

УДК 535.2+535.37

КВАНТОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ С ПОМОЩЬЮ ЧАСТОТНО-КОРРЕЛИРОВАННЫХ ПАР ФОТОНОВ

*А.А. Калачев, Д.А. Калашников, А.А. Калинин,
В.В. Самарцев, А.В. Шкаликов*

Аннотация

Экспериментально реализован новый подход спектроскопического исследования вещества, в котором используются частотно-коррелированные пары фотонов, рожденные в процессе спонтанного параметрического рассеяния света. Исследуемый примесный кристалл YAG:Er^{3+} помещался в одном канале схемы интерферометра Брауна–Твисса, а контроль длины волны осуществлялся монохроматором в другом канале. Критерием достоверности результатов является сравнение со спектром поглощения, измеренным с помощью классических источников света.

Введение

Пары фотонов, рожденные в процессе спонтанного параметрического рассеяния света (СПР) [1], находят применение для изучения фундаментальных аспектов квантовой теории, таких как квантовая телепортация [2], квантовая криптография [3], проверка неравенств Белла [4], квантовая метрология [5, 6], квантовая литография и многих других экспериментах, где наиболее ярко проявляются свойства неклассического света.

В данной работе мы использовали частотно-коррелированные фотоны для исследования спектроскопических свойств оптически плотной среды. Различные методы спектроскопических исследований предполагают использование классических источников света. Однако в некоторых ситуациях использование этих методов затруднено в связи с большой мощностью или малым отношением «сигнал/шум».

Одним из примеров такой ситуации является случай определения частоты фотонов, прошедших через поглощающую среду. Так, для измерения спектральных свойств вещества в вакууме в ультрафиолетовом диапазоне необходимо не только разместить спектрометр в вакуумной камере, но и управлять им. Однако при использовании в спектроскопии частотно-коррелированных пар фотонов, состоящих из одного ультрафиолетового (УФ) фотона и другого фотона большей длины (видимый фотон), экспериментальная установка значительно упрощается. УФ-фотон проходит через образец и детектируется, а видимый фотон – через спектрометр, находящийся при атмосферном давлении. Это одно из самых полезных свойств бифотонной спектроскопии [7].

Другой ситуацией является случай, когда необходимо определить спектроскопические свойства хрупкого образца в инфракрасном диапазоне. Во-первых, энергия источника света должна быть небольшой, чтобы не разрушить исследуемый образец. Во-вторых, фотодетекторы в инфракрасном диапазоне обычно сильно «шумят», что значительно снижает отношение «сигнал/шум» и не дает возможности получить достоверные результаты. Однако при использовании метода бифотонной спектроскопии, в основе которого лежит измерение скорости счета совпадений

между инфракрасными фотонами, проходящими через образец, и фотонами видимого диапазона, проходящими через монохроматор, достигается существенно более высокое отношение «сигнал/шум».

1. Теория

В процессе СПР плоская волна накачки с частотой ω_p и волновым вектором \mathbf{k}_p возбуждает нелинейный кристалл с сильной квадратичной восприимчивостью, в котором случайным образом (с эффективностью порядка 10^{-7} – 10^{-11}) происходит уничтожение высокочастотного фотона накачки и одновременное рождение двух низкочастотных фотонов, называемых обычно холостым и сигнальным. При определенной ориентации оптической оси кристалла пара фотонов может испускаться коллинеарно в том же направлении, что и излучение накачки. Однако в общем случае пара фотонов покидает образец неколлинеарно, так что состояние бифотонного поля, излучаемого при СПР, в первом порядке теории возмущения может быть представлено в следующем виде [8]:

$$|\Psi\rangle = \sum_{s,i} \delta(\omega_s + \omega_i - \omega_p) \delta(\mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i - \mathbf{k}_p) a_s^+ (\mathbf{k}_s) a_i^+ (\mathbf{k}_i) |0\rangle, \quad (1)$$

где ω_j , \mathbf{k}_j ($j = s, i, p$) – частота и волновой вектор, соответственно, сигнального (s), холостого (i) фотонов и волны накачки (p), a_s^+ , a_i^+ – операторы рождения для сигнального и холостого фотонов. Частоты сигнального и холостого излучений связаны с частотой накачки законом сохранения энергии: $\omega_p = \omega_s + \omega_i$, а волновые векторы удовлетворяют условию фазового синхронизма: $\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i$.

Отличительной особенностью СПР является то, что регистрация фотона в одном плече интерферометра Брауна – Твисса однозначно свидетельствует о наличии второго фотона в сопряженном плече. Это свойство СПР как раз и лежит в основе бифотонной спектроскопии, идея которой пояснена в [7].

Скорость счета совпадений коррелированных пар фотонов может быть представлена в виде [9]:

$$R_c \propto \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^T dt_1 dt_2 G^{(2)}(t_1, r_1; t_2, r_2), \quad (2)$$

где $G^{(2)}(t_1, r_1; t_2, r_2)$ – функция корреляции второго порядка. Следует отметить, что в соответствии с законом сохранения энергии при сканировании монохроматором одной частотной моды картина скорости счета совпадений будет зависеть от пропускания сопряженной частотной моды во втором плече интерферометра, то есть, грубо говоря, мы измеряем пропускание на частоте сопряженной моды. Следуя [10], можно преобразовать (2) к виду:

$$R_c \approx |f(\omega_p - \omega_M)|^2, \quad (3)$$

то есть скорость счета совпадений точно соответствует спектральной функции исследуемого образца, но обращена по частоте относительно частоты накачки.

В рамках этой работы рассматривается прохождение одного фотона (холостого) из пары коррелированных фотонов, рожденного в процессе спонтанного параметрического рассеяния света, через резонансную среду. Очевидно, что однофотонный волновой пакет будет эффективно поглощаться только в том случае, если ширина спектра этого фотона будет меньше ширины линии поглощения, что, в свою очередь, определяется разрешающей способностью монохроматора.

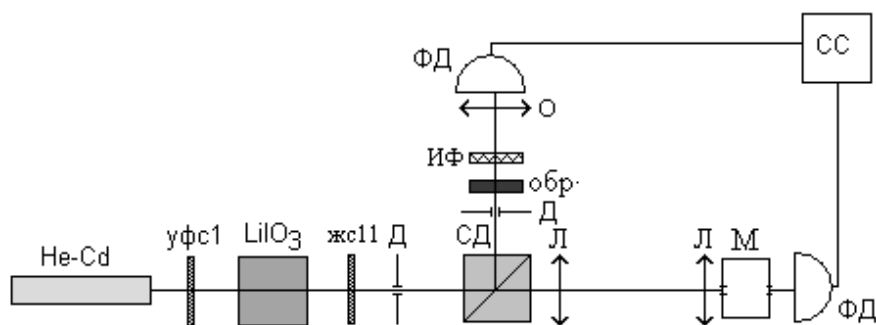


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

2. Эксперимент

За основу в эксперименте по бифотонной спектроскопии была взята модифицированная схема интерферометра Брауна–Твисса (рис. 1). Пары частотно-коррелированных фотонов рождаются в процессе СПР в кристалле иодата лития (LiIO_3) длиной 10 мм, который вырезан для I типа синхронизма и накачивается непрерывным излучением He-Cd лазера (мощностью 15 мВт) на длине волны 325 нм. Перед кристаллом для уменьшения шумов использовался светофильтр уфс1, а после кристалла LiIO_3 для отсеивания накачки – светофильтр жс11. Диафрагмы Д выделяли нужную пространственную моду из всего спектра СПР. Система из двух линз Л в одном канале фокусировала излучение на щель монохроматора М, а в сопряженном канале весь спектр излучения СПР фокусировался с помощью объектива О на фотодетектор ФД.

Сигналы в обоих каналах детектировались лавинными фотодиодами ФД (SPCM: Perkin Elmer AQR-14FC) с низким темновым шумом (100 Гц). Блоки КА-МАКа: электрическая линия задержки в наносекундном диапазоне, блок совпадений и счетчик импульсов, управляемые персональным компьютером, обозначенные на блок-схеме экспериментальной установки как СС, производили сбор данных.

3. Результаты

Исследуемый образец представляет собой примесный кристалл YAG:Er^{3+} толщиной 3 мм. Спектр пропускания этого кристалла в области резонансного перехода ${}^4\text{I}_{15/2} - {}^4\text{F}_{9/2}$ был прописан с использованием традиционного метода спектроскопического исследования вещества (рис. 2) [11].

Как известно, ширина спектра СПР достаточно большая. В нашем случае (СПР в коллинеарном частотно-вырожденном режиме с синхронизмом I типа) эта величина составляет около 20 нм. Для проведения спектроскопических исследований методом бифотонной спектроскопии необходимо, чтобы в рабочем диапазоне длин волн скорость счета совпадений оставалась постоянной (рис. 3).

Процесс снятия спектра поглощения методом бифотонной спектроскопии проходит при неизменном счете в двух каналах схемы Брауна–Твисса. Сравнение спектра поглощения YAG:Er^{3+} , выполненного с использованием классического источника света (рис. 2), со спектром, полученным методом бифотонной спектроскопии, представлено на рис. 4.

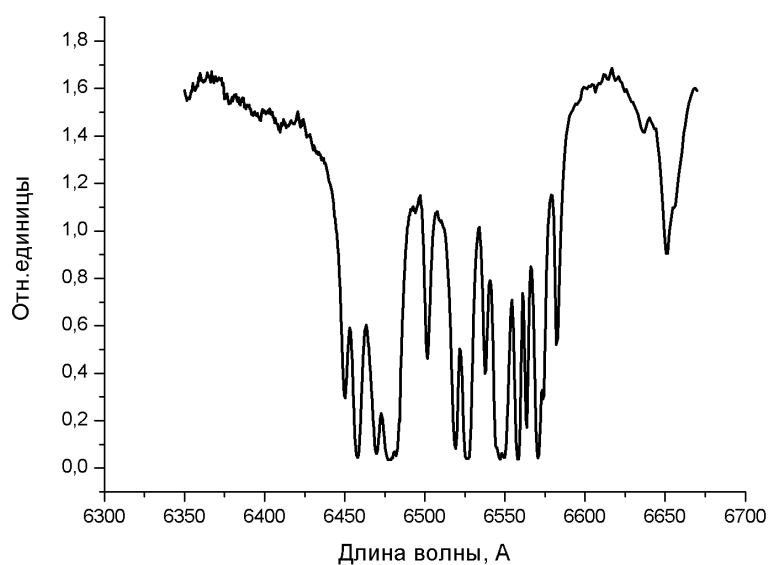
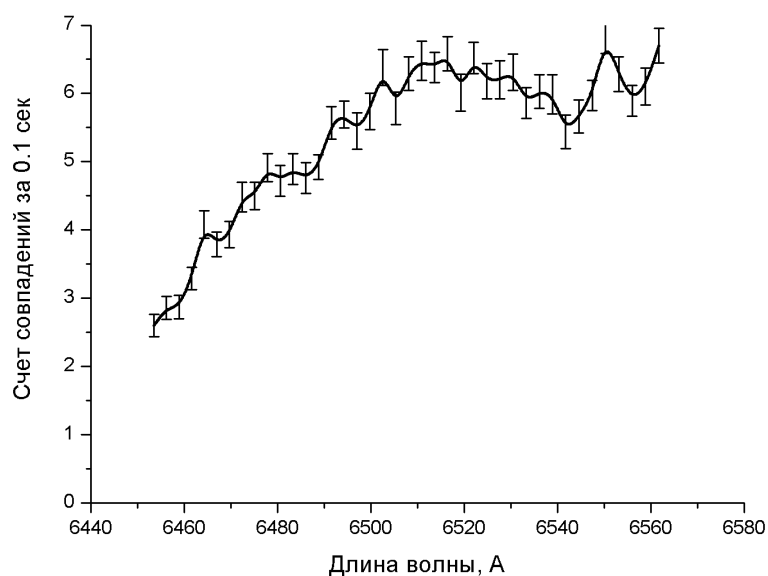
Рис. 2. Спектр поглощения YAG:Er³⁺

Рис. 3. Спектр СПР в коллинеарном вырожденном режиме

Заключение

Таким образом, в данной работе измерен спектр поглощения YAG:Er³⁺ частотно-коррелированными парами фотонов, рожденными в процессе СПР. Предложен и экспериментально реализован метод бифотонной спектроскопии, позволяющий измерять длину волны сопряженной частотной моды. Это обстоятельство позволяет проводить спектроскопические исследования в вакууме в УФ-диапазоне длин волн. Используемые в этом методе частотно-коррелированные пары фотонов позволяют также исследовать спектроскопические свойства хрупких кристал-

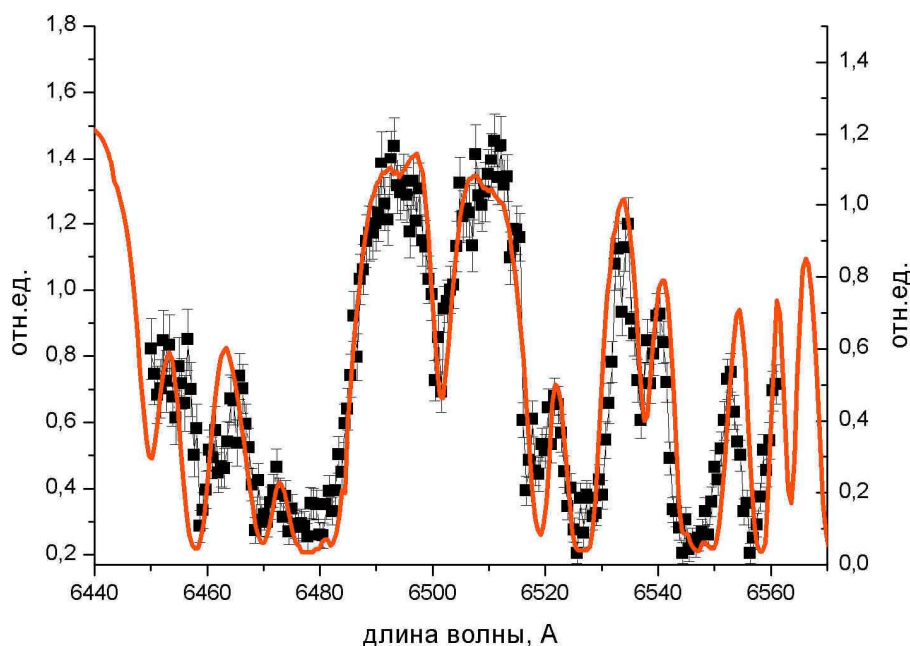


Рис. 4. Спектр поглощения YAG:Er^{3+} , снятый методом лазерной спектроскопии (сплошная линия) и методом бифотонной спектроскопии

лов в инфракрасном спектральном диапазоне, где у фотодетекторов большие темновые шумы. Однако бифотонная спектроскопия не ограничивается только коллинеарным частотно-вырожденным режимом, можно использовать невырожденный коллинеарный режим для изменения спектрального диапазона исследования [12].

Работа поддержана грантами РФФИ (№ 07-02-00883-а, 05-02-16003-а, 04-02-81009-Бел-а и 05-02-16169-а), «Фондом содействия отечественной науке», а также программами Президиума РАН «Квантовая макрофизика» и ОФН РАН «Оптическая спектроскопия и стандарты частоты» и «Когерентные акустические поля и сигналы».

Summary

A.A. Kalachev, D.A. Kalashnikov, A.A. Kalinkin, V.V. Samartsev, A.V. Shkalikov. Quantum spectroscopy by frequency-correlated photon pairs.

The new approach is experimentally realized for spectroscopic investigation of matter, where frequency-correlated photon pairs generated in the process of spontaneous parametric down-conversion (SPDC) are used. The doped crystal of YAG:Er^{3+} under investigation was placed one of the channels of Brown – Twiss interferometer scheme, while the wavelength control was made by a monochromator in another channel. The criteria of fidelity is a comparison with absorption spectra measured with the help of classical light source.

Литература

1. *Клышко Д.Н.* Фотон и нелинейная оптика. – М.: Наука, 1980. – 259 с.
2. *Kim Y., Kulik P., Shih Y.* Quantum teleportation with a complete Bell state measurement // *Phys. Rev. Lett.* – 2001. – V. 86. – P. 1370–1373.

3. *Ekert A.K.* Quantum cryptography based on Bell's theorem // Phys. Rev. Lett. – 1991. – V. 67. – P. 661–663.
4. *Kwait P.G., Steinberg A.M., Chiao R.Y.* High-visibility interference in a Bell inequality experiment for energy and time // Phys. Rev. A. – 1993. – V. 47. – P. R2472–R2475.
5. *Клышко Д.Н.* Об использовании двухфотонного света для абсолютной калибровки фотодетекторов // Квантовая электроника. – 1980. – № 7. – С. 1932–1940.
6. *Клышко Д.Н., Пенин А.Н.* Перспективы квантовой фотометрии // УФН. – 1987. – Т. 152. – С. 653–665.
7. *Калачёв А.А., Калинин А.А., Самарцев В.В., Шкаликов А.В.* Оптическая спектроскопия с помощью бифотонов // Изв. РАН. Сер. Физическая. – 2006. – Т. 70. – С. 480–483.
8. *Shih Y.* Entangled biphoton source – property and preparation // Rep. Prog. Phys. – 2003. – V. 66. – P. 1009.
9. *Glauber R.J.* The quantum theory of optical coherence // Phys. Rev. – 1963. – V. 130, No 6. – P. 2529–2539.
10. *Scarcelli G., Valencia A., Gompers S., Shih Y.* Remote spectral measurement using entangled photons // Appl. Phys. Lett. – 2003. – V. 83, No 26. – P. 5560.
11. *Шкаликов А.В., Калинин А.А., Калачев А.А., Самарцев В.В.* К вопросу о распространении импульсов «малой» площади через оптически плотные среды // X Междунар. молодежная шк. «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия»: сб. ст. – Казань: Казн. гос. ун-т, 2006. – С. 181–184.
12. *Yabushita A., Kobayashi T.* Spectroscopy by frequency-entangled photon pairs // Phys. Rev. A. – 2004. – V. 69. – Art. 013806.

Поступила в редакцию
23.01.07

Калачев Алексей Алексеевич – кандидат физико-математических, старший научный сотрудник Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

Калашников Дмитрий Андреевич – младший научный сотрудник Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

Калинкин Александр Александрович – кандидат физико-математических, научный сотрудник Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

Самарцев Виталий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией нелинейной оптики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: samartsev@kfti.knc.ru

Шкаликов Андрей Викторович – младший научный сотрудник Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: shkalikov@mail.knc.ru