhov Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

² Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics, Moscow, Russia

³ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

⁴ Moscow Institute for Steel and Alloys, Moscow, Russia

⁵ Skolkovo Institute for Science and Technologies, Moscow, Russia

⁶ London University, London, UK

* walter.pogosov@gmail.com

Abstract

A theoretical study is presented of the wave mixing when a single superconducting qubit is irradiated by two photon fields. The first signal is a classical monochromatic signal (pump), and the second is a non-classical light. In particular, we consider two examples of non-classical light: (1) broadband squeezed light, which can be generated by a degenerate parametric amplifier, and (2) a periodically excited quantum superposition of Fock states with 0 and 1 photons, which can be generated by a source of single photons (source qubit) upon pumping it with the appropriate pulses. It is shown that the mixing of classical and nonclassical photon fields leads to the appearance of side peaks in the scattered radiation due to elastic multiphoton scattering on the probe qubit, which acts as a nonlinear element. It is demonstrated that the structure of the side peaks is qualitatively different from the situation when two classical monochromatic signals with slightly different frequencies are mixed. The most interesting feature is the absence of some side peaks corresponding to individual multiphoton processes, which turn out to be impossible due to the peculiarities of the incident wave statistics. A general conclusion is drawn that the analysis of peak amplitudes can be used to study the statistics of photons in a nonclassical mode, which can potentially find application in quantum sensorics.

Key words: qubit, photon, nonlinear optical processes, wave mixing, quantum statistics