РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



⁽¹⁹⁾ **R**IJ ⁽¹¹⁾

2 734 455⁽¹³⁾ C1

フ

N

34455

C

(51) ΜΠΚ *G09B 23/22* (2006.01) *G01J 9/00* (2006.01) *H04B 10/70* (2013.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

G09B 23/22 (2020.02); G01J 9/00 (2020.02); H04B 10/70 (2020.02)

 (21)(22) Заявка: 2019135033, 31.10.2019 (24) Дата начала отсчета срока действия патента: 31.10.2019 	 (72) Автор(ы): Катамадзе Константин Григорьевич (RU) (73) Патентообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова" (МГУ) (RU)
Дата регистрации: 16.10.2020	
(22) Дата подачи заявки: 31.10.2019	
 (45) Опубликовано: 16.10.2020 Бюл. № 29 Адрес для переписки: 119234, Москва, ул. Ломоносовский проспект, 27, стр. 1, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Фонд "Национальное интеллектуальное развитие" 	 (56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: G.I. Struchalin и др. "Experimental adaptive quantum tomography of two-qubit states", PHYSICAL REVIEW A 93, 2016, стр. 012103-1 - 012103-10. Ю. И. Богданов и др. "Исследование статистики фотонов с использованием компаунд-распределения Пуассона и квадратурных измерений", АВТОМЕТРИЯ, т. 52, No 5, 2016 г., стр. 71-83. WO 2003019284 A2, 06.03.2003. (см. прод.)

(54) УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ КВАНТОВОЙ ОПТИКИ И КВАНТОВОЙ ИНФОРМАТИКИ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области оптики и квантовой физики и касается учебно-научного лабораторного проведения стенда для исследований поляризационных И корреляционных свойств однофотонных, бифотонных, когерентных и тепловых световых полей, интерференции Хонга-Оу-Манделя и гомодинного детектирования. Стенд включает в себя модуль лазера накачки, модуль источника бифотонов, модули поляризационных измерений в каналах А и В, модуль корреляционных измерений, модуль источника когерентных и тепловых состояний и модуль гомодинного детектирования. Модуль источника бифотонов содержит контроллер поляризации и нелинейные кристаллы. Каналы А и В содержат контроллеры

бифотонного излучения, поляризации поляризационный фильтр и/или светоделитель. Модуль корреляционных измерений содержит однофотонные детекторы, соединенные с коррелятором импульсов, подключенным к компьютеру. Модуль источника когерентных и тепловых состояний содержит лазер И светоделитель, делящий свет на два канала, в одном из которых расположен матовый диск, предназначенный для модулирования случайным образом излучения лазера по фазе и амплитуде. Технический результат заключается в увеличении количества исследуемых процессов и обеспечении автоматизации проведения возможности экспериментов. 36 з.п. ф-лы, 1 ил.



RU 2554615 C2, 27.06.2015.

Р

2734455 C1

刀

C

RUSSIAN FEDERATION



(19)(11)

2 734 455⁽¹³⁾ C1

(51) Int. Cl. G09B 23/22 (2006.01) G01J 9/00 (2006.01) H04B 10/70 (2013.01)

FEDERAL SERVICE FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(52) CPC

G09B 23/22 (2020.02); G01J 9/00 (2020.02); H04B 10/70 (2020.02)

(21)(22) Application: 2019135033, 31.10.2019	 (72) Inventor(s): Katamadze Konstantin Grigorevich (RU) (73) Proprietor(s): Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Moskovskij gosudarstvennyj universitet imeni M.V. Lomonosova" (MGU) (RU) N 4 5 5
 (24) Effective date for property rights: 31.10.2019 Registration date: 16.10.2020 Priority: (22) Date of filing: 31.10.2019 (45) Date of publication: 16.10.2020 Bull. № 29 	
Mail address: 119234, Moskva, ul. Lomonosovskij prospekt, 27, str. 1, Moskovskij gosudarstvennyj universitet imeni M.V. Lomonosova, Fond "Natsionalnoe intellektualnoe razvitie"	

(54) EDUCATIONAL AND SCIENTIFIC LABORATORY BENCH FOR QUANTUM OPTICS AND QUANTUM **COMPUTER SCIENCE**

(57) Abstract:

FIELD: optics.

SUBSTANCE: invention relates to the field of optics and quantum physics and relates to the educational and scientific laboratory bench for conducting studies of polarization and correlation properties of single-photon, biphoton, coherent and thermal light fields, Hong-Ou-Mandel interference and homodyne detection. Test bench includes a pumping laser module, a biphoton source module, polarization measurement modules in channels A and B, a correlation measurement module, a coherent and thermal state source module and a homodyne detection module. Biphoton source module includes a polarization controller and nonlinear crystals. Channels A and B contain polarization controllers of biphoton radiation, a polarization filter and/or a beam splitter. Correlation measurement module comprises single-photon detectors connected to a pulse correlator connected to a computer. Coherent and thermal state source module comprises a laser and a beam splitter which divides light into two channels, in one of which a matte disk is placed, which is intended for modulation of phase and amplitude laser radiation at random.

EFFECT: technical result consists in increasing the number of analyzed processes and enabling automation of experiments.

37 cl, 1 dwg

0



2734

Р

4455 C1

刀

C

N

1

ω

Область техники

Изобретение относится к области физики, а именно к оптике и квантовой физике, и может быть использовано для отработки практических навыков по реализации процессов, применяемых в технологиях квантовых коммуникаций и квантовых

5 вычислений, включая но не ограничиваясь, проведением следующих исследований: поляризационных и корреляционных свойств однофотонных, бифотонных, когерентных и тепловых световых полей, интерференции Хонга-Оу-Манделя, и гомодинного детектирования.

Уровень техники

- Одним из самых сложных и вместе с тем востребованных в современном мире разделом физики является квантовая физика. Ее востребованность обусловлена развитием квантовых (в особенности - квантово-информационных) технологий. В то же время, сложность понимания процессов квантовой физики связана с тем, что ее базовые принципы противоречат имеющемуся опыту, в связи с чем только практический
- *15* опыт работы с квантовыми системами может дать полное понимание законов квантовой физики.

Во всем мире физический практикум является неотъемлемым компонентом обучения самым разным разделам физики. Из уровня техники известны различные учебно-научные лабораторные стенды для проведения исследований отдельных физических процессов,

- 20 однако отсутствуют стенды, которые могли бы комплексно решать задачи и демонстрировать основы квантовой физики, включая:
 - 1. Проверку нарушения неравенства Белла,
 - 2. Исследование томографии поляризационных кубитов и куквартов,
 - 3. Исследование томографии однокубитных квантовых процессов,
- 25 4. Исследование статистики фотонов,
 - 5. Исследование гомодинного детектирования,
 - 6. Исследование систем квантового распределения ключа,
 - 7. Исследование квантового генератора случайных чисел,
 - 8. Исследование интерференции Хонга-Оу-Манделя.
- 30 В частности, из статьи F.T. Arecchi, "Measurement of the statistical distribution of gaussian and laser sources," Phys. Rev. Lett. 15, 912-916 (1965) известна схема установки, позволяющая приготавливать различные квазитепловые и когерентные состояния света, и измерять их статистику интенсивности. Такая схема позволяет частично реализовать задачу 4 и 7, но в ограниченном варианте, поскольку не позволяет
- 35 приготавливать бифотонные и однофотонные поля, а также измерять числа фотонов вместо интенсивности. Кроме того, она не позволяет реализовать остальные задачи: 1, 2, 3, 5, 6, 8.

Из статьи S. Friberg, C.K. Hong, and L. Mandel, "Measurement of Time Delays in the Parametric Production of Photon Pairs," Phys. Rev. Lett. 54, 2011-2013 (1985) известна схема

40 установки, позволяющая решать задачу 8 - исследование интерференции Хонга-Оу-Манделя, но она не может решать остальные задачи.

Наиболее близким к предлагаемому стенду является установка, представленная в статье G.I. Struchalin, I.A. Pogorelov, S.S. Straupe, K.S. Kravtsov, I.V. Radchenko, and S.P. Kulik, "Experimental adaptive quantum tomography of two-qubit states," Phys. Rev. A 93, 012103

45 (2016), с помощью которой возможно приготовление набора различных поляризационных состояний бифотонов, и проведение их полной томографии. Такая схема позволяет реализовать часть из перечисленных выше задач (1, 2, 4, 6, 7). Установка состоит из узкополосного лазера накачки на длине волны 408 нм, соединенного

оптической связью с поляризационным контроллером накачки, состоящим из двух фазовых пластин (полуволновая и четвертьволновая на длине волны накачки), соединенным оптической связью с парой скрещенных нелинейных кристаллов типа I, в которых происходит генерация бифотонного поля в неколлинеарном режиме, когда

- ⁵ один фотон распространяется по каналу 1, а второй по каналу 2. В обоих каналах расположено по одному контроллеру поляризации, также состоящему из двух фазовых пластин (полуволновая и четвертьволновая на удвоенной длине волны накачки) и по поляризационному светоделителю (призме Воластона). Каждый светоделитель разделяет каждый из каналов на 2. В результате образуется 4 оптических канала, каждый из
- 10 которых соединен оптической связью с однофотонным детектором. Все 4 детектора также выполнены с возможностью соединения электрической связью с коррелятором импульсов.

К недостаткам данного решения стоит отнести невозможность приготовления произвольного бифотонного состояния, что ограничивает возможности исследований

15 в задачах 2 и 6. Кроме того, она не позволяет приготавливать когерентные и квазитепловые состояния света, что ограничивает возможности исследований в задачах 4, 7. Наконец, она не позволяет решать задачи 3 и 5.

Технической проблемой является разработка стенда (практикума) в виде единой модульной системы, позволяющей реализовать все перечисленные задачи с обеспечением

20 возможности автоматизации эксперимента и удаленного доступа к установке.

Раскрытие изобретения

Техническим результатом, достигаемым заявляемым изобретением, является возможность решения ключевых задач квантовой оптики и квантовой информатики, включая:

25 1. Проверка нарушения неравенства Белла

- 2. Томография поляризационных кубитов и куквартов
- 3. Томография однокубитных квантовых процессов
- 4. Статистика фотонов

30

- 5. Гомодинное детектирование
- 6. Системы квантового распределения ключа
 - 7. Квантовый генератор случайных чисел
 - 8. Интерференция Хонга-Оу-Манделя,

с помощью одного стенда, характеризующегося модульной конструкцией.

Стенд позволяет проводить модельные эксперименты квантовой физики с высокой 35 точностью и воспроизводимостью результатов при обеспечении удобства проведения исследований и реализации экспериментов.

Технический результат достигается посредством создания учебно-научного лабораторного стенда для проведения исследований поляризационных и

- корреляционных свойств однофотонных, бифотонных, когерентных и тепловых световых полей, интерференции Хонга-Оу-Манделя, и гомодинного детектирования, включающего расположенные на оптическом столе последовательно соединенные оптической связью модуль лазера накачки, модуль источника бифотонов, модули поляризационных измерений в каналах А и В, модуль корреляционных измерений, выполненный с возможностью подключения к устройству регистрации и анализа данных (компьютеру),
- 45 а также модуль источника когерентных и тепловых состояний и модуль гомодинного детектирования, где модуль источника когерентных и тепловых состояний выполнен с возможностью соединения оптической связью либо с модулями поляризационных измерений в каналах А и В, либо с модулем гомодинного детектирования, а модуль

гомодинного детектирования выполнен с возможностью подключения к устройству регистрации и анализа данных (компьютеру), при этом

модуль лазера накачки содержит лазер с контроллером тока и температуры, модуль источника бифотонов содержит на одном оптическом пути контроллер

- ⁵ поляризации бифотонного излучения (контроллер поляризационного состояния накачки или поляризационный контроллер), нелинейные кристаллы, систему разделения излучения бифотонов и излучения накачки, которая в одном из вариантов осуществления выполнена в виде фильтра, пропускающего излучение на длине волны бифотонов и осекающего излучение на длине волны накачки (например, notch-фильтра);
- каналы А и В модулей поляризационных измерений содержат контроллеры поляризации бифотонного излучения, поляризационный фильтр и/или светоделитель; модуль корреляционных измерений содержит однофотонные детекторы, соединенные с коррелятором импульсов, выполненным с возможностью подключения к устройству регистрации и анализа данных (компьютеру);
- 15 модуль источника когерентных и тепловых состояний содержит лазер, соединенный оптической связью со светоделителем, выполненным с возможностью деления света на два канала, в одном из которых расположен матовый диск, выполненный с возможностью вращения вокруг своего центра для модулирования случайным образом излучение лазера по фазе и амплитуде, при этом оба канала выполнены с возможностью
- 20 подключения к модулям поляризационных измерений и модулю гомодинного детектирования;

модуль гомодинного детектирования содержит поляризационный светоделитель, входы которого выполнены с возможностью подключения к выходам источника когерентных и тепловых состояний, а в его выходном канале расположен контроллер

25 поляризации и второй поляризационный светоделитель, выходы которого соединены оптической связью с детекторами света.

Контроллер поляризации бифотонного излучения в модуле источника бифотонов и модулях поляризационных измерений состоит из последовательно расположенных полуволновой и четвертьволновой фазовых пластин, установленных во вращающихся

лодвижках. Фазовые пластины контроллера поляризации в модуле источника бифотонов рассчитаны на длину волны лазера накачки, а фазовые пластины контроллеров поляризации в модулях поляризационных измерений - на вдвое большую длину волны. Контроллеры поляризации бифотонного излучения в модуле источника бифотонов и модулях поляризационных измерений выполнены на вращающихся подвижках (вокруг оптической оси) с возможностью подключения к компьютеру и автоматизированной

регулировки угла поворота подвижек.

В качестве оптической связи, соединяющей модули, может быть использовано оптоволокно.

Лазер в модуле лазера накачки представляет собой лазерный диод, установленный в коллимационной трубочке, с возможностью стабилизации температуры посредством использования элемента Пельтье, соединенного с контроллером тока и температуры. Модуль лазера накачки содержит каплер - устройство ввода/вывода излучения в оптоволокно, представляющий собой трубочку с линзой, в фокальной плоскости которой расположен торец оптоволокна для связи с соседним модулем. В одном из

45 вариантов осуществления изобретения модуль лазера накачки включает оптический изолятор, расположенный между лазером и каплером, исключающим попадание отраженного излучения обратно в лазер. Возможен вариант выполнения модуля лазера накачки, согласно которому между лазером и каплером установлена пара призм, выполненных с возможностью корректировки формы пучка для эффективного заведения излучения в оптоволокно. Лазерный диод в модуле лазера накачки может быть выполнен с возможностью работы на длине волны 400-410 нм и имеет ширину линии не более 1 ГГц. В конкретном варианте выполнения лазерный диод содержит встроенный

- 5 высокодобротный (например, брэгговский) резонатор. Еще в одном варианте осуществления изобретения модуль лазера накачки содержит дифракционную решетку, соединенную с лазерным диодом оптической связью, для обеспечения необходимой ширины спектра и выполняющей функцию зеркала внешнего резонатора.
- Модуль источника бифотонов со стороны входа содержит каплер, в фокальной плоскости линзы которого расположен торец оптоволокна для соединения с модулем накачки, и выполнен с возможностью подключения к модулям поляризационных измерений в каналах A и B также с помощью другого каплера, который выполнен с возможностью подключения к модулю источника когерентных и тепловых состояний (т.е. второй каплер не входит в конструкцию данного модуля, выступает в качестве
- 15 отдельного элемента соединения/подключения упомянутых модулей). Частотный фильтр в модуле источника бифотонов может быть выполнен под длину волны 405 нм с просветлением в диапазоне 400-410 нм. Нелинейные кристаллы в модуле источника бифотонов изготовлены с учетом кристаллографических осей под вырожденный синхронизм типа I для длины волны накачки с ортогонально ориентированными
- 20 оптическими осями. Модуль источника бифотонов содержит частотный фильтр накачки и линзу, установленную после частотного фильтра накачки и перед нелинейными кристаллами таким образом, чтобы кристаллы находились в ее фокусе, при этом линза выполнена с просветляющим покрытием на длине волны накачки. В одном из вариантов осуществления изобретения модуль источника бифотонов содержит вторую линзу,
- 25 установленную за нелинейными кристаллами, и второй частотный фильтр, установленный за второй линзой, при этом вторая линза установлена таким образом, чтобы кристаллы находились в ее фокусе, и выполнена с просветляющим покрытием на удвоенной длине волны накачки, а второй частотный фильтр выполнен пропускающим излучение бифотонов на удвоенной длине волны накачки, но не
 30 пропускающим излучение на длине волны накачки.
 - Пропускающим излучение на длине волны нака им.
 Лазер модуля источника когерентных и тепловых состояний соединен со светоделителем с помощью оптоволокна, имеет волоконный выход, его ширина спектра не превышает 1 МГц, а центральная длина волны равна удвоенной длине волны лазера накачки. Матовый диск модуля источника когерентных и тепловых состояний соединен
 с выходом светоделителя и с выходным оптоволокном посредством каплеров. Матовый
- 35 с выходом светоделителя и с выходным оптоволокном посредством каплеров. Матовый диск модуля источника когерентных и тепловых состояний выполнен с возможностью подключения к компьютеру и регулировки скорости вращения, включая полную остановку.

Подключение модуля источника бифотонов и модуля источника когерентных и 40 тепловых состояний к модулям поляризационных измерений в каналах A и B реализовано посредством светоделительной пластины, имеющей два входа и два выхода, при этом один из входов соединен с выходом модуля источника бифотонов, второй вход - с выходом модуля источника когерентных и тепловых состояний через каплер, а выходы светоделительной пластины соединены оптической связью со входами модулей 45 поляризационных измерений в каналах A и B.

Модули поляризационных измерений в каналах А и В содержат каплеры, расположенные на выходе модулей, через которые реализовано оптоволоконное соединение с модулем корреляционных измерений, при этом перед каплерами установлены узкополосные частотные фильтры с шириной диапазона пропускания 10-40 нм, центр диапазона пропускания которых совпадает с удвоенной длиной воны лазера накачки. Один из каплеров модуля поляризационных измерений в канале А установлен на трансляционную подвижку, выполненную с возможностью изменения

расстояния между ним и поляризационным фильтром и/или светоделителем, при этом 5 трансляционная подвижка может быть выполнена с возможностью подключения к компьютеру.

Модуль корреляционных измерений содержит четыре однофотонных детектора, оптические входы которых соединены с оптическими выходами модулей

- поляризационных измерений, при этом два детектора из четырех подключены к выходам 10 каналов А и В через симметричный (одномодовый) оптоволоконный светоделитель. Коррелятор импульсов выполнен с возможностью подсчета числа фотоотсчетов по каждому каналу, а также измерения числа совпадений фотоотсчетов между любыми двумя каналами и измерения гистограммы времен задержки между импульсами, идущими
- по любым из двух каналов. 15

Модуль гомодинного детектирования снабжен со стороны входа каплерами для соединения с помощью оптоволокон с модулем источника когерентных и тепловых состояний. Контроллер поляризации в модуле гомодинного детектирования выполнен в виде полуволновой фазовой пластинки на удвоенную длину волны накачки. Модуль

- гомодинного детектирования содержит также блок аналого-цифрового преобразователя 20 (АЦП), соединенный с детекторами света, и выполненный с возможностью подключения к компьютеру. Детекторы света в модуле гомодинного детектирования выполнены в виде единого модуля, включающего усилитель разностного фототока. В одном из вариантов осуществления изобретения перед первым поляризационным светоделителем
- модуля гомодинного детектирования установлено зеркало на прецизионной пьезо-25 подвижке, соединенной с источником пилообразного сигнал; а перед вторым поляризационным светоделителем модуля гомодинного детектирования установлена длиннофокусная линза, при этом детекторы расположены от линзы на ее фокусном расстоянии.
- В одном из вариантов реализации изобретения учебно-научный лабораторный стенд 30 содержит компьютер, соединенный с модулями стенда, выполненный с возможностью удаленного подключения другого компьютера с обеспечением возможности удаленного управления всеми модулями стенда.

В заявляемом изобретении при оптоволоконном соединении модулей

предпочтительно использование каплеров - устройств ввода/вывода излучения в 35 оптоволокно, представляющего собой трубочку с линзой, в фокальной плоскости которой расположен торец оптоволокна.

Таким образом, достижение технического результата обеспечивается за счет того, что в одной оптической схеме объединены несколько универсальных модулей: модули

- лазера накачки, источника бифотонов, источника когерентных и тепловых состояний, 40 два модуля поляризационных измерений, модуль корреляционных измерений и модуль гомодинного детектирования. Для возможности решения широкого спектра задач квантовой физики с помощью одного модульного стенда была разработана схема, включающая минимально необходимый и достаточный набор устройств и
- 45 конструктивных элементов с возможностью соединения элементов в модуле и модулей между собой под решаемую задачу. Данные модули можно по-разному коммутировать между собой и задавать их параметры в зависимости от конкретной задачи. При этом, для увеличения числа одновременно обучающихся, большая часть модулей может быть

автоматизирована, и к ним возможен удаленный доступ. Интерфейс программ удаленного доступа создает у пользователя эффект полного присутствия за счет множества датчиков и веб-камер.

Краткое описание чертежей

5 Изобретение поясняется чертежом, на котором представлена схема разработанного стента.

Позициями на чертеже обозначены:

1, 6 - лазерный диод,

10

25

1а, 6а - контроллер тока и температуры для лазерного диода,

- 2 дифракционная решетка для создания внешнего резонатора к диоду 1,
 - 3 оптический изолятор Фарадея,
 - 4 пара анаморфных призм для преобразования профиля луча диода 1,

5a, 5b, 9, 9a, 11, 32, 33, 34, 35, 63, 64 - одномодовое поляризационно сохраняющее волокно (оптоволокно),

- 15 7 одномодовый волоконный светоделитель (поляризационно сохраняющий светоделитель),
 - 8 аттенюатор излучения,
 - 10 вращающийся матовый диск,
 - 12 поляризатор для излучения лазера,
- 20 13 полуволновая пластинка нулевого порядка с просветлением,
 - 14 четвертьволновая пластинка нулевого порядка с просветлением,
 - 15 bandpass-фильтр,
 - 16 дихроичное зеркало,
 - 17, 60 линза плоско-выгнутая с просветлением,
 - 18 пара скрещенных кристаллов ВіВО,
 - 19 линза плоско-выгнутая с просветлением,
 - 20 notch-фильтр,
 - 21 светоделительная пластина 50:50,
 - 22, 24, 26, 28, 59 полуволновая пластинка нулевого порядка с просветлением,
- 23, 25, 27, 29 четвертьволновая пластинка нулевого порядка с просветлением,
 30, 31, 58, 61 поляризационный светоделительный кубик для излучения
 (поляризационный светоделитель),
 - 36, 37, 38, 39 кремниевый однофотонный детектор,
 - 40, 41, 42 интеренференционный фильтр,
- 35 43 моторизированная трансляционная подвижка,

44 - одномодовый волоконный светоделитель (поляризационно сохраняющий светоделитель),

45 - коррелятор для обработки импульсов, приходящих с детекторов 36-39, включающий 4 «старт-стоп» схемы,

- 40 46, 67 устройство регистрации и анализа данных (компьютер или персональный компьютер),
 - 47-57 устройства ввода/вывода излучения в оптоволокно (каплеры),
 - 62 балансный детектор,
 - 65 зеркало на пьезо-подвижке,
- 45 66 аналогово-цифровой преобразователь.

Подробное описание осуществления изобретения

Учебно-научный лабораторный стенд для проведения исследований поляризационных и корреляционных свойств однофотонных, бифотонных, когерентных и тепловых

световых полей, интерференции Хонга-Оу-Манделя и гомодинного детектирования, включает расположенные на оптическом столе модуль лазера накачки, соединенный оптической связью с модулем источника бифотонов, соединенный оптической связью с модулями поляризационных измерений в каналах А и В, соединенными оптической

- ⁵ связью с модулем корреляционных измерений, который в свою очередь выполнен с возможностью подключения к устройству регистрации и анализа данных (компьютеру), а также модуль источника когерентных и тепловых состояний, выполненный с возможностью соединения оптической связью либо с модулями поляризационных измерений в каналах А и В, либо с модулем гомодинного детектирования, который
- 10 также выполнен с возможностью подключения к устройству регистрации и анализа данных (компьютеру).

Модуль лазера накачки представляет собой контроллер тока и температуры 1а, соединенный с лазерным диодом 1, установленным в коллимационной трубочке, находящейся в тепловом контакте с элементом Пельтье, также соединенным с

- 15 контроллером тока и температуры. Лазерный диод 1 соединен оптической связью с оптическим изолятором 3, который затем соединен с модулем ввода/вывода излучения в оптоволокно (каплером) 47, представляющим собой трубочку с линзой, в фокальной плоскости которой расположен торец оптоволокна 5а.
- Лазерный диод 1 в модуле лазера накачки работает на длине волны 400-410 нм и имеет ширину линии не более 1 ГГц. Для этого либо в качестве лазерного диода 1 используется лазерный диод со встроенным высокодобротным (например, брэгговским) резонатором, либо в оптической связи, соединяющей лазерный диод 1 с оптическим изолятором 3, устанавливается дифракционная решетка 2.

Для увеличения доли лазерного излучения, заведенного в оптоволокно в модуле лазера накачки, в оптической связи, соединяющей оптический изолятор 3 с оптоволокном, может быть азмещена пара призм, исправляющих форму пучка (на

чертеже не показаны).

Модуль источника бифотонов состоит из каплера 48, в фокальной плоскости линзы которого расположен торец оптоволокна 5b, соединенный оптической связью с

- 30 поляризатором 12, соединенным оптической связью с полуволновой фазовой пластиной 13, рассчитанной на длину волны 405 нм и просветленную в диапазоне 400-410 нм, соединенную оптической связью с четвертьволновой фазовой пластиной 14, рассчитанной на длину волны 405 нм и просветленную в диапазоне 400-410 нм, соединенную оптической связью со спектральным фильтром 15, пропускающим
- 35 излучение в диапазоне 400-410 нм, соединенным оптической связью с линзой 17, в фокусе которой расположена пара нелинейных кристаллов 18, вырезанных под вырожденный синхронизм типа I для длины волны накачки, оптические оси которых ориентированы ортогонально. В случае, если кристаллы вырезаны под коллинеарный синхронизм, то кристалл соединяется одной оптической связью с линзой 19, соединенной со
- 40 спектральным фильтром 20, блокирующим излучение на длине волны 400-410 нм и пропускающим - на длине волны 800-820 нм, соединенным с входом симметричного неполяризационного светоделителя 21, выходы которого соединены оптическими связями с модулями поляризационных измерений в каналах А и В. В этом случае другой вход светоделителя 21 соединен оптической связью с каплером 53 в фокальной плоскости
- 45 линзы которого устанавлен торец оптоволокна 11, другой торец которого может быть соединен с модулем источника когерентных и тепловых состояний. В случае, если кристаллы вырезаны под неколлинеарный синхронизм (на схеме не представлен), то кристалл соединяют одной оптической связью с линзой, соединенной со спектральным

фильтром, блокирующим излучение на длине волны 400-410 нм и пропускающим - на длине волны 800-820 нм, соединенным оптической связью с модулем поляризационных измерений в канале A, а другой оптической связью - с линзой, соединенной со спектральным фильтром, блокирующим излучение на длине волны 400-410 нм и

- ⁵ пропускающим на длине волны 800-820 нм, соединенным оптической связью с модулем поляризационных измерений в канале В. В этом случае каплер 53 соединяют оптической связью с нелинейными кристаллами 18, находящейся на одной оптической оси со связью между кристаллами и одним из модулей поляризационных измерений. Фазовые пластинки 13, 14 установлены во вращающихся подвижках с возможностью
- подключения к управляющему устройству (компьютеру). Модуль источника когерентных и тепловых состояний состоит из узкополосного лазерного диода 6 с волоконным выходом, шириной спектра не более 1 МГц и центральной длиной волны вдвое большей, чем длина волны лазера накачки, соединенного оптическим волокном с волоконным светоделителем 7, первый
- 15 волоконный выход которого 9 имеет возможность подключения к модулю гомодинного детектирования, а торец волокна второго выхода 9а находится в фокусе линзы волоконного каплера 54, соединенного оптической связью с вращающимся матовым диском 10, соединенным оптической связью с каплером 55, в фокальной плоскости линзы которого расположен торец оптоволокна 11, второй торец которого имеет
- 20 возможность подключения к модулям поляризационных измерений в каналах А и В. Подключение источника бифотонов и источника когерентных и тепловых состояний к модулям поляризационных измерений в каналах А и В обеспечивается следующим образом: выходной разъем оптоволокна источника когерентных и тепловых состояний подключается к оптоволокну 11, второй конец которого находится в фокусе линзы
- 25 каплера 53, соединенного оптической связью со входом симметричного светоделителя 21. Второй вход светоделителя соединен оптической связью с выходом источника бифотонов. Выходы светоделителя соединены оптической связью со входами модулей поляризационных измерений в каналах А и В.

Вход модуля поляризационных измерений в канале А соединяется оптической связью с полуволновой пластинкой 22 на 810 нм с просветляющим покрытием на диапазон

- 30 с полуволновой пластинкой 22 на 810 нм с просветляющим покрытием на диапазон 800-820 нм, установленной во вращающейся подвижке, соединенной оптической связью с четвертьволновой пластинкой 23 на 810 нм с просветляющим покрытием на диапазон 800-820 нм, установленной во вращающейся подвижке, соединенной оптической связью с полуволновой пластинкой 24 на 810 нм с просветляющим покрытием на диапазон
- 35 800-820 нм, установленной во вращающейся подвижке, соединенной оптической связью с четвертьволновой пластинкой 25 на 810 нм с просветляющим покрытием на диапазон 800-820 нм, установленной во вращающейся подвижке, соединенной оптической связью с поляризационным светоделителем 30, один из выходов которого соединен оптической связью с интерференционным фильтром 40а, пропускающим излучение только в
- 40 диапазоне 800-820 нм, соединенным оптической связью с каплером 49, в фокусе линзы которого расположено оптоволокно 32 с возможностью подключения к модулю корреляционных измерений; второй выход поляризационного светоделителя 30 соединен оптической связью с интерференционным фильтром 40, пропускающим излучение только в диапазоне 800-820 нм, соединенным оптической связью с каплером 50, в фокусе
- 45 линзы которого расположено оптоволокно 33 с возможностью подключения к модулю корреляционных измерений; каплер 50 установлен на трансляционную подвижку с возможностью подключения к управляющему устройству (компьютеру). Фазовые пластинки 22-25 установлены во вращающихся подвижках с возможностью подключения

к управляющему устройству (компьютеру).

Вход модуля поляризационных измерений в канале А соединяется оптической связью с полуволновой пластинкой 26 на 810 нм с просветляющим покрытием на диапазон 800-820 нм, установленной во вращающейся подвижке, соединенной оптической связью

- 5 с четвертьволновой пластинкой 27 на 810 нм с просветляющим покрытием на диапазон 800-820 нм, установленной во вращающейся подвижке, соединенной оптической связью с полуволновой пластинкой 28 на 810 нм с просветляющим покрытием на диапазон 800-820 нм, установленной во вращающейся подвижке, соединенной оптической связью с четвертьволновой пластинкой 29 на 810 нм с просветляющим покрытием на диапазон
- 800-820 нм, установленной во вращающейся подвижке, соединенной оптической связью с поляризационным светоделителем 31, один из выходов которого соединен оптической связью с интерференционным фильтром 41, пропускающим излучение только в диапазоне 800-820 нм, соединенным оптической связью с каплером 51, в фокусе линзы которого расположено оптоволокно 34 с возможностью подключения к модулю
- 15 корреляционных измерений; второй выход поляризационного светоделителя 31 соединен оптической связью с интерференционным фильтром 42, пропускающим излучение только в диапазоне 800-820 нм, соединенным оптической связью с каплером 52, в фокусе линзы которого расположено оптоволокно 35 с возможностью подключения к модулю корреляционных измерений; фазовые пластинки 26-29 установлены во вращающихся
- 20 подвижках с возможностью подключения к управляющему устройству (компьютеру). Модуль корреляционных измерений состоит из четырех однофотонных детекторов 36-39, оптические входы которых соединены с выходами оптических волокон модулей поляризационных измерений 35-32 соответственно. В случае исследования интерференции Хонга-Оу-Манделя, волокна 34, 33 подключаются к детекторам 37, 38 через волоконный
- 25 светоделитель 44. Электронные выходы детекторов 36-39 соединены оптической связью с коррелятором импульсов 45, имеющем функции подсчета числа фотоотсчетов по каждому каналу, а также измерения числа совпадений фотоотсчетов между любыми двумя каналлами и измерения гистограммы времен задержки между импульсами, идущими по любым из двух каналов. Выход коррелятора имеет возможность
- 30 подключения к устройству анализа и обработки данных (компьютеру) 46. Модуль гомодинного детектирования состоит из оптических волокон 63, 64, входы которых имеют возможность подключения к выходам оптических волокон 9 и 11 источника когерентных и тепловых состояний. Вторые торцы волокон 63, 64 располагаются в фокальных плоскостях линз каплеров 56, 57, которые соединены
- 35 оптической связью со входами поляризационного светоделителя 58, выход которого соединен оптической связью с полуволновой пластинкой 59 на 810 нм с просветляющим покрытием на диапазон 800-820 нм, установленной во вращающейся подвижке, соединенной оптической связью с линзой 60, соединенной оптической связью с поляризационным светоделителем 61, выходы которого соединены со входами
- 40 балансного детектора 62, выполненного с возможностью измерения интенсивностей сигнала в каждом канале по отдельности, так и разности интенсивностей между каналами. На оптической связи между каплером 57 и поляризационным светоделителем 58 может быть расположено зеркало 65, установленное на пьезо-подвижке Детектор 62 размещают таким образом, чтобы его оптические входы находились в фокусе линзы
- 45 60. Детектор 62 соединен электрической связью с аналого-цифровым преобразователем 66 (АЦП) с возможностью подключения к устройству анализа и обработки данных (компьютеру) 46.

Особенностью заявляемого изобретения является то, что каплер 50, заводящий

излучение в оптоволокно, соединенное с одним из детекторов модуля корреляционных измерений, может быть установлен на трансляционной подвижке, а два детектора имеют возможность подключения к оптическим каналам через светоделитель, что позволяет наблюдать интерференцию Хонга-Оу-Манделя (задача 8). Кроме того, в

- ⁵ каждом канале установлен не один, а два поляризационных преобразователя, что позволяет приготавливать и измерять любые однофотонные и бифотонные квантовые состояния, что позволяет в полном объеме реализовать задачи 2, 3, 6. Наличие источника когерентных и квазитепловых состояний, а также модуля гомодинного детектирования, позволяют в полном объеме реализовать задачи 4, 5 и 7.
- Ниже представлено подробное описание работы стенда при решении перечисленных выше задач квантовой физики.

Источником накачки для процесса спонтанного параметрического рассеяния служит лазерный диод 1, излучающий на длине волны 400-410 нм. Ток и температура диода стабилизируются контроллером 1а. Лазерное излучение коллимируется линзой и

- 15 направляется на дифракционную решетку 2, установленную таким образом, чтобы максимум первого порядка отражался обратно в лазер. За счет этого образуется внешний резонатор с более высокой селективностью, что позволяет существенно сузить спектр излучения. Максимум нулевого порядка отражается от решетки и попадает в оптический изолятор 3, который предохраняет лазерный диод от обратной засветки,
- 20 и на пару анаморфных призм 4, преобразующих эллиптическое сечение пучка в круглое. Затем с помощью каплера 47 излучение накачки заводится в оптическое волокно 5а. Все используемые оптические волокна являются одномодовыми и сохраняют поляризацию.

Помимо лазера накачки, в системе присутствует источник когерентных и тепловых 25 состояний света. В его основе лежит диодный лазер 6 с оптоволоконным выходом для излучения с длиной волны 810 нм. Ток и температура лазерного диода также стабилизируются контроллером 6а. Это излучение разделяется волоконным светоделителем 7 на две части: первая, когерентная, пропускается в волокно 9, а вторая - фокусируется на вращающемся матовом диске 10 и после дефазировки попадает в

30 волокно 11. Таким образом, на выходе источника когерентных и тепловых состояний по волокну 9 выводится мощное когерентное состояние, используемое в качестве гомодина, а на выходе волокна 11 - тепловое состояние, если матовый диск вращается, и ослабленное когерентное состояние, если диск остановлен.

Для генерации бифотонов излучение лазера накачки выводится из волокна 5b, 35 коллимируется линзой каплера 48, пропускается последовательно через поляризатор 12, пару фазовых пластин (четвертьволновую 14, и полуволновую 13, ориентированных под углами f_p и q_p к вертикали, соответственно), задающих поляризационное состояние накачки, узкополосный фильтр 15, пропускающий линию излучения лазера, и после этого фокусируется линзой 17 на сборке 18 из двух нелинейных кристаллов BiBO

- ⁴⁰ толщиной 0,5 мм. Кристаллы вырезаны под углом коллинеарного вырожденного синхронизма I типа, их оси повернуты так, чтобы в первом кристалле под действием вертикально поляризованной накачки рождались пары фотонов с горизонтальной плоскостью поляризации |*HH*>, а во втором наоборот, под действием горизонтально
- 45 поляризованной накачки пары вертикально поляризованных фотонов $|VV\rangle$. В общем же случае квантовое состояние бифотонов на выходе имеет вид $c_{HH} | HH \rangle + c_{VV} | VV \rangle$, для которого отношение модулей амплитуд $|c_{HH}|/|c_{VV}|$ определяется углом q_p , а разность

фаз $Arg(c_{HH})$ - $Arg(c_{VV})$ - углом f_{p} .

15

Рожденное в кристаллах 18 излучение, содержащее бифотоны, коллимируется линзой 19, а излучение накачки поглощается фильтром 20. Затем излучение бифотонов разделяется светоделителем 21 (нечувствительным к поляризации) на два канала «А» и «В». Необходимо отметить, что при этом с вероятностью 1/2 фотоны не разделятся и уйдут в один канал, но выделяя случаи, когда в каждом из каналов регистрируется по одному фотону, можно отсечь случаи, когда фотоны не разделились.

В некоторых задачах вместо излучения бифотонов используются когерентные и тепловые состояния света, которые попадают в систему по оптоволокну 11,

коллимируются линзой каплера 53 и подаются на второй вход светоделителя 21. В каждом канале установлено по паре фазовых пластин (четвертьволновые 23, 27 и полуволновые 22, 26, установленные под углами f_{A1} , f_{B1} , q_{A1} и q_{B1} , соответственно), которые вместе с пластинами, управляющими накачкой (13 и 14) позволяют приготовить произвольное чистое поляризационное состояние бифотона вида

- $c_{HH} |H\rangle_A |H\rangle_B + c_{HV} |H\rangle_A |V\rangle_B + c_{VH} |V\rangle_A |H\rangle_B + c_{VV} |V\rangle_A |V\rangle_B$. Затем в каждом канале установлено по еще одной паре пластин (четвертьволновые 25, 29 и полуволновые 24, 28, установленные под углами f_{A2} , f_{B2} , q_{A2} и q_{B2} соответственно) и поляризационные
- ²⁰ светоделители 30, 31, пропускающие вертикально поляризованные фотоны, и отражающие горизонтально поляризованные. Углы поворота фазовых пластин определяют измерительный базис, то есть вид операторов измерения

 $\hat{A}(q_{A2},f_{A2})\epsilon |y\rangle_A \langle y|_A - |y_{\wedge}\rangle_A \langle y_{\wedge}|_A$ и $\hat{B}(q_{B2},f_{B2})\epsilon |y\rangle_B \langle y|_B - |y_{\wedge}\rangle_B \langle y_{\wedge}|_B$ вкаждом канале. В каждом выходном канале светоделителей излучение фокусируется каплерами

- ²⁵ 49-52 в волокна 32 35, соединенные с однофотонными детекторами 39-36. Перед входом в каждое волокно установлены узкополосные фильтры 40, 40a, 41, 42, пропускающие излучение бифотонов, а также тепловые и когерентные состояния света на длине волны 810 нм, и отсекающие засветку. Каплер 50, фокусирующий излучение в волокно 33, установлен на трансляционную подвижку 43, позволяющую измерять
- ³⁰ провал Манделя. В этом случае волокна 33 и 34 подключаются к детекторам 37 и 38 через волоконный светоделитель 44.

Все детекторы подключаются к коррелятору 45, который позволяет регистрировать количество фотоотсчетов в каждом канале и количество совпадений между любой парой каналов. Результат отправляется на компьютер. В автоматизированной версии

³⁵ положения всех фазовых пластин, а также трансляционной подвижки 43 задаются с компьютера.

В задаче «Гомодинное детектирование» волокна источника когерентных и тепловых состояний 9 и 11 подключаются к волокнам 63 и 64 модуля гомодинного детектирования. Поляризационно сохраняющие волокна 9, 11, 63, 64 ориентированы таким образом,

- ⁴⁰ чтобы выходное излучение, коллимируемое каплерами 56 и 57 было ортогонально поляризовано. Тогда излучение гомодина, распространяющееся по волокнам 9 и 63 и излучение исследуемого поля, распространяющегося по волокнам 11 и 64 сбиваются на поляризационном светоделителе 58 в одну пространственную моду, затем из поляризации поворачиваются на 45 градусов полуволновой пластинкой 59, и снова
- ⁴⁵ разделяются симметричным образом на два канала поляризационным светоделителем 61, каждый из которых с помощью линзы 60 фокусируется в оптический вход балансного детектора 62, измеряющего разность интенсивностей во входных каналах. Для изменения относительной фазы между гомодином и исследуемым излучением в оптический канал

между каплером 57 и светоделителем 58 устанавливают зеркало на пьезо-подвижке 63.

1. Задачу по проверке нарушения неравенства Белла решают следующим образом.

Углы поворота управляющих фазовых пластин $f_{
m p}, {
m q}_{
m p}, f_{
m A1}, f_{
m B1}, {
m q}_{
m A1}$ и ${
m q}_{
m B1}$

устанавливают таким образом, чтобы генерация бифотонов происходила в максимально ⁵ перепутанном состоянии, например, в одном из состояний Белла:

 $|\mathbf{F}_{\pm}\rangle = (H)_A |H\rangle_B \pm |V\rangle_A |V\rangle_B)/\sqrt{2}$ или $|\mathbf{Y}_{\pm}\rangle = (H)_A |V\rangle_B \pm |V\rangle_A |H\rangle_B)/\sqrt{2}$ атем определяют два набора углов измерительных фазовых пластин $f_{A2}^{(1,2)}$, $f_{B2}^{(1,2)}$, $q_{A2}^{(1,2)}$ и $q_{B2}^{(1,2)}$, для которых величина переменной Белла

$$\langle \hat{S} \rangle = \langle \hat{A}^{(1)} \hat{B}^{(1)} \rangle + \langle \hat{A}^{(1)} \hat{B}^{(2)} \rangle + \langle \hat{A}^{(2)} \hat{B}^{(1)} \rangle - \langle \hat{A}^{(2)} \hat{B}^{(2)} \rangle$$
 принимает максимальное значение.

После чего проводят измерение переменной Белла и оценивают статистическую

погрешность результата измерения. Важно убедиться, что $\left< \hat{S} \right> 2$.

20

- ¹⁵ 2. Исследование томографии поляризационных кубитов и куквартов осуществляют следующим образом.
 - Углы поворота управляющих фазовых пластин f_{p} , q_{p} , f_{A1} , f_{B1} , q_{A1} и q_{B1}

устанавливают таким образом, чтобы генерация бифотонов происходила в максимально перепутанном состоянии, например, в некотором заданном состоянии:

$$|y\rangle_{AB} = c_{HH} |H\rangle_{A} |H\rangle_{B} + c_{HV} |H\rangle_{A} |V\rangle_{B} + c_{VH} |V\rangle_{A} |H\rangle_{B} + c_{VV} |V\rangle_{A} |V\rangle_{B}$$
. Выбираютнекоторый

протокол измерений - набор операторов измерения $\{\hat{A}^{(i)}\}, \{\hat{B}^{(i)}\},$ и для каждой

комбинации операторов за некоторое фиксированное время измеряют количество 25 событий, соответствующих каждому из четырех исходов. Результат записывают в файл. Дальше этот файл обрабатывают на компьютере с использованием метода максимального правдоподобия с восстановлением квантовое состояния. Восстановленное состояние сравнивают с заданным и рассчитывают фиделити. При этом возможны несколько вариантов заданий:

30 - Исходное двухфотонное (двухкубитное) состояние факторизованное, тогда состояние поляризационного кубита в каждом канале чистое. Анализируют результаты измерений только одного кубита, и на их основе восстанавливают чистое состояние.

- Для того же набора данных состояние кубита восстанавливают как смешанное и оценивают его чистоту.

³⁵ - Исходное двухкубитное состояние перепутанное, тогда состояние кубита в каждом канале смешанное. На основе результатов измерений восстанавливают смешанное состояние кубита.

 Анализируют полный объем данных для двухкубитного состояния, как для факторизованного, так и для перепутанного состояния. В каждом случае производят
 40 оценку состояния как чистого, так и перепутанного.

- Для каждого из заданий можно оценить зависимость фиделити от объема выборки.

3. Исследование томографии однокубитных квантовых процессов осуществляют следующим образом.

Углы поворота управляющих фазовых пластин f_p , q_p , f_{A1} , f_{B1} , q_{A1} и q_{B1} ⁴⁵ устанавливают таким образом, чтобы генерация бифотонов происходила в факторизованном состоянии: $|H\rangle_A |H\rangle_B$. Фотон в канале «А» используют как триггерный, а в канале «В» - для томографии квантового процесса. Квантовый процесс реализуют некоторым поляризационным элементом, установленным между фазовыми пластинками 27 и 28. Для томографии квантового процесса приготавливают набор входных квантовых состояний (посредством выбора различных углов f_{B1} и q_{B1}), а для каждого выходного состояния производят набор измерений (посредством выбора различных углов f_{B1} и q_{B1}).

 5 различных углов f_{B2} и q_{B2}).

10

Результаты измерений записывают в файл, и затем восстанавливают унитарную матрицу, или хи-матрицу, описывающую квантовый процесс.

4. Задачу квантового распределения ключа решают следующим образом.

Настоящая установка позволяет реализовать различные протоколы квантового распределения ключа. Далее представлено описание трех вариантов.

Вариант 1. Протокол BB84 (версия 1). Углы поворота управляющих фазовых пластин f_p , q_p , f_{A1} , f_{B1} , q_{A1} и q_{B1} устанавливают таким образом, чтобы генерация бифотонов происходила в факторизованном состоянии: $|H\rangle_A |H\rangle_B$. Фотон в канале «А» использует

- ¹⁵ как триггерный, а в канале «В» для передачи ключа. В этом случае Алиса приготавливает квантовое состояние фотона, задавая углы f_{B1} и q_{B1}, а Боб выбирает измерительный базис, задавая положения пластин f_{B2} и q_{B2}. Заранее генерируется последовательность случайных бит ключа, последовательность базисов Алисы и
- 20 последовательность базисов Боба. Реализуется передача ключа, данные записывают в файл. Производят анализ полученных данных: просеивание ключа, анализ процента ошибок. Аналогичным образом можно реализовать и другие однопроходные протоколы, например, В92. Опционально, можно также внести в канал связи помехи, связанные с действиями Евы. Например, поставить между фазовыми пластинками 27 и 28
- 25 поляризатор, угол поворота которого также выбирается случайно. Чтобы ускорить процесс передачи ключа, можно просто последовательно перебрать все комбинации углов поворота пластин Алисы и Боба, для каждого набора получить отдельный набор данных, а потом перемешать их в соответствии с тем, в какой последовательности идут случайные состояния Алисы и случайные базисы Боба.
- ³⁰ Вариант 2. Протокол BB84 (версия 2). Углы поворота управляющих фазовых пластин $f_{\rm p}$, $q_{\rm p}$, $f_{\rm A1}$, $f_{\rm B1}$, $q_{\rm A1}$ и $q_{\rm B1}$ и устанавливают таким образом, чтобы генерация бифотонов происходила в перепутанном состоянии. В этом случае станции Алисы отвечает канал «А», а станции Боба канал «В». Алиса и Боб случайным образом выбирают измерительные базисы, и проводят измерения. Результаты измерений записываются в
- *зэ* файл и анализируются аналогично тому, как это делалось в предыдущем пункте. Таким же образом можно реализовать и другие однопроходные протоколы.

Вариант 3. Протокол Эккерта. Параметры установки такие же, как и в предыдущем пункте, но Алиса и Боб выбирают измерительные базисы таким образом, чтобы параллельно с распределением ключа была возможность измерять неравенства Белла.

40 Соответственно, при обработке данных, помимо ключа и ошибок, необходимо также убедиться в нарушении неравенств Белла.

5. Исследование статистики фотонов осуществляют следующим образом.

Данная задача посвящена исследованию статистики фотоотсчетов различных квантовых состояний света: однофотонного, двухфотонного, когерентного, теплового.

45 1. Когерентное состояние света. Лазер накачки выключают (перекрывают), на вход системы подают когерентное состояние света от красного лазера. Для анализа используют только канал «А».

1.1. Измерение автокорреляционной функции проводят с использованием двух

детекторов. Углы фазовых пластин f_{A1} , q_{A1} , f_{A2} и q_{A2} задают таким образом, чтобы скорость счета детекторов 38 и 39 была одинаковой. Сигналы с этих детекторов отправляют на старт-стоп схему, события «стоп» проходят через электронную линию задержки, и измеряют гистограмму времен между событиями «старт» и «стоп».

⁵ 1.2. Измерение автокорреляционной функции с использованием одного детектора. Углы фазовых пластин f_{A1} , q_{A1} , f_{A2} и q_{A2} задают таким образом, чтобы скорость счета детектора 39 была максимальной. Сигналы с этого детектора отправляют на стартстоп схему, таким образом измеряют гистограмму времен между соседними импульсами. Изменяя углы f_{A1} , q_{A1} , f_{A2} и q_{A2} можно изменять скорость счета фотонов в канале, и

снимать гистограммы для различных ее значений.

40

1.3. Измерение автокорреляционных функций высших порядков. Углы фазовых пластин f_{A1} , q_{A1} , f_{A2} , q_{A2} , f_{B1} , q_{B1} , f_{B2} , q_{B2} задают таким образом, чтобы скорость счета всех четырех детекторов была одинаковой. В течение некоторого времени измеряют

15 количество единичных фотоотсчетов в каждом канале, а также количество двойных, тройных и четверных совпадений. Рассчитывают значения корреляционных функций второго, третьего и четвертого порядка в нуле.

1.4. Измерение распределения по числу фотонов. Углы фазовых пластин f_{A1} , q_{A1} , f_{A2} и q_{A2} задают таким образом, чтобы скорость счета детектора 39 была максимальной.

- ²⁰ На один вход «старт» старт-стоп схемы подают периодический сигнал с периодом 1-10 мс. На вход стоп - сигналы с детектора 39. Производят набор измерений количества фотоотсчетов за некоторое фиксированное время накопления, определяемое окном схемы совпадений. Строят гистограмму количества фотоотсчетов (совпадений), отражающую распределение по числу фотонов. Можно построить гистограммы для
- ²⁵ разных значений времени накопления. Изменяя углы f_{A1} , q_{A1} , f_{A2} и q_{A2} можно изменять скорость счета фотонов в канале и снимать гистограммы для различных ее значений.

1.5. Реализация отщепления фотона. Углы фазовых пластин f_{A1} , q_{A1} , f_{A2} и q_{A2} задают

таким образом, чтобы среднее количество фотонов за фиксированное время накопления, регистрируемое детектором 38, было 0,1. В корреляторе задействуются одновременно

³⁰ регистрируемое детектором 38, было 0,1. В корреляторе задействуются одновременно две старт-стоп схемы. На вход «старт» обеих схем подают периодический сигнал с периодом 1-10 мс. На вход стоп одной схемы подают импульсы с детектора 39, а другой - импульсы с детектора 38. Производят набор измерений количества фотоотсчетов каждого из детекторов за некоторое фиксированное время накопления, определяемое окном схемы совпадений. Строят гистограмму количества фотоотсчетов детектора 39,

35 окном схемы совпадении. Строят гистограмму количества фотоотсчетов детектора 39, соответствующую исходному распределению по числу фотонов, и гистограмму фотоотсчетов детектора D_{AH} при условии регистрации одного фотона детектором 38,

- условное распределение, соответствующее отщеплению одного фотона. Можно показать, что для когерентного состояния отщепление фотона не влияет на вид распределения.

- 2. Тепловые состояния света. Лазер накачки выключают (перекрывают), на вход системы подают тепловое состояние света от красного лазера, пропущенного через вращающийся матовый диск. Для анализа используют только канал «А».
- 2.1. Измерение автокорреляционной функции с использованием двух детекторов.
 Углы фазовых пластин f_{A1}, q_{A1}, f_{A2} и q_{A2} задают таким образом, чтобы скорость счета детекторов 38 и 39 была одинаковой. Сигналы с этих детекторов отправляют на стартстоп схему, события «стоп» проходят через электронную линию задержки, и измеряют гистограмму времен между событиями «старт» и «стоп». Измеряют время корреляции.

Можно провести несколько измерений изменяя скорость вращения матового диска.

2.2. Измерение автокорреляционной функции с использованием одного детектора. Углы фазовых пластин f_{A1} , q_{A1} , f_{A2} и q_{A2} задают таким образом, чтобы скорость счета детектора 39 была максимальной. Сигналы с этого детектора отправляют на старт-

- ⁵ стоп схему, таким образом измеряют гистограмму времен между соседними импульсами. Изменяя углы f_{A1} , q_{A1} , f_{A2} и q_{A2} можно изменять скорость счета фотонов в канале и снимать гистограммы для различных ее значений.
- 2.3. Измерение автокорреляционных функций высших порядков. Углы фазовых пластин f_{A1} , q_{A1} , f_{A2} и q_{A2} , f_{B1} , q_{B1} , f_{B2} , q_{B2} задают таким образом, чтобы скорость счета всех четырех детекторов была одинаковой. В течение некоторого времени измеряют количество единичных фотоотсчетов в каждом канале, а также количество двойных, тройных и четверных совпадений. Рассчитывают значения корреляционных функций второго, третьего и четвертого порядка в нуле.
- 2.4. Измерение распределения по числу фотонов. Углы фазовых пластин f_{A1}, q_{A1}, f_{A2} и q_{A2} задают таким образом, чтобы скорость счета детектора 39 была максимальной. На один вход «старт» старт-стоп схемы подают периодический сигнал с периодом 1-10 мс. На вход стоп сигналы с детектора 39. Производят набор измерений количества фотоотсчетов за некоторое фиксированное время накопления, меньшее времени
- ²⁰ корреляции, определяемое окном схемы совпадений. Строят гистограмму количества фотоотсчетов (совпадений), отражающую распределение по числу фотонов. Можно построить гистограмму для разных значений времени накопления. Изменяя углы f_{A1} , q_{A1} , f_{A2} и q_{A2} можно изменять скорость счета фотонов в канале, и снимать гистограммы для различных ее значений.
 - 2.5. Реализация отщепления фотона. Углы фазовых пластин f_{A1} , q_{A1} , f_{A2} и q_{A2} задают таким образом, чтобы было среднее количество фотонов за фиксированное время накопления, меньшее времени корреляции, регистрируемое детектором 38 было 0,1. В корреляторе задействуются одновременно две старт-стоп схемы. На вход «старт» обеих
- 30 схем подают периодический сигнал с периодом 1-10 мс. На вход стоп одной схемы подают импульсы с детектора 39, а другой - импульсы с детектора 38. Производят набор измерений количества фотоотсчетов каждого из детекторов за некоторое фиксированное время накопления, определяемое окном схемы совпадений. Строят гистограмму количества фотоотсчетов детектора 39, соответствующую исходному
- 35 распределению по числу фотонов, и гистограмму фотоотсчетов детектора 39 при условии регистрации одного фотона детектором 38, - условное распределение, соответствующее отщеплению одного фотона. Можно показать, что для теплового состояния отщепление фотонов существенно изменяет форму распределения и удваивает среднее значение.
- 3. Условное однофотоное состояние. Красный лазер (810 нм) отключают, включают лазер накачки. Углы поворота управляющих фазовых пластин f_p , q_p , f_{A1} , f_{B1} , q_{A1} и q_{B1} устанавливают таким образом, чтобы генерация бифотонов происходила в факторизованном состоянии: $|H\rangle_{_{A}}|H\rangle_{_{B}}$. Фотон в канале «В» используют как триггерный,
- ⁴⁵ таким образом исследуют условное однофотонное состояние в канале «А». Углы фазовых пластин f_{B1} , q_{B1} , f_{B2} и q_{B2} задают таким образом, чтобы скорость счета детектора 36 была максимальной. В силу того, что оба фотона могли пойти в один канал, а также из-за прочих оптических потерь, условное состояние света в канале «А»

будет иметь также примесь вакуумного состояния.

3.1. Измерение временной моды условного однофотонного состояния на основе измерения корреляционной функции второго порядка. Углы фазовых пластин f_{A1} , q_{A1} , f_{A2} и q_{A2} задают таким образом, чтобы скорость счета детектора 39 была максимальной. На вход «старт» старт-стоп схемы подключают сигнал с детектора 36, а на вход «стоп» - с детектора 39. Измеряют гистограмму времен между событиями «старт» и «стоп».

Определяют ширину гистограммы.

5

3.2. Измерение автокорреляционной функции с использованием одного детектора. Углы фазовых пластин f_{A1} , q_{A1} , f_{A2} и q_{A2} задают таким образом, чтобы скорость счета 10 детектора 39 была максимальной. Сигналы с этого детектора отправляют на стартстоп схему, таким образом измеряют гистограмму времен между соседними импульсами. Опционально, можно измерять те же распределения при условии регистрации фотона в сопряженном канале детектором 36.

- 3.3. Измерение автокорреляционной функции с использованием трех детекторов. 15 Углы фазовых пластин f_{A1} , q_{A1} , f_{A2} и q_{A2} задают таким образом, чтобы скорость счета детекторов 38 и 39 была одинаковой. Сигналы с этих детекторов отправляют на стартстоп схему, события «стоп» проходят через электронную линию задержки, и измеряют гистограмму времен между событиями «старт» и «стоп». При этом запись событий
- происходит при условии срабатывания другой старт-стоп схемы, регистрирующей 20 совпадение фотоотсчетов между детекторами 39 и 36. Определяют глубину и ширину провала корреляционной функции.

6. Решения задачи, связанной с исследованиями квантового генератора случайных чисел, осуществляют следующим образом.

Поскольку квантовые процессы принципиально недетерминированы, то именно 25 квантовый генератор случайных чисел будет максимально защищен от возможного предсказания его исходов. Настоящая схема позволяет реализовать множество различных квантовых генераторов случайных чисел. В их основе лежат свойства когерентного излучения. Лазер накачки выключают (перекрывают), на вход системы подают когерентное состояние света от красного лазера. 30

1. Углы фазовых пластин f_{A1} , q_{A1} , f_{A2} и q_{A2} , f_{B1} , q_{B1} , f_{B2} , q_{B2} задают таким образом, чтобы скорость счета всех четырех детекторов была одинаковой. За один такт генерируется два бита информации. В каждом такте измерение идет до того момента, пока хотя бы один фотон будет зарегистрирован любым из четырех детекторов. Далее

- 35 в зависимости от того, какой детектор сработал, записывают число от 0 до 3. Измерения повторяют до тех пор, пока не будет сгенерирована достаточно большая последовательность случайных чисел. Далее эту последовательность записывают в файл, подвергают постобработке и проверке.
- 2. Углы фазовых пластин f_{A1} , q_{A1} , f_{A2} и q_{A2} задают таким образом, чтобы скорость 40 счета детектора 39 была максимальной. Сигналы с этого детектора отправляют на старт-стоп схему, таким образом измеряют времена между соседними импульсами. Последовательность этих времен и играет роль последовательности случайных чисел. Далее эту последовательность записывают в файл, подвергают постобработке и проверке.
- 45

7. Задачу интерференции Хонга-Оу-Манделя решают следующим образом. Углы поворота управляющих фазовых пластин *f*_n, q_p выставляют таким образом, чтобы состояние света после пары кристаллов имело вид

 $(|HH\rangle - |VV\rangle)/\sqrt{2} = (|DA\rangle + |AD\rangle)/\sqrt{2}$, где состояния $|D\rangle = (|H\rangle + |V\rangle)/\sqrt{2}$ и $|A\rangle = (|H\rangle - |V\rangle)/\sqrt{2}$ отвечают диагональной и антидиагональной поляризации фотона. Тогда состояние в каналах «А» и «В» будет иметь вид $(|D\rangle_A |A\rangle_B + |A\rangle_A |D\rangle_B)/\sqrt{2}$. Углы

- ⁵ Гогда состояние в каналах «А» и «В» оудет иметь вид $(D_A | A_B + | A_A | D_B)/\sqrt{2}$. Углы фазовых пластин f_{A1} , q_{A1} , f_{A2} и q_{A2} устанавливают таким образом, чтобы диагонально поляризованный фотон заходил в волокно 33, а углы f_{B1} , q_{B1} , f_{B2} , q_{B2} - таким образом, чтобы антидиагонально поляризованный фотон заходил в волокно 34. Волокна 33 и 34 подключают к детекторам 37 и 38 через волоконный светоделитель 44. Измеряется
- ¹⁰ количество совпадений фотоотсчетов между детекторами 37 и 38 в зависимости от положения трансляционной подвижки 43. При определенном положении подвижки будет наблюдаться провал совпадений провал Манделя.

Можно измерить ширину провала в зависимости от ширины полосы пропускания фильтров 40, 41, 42.

15

Также можно изменить углы фазовых пластин f_{A1} , q_{A1} , f_{A2} и q_{A2} таким образом, чтобы в волокно 33 заходил антидиагонально поляризованный фотон. В этом случае вместо провала в совпадениях будет наблюдаться пик.

8. Задачу гомодинного детектирования решают следующим образом.

20 Источник тепловых и когерентных состояний подключают к модулю гомодинного детектирования. Исследуют зависимость разностной интенсивности, регистрируемой детектором 62 от времени и от фазы гомодина в зависимости от скорости вращения матового 10.

Все перечисленные выше исследования были проведены на учебно-научном лабораторном стенде, который был изготовлен по схеме, представленной на чертеже.

- ²⁵ При этом была использована элементная база, представленная в перечисленных интернет-источниках: лазерный диод 1 с длиной волны 405 нм (https://www.thorlabs.com/ thorproduct.cfm?partnumber=L405P150); контроллер тока и температуры 1а для лазерного диода 1 (https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=ITC102) дифракционная решетка 2 для создания внешнего резонатора к диоду 1, 1200 штрихов/мм (https://
- ³⁰ www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=GR25-1204); оптический изолятор Фарадея 3 на длине волны 405 нм https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=IO-3D-405-PBS); пара анаморфных призм 4 для преобразования профиля луча диода 1 (https:// www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PS873-A); одномодовое поляризационно сохраняющее волокно 5a,b на 405 нм (https://shop.ozoptics.com/qpmj-3a3a-400-3125-3-1-
- ³⁵ 1); лазерный диод 6 с длиной волны 810 нм (https://www.thorlabs.com/ thorproduct.cfm?partnumber=L808P200); контроллер тока и температуры 6а для лазерного диода 6 (https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=ITC102); одномодовый поляризационно сохраняющий волоконный светоделитель 7 на 810 нм; одномодовое поляризационно сохраняющее волокно 9 и 11 на 810 нм (http://shop.ozoptics.com/pmj-
- ⁴⁰ ЗаЗа-850-5125-3-1-1); вращающийся матовый диск 10, с характерным размером зерна матирования 30 мкм, диаметром 5-15 см, толщиной 0,5-2 мм, частотой вращения от 0 до 10 об/с; поляризатор 12 для излучения на длине волны 405 нм (https://www.torlabs.com/ thorproduct.cfm?partnumber=LPVISE100-A); полуволновая пластинка 13 нулевого порядка с просветлением на длине волны 405 нм (https://www.thorlabs.com/
- ⁴⁵ thorproduct.cfm?partnumber=WPH10E-405); четвертьволновая пластинка 14 нулевого порядка с просветлением на длине волны 405 нм (https://www.thorlabs.com/ thorproduct.cfm?partnumber=WPQI0E-405); bandpass-фильтр 15 на 405 нм с шириной на полувысоте 10 нм (https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=FB405-10); зеркало

16a, 16b, отражающее в диапазоне 780-850 нм (https://www.thorlabs.com/ thorproduct.cfm?partnumber=BBI-E03); линза 17 плоско-выгнутая с просветлением на 405 нм, фокусное расстояние 40 мм (https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber= LA4306-A); пара скрещенных кристаллов BiBO 18, толщина каждого 0,5 мм (http://

- ⁵ www.newlightphotonics.com/vl/bibo- standardproducts.html); линза 19 плоско-выгнутая с просветлением на 805-815 нм, фокусное расстояние 40 мм (https://www.thorlabs.com/ thorproduct.cfm?partnumber=LA1422-B); notch-фильтр 20 на 405 нм (https://www.thorlabs.com/ thorproduct.cfm?partnumber=NF405-13); светоделительная пластина 21 (50:50) в диапазоне 805-815 нм (https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=BSW29); полуволновый
- 10 пластинки нулевого порядка 22, 24, 26, 28, 59 с просветлением на длине волны 810 нм (https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=WPH10E-808); четвертьволновые пластинки 23, 25, 27, 29 нулевого порядка с просветлением на длине волны 810 нм (https: //www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=WPQ10E-808); поляризационные светоделительные кубики 30, 31, 58, 61 для излучения в диапазоне 805-815 нм (https://
- ¹⁵ www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PBS202); одномодовое поляризационно сохраняющее волокно 32, 33, 34, 35, 63, 64 в диапазоне 805-815 нм (https:// www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=P1-780PM-FC-2); кремниевые однофотонные детекторы 36, 37, 38, 39 на диапазон 805-815 нм (https://www.lasercomponents.com/de-en/ product/count-nir/); интеренференционный фильтр 40, 41, 42 с центральной длиной волны
- 20 810 нм и шириной на полувысоте 10 нм (https://www.thorlabs.com/ thorproduct.cfm?partnumber=FB810-10); моторизированная трансляционная подвижка 43 с ходом 25 мм (https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PT1/M-Z8);); одномодовый волоконный светоделитель 44 в диапазоне 805-815 нм; коррелятор 45 для обработки импульсов, приходящих с детекторов 36-39, использующий "старт-стоп"
- 25 схемы (https://www.picoquant.com/products/category/tcspc-and-time-tagging-modules/ multiharp150-high-throughput-multichannel-event-timer-tcspc-unit#specification); каплеры 47-48 для излучения на 405 нм, состоящие из трубочки, с волоконным адаптером на одном конце и линзой с фокусным расстоянием 10 мм, просветленной на 405 нм; каплеры 49-57 для излучения на 810 нм, состоящие из трубочки, с волоконным адаптером на одном
- *зо* конце и линзой с фокусным расстоянием 10 мм, просветленной на 810 нм; балансный детектор 62 (https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PDB450A); зеркало с пьезоподвижкой 65 с контроллером (https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?pfrtnumber= KPZNFL5/M);
- Таким образом, разработанный учебно-научный лабораторный стенд обеспечивает 35 возможность решения всех перечисленных выше задач квантовой физики. Заявляемый стенд может быть использован с целью обучения студентов ВУЗов, сотрудников учебных заведений, научных организаций и индустриальных компаний основам реализации оптических схем, используемых в технологиях квантовых коммуникаций и квантовых вычислений.

40

(57) Формула изобретения

1. Учебно-научный лабораторный стенд для проведения исследований поляризационных и корреляционных свойств однофотонных, бифотонных, когерентных и тепловых световых полей, интерференции Хонга-Оу-Манделя и гомодинного

45 детектирования, включающий последовательно соединенные оптической связью модуль лазера накачки, модуль источника бифотонов, модули поляризационных измерений в каналах A и B, модуль корреляционных измерений, выполненный с возможностью подключения к компьютеру, а также модуль источника когерентных и тепловых состояний и модуль гомодинного детектирования, где модуль источника когерентных и тепловых состояний выполнен с возможностью соединения оптической связью либо с модулями поляризационных измерений в каналах А и В, либо с модулем гомодинного детектирования, а модуль гомодинного детектирования выполнен с возможностью подключения к компьютеру, при этом

- модуль лазера накачки содержит лазер с контроллером тока и температуры, модуль источника бифотонов содержит расположенные на одном оптическом пути контроллер поляризации бифотонного излучения, нелинейные кристаллы, систему разделения излучения бифотонов и излучения накачки;
- каналы А и В модулей поляризационных измерений содержат контроллеры 10 поляризации бифотонного излучения, поляризационный фильтр и/или светоделитель; модуль корреляционных измерений содержит однофотонные детекторы, соединенные с коррелятором импульсов, выполненным с возможностью подключения к компьютеру; модуль источника когерентных и тепловых состояний содержит лазер, соединенный
- оптической связью со светоделителем, выполненным с возможностью деления света 15 на два канала, в одном из которых расположен матовый диск, выполненный с возможностью вращения вокруг своего центра для модулирования случайным образом излучения лазера по фазе и амплитуде, при этом оба канала выполнены с возможностью подключения к модулям поляризационных измерений и модулю гомодинного
- 20 детектирования;

5

25

30

модуль гомодинного детектирования содержит первый поляризационный светоделитель, входы которого выполнены с возможностью подключения к выходам источника когерентных и тепловых состояний, а в его выходном канале расположен контроллер поляризации, второй поляризационный светоделитель и соединенные с ним оптической связью детекторы света.

2. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что контроллер поляризации бифотонного излучения в модуле источника бифотонов и модулях поляризационных измерений состоит из последовательно расположенных полуволновой и четвертьволновой фазовых пластин, установленных на подвижках, выполненных с возможностью вращения.

3. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 2, характеризующийся тем, что фазовые пластины контроллера поляризации в модуле источника бифотонов рассчитаны на длину волны лазера накачки, а фазовые пластины контроллеров поляризации в модулях поляризационных измерений - на вдвое большую длину волны.

4. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 2, характеризующийся тем, 35 контроллеры поляризации бифотонного излучения в модуле источника бифотонов и модулях поляризационных измерений выполнены на подвижках с возможностью вращения вокруг оптической оси, при этом подвижки выполнены с возможностью подключения к компьютеру и автоматизированной регулировки угла поворота

40 подвижек.

> 5. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что в качестве оптической связи, соединяющей модули, используют оптоволокно.

6. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что лазер в модуле лазера накачки представляет собой лазерный диод, установленный в коллимационной трубочке, с возможностью стабилизации температуры посредством

45 использования элемента Пельтье, соединенного с контроллером тока и температуры.

7. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что модуль лазера накачки содержит каплер - устройство ввода/вывода излучения в оптоволокно, представляющий собой трубочку с линзой, в фокальной плоскости которой расположен торец оптоволокна для связи с соседним модулем.

8. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 7, характеризующийся тем, что модуль лазера накачки включает оптический изолятор, расположенный между лазером и
 5 каплером, исключающим попадание отраженного излучения обратно в лазер.

- 9. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 7, характеризующийся тем, что в модуле лазера накачки между лазером и каплером установлена пара призм, выполненных с возможностью корректировки формы пучка для эффективного заведения излучения в оптоволокно.
- 10. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 6, характеризующийся тем, что лазерный диод в модуле лазера накачки выполнен с возможностью работы на длине волны 400-410 нм и имеет ширину линии не более 1 ГГц.

11. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 6, характеризующийся тем, что лазерный диод содержит встроенный высокодобротный резонатор.

15 12. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 6, характеризующийся тем, что модуль лазера накачки содержит дифракционную решетку, соединенную с лазерным диодом оптической связью, для обеспечения необходимой ширины спектра и выполняющей функцию зеркала внешнего резонатора.

13. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что модуль источника бифотонов со стороны входа содержит каплер, в фокальной плоскости линзы которого расположен торец оптоволокна для соединения с модулем накачки.

14. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что модуль источника бифотонов выполнен с возможностью подключения к модулям поляризационных измерений в каналах А и В с помощью каплера, в фокальной плоскости линзы которого расположен торец оптоволокна.

25

15. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что частотный фильтр в модуле источника бифотонов выполнен под длину волны 405 нм с просветлением в диапазоне 400-410 нм.

16. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что
 зо нелинейные кристаллы в модуле источника бифотонов изготовлены под вырожденный синхронизм типа I для длины волны накачки, с ортогонально ориентированными оптическими осями.

17. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что модуль источника бифотонов содержит частотный фильтр накачки и линзу, установленную

зъ после частотного фильтра накачки и перед нелинейными кристаллами таким образом, чтобы кристаллы находились в ее фокусе, при этом линза выполнена с просветляющим покрытием на длине волны накачки.

18. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что модуль источника бифотонов содержит линзу, установленную со стороны выхода модуля после
 40 нелинейных кристаллов таким образом, чтобы кристаллы находились в ее фокусе, при этом линза выполнена с просветляющим покрытием на удвоенной длине волны накачки.

19. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 18, характеризующийся тем, что модуль источника бифотонов содержит частотный фильтр, установленный со стороны выхода за линзой, размещенной после нелинейных кристаллов, и выполненный с

45 возможностью пропускать излучения бифотонов на удвоенной длине волны накачки, но не пропускать излучение на длине волны накачки.

20. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что лазер модуля источника когерентных и тепловых состояний имеет волоконный выход, его

ширина спектра не превышает 1 МГц, а центральная длина волны равна удвоенной длине волны лазера накачки.

21. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что лазер модуля источника когерентных и тепловых состояний соединен со светоделителем с помощью оптоволокна.

22. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что матовый диск модуля источника когерентных и тепловых состояний соединен с выходом светоделителя и с выходным оптоволокном посредством каплеров.

23. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что матовый диск модуля источника когерентных и тепловых состояний выполнен с 10 возможностью регулировки скорости вращения, включая полную остановку.

24. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что подключение модуля источника бифотонов и модуля источника когерентных и тепловых состояний к модулям поляризационных измерений в каналах А и В реализовано

- посредством светоделительной пластины, имеющей два входа, один из которых соединен 15 с выходом модуля источника бифотонов, а второй - с выходом модуля источника когерентных и тепловых состояний посредством каплера, выходы светоделительной пластины соединены оптической связью со входами модулей поляризационных измерений в каналах А и В.
- 25. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что модули 20 поляризационных измерений в каналах А и В соединены с модулем корреляционных измерений оптоволокнами посредством каплеров, перед которыми установлены узкополосные частотные фильтры с шириной диапазона пропускания 10-40 нм, центр диапазона пропускания которых совпадает с удвоенной длиной воны лазера накачки.
- 26. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что один 25 из каплеров модуля поляризационных измерений в канале А установлен на трансляционную подвижку, выполненную с возможностью изменения расстояния между ним и поляризационным фильтром и/или светоделителем.

27. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 26, характеризующийся тем, что трансляционная подвижка выполнена с возможностью подключения к компьютеру. 30

28. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что модуль корреляционных измерений содержит четыре однофотонных детектора, оптические входы которых соединены с оптическими выходами модулей поляризационных измерений, при этом два детектора из четырех подключены к выходам каналов А и В через симметричный оптоволоконный светоделитель. 35

29. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что коррелятор импульсов выполнен с возможностью подсчета числа фотоотсчетов по каждому каналу, а также измерения числа совпадений фотоотсчетов между любыми двумя каналами и измерения гистограммы времен задержки между импульсами, идущими по любым из двух каналов.

40

5

30. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что модуль гомодинного детектирования снабжен со стороны входа каплерами для соединения с помощью оптоволокон с модулем источника когерентных и тепловых состояний.

31. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что 45 контроллер поляризации в модуле гомодинного детектирования выполнен в виде полуволновой фазовой пластинки на удвоенную длину волны накачки.

32. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что детекторы света в модуле гомодинного детектирования соединены с блоком АЦП,

выполненным с возможностью подключения к компьютеру.

33. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что детекторы света в модуле гомодинного детектирования выполнены в виде единого модуля, включающего усилитель разностного фототока.

- 5 34. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что перед первым поляризационным светоделителем модуля гомодинного детектирования установлено зеркало на прецизионной пьезоподвижке, соединенной с источником пилообразного сигнала.
- 35. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что перед
 вторым поляризационным светоделителем модуля гомодинного детектирования
 установлена длиннофокусная линза, при этом детекторы расположены от линзы на ее фокусном расстоянии.

36. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что он содержит компьютер, соединенный с модулями стенда, выполненный с возможностью удаленного подключения другого компьютера с обеспечением возможности удаленного

15 удаленного подключения другого компьютера с обеспечением возможности удаленного управления всеми модулями стенда.

37. Учебно-научный лабораторный стенд по п. 1, характеризующийся тем, что соединение модулей оптоволоконной оптической связью реализовано посредством каплера - устройства ввода/вывода излучения в оптоволокно, представляющего собой трубочку с линзой, в фокальной плоскости которой расположен торец оптоволокна.

25

20

30

40

45

