



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013144621/28, 04.10.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
04.10.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 04.10.2013

(43) Дата публикации заявки: 10.04.2015 Бюл. № 10

(45) Опубликовано: 27.06.2015 Бюл. № 18

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: US 7683361 B2 23.03.2010 . US 8228507 B2 24.07.2012 . US 7220954 B2 22.05.2007 . CA 2636394 A1 01.02.2010

Адрес для переписки:

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1,
Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова, Фонд "Национальное
интеллектуальное развитие"

(72) Автор(ы):

Страупе Станислав Сергеевич (RU),
Кулик Сергей Павлович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

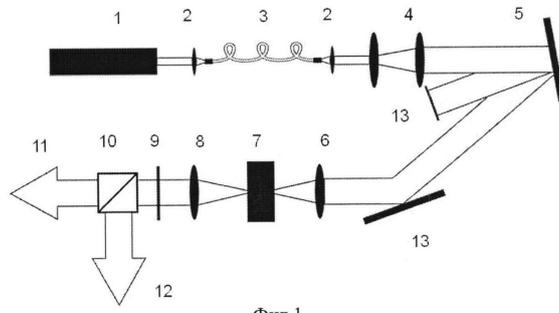
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова" (МГУ)
(RU)

(54) СПОСОБ ГЕНЕРАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СОСТОЯНИЙ БЕЛЛА

(57) Реферат:

Изобретение относится к области управления интенсивностью, цветом, фазой, поляризацией или направлением света. Сущность способа состоит в том, что угловой спектр генерируемого оптического двухфотонного излучения меняют в зависимости от пространственного профиля изменения интенсивности лазерной накачки. Предлагаемый способ позволяет генерировать максимально перепутанные состояния Белла пар фотонов в двумерном подпространстве параксиальных мод с единичной четностью. Ключевой особенностью метода является

использование лазерной накачки в высших пространственных модах в режиме жесткой фокусировки. Технически, метод основан на адаптивной подстройке фазового фронта лазерной накачки с помощью активного пространственного фазового модулятора света. Этот подстроенный фронт за счет условий фазового синхронизма в нелинейном кристалле генерирует форму амплитуды бифотона соответствующей пространственному состоянию Белла. 2 ил.



Фиг.1

R U 2 5 5 4 6 1 5 C 2

R U 2 5 5 4 6 1 5 C 2



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.
G02F 1/01 (2006.01)
G02F 1/35 (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2013144621/28, 04.10.2013

(24) Effective date for property rights:
04.10.2013

Priority:

(22) Date of filing: 04.10.2013

(43) Application published: 10.04.2015 Bull. № 10

(45) Date of publication: 27.06.2015 Bull. № 18

Mail address:

119991, Moskva, GSP-1, Leninskie gory, 1,
Moskovskij gosudarstvennyj universitet imeni M.V.
Lomonosova, Fond "Natsional'noe intellektual'noe
razvitie"

(72) Inventor(s):

**Straupe Stanislav Sergeevich (RU),
Kulik Sergej Pavlovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe
obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniya "Moskovskij gosudarstvennyj
universitet imeni M.V. Lomonosova" (MGU)
(RU)**

(54) **METHOD OF GENERATING SPATIAL BELL STATES**

(57) Abstract:

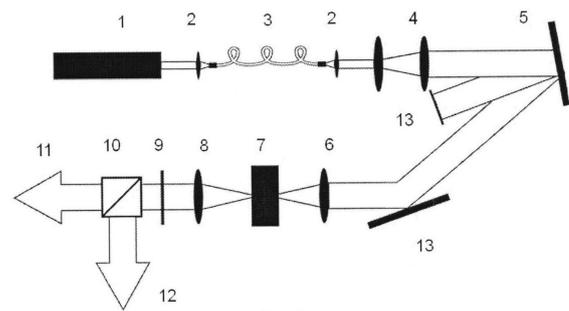
FIELD: physics, optics.

SUBSTANCE: invention relates to controlling intensity, colour, phase, polarisation or direction of light. In the method, the angular spectrum of the generated optical two-photon radiation is varied according to the spatial profile of variation of intensity of laser pumping. The key feature of the method is the use of laser pumping in high spatial modes in rigid focusing mode. The method is based on adaptive adjustment of the phase front of laser pumping using an active spatial light phase modulator. This adjusted front, owing to phase synchronism conditions in the nonlinear crystal, generates a biphoton amplitude shape corresponding to a spatial Bell state.

EFFECT: present method enables to generate

maximally entangled Bell states of photon pairs in two-dimensional subspace of paraxial modes with single parity.

2 dwg



Фиг. 1

RU 2 554 615 C 2

RU 2 554 615 C 2

Изобретение относится к области управления интенсивностью, цветом, фазой, поляризацией или направлением света.

Из уровня техники в данной области известен способ формирования одномодовой структуры пространственного спектра двухфотонного излучения, рождающегося при спонтанном параметрическом рассеянии света в нелинейном кристалле (см. статью М. Minozzi, S. Bonora, A.V. Sergienko, G. Vallone, P. Villoresi, Optimization of Two-Photon Wavefunction in Parametric Down Conversion by Adaptive Optics Control of the Pump Radiation, опубликованную 15 февраля 2013 года в журнале Optics Letters, Vol.38, №4, p.489-491).

Принципиальным недостатком известного способа формирования пространственной структуры двухфотонного излучения является то, что он не позволяет создавать сильно перепутанные двухкомпонентные квантовые состояния, которые называют состояниями Белла и которые играют ведущую роль при создании элементов квантовой связи.

Технический результат, на достижение которого направлено изобретение, заключается в том, что в пучок лазерной накачки устанавливается адаптивный элемент, например, пространственный модулятор света, который формирует специальный профиль пространственного изменения излучения лазерной накачки.

Указанный технический результат достигается тем, что в способе формирования пространственного спектра двухфотонного излучения, включающем лазер оптической накачки, системы формирования углового спектра лазера оптической накачки, нелинейный кристалл-преобразователь, в котором генерируется спонтанное параметрическое рассеяние света, пространственный спектр излучения лазера оптической накачки формируют в первой пространственной моде Эрмита-Гаусса в режиме жесткой фокусировки, так чтобы угловая расходимость лазера оптической накачки совпадала по величине с угловой расходимостью спонтанного параметрического рассеяния света.

Сущность изобретения поясняется чертежами.

На фиг.1 показана схема генерации пространственных состояний Белла при помощи формирования пространственной структуры пучка лазера оптической накачки.

На фиг.2 показан пример фазовой голограммы, преобразующей фундаментальную гауссову моду лазерной накачки в моду Эрмита-Гаусса HG₁₀, которая обеспечивает формирование пространственного состояния Белла в двухфотонном излучении на выходе нелинейного кристалла-преобразователя. Вносимая фаза кодируется насыщенностью серого цвета: темные полосы отвечают сдвигу фазы 180 град, светлые - сдвигу фазы 0 град.

Разработка эффективных методов создания оптических полей в неклассических состояниях - одна из основных прикладных задач современной квантовой оптики. Данный способ основан на использовании пространственных состояний бифотонных пар, рождающихся в процессе СПР. Вектор состояния пары фотонов, рождающихся в таком процессе, имеет вид:

$$|\Psi\rangle = |\text{vac}\rangle + \int d\mathbf{k}_1 d\mathbf{k}_2 F(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2) |1\rangle_{\mathbf{k}_1} |1\rangle_{\mathbf{k}_2}. \quad (1)$$

Это состояние удобно представить в виде разложения по дискретному базису параксиальных мод, выбранных специальным образом - так называемому базису мод Шмидта. Моды Шмидта определяются как собственные функции интегрального оператора с ядром $F(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2)$, что физически соответствует базису, в котором редуцированная однофотонная матрица плотности диагональна. Рассмотрим реальный

вид амплитуды бифотона, соответствующий коллинеарному частотно-вырожденному режиму спонтанного параметрического рассеяния типа I:

$$F(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2) \propto E_p \left(\frac{\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2}{a} \right) \text{sinc} \left(\frac{(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2)^2}{b^2} \right). \quad (2)$$

В работе [1] было показано, что в приближении, соответствующем замене, функции $\text{sinc}(\cdot)$ в выражении для амплитуды бифотона на Гауссову функцию с соответствующим перемасштабированием, выражения для модовых функций мод Шмидта могут быть в явном виде получены аналитически. Эти модовые функции представляют собой хорошо известный ортогональный набор функций Гаусса-Эрмита (или Гаусса-Лагерра, в зависимости от выбора системы координат).

Основным параметром, определяющим форму угловой амплитуды бифотона, является количество мод Шмидта, дающих существенный вклад в разложение. По порядку величины этот параметр равен отношению b/a ширины углового спектра накачки и угловой ширины синхронизма в кристалле. В случае $b=a$ излучение параметрического рассеяния одномодовое и каждый из фотонов находится в чистом пространственном состоянии. В реальности приближение двойной гауссоиды работает далеко не всегда, причем в режиме, близком к одномодовому, требующем сильной фокусировки накачки, различия довольно существенны. Однако в работе [2] было продемонстрировано, что, используя адаптивную коррекцию фазового фронта накачки, можно модифицировать ее угловой спектр таким образом, чтобы генерация параметрического рассеяния была одномодовой и в реальных условиях. Генерация пространственно-одномодовых пучков - лишь промежуточный этап на пути к контролируемому созданию пространственных состояний двухфотонного излучения или бифотонов с контролируемым модовым составом. Опираясь на результаты работы [2], мы предлагаем метод получения более сложных пространственных состояний - максимально перепутанных пространственных состояний Белла.

Предлагаемый способ позволяет генерировать максимально перепутанные состояния Белла пар фотонов в двумерном подпространстве параксиальных мод с единичной четностью. Ключевой особенностью метода является использование лазерной накачки в высших пространственных модах в режиме жесткой фокусировки ($b=a$). Для пояснения основной идеи метода рассмотрим сначала форму амплитуды в двухгауссовом приближении. Пусть угловой спектр пучка лазерной накачки описывается функцией Гаусса-Эрмита $E_p^{(nm)}(\mathbf{k}_p) = \text{HG}_{nm}(\mathbf{k}_p)$. Тогда разложение углового спектра по модам Гаусса-Эрмита будет иметь вид:

$$F^{(nm)}(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2) = \sum C_{ijkl}^{(nm)} \text{HG}_{ij}(\mathbf{k}_1) \text{HG}_{kl}(\mathbf{k}_2), \quad (3)$$

где коэффициенты $C_{ijkl}^{(nm)}$ определяются модой лазерной накачки при условии сохранения пространственной четности в процессе спонтанного параметрического рассеяния. Простейшим нетривиальным и наиболее важным для нас случаем является случай $\{n, m\} = \{0, 1\}$ - накачка в одной из мод первого порядка. Пусть для определенности $n=1, m=0$, если при этом выполнено условие $a=b$, то разложение для амплитуды бифотона принимает вид:

$$F^{(10)}(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} (\text{HG}_{10}(\mathbf{k}_1) \text{HG}_{00}(\mathbf{k}_2) + \text{HG}_{00}(\mathbf{k}_1) \text{HG}_{10}(\mathbf{k}_2)). \quad (4)$$

Такая форма амплитуды бифотона соответствует пространственному состоянию Белла. Отметим еще раз, что такое простое выражение получено при двух условиях: надлежащая фокусировка лазерной накачки, соответствующая числу Шмидта, равному единице при гауссовой лазерной накачке, и справедливость аппроксимации выражения для амплитуды бифотона двойной гауссоидой. Первое условие на практике всегда может быть выполнено, выполнения второго можно добиться адаптивной подстройкой фазового фронта лазерной накачки с помощью активного пространственного фазового модулятора света.

Пример схемы для реализации предлагаемого способа приведен на Фиг.1. В качестве лазерной накачки используется излучение полупроводникового лазерного диода на длине волны 405 нм. Излучение лазерной накачки проходит через модовый фильтр, состоящий из одномодового волокна 3 и коллимирующих объективов 2, после пространственной фильтрации угловой спектр лазерного пучка с высокой степенью точности является гауссовым. Для преобразования пучка в HG_{10} моду используется жидкокристаллический пространственный модулятор света 5, позволяющий вносить в пучок произвольную пространственно-распределенную фазовую задержку. Для достижения высокого качества преобразования используется фазовая голограмма, представляющая собой специально рассчитанную фазовую дифракционную решетку, позволяющую получить как фазовую, так и амплитудную модуляцию выходного пучка в первом порядке дифракции. Примерный вид фазовой голограммы, преобразующей фундаментальную гауссову моду в моду HG_{10} , изображен на Фиг.2. Перед модулятором установлен дополнительный телескоп 4, расширяющий пучок для оптимального использования рабочей области модулятора. Пучок в нулевом дифракционном порядке блокируется, а первый дифракционный порядок фокусируется в нелинейный кристалл 7 при использовании зеркал 13. Фокусное расстояние фокусирующей линзы 6 выбирается в зависимости от длины и типа используемого кристалла, так чтобы выполнялось условие $b=a$ (например, для кристалла ВВО длиной 2 мм с коллинеарным частотно-вырожденным синхронизмом типа II она составляет 150 мм). На выходе из кристалла пучок коллимируется линзой, фильтруется интерференционным фильтром 9 и делится на светоделителе 10 (поляризационном в случае использования синхронизма типа II, неполяризационном для синхронизма типа I). После светоделителя индексы 1 и 2 в выражении (4) соответствуют проходящему 11 и отраженному 12 каналу.

Для повышения качества и эффективности генерации пространственного белловского состояния угловой спектр накачки должен быть модифицирован, для компенсации искажений, вызванных негауссовой формой реального углового спектра спонтанного параметрического рассеяния. Таким образом, оптимальный угловой спектр лазерной накачки должен иметь вид:

$$E_p(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2) = \text{HG}_{10}(\mathbf{k}_p) + \sum \varepsilon_{nm} \text{HG}_{nm}(\mathbf{k}_p), \quad (5)$$

где коэффициенты ε_{nm} должны быть выбраны таким образом, чтобы пространственное состояние бифотонной пары на выходе схемы было максимально близко к требуемому состоянию Белла. В отличие от работы [2], где оптимизация проводилась по всем сегментам деформируемого зеркала, соответствующим отдельным пикселям жидкокристаллического фазового модулятора в нашей схеме, мы предлагаем

проводить оптимизацию в пространстве коэффициентов ϵ_{nm} . Это позволит значительно сократить вычислительные ресурсы, уменьшая размерность пространства параметров до количества существенный мод в разложении, которое в рассматриваемом условии жесткой фокусировки невелико (~ 10). В рассмотренном в работе [2] случае критерием оптимизации была близость выходного однофотонного состояния к гауссовскому. Фазовая голограмма, соответствующая оптимальным значениям ϵ_{nm} , строится исходя из результатов предварительного численного расчета, а затем адаптивно корректируется четом реальных данных, получаемых в измерительной схеме.

Способ может быть осуществлен с помощью другого аналогичного устройства, изменяющего оптические характеристики пространственного профиля лазерной накачки, подаваемой на нелинейный кристалл-преобразователь.

Краткое описание чертежей

Фиг.1. Схема генерации пространственных состояний Белла при помощи формирования пространственной структуры пучка лазера оптической накачки.

1 - лазерный диод; 2 - коллимирующие объективы; 3 - одномодовое волокно; 4 - телескоп; 5 - пространственный модулятор света; 6, 8 - фокусирующие линзы; 7 - нелинейный кристалл; 9 - фильтр; 10 - светоделитель; 11, 12 - проходящий и отраженный каналы светоделителя; 13 - вспомогательные зеркала.

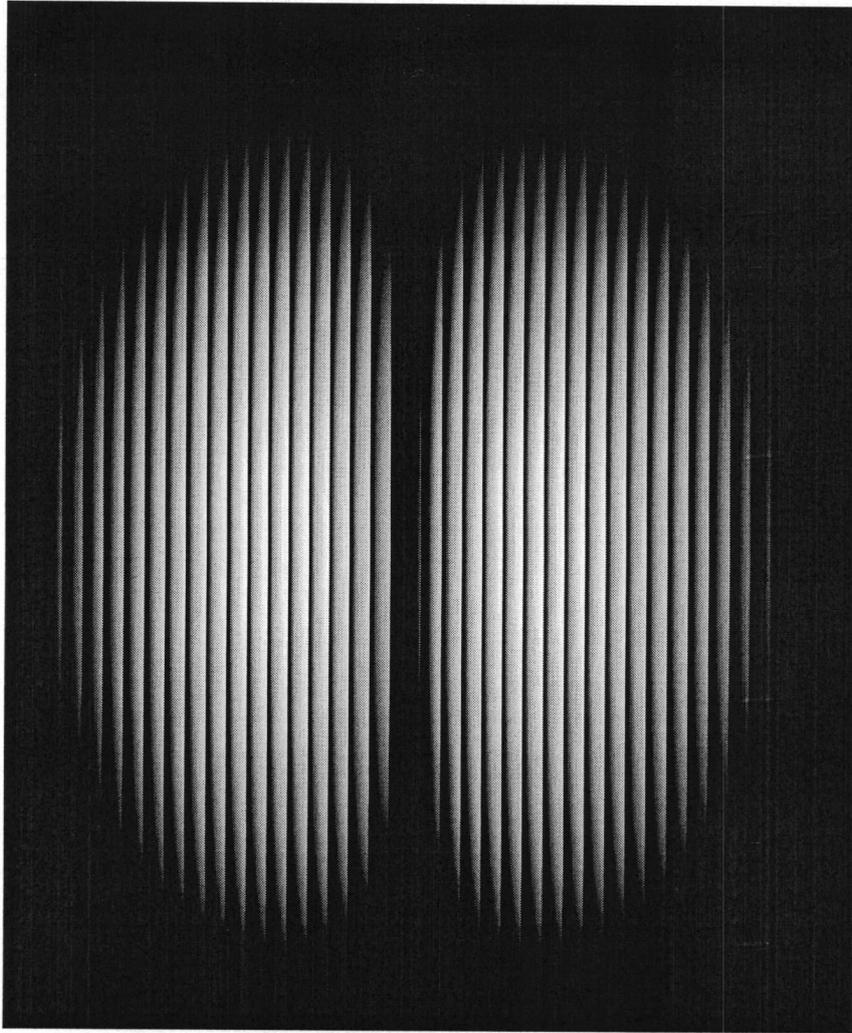
Фиг.2. Пример фазовой голограммы, преобразующей фундаментальную гауссову моду лазерной накачки в моду Эрмита-Гаусса HG_{10} , которая обеспечивает формирование пространственного состояния Белла в двухфотонном излучении на выходе нелинейного кристалла-преобразователя. Темные полосы отвечают сдвигу фазы 180 град, светлые - сдвигу фазы 0 град.

Список литературы

1. S.S. Straupe, D.P. Ivanov, A.A. Kalinkin, I.B. Bobrov, S.P. Kulik. Angular Schmidt modes in spontaneous parametric down-conversion. *Physical Review A*, Vol.83, №6, 060302(R) (2011).
2. M. Minozzi, S. Bonora, A.V. Sergienko, G. Vallone, P. Villoresi. Optimization of Two-Photon Wavefunction in Parametric Down Conversion by Adaptive Optics Control of the Pump Radiation, *Optics Letters*, Vol.38, №4, p.489-491 (2013).

Формула изобретения

Способ генерации максимально перепутанных пространственных состояний Белла, включающий лазер оптической накачки, системы формирования углового спектра лазера оптической накачки, нелинейный кристалл-преобразователь, в котором генерируется спонтанное параметрическое рассеяния света, отличающийся тем, что пространственный спектр излучения лазера оптической накачки формируют в первой пространственной моде Эрмита-Гаусса в режиме жесткой фокусировки, так чтобы угловая расходимость лазера оптической накачки совпадала по величине с угловой расходимостью спонтанного параметрического рассеяния света.



Фиг.2