

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **034832**

(13) **B1**

**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

**(45)** Дата публикации и выдачи патента  
**2020.03.26**

**(51)** Int. Cl. **G01N 21/17** (2006.01)

**(21)** Номер заявки  
**201890624**

**(22)** Дата подачи заявки  
**2016.09.26**

---

**(54) ДЕТЕКТОР С ШУМОПОДАВЛЕНИЕМ**

---

**(31)** **20151276**

**(32)** **2015.09.29**

**(33)** **NO**

**(43)** **2018.08.31**

**(86)** **PCT/EP2016/072865**

**(87)** **WO 2017/055219 2017.04.06**

**(71)(73)** Заявитель и патентовладелец:  
**СИНТЕФ ТТО АС (NO)**

**(72)** Изобретатель:  
**Йохансен Иб-Руне (NO)**

**(74)** Представитель:  
**Поликарпов А.В., Соколова М.В.,  
Путинцев А.И., Черкас Д.А., Игнатъев  
А.В. (RU)**

**(56)** BREGUET J. ET AL.: "Photoacoustic detection of trace gases with an optical microphone", SENSORS AND ACTUATORS A: PHYSICAL, ELSEVIER BV, NL, vol. 48, no. 1, 1 May 1995 (1995-05-01), pages 29-35, XP027208121, ISSN: 0924-4247 [retrieved on 1995-05-01], Section 2; figure 1; table 1, abstract  
US-A1-2013160557  
WO-A1-2004029594  
US-A1-2006123884  
WO-A1-2008026146  
US-A1-2010139368

---

**(57)** Изобретение относится к оптическому детектору газа для обнаружения газа, поглощающего свет на известной длине волны, при этом детектор газа содержит по меньшей мере две по существу идентичные параллельные мембраны, определяющие объем между ними, который содержит подлежащий исследованию газ, и модулированный первый источник света, испускающий свет на упомянутой известной длине волны в упомянутый объем при выбранной частоте, причем детектор приспособлен для обнаружения относительных перемещений упомянутых мембран, а упомянутые перемещения имеют частоту, соответствующую частоте или множеству частот упомянутого импульсного источника света, причем упомянутый объем имеет по меньшей мере одно отверстие, позволяющее газу неограниченно течь или диффундировать в упомянутый объем.

---

**B1**

**034832**

**034832**

**B1**

Настоящее изобретение относится к оптическому детектору газа для обнаружения газа, поглощающего свет на известной длине волны.

Хорошо известны газовые датчики абсорбционного типа, в которых свет передается через газовую смесь к детектору, при этом определенный газ поглощает свет с определенными характеристическими длинами волн, и, если передаваемый спектр и детектированный спектр известны, можно узнать концентрацию газа. Тем не менее, измерение спектра передаваемого света является сложным процессом, а также трудным для применения в компактном недорогом оборудовании, например в приборах для измерения содержания алкоголя.

Были разработаны некоторые альтернативные решения, в которых поглощение определенных длин волн в газе может быть использовано таким образом, что поглощение приводит к росту температуры в газе или к флуктуациям давления. Было продемонстрировано, что фотоакустические детекторы газа, изобретенные Brüel и Kjær (US 4818882), позволяют обнаруживать очень низкие уровни газа. "Сердцем" фотоакустических детекторов газа являются очень хорошие конденсаторные микрофоны, изготовленные Brüel и Kjær. Низкочастотная чувствительность конденсаторного микрофона ограничена требуемым предварительным напряжением мембран. Это предварительное напряжение необходимо, чтобы избежать того, что емкостные силы притягивают мембрану к задней пластине. Настоящее изобретение обеспечивает улучшение в этом отношении, например, благодаря использованию оптического считывания, позволяющего изготовить мембрану намного мягче (с меньшим напряжением). Кроме того, конденсаторный микрофон Brüel и Kjær имеет всенаправленный отклик. Обычно считается, что всенаправленный (или не имеющий определенного направления) отклик микрофона представляет идеальную сферу в трех направлениях (см. <https://en.wikipedia.org/wiki/Microphone>). Это означает, что конденсаторный микрофон захватывает шум со всех направлений. Настоящее изобретение улучшает это несколькими путями, как объясняется позднее. Кроме того, фотоакустические детекторы газа, изобретенные Brüel и Kjær, для правильной работы должны иметь газ внутри замкнутого объема. Это означает, что датчик газа нуждается в насосах для транспортировки газа в закрытый объем, а также в клапанах для изоляции объема. Настоящее изобретение не требует насосов или клапанов.

Другой фотоакустический способ обнаружения описан в US2005/117155 (US7245380), где применяется импульсный источник света. Одной из наиболее привлекательных особенностей этого изобретения является то, что оно не требует использования насосов или клапанов, как стандартный фотоакустический подход. Импульсный свет поглощается жидкостью и приводит к возникновению акустических волн в жидком образце, которые могут быть обнаружены резонирующим вилкообразным кристаллом, из которого может быть считан результирующий сигнал. Поглощенная энергия аккумулируется в кристалле в форме вилки, и кристалл в форме вилки действует как механический фильтр на резонансной частоте. Вилка предпочтительно выполнена из кварца, что может подходить для использования в жидкости, но будет иметь ограниченную эффективность связи в газе. Частота импульсов ограничена резонансной частотой вилки, и это требует очень хорошего управления частотой возбуждения и способами компенсации изменений резонансной частоты из-за температуры, изменения массы вилки (т.е. частиц пыли) или других внешних влияний.

Таким образом, целью настоящего изобретения является разработка компактного и недорогого фотоакустического газового датчика, имеющего низкую чувствительность к внешним вибрациям, в то же самое время обладающего высокочувствительным обнаружением газа. Это достигается с помощью оптического детектора газа, охарактеризованного в приложенной формуле изобретения.

В соответствии с предпочтительным вариантом осуществления изобретения детектор газа базируется, таким образом, на контроле расстояния между двумя параллельными мембранами, определяющими объем между ними. Газ будет обнаруживаться в виде волны/импульса давления или скорости, распространяющихся наружу из объема между мембранами, тем самым раздвигая их в противоположных направлениях. Вибрации и внешний акустический шум из окружающей среды будут перемещать мембраны в одном и том же направлении, тем самым сохраняя расстояние между ними, а значит, не будут обнаруживаться детектором.

Конденсаторный микрофон имеет всенаправленный отклик из-за закрытого заднего объема и будет захватывать шум со всех трех направлений. Микрофон без заднего объема, такой как ленточный микрофон, обнаруживает звук согласно двунаправленной диаграмме (также называемой восьмеркой), поскольку лента открыта с обеих сторон. Таким образом, единственная мембрана не является чувствительной к звуку, поступающему с боковых сторон, и имеет основную чувствительность в направлении, перпендикулярном мембране. В настоящем изобретении используются две отдельные мембраны, и они по-прежнему являются нечувствительными к звуку или вибрациям, поступающим с боковых сторон. Внешний звук или вибрация, перпендикулярные мембранам, будут перемещать обе мембраны, а так как измеряется относительное перемещение между двумя мембранами, вклад от внешнего источника будет существенно снижен и в принципе полностью устранен, если длина волны от внешнего источника является большей по сравнению с расстоянием между двумя мембранами. Сигнал, создаваемый поглощением газа между двумя мембранами, будет расталкивать мембраны и не будет подавляться.

Несколько различных средств может быть предусмотрено для измерения перемещения, например с использованием симметричных мембран, имеющих пьезоэлектрические кольца, как показано в WO 2011/033028, которые соединены электрически, чтобы устранить сигналы, если мембраны перемещаются в одном и том же направлении. Аналогичные конструкции могут быть выполнены с использованием пьезорезистивных или емкостных датчиков.

Предпочтительно расстояние между мембранами измеряют оптически, используя интерферометрию, т.е. измерительную систему, обсуждаемую в WO 2003/046498. В соответствии с предпочтительным вариантом осуществления мембраны, таким образом, образуют зеркала в интерферометре Фабри-Перо, изменяющем резонанс в зависимости от расстояния между мембранами.

Изобретение будет обсуждено ниже со ссылкой на прилагаемые чертежи, иллюстрирующие изобретение примерами.

Фиг. 1 иллюстрирует образец газа, расположенный между двумя мембранами.

Фиг. 2 иллюстрирует вариант осуществления изобретения, когда датчик газа снабжен резонатором.

Фиг. 3 иллюстрирует датчик с оптическим считыванием.

Фиг. 4а, 4б иллюстрируют предпочтительный вариант осуществления, обеспечивающий оптическое измерение расстояния между мембранами.

Как показано на фиг. 1, детектор 1 газа, по существу, связан с объемом 2 газа, облучаемого импульсным световым пучком 8 от источника 3. При поглощении света объем газа расширяется и расталкивает две мембраны 4а, 4б с силой  $F$ . Как указано на чертеже, расстояние  $D$  между мембранами 4а, 4б будет изменяться во времени  $t$  и амплитуда изменения  $D$  будет связана с концентрацией целевого газа в образце. Объем 2 газа не помещается в закрытом контейнере, а является, по существу, свободным для перемещения или диффузии в измерительный объем, тем самым делая ненужными насосы или другие средства для получения потока, хотя это будет зависеть от предполагаемого использования и работы датчика. Объем газа может просто определяться положением мембран без каких-либо стенок или составных частей.

Очень упрощенной моделью звука, исходящего от возбуждения газа, является акустический точечный источник, генерирующий сферическую волну. Звуковое давление от сферической волны уменьшается пропорционально расстоянию  $r$  распространения (см. "Elektroakustikk", Jens Jorgen Dammerud, 4<sup>th</sup> ed., 2013, p. 100), а интенсивность звука уменьшается пропорционально  $r^2$ . Это значит, что если расстояние от акустического точечного источника до внутренней части мембраны составляет 1 мм, а расстояние от точечного источника до внешней части мембраны составляет 10 мм, то давление звука в 10 раз ниже снаружи, в перемещении мембраны доминирует прямой путь изнутри.

Как показано на фиг. 1, акустический сигнал, создаваемый в образце газа, может протекать 5 вокруг мембраны 4а, 4б, и тем самым частота импульсов и размер мембран могут быть выбраны таким образом, чтобы предотвратить отрицательную обратную связь, в то же самое время сохраняя объем открытым, чтобы дать возможность газу протекать свободно через объем. При правильном выборе размеров мембран давление снаружи может иметь фазу, противоположную давлению между мембранами 4а, 4б, тем самым увеличивая силу сигнала. При генерировании акустических импульсов на частоте 20 кГц длина волны звука составляет 17 мм. Если путь распространения от объема к задней стороне мембран составляет 17 мм, задняя и передняя стороны находятся в фазе и перемещение мембраны уменьшается или даже подавляется. Однако, если путь распространения составляет  $17/2=8,5$  мм, звук на обратной стороне мембраны находится в противофазе, что может увеличить амплитуду перемещений мембраны и тем самым улучшить сигнал детектора. Таким образом, размеры мембран и объем газа могут изменяться в зависимости от скорости звука в газе. Однако измерение будет осуществляться до тех пор, пока перемещения полностью не подавляются.

На фиг. 2 детектор содержит акустический резонатор 6, окружающий первую и вторую мембраны 4а, 4б, который, при согласовании с частотой импульсов источника света, может усилить вибрации, а значит, сигнал.

На фиг. 3 представлено схематическое изображение, где газ 7 вводится в пространство между мембранами 4а, 4б, определяющими объем 2 газа, а свет 8 от инфракрасного широкополосного источника облучает объем 2 газа, который поглощает свет на характеристических длинах волн. Расстояние между мембранами 4а, 4б измеряют, используя интерферометрические средства, т.е. адаптацию способа, описанного в WO 2003/046498. Для получения этого мембраны имеют, по меньшей мере, частично отражающую поверхность, так что полость между мембранами образует интерферометр Фабри-Перо с резонансной частотой, зависящей от расстояния между мембранами. Один (или более) узкополосный источник 15 света, т.е. диодный лазер, используется для передачи контролируемого света 14 через мембраны 4а и 4б и на один или несколько детекторов 16. Альтернативная схема представляет считывание сигнала, отражающегося от мембран. Источник 15 света и детектор 16, в том числе любые оптические средства для фокусировки или коллимации света, обычно размещаются на расстоянии более 0,1 мм, предпочтительно несколько мм, от мембран, чтобы избежать какой-либо формы эффектов разрушения пленки, генерирующих шум. Для получения как можно более чувствительного датчика, напряжение в мембранах должно быть как можно меньше, обычно между 5 и 50 МПа.

Фиг. 4а и 4б иллюстрируют источник света, облучающий поток 7 газа между двумя мембранами 4а, 4б. Фиг. 4а иллюстрирует детектор газа в соответствии с изобретением, с одной стороны, в то время как фиг. 4б иллюстрирует детектор газа, как видно сверху. Источником может быть широкополосный ИК (инфракрасный) источник 10, испускающий свет в довольно широком диапазоне длин волн. Свет коллимируется линзой 11 и передается через интерферометр 12 Фабри-Перо для того, чтобы выбрать по меньшей мере одну из характеристических длин волн для газа, подлежащего обнаружению. Вторая линза 13 используется для фокусировки света на образце 2 газа. Этот источник света может быть представлен в разных вариантах осуществления в зависимости от рабочих длин волн и газа, подлежащего обнаружению, а линзы могут быть как рефракционные, так и дифракционные. Для измерений СО в источнике могут использоваться фильтры, как описано в WO 2006/110041 и WO 2006/110042. Для других газов в источнике могут использоваться фильтры, описанные в WO 2011/033028.

Фокусное расстояние второй линзы 13, фокусирующей свет на объеме газа, может быть выбрано таким образом, чтобы задавать узкий конус, по меньшей мере, в направлении между мембранами, так что мембраны могут быть как можно ближе друг к другу без блокировки света. При фокусировке света 8 измеряемый объем 2 также ограничен в фокусной области, что напоминает акустический точечный источник, как упомянуто выше. Как можно видеть на фиг. 4б, сфокусированный световой пучок не распространяется через какое-либо окно или другие материалы поблизости от объема 2 образца газа, что является полезным, так как не происходит дополнительного поглощения, что могло бы оказать негативное влияние на условия в образце, но более важно то, что отсутствие окна предотвращает генерацию акустических сигналов, что обычно представляет основные ограничения в фотоакустической спектрометрии. Устранение окон допускает нулевой сигнал, когда газ отсутствует, в то время как использование окна обычно дает базовый сигнал, который необходимо вычесть, и этот базовый сигнал будет изменяться во времени и, таким образом, будет ограничивать точность датчиков.

Модуляция источника света может быть выполнена путем его включения и выключения, но это может повлиять на излучаемый спектр. Другой альтернативой является блокирование пучка при выбранной скорости, например используя вращающееся колесо или LCD. В соответствии с предпочтительным вариантом осуществления интерферометр Фабри-Перо может быть использован для сканирования назад и вперед по характеристической длине волны, так что поглощение происходит со скоростью, зависящей от того, когда свет имеет надлежащую длину волны. Как правило, если источник имеет длину волны, модулированную частотой  $f$ , сигнал может быть демодулирован при  $1f$ ,  $2f$ ,  $3f$ , и в некоторых случаях более высокие гармоники используются для демодуляции.

Чтобы предотвратить распространение акустических волн из исследуемого объема газа к задней части мембраны, частота модуляции должна быть относительно высокой. Если интерферометр Фабри-Перо сканируется с частотой, например, 10 кГц, акустическая частота будет 20 кГц, что означает длину акустической волны 17 мм. Пример, проиллюстрированный на фиг. 4а, 4б, базируется на источнике  $1 \times 0,2$  мм, передающем свет через фильтр F-P с диаметром 3 мм и далее между мембранами, и на использовании линзы 13 для фокусировки света от источника между мембранами. Расстояние между мембранами может обычно составлять от 0,3 до 5 мм в зависимости от размера источника. Размер мембран может обычно составлять от 1 до 25 мм, а толщина мембраны может обычно составлять от 10 до 1000 нм. Хорошие результаты были получены с диаметром мембраны 5 мм и мембраной из нитрида кремния толщиной 100 нм.

Толщина мембраны только 100 нм является большим преимуществом по сравнению с любой системой, использующей конденсаторный микрофон или электретный микрофон, так как они обычно имеют толщину мембраны 3000 нм или больше. Это значит, что настоящее изобретение будет в 30 раз менее чувствительным по отношению к внешней вибрации только из-за веса мембраны. Кроме того, преимущество изобретения связано с измерением относительного расстояния между двумя мембранами.

Кривая отклика, создаваемая интерферометром Фабри-Перо, будет зависеть от отражения мембран, и низкое отражение даст косинусоподобный отклик. В любом случае важно отслеживать перемещение мембраны в таком положении на кривой отклика, где чувствительность высока. Можно назвать это положение рабочей точкой датчиков. Рабочая точка может быть получена настройкой расстояния между двумя мембранами. Это может быть сделано с использованием электростатического привода, пьезоэлектрического привода или термического привода. В качестве альтернативы длина волны источника, используемого для контроля относительного смещения между двумя мембранами, может быть настроена в соответствии с рабочей точкой.

Третьим способом получения обоснованной рабочей точки является использование ряда углублений в мембране, как описано в WO 2014/202753. Интерферометрический сигнал, генерируемый интерферометром Фабри-Перо, обычно будет повторяться при каждом увеличении расстояния между мембранами на половину длины волны. Для мембран с низким отражением сигнал Фабри-Перо может быть аппроксимирован косинусоидальной формой сигнала. Если будем использовать только интерференцию между двумя мембранами, рабочая точка может находиться сверху и внизу косинусоиды и чувствительность будет очень низкой. Хорошим способом улучшить это является введение второй области, где рас-

стояние между мембранами дает сдвиг фазы на  $90^\circ$  (или  $90^\circ \pm n \times 180^\circ$ ,  $n=0, 1, 2, 3, \dots$ ). Когда расстояние между мембранами изменяется, будем иметь как синусоиду, так и косинусоиду и можем вычислить правильное изменение расстояния. Вторая область может быть выполнена с помощью углубления в мембране. С практической точки зрения иногда может быть трудным вычислить правильное расстояние только с фазовым сдвигом на  $90^\circ$  из-за неоднозначности в отношении изменения направления перемещения. Если мы используем еще одно углубление и генерируем три области со смещением фазы сигнала интерференции  $0, 120, 240^\circ$  (или  $n \times 120^\circ + m \times 360^\circ$ ,  $n=0, 1, 2, m=0, 1, 2, 3, \dots$ ), то правильная амплитуда сигнала может быть вычислена с более высоким уровнем достоверности. В некоторых случаях полезным может быть более двух углублений. Подробности обсуждаются в заявке WO 2014/202753, которая вводится в настоящий документ путем ссылки.

Настоящее изобретение особенно хорошо подходит для миниатюризованных систем газовых датчиков. Датчик менее нескольких см<sup>3</sup> может быть легко изготовлен, а комбинация настраиваемого источника и фотоакустического способа обнаружения с шумоподавлением делает такой датчик подходящим для ряда различных применений, в том числе датчики для алко-замка, доказательные датчики для измерения концентрации алкоголя, холодильных газов, анестетиков и т.д.

Таким образом, предпочтительный вариант осуществления настоящего изобретения включает в себя оптический детектор газа для обнаружения газа, поглощающего свет по меньшей мере на одной известной длине волны. Детектор газа содержит две по существу идентичные параллельные мембраны, определяющие объем между ними, который содержит подлежащий исследованию газ, и модулированный первый источник света, испускающий свет на упомянутой известной длине волны в упомянутый объем на выбранной частоте.

Детектор предназначен для обнаружения соответствующего перемещения между упомянутыми мембранами на частоте или на множестве частот упомянутого импульсного источника света, чтобы выявлять перемещения, вызванные поглощением импульсного света в объеме 2 газа. Тем самым любой внешний шум, вызывающий перемещение мембран в одном и том же направлении, не будет мешать измерениям.

Кроме того, газ может течь или диффундировать неограниченно в датчик и из него, так что внешние воздействия, такие как изменения температуры, не будут приводить к изменениям давления в объеме и, следовательно, относительным перемещениям между мембранами.

Кроме того, ряд углублений может быть введен в конструкцию мембраны, глубина углублений оптимизирована для обеспечения соответствующего изменения фазы. Амплитуда сигнала может быть скорректирована с помощью контроля сигналов, генерируемых углублениями.

В качестве альтернативы расстояние между мембранами настраивается с помощью обратной связи из системы контроля для получения обоснованной рабочей точки либо длина волны контролируемого света настраивается с помощью обратной связи из системы контроля для получения обоснованной рабочей точки.

В соответствии с другим вариантом осуществления изобретения импульсный свет передается в объем газа через отверстие в мембранах или между мембранами, например то же самое отверстие, которое используется газовым потоком. Стандартные фотоакустические датчики имеют окна, которые независимо от выбранного материала будут вносить вклад в акустический сигнал. Таким образом, в соответствии с предпочтительным вариантом осуществления изобретения никакие оптические окна не используются, чтобы окружить газ внутри упомянутого объема, что устраняет любые сигналы, генерируемые поглощением на окнах.

Источник света может содержать настраиваемый фильтр Фабри-Перо, используемый для выбора длины волны и/или выполнения модуляции длины волны, либо настраиваемый лазер может быть использован для выбора длины волны и/или выполнения модуляции длины волны.

В качестве альтернативы оптическим измерениям относительные перемещения или расстояние между мембранами могут контролироваться с использованием пьезорезистивных, пьезоэлектрических или емкостных средств.

Частота импульсов для световых импульсов и размер мембран выбираются таким образом, что длина волны генерируемой вибрации в зависимости от скорости звука в газе и частоты импульсов светового пучка меньше, чем половина диаметра мембран, чтобы избежать подавления перемещения мембран. Кроме того, общая величина объема газа составляет предпочтительно менее 4 см<sup>3</sup>, чтобы обеспечить короткий отклик.

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Оптический детектор газа для обнаружения газа, поглощающего свет на известной длине волны, содержащий две параллельные мембраны, определяющие объем между ними, который содержит подлежащий исследованию газ, и источник модулированного света, испускающий свет на упомянутой известной длине волны в упомянутый объем при выбранной частоте модуляции, причем детектор выполнен с возможностью обнаружения относительных перемещений между упомянутыми мембранами, вызванных поглощением света в газе, при этом мембраны выполнены с возможностью перемещения во взаимно противоположных направлениях с частотой, соответствующей упомянутой частоте модуляции или кратной упомянутой частоте модуляции, причем упомянутый объем имеет по меньшей мере одно отверстие, позволяющее газу неограниченно течь или диффундировать в упомянутый объем, и упомянутое обнаружение относительных перемещений обеспечивается с использованием оптических измерений, обеспечивающих контроль расстояния между двумя упомянутыми мембранами.

2. Детектор газа по п.1, в котором обнаружение перемещения обеспечивается с использованием оптической интерферометрии.

3. Детектор газа по п.2, в котором упомянутые мембраны являются частично отражающими и по меньшей мере одна из упомянутых мембран является частично прозрачной для упомянутого передаваемого света, тем самым образуя интерферометр Фабри-Перо, при этом упомянутое расстояние контролируется путем контроля переданной или отраженной интенсивности от интерферометра Фабри-Перо.

4. Детектор газа по п.3, в котором ряд углублений введен в конструкцию по меньшей мере одной мембраны и глубина углублений оптимизирована для создания выбранного изменения фазы в переданном и отраженном свете, чтобы обеспечить коррекцию контролируемого изменения расстояния между упомянутыми мембранами.

5. Детектор газа по п.3, в котором упомянутые средства для контроля расстояния между мембранами настраиваются посредством обратной связи от средств контроля для получения обоснованной рабочей точки.

6. Детектор газа по п.3, в котором длина волны контролируемого света настраивается с помощью обратной связи, исходя из значения измерения контролируемого расстояния для получения обоснованной рабочей точки.

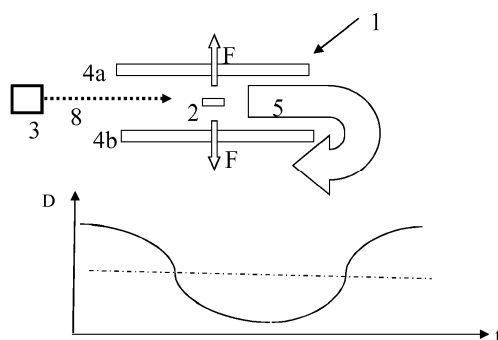
7. Детектор газа по п.1, в котором никакие оптические окна не используются для окружения газа внутри упомянутого объема, устраняя любые сигналы, генерируемые поглощением на окнах.

8. Детектор газа по п.1, в котором настраиваемый фильтр Фабри-Перо используется для выбора длины волны и/или выполнения модуляции длины волны.

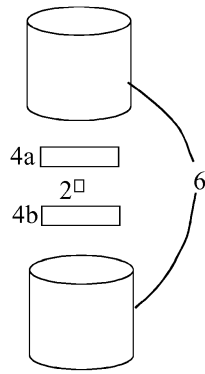
9. Детектор газа по п.1, в котором настраиваемый лазер используется для выбора длины волны и/или выполнения модуляции длины волны.

10. Детектор газа по п.1, в котором частота модуляции и размер мембран выбраны таким образом, что длина волны генерируемой вибрации в газе, зависящая от скорости звука в газе, составляет менее половины диаметра мембран.

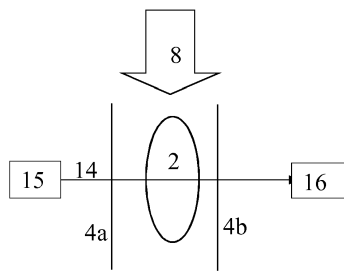
11. Детектор газа по п.1, в котором общая величина объема составляет менее  $4 \text{ см}^3$ .



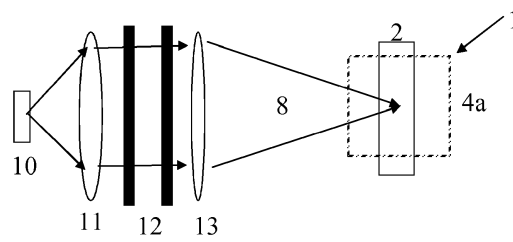
Фиг. 1



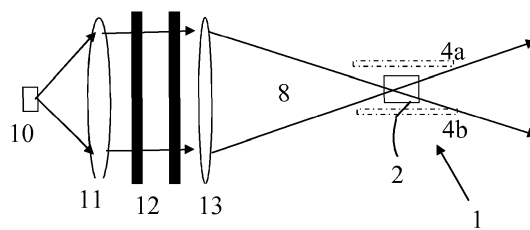
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4a



Фиг. 4b