

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **034547**(13) **B1**(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2020.02.19

(51) Int. Cl. **G01V 7/04** (2006.01)
H01S 3/22 (2006.01)

(21) Номер заявки
201700593

(22) Дата подачи заявки
2017.12.26

(54) **СВЕРХЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ДЕТЕКТОР ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОГО ПРИЗМЕННОГО РЕЗОНАТОРА ТИПА "ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ"**

(43) **2019.06.28**

(56) RU-C1-2454685
RU-C1-2116659
RU-C1-2167437
US-A-5321718
US-A1-2017363412

(96) **2017000156 (RU) 2017.12.26**
(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
БЕЛЫХ ИВАН ГРИГОРЬЕВИЧ
(RU); МАЛЫЦЕВ АЛЕКСАНДР
ГРИГОРЬЕВИЧ; МАЛЫЦЕВ ИГОРЬ
АЛЕКСАНДРОВИЧ (BY); ФЕДОРОВ
ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ (RU)

(72) Изобретатель:
Мальцев Александр Григорьевич,
Мальцев Игорь Александрович (BY)

(57) В патенте описывается способ достижения высокой чувствительности детектора гравитационных волн на основе двумерного призмленного резонатора He-Ne лазера типа "Шепчущей галереи". Эффект ШГ достигается тем, что резонатор сформирован из прямоугольных призм-крыш, в которых используется фундаментальный закон полного внутреннего отражения (ПВО) для электромагнитных волн оптического диапазона. Закон ПВО в предложенной схеме резонатора создает эффект ШГ. Эффект ШГ характеризует большое время жизни фотона в резонаторе. Сверхузкая ширина линии генерации двумерного призмленного резонатора ШГ формируется 1) большим временем жизни фотона в резонаторе, 2) узкой шириной линии пассивного резонатора, 3) приведением в нулевое значение проекций скоростей всех возбужденных атомов. На основании вышеуказанных свойств значение дробового шума фотонов выше теоретического предела в 10^{17} раз.

B1**034547****034547****B1**

Изобретение относится к области квантовой электроники, в частности к лазерной технике. На основе предложенного решения может быть создан сверхчувствительный детектор гравитационных волн при сравнительно небольших габаритных размерах.

Известны интерферометры типа двухлучевых интерферометров Майкельсона с взаимно перпендикулярными плечами длиной по 4,5 км каждое. Такими интерферометрами были обнаружены гравитационные волны по изменению интерференционной картины при слабых колебаниях зеркал интерферометра [1].

Такие эксперименты сильно дорогостоящие и практически такой эксперимент нельзя повторить или перепроверить.

Целью изобретения является использование более чувствительного активного интерферометра вместо пассивного интерферометра Майкельсона.

Для достижения поставленной цели предлагается использовать измерение вариации оптической фазы или частоты генерации лазера, которые возникают при перемещении зеркал. Возмущение оптической длины резонатора L на δL приводит к изменению частоты генерации лазера на $\Delta\nu = (\delta L/L)\nu$.

Поставленная цель достигается построением двумерного призмного резонатора с использованием эффекта полного внутреннего отражения ПВО от прямоугольных призм. Фундаментальный закон ПВО в прямоугольной призме-крыше в представленной авторами изобретения схеме резонатора создает аналог шепчущей галереи ШГ для волн оптического диапазона. Эффект ШГ определяет большое время жизни фотона в резонаторе $\tau = 0,035$ с. Большое время жизни фотона характеризует гигантскую добротность резонатора $Q = 1,1 \times 10^{14}$ и сверхузкую линию генерации лазера.

Реализуемость многопроходного резонатора на основе ШГ подтверждена экспериментальным образцом, разработанным и созданным авторским коллективом (фиг. 1).

В газовом лазере, образованном квадратным резонатором, рабочая среда, смесь He и Ne в отношении 10:1 размещается в разрядном канале, выполненном в виде щелевого зазора 1 между плоскими электродами 2 и 3 (фиг. 2). Двумерный оптический призмный резонатор (фиг. 3) образован выходным полупрозрачным зеркалом 4, плотным зеркалом 8 и четырьмя поворотными зеркалами 5. Каждое поворотное зеркало выполнено в виде набора из прямоугольных трехгранных призм-крыш 6 полного внутреннего отражения, установленных основаниями на плоских подложках. В одном из поворотных зеркал выполнено выходное окно связи 7, оптически сопряженное с плотным зеркалом 8 и полупрозрачным зеркалом 4. Плотное и полупрозрачное зеркала расположены перпендикулярно осевой линии оптического резонатора. Поворотные зеркала расположены по периферии щелевого зазора так, что плоскости подложек соседних поворотных зеркал перпендикулярны, а осевая линия оптического резонатора ортогональна плоскостям боковых граней призм-крыш.

В результате оригинального геометрического построения лазера и оптического резонатора съем генерации с единицы объема инверсной среды осуществляется в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Отсюда следует, что такие условия работы лазера характеризуются двумерным принципом действия резонатора лазера.

Высота щелевого зазора l (1 фиг. 2), ширина боковой грани призмы-крыши $\frac{a}{\sqrt{2}}$, длина отрезка L линии резонатора, заключенного между зеркалами, удовлетворяют условиям:

$$2\sqrt{Ll} \leq \min\left(l, \frac{a}{\sqrt{2}}\right) \quad (1)$$

$$L = 2\sqrt{2} \frac{A \times B}{a} \quad (2)$$

где A, B - длины подложек соседних поворотных зеркал,

a - ширина основания призм, из которых собраны поворотные зеркала.

Соотношения (1) и (2) поясняются фиг. 3, на котором приведена развертка зигзагообразного пути луча в резонаторе. Линия со стрелкой изображает основание квадрата, в котором находится выходное окно 7, отмеченное кружочком. Как видно из фиг. 3, элементарная длина пути луча L_0 , возвращающая его на грань с окном связи, равна $L_0 = \frac{2A}{\cos 45^\circ} = 2\sqrt{2}A$, а полная длина пути луча усиления при однократном обходе квадрата дается формулой (2).

Условие (1) характеризует максимальную длину пути луча в резонаторе, совместимую с его дифракционной расходимостью.

Дифракционный поперечный размер луча $d = \sqrt{4\lambda L}$ должен быть меньше минимального геометрического размера: или высоты зазора l , или расстояния между центрами лучей $\frac{a}{\sqrt{2}}$.

В "Шепчущей галерее" переотражение приповерхностных волн скользящего падения на внутренней поверхности шара или цилиндра происходит практически без потерь, поэтому время жизни этих волн имеет астрономические величины [2]. В квадратном резонаторе (фиг. 1, фото), состоящем из призм ПВО, видно, что потери на переотражение от оснований призм для лучей, падающих под прямыми углами на боковые просветленные грани прямоугольных призм, практически полностью отсутствуют.

Выражение для дифракционного предела $F = \frac{a^2}{4\lambda L}$ позволяет лучу генерации диаметром $d = 3,5$ мм

иметь внутри резонатора длину пути $L=5$ м. При такой длине луча усиления число Френеля $F=1$. Это необходимое условие для генерации основной поперечной моды излучения TEM_{00} .

На фотографии фиг. 1 луч юстировочного лазера после многократных переотражений от призм ПВО проходит без потерь внутри резонатора длину пути $L=5$ м. Таким образом, видно, что существует аналогия с эффектом шепчущей галереи.

Габаритный размер квадратного призматического резонатора со стороной 9 см позволяет сделать восемнадцать проходов луча усиления диаметром $d=3,5$ мм внутри резонатора, при этом луч усиления ни на одном отрезке траектории дважды не проходит по одному и тому же месту.

Существенным параметром резонаторов также является добротность резонатора Q , которая определяется временем жизни фотона в резонаторе. Например, в ШГ, которую образует флюоритовый микродиск, время жизни фотона в резонаторе $\tau=10^{-4}$ с. Это время позволяет получить, как пишут в литературе, гигантскую добротность $Q=3 \times 10^{11}$ [3]. Добротность обычных лазерных резонаторов не превышает $10^8 - 10^9$. В диэлектрических микродисках или микрошариках на время жизни фотона в оптическом диапазоне большое влияние оказывает необработанная шероховатость поверхности микродиска или микрошарика и несовершенство кристаллической структуры материала. Также известно, что с увеличением диаметра шарика или микродиска относительно длины волны генерации, время жизни фотона в резонаторе резко увеличивается.

В отличие от микрошарика или микродиска, в предложенном случае поверхности призм обрабатываются с минимальной шероховатостью и габариты предложенной авторами ШГ намного больше длины волны генерации.

Принципиальная схема эксперимента по измерению времени жизни фотона в разработанном и созданном авторами изобретения призматическом резонаторе ШГ представлена на фиг. 4. В кювету 1, наполненную смесью He и Ne в отношении 10:1, подавался одиночный импульс напряжения. При помощи объектива 3, фотоприемного устройства 4 и осциллографа 5 были сфотографированы два световых импульса (фиг. 5).

Первый импульс - время свечения кюветы без призматического резонатора и второй импульс - время свечения кюветы с призматическим резонатором ШГ. Время свечения кюветы без призматического резонатора было $\tau=10$ мс. Время свечения кюветы с призматическим резонатором составляло $\tau=35$ мс.

По известному выражению [4] определяется добротность резонатора Q

$$Q=2\pi\nu\tau \quad (3)$$

Частота лазера на $\lambda=0,633$ мкм равна 5×10^{14} Гц. При $\tau=0,035$ с добротность резонатора $Q=1,1 \times 10^{14}$. Фундаментальный закон полного внутреннего отражения в прямоугольной призме в предложенной авторами схеме резонатора создает эффект ШГ для волн оптического диапазона. Эффект ШГ определяет большое время жизни фотона в резонаторе. Большое время жизни фотона в резонаторе, согласно выражению $\Delta\nu=1/2\pi\tau$, определяет сверхузкую линию пассивного резонатора $\Delta\nu=4,6$ Гц.

В двумерном призматическом резонаторе ШГ все пространство (фиг. 1) заполнено центрами пересечения генерируемого луча лазера под прямыми углами. Такое физическое условие генерации позволяет выстроить все имеющиеся проекции векторов скоростей $v_{\perp}$ инверсных атомов перпендикулярно к направлению движения генерируемого луча. Таким образом, все инверсные атомы дают вклад в излучение на одной частоте - на частоте центра линии излучения.

Согласно формуле (4.8) в книге [5] в призматическом резонаторе генерация происходит на центральной частоте ν_0 атомного перехода.

Оценим теоретическую ширину линии генерации согласно формуле (17) из статьи A.L. Schawlow and C.H. Townes [6].

$$\delta\nu = \frac{4\pi h\nu}{P} (\Delta\nu_{\text{рез}})^2 \quad (4)$$

P - мощность излучения лазера равная 1 мВт.

Ширина линии нашего двумерного призматического резонатора типа ШГ

$$\Delta\nu_{\text{рез}}=4,6 \text{ Гц}$$

Отсюда теоретическая ширина линии генерации согласно формуле (4) имеет бесконечно малую величину:

$$\delta\nu = 9 \times 10^{-14} \text{ Гц}$$

В связи с этим можно сказать, что понятия ширины линии в двумерном призматическом резонаторе ШГ не существует. Доплеровская ширина линии генерации "схлопывается" в узкую линию, иными словами "Доплер коллапсирует".

Таким образом, с помощью двумерного призматического резонатора типа ШГ можно управлять физическим процессом формирования ширины линии генерации газового лазера.

Итак, сверхузкая ширина линии генерации двумерного призматического резонатора ШГ формируется:

- 1) большим временем жизни фотона в резонаторе,
- 2) узкой шириной линии пассивного резонатора,
- 3) приведением в нулевое значение проекций скоростей всех возбужденных атомов.

В силу перечисленных физических условий генерации, двумерный призматический резонатор газового

лазера будет генерировать очень узкий пик выходной мощности, измеряемый миллионными долями Гц. Такой резонатор можно использовать в качестве активного интерферометра для измерения вариации оптической фазы или частоты генерации лазера, которые возникают при перемещении зеркал. Возмущение оптической длины резонатора L на δL приводит к изменению частоты генерации лазера на $\Delta\nu = (\delta L/L)\nu$. Поэтому малейшее изменение частоты генерации со сверхузкой шириной линии приводит к заметному изменению выходной мощности ΔP , которая фиксируется фотодетектором.

Активные интерферометры имеют более высокую чувствительность, чем пассивные интерферометры [7].

Газовый лазер с двумерным призмным резонатором ШГ может стать основой для разработки приборов регистрации гравитационных волн. По публикациям в научной литературе [7, 8] чувствительность существующих установок по обнаружению гравитационных волн на основе лазерных активных интерферометров с использованием нелинейных резонансов, на два-три порядка меньше необходимого теоретического предела. По астрофизическим оценкам требуемая чувствительность установки должна быть не хуже, чем $\delta L_{\text{др}}/L = 10^{-21} \frac{1}{\sqrt{\text{Гц}}} [9]$.

Предварительные оценки чувствительности детектора гравитационных волн на основе двумерного призмного резонатора типа ШГ дают хороший результат. Ввиду оригинальных особенностей построения призмного резонатора и физических процессов, происходящих в нем, линия генерации представляет очень узкий пик шириной $\delta\nu = 9 \times 10^{-14}$ Гц.

Минимально регистрируемое изменение длины резонатора определяется фундаментальной величиной - дробовым шумом светового луча и фотодетектора. Для спектральной плотности шума известно выражение [7]:

$$\delta L_{\text{др}} = \lambda \left(\frac{4}{3\sqrt{3}} \right) \left(\frac{h\nu}{\eta P} \right)^{1/2} \left(\frac{\delta\nu}{\Delta\nu_m} \times \frac{1}{k} \right) \left[\frac{\text{м}}{\sqrt{\text{Гц}}} \right] \quad (5)$$

где $\Delta\nu_m = c/2L$ - межмодовое расстояние,

$k=10$ - контраст узкого резонанса,

$\lambda=0,63$ мкм - длина волны излучения He-Ne лазера,

$\eta P=1$ Вт ($P=0,001$ Вт - мощность излучения, $\eta=1000$ - эффективность фотодетектора),

$L=5$ м - длина резонатора.

В результате детектор гравитационных волн с двумерным призмным резонатором ШГ может иметь чувствительность

$$\delta L_{\text{др}}/L = 1,66 \times 10^{-38} \frac{1}{\sqrt{\text{Гц}}}$$

Эта величина в 10^{17} раз выше чувствительности теоретического предела.

Литература

1. B.P. Abbott et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger // Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016).
2. Виноградов А.В., Ораевский А.Н. Соросовский образовательный журнал, 7, 2001, № 2, с. 96-102.
3. Городецкий М.Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью, М.: Физматлит, 2011, с. 276-277.
4. Звелто О. Принципы лазеров, М.: Мир, 1990, с. 186-187, с. 347.
5. Казанцев А.П., Сурдутович Г.И., Яковлев В.П. Механическое действие света на атомы, М.: Наука, 1991, с. 32.
6. Schawlow A.L. and Townes C.H. // Infrared and Optical Masers, Physical review, December 15, 1958, p. 1943.
7. Летохов В.С., Чеботаев В.П. Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения, М.: Наука, 1990, с. 458-460.
8. Багаев С.Н., Безруков Л.Б., Квашнин Н.Л. и др. ПТЭ, 2, с. 95 (2015).
9. Thome K.S. // Rev. Mod. Phys / 1980. V. 52. P. 285.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Газовый лазер, содержащий инверсную среду, отличающийся тем, что с целью уменьшения ширины линии генерации $\delta\nu$ и увеличения добротности резонатора Q инверсная среда размещена в квадратном призмном разрядном канале с двумерным принципом действия, выполненном в виде щелевого зазора, многопроходный оптический резонатор образован четырьмя поворотными зеркалами, каждое поворотное зеркало выполнено в виде набора из прямоугольных трехгранных призм-крыш полного внутреннего отражения, установленных основаниями на плоских подложках, в одном из поворотных зеркал выполнено выходное окно связи, оптически сопряженное с плотным и полупрозрачным зеркалами, поворотные зеркала расположены по периметру щелевого зазора так, что плоскости подложек соседних поворотных зеркал перпендикулярны, а осевая линия резонатора ортогональна плоскостям боковых граней призм-крыш, при этом высота щелевого зазора l , ширина оснований прямоугольных призм-крыш a и длина отрезка осевой линии резонатора L , заключенного между поворотными зеркалами, удовлетво-

ряют условиям:

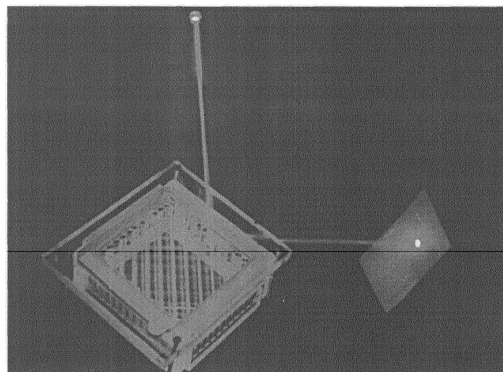
$$2\sqrt{L\lambda} \leq \min\left(l, \frac{a}{\sqrt{2}}\right); \quad L = 2\sqrt{2} \frac{A \times B}{a}$$

где А, В - длина подложек соседних поворотных зеркал.

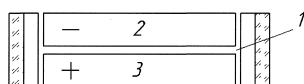
2. Применение газового лазера по п.1 в качестве сверхчувствительного лазерного активного интерферометра для детектирования гравитационных волн, в котором согласно формуле

$$\frac{\delta L}{L} = \lambda \left(\frac{4}{3\sqrt{3}} \right) \left(\frac{h\nu}{\eta P} \right)^{1/2} \left(\frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_m} \times \frac{1}{k} \right) \left[\frac{1}{\sqrt{\Gamma_{\text{ц}}}} \right]$$

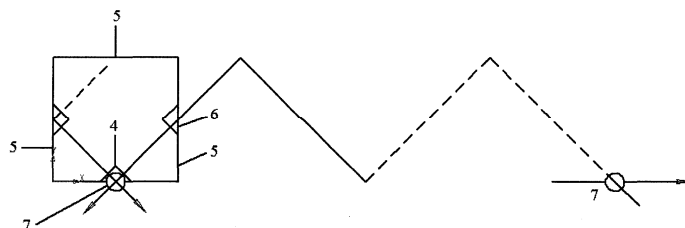
эквивалентная величина чувствительности выше теоретического предела в 10^{17} раз.



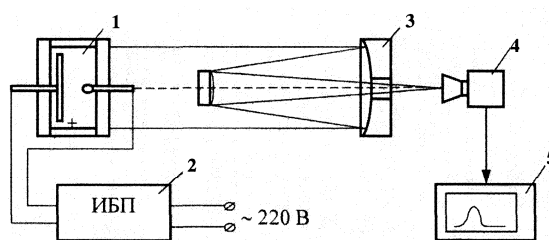
Фиг. 1



Фиг. 2

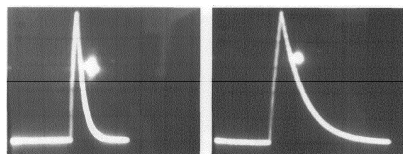


Фиг. 3



1- Призмный резонатор ПВО типа ШГ; 2- ИБП – импульсный блок питания; 3- телескоп; 4- фотоприемное устройство; 5- осциллограф.

Фиг. 4



Фиг. 5

