

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **036466**(13) **B1**(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2020.11.13**

(51) Int. Cl. **G02B 26/00** (2006.01)  
**G01J 3/26** (2006.01)

(21) Номер заявки  
**201892773**

(22) Дата подачи заявки  
**2017.06.22**

**(54) МОДУЛИРОВАННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ФАБРИ-ПЕРО**

(31) **20161086**

(32) **2016.06.29**

(33) **NO**

(43) **2019.05.31**

(86) **PCT/EP2017/065364**

(87) **WO 2018/001851 2018.01.04**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**ТЮНАБЛ 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) EP-A1-2557441

THOR BAKKE ET AL.: "A novel ultra-planar, long-stroke and low-voltage piezoelectric micromirror", JOURNAL OF MICROMECHANICS & MICROENGINEERING, INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING, BRISTOL, GB, vol. 20, no. 6, 1 June 2010 (2010-06-01), page 64010, XP020192938, ISSN: 0960-1317, DOI: 10.1088/0960-1317/20/6/064010, Abstract, page 2, paragraph 2, page 6, paragraph 5, figures 1(a), 1(b)

POULTER ET AL.: "A servo-controlled Fabry-Perot interferometer for the FIR", INFRARED PHYSICS, PERGAMON, vol. 24, no. 1, 1 January 1984 (1984-01-01), pages 35-42, XP024447554, ISSN: 0020-0891, DOI: 10.1016/0020-0891(84)90045-9 [retrieved on 1984-01-01] page 38, paragraph 4  
JP-A-H10335693

(57) Изобретение относится к интерферометру Фабри-Перо, содержащему две плоские зеркальные поверхности, установленные в рамке, и к системе, содержащей такой интерферометр. Между зеркалами имеется известное расстояние, и по меньшей мере одна из зеркальных поверхностей частично прозрачная и частично отражающая, кроме того, имеются по меньшей мере два исполнительных блока, каждый из которых содержит по меньшей мере один исполнительный механизм. Первый исполнительный блок регулирует указанное расстояние между зеркалами, а второй исполнительный блок модулирует указанное расстояние на выбранной частоте, в результате чего оба блока совместно обеспечивают вариацию расстояний между зеркалами в некотором диапазоне, соответствующем диапазону длин волн фильтрации в указанном интерферометре Фабри-Перо. По меньшей мере одно из указанных зеркал связано с рамкой через кремниевую мембрану, и по меньшей мере один из указанных исполнительных блоков содержит пьезоэлектрический материал на указанной мембране, таким образом образуя биморфный или униморфный исполнительный блок.

**B1****036466****036466 B1**

Настоящее изобретение относится к новому типу перестраиваемого оптического фильтра на основе интерферометра Фабри-Перо (FP).

Обычный способ использования перестраиваемого интерферометра Фабри-Перо, например, как рассмотрено в документах WO 2011/0033028 и EP2557441, состоит в том, чтобы осуществлять развертку по длине волны путем изменения расстояния между зеркалами, по существу, с постоянной скоростью, производить выборку спектрального отклика и анализировать его в цифровой форме. Для уменьшения шумов  $1/f$  иногда выполняют много разверток в 1 с. Обычно частота развертки ограничена массой перемещаемого зеркала, жесткостью пружины и доступной мощностью. Предполагается, что этим способом можно осуществлять развертку в фильтре Фабри-Перо с частотой  $\Omega=10$  Гц. В идеальном случае может потребоваться частота детектирования 1000 Гц. Этого можно добиться добавлением высокочастотной синусоидальной (или периодической) модуляции с частотой  $f=500$  Гц, а затем демодулировать сигнал на частоте  $2*f$  и, таким образом, детектировать 2-ю гармонику так же, как осуществляют детектирование гармоники в спектрометрии с диодным лазером. Развертывающее перемещение с частотой  $f$ , как правило, намного меньше, чем развертывающее перемещение с частотой  $Q$ . Интерферометр Фабри-Перо с униморфным (или биморфным) исполнительным механизмом на основе пьезоэлектрических материалов на кремнии может, как правило, выполнить  $10^{10}$  полных разверток. То есть речь идет о развертке от одного внешнего конца до другого. Это соответствует сроку службы 10 лет при работе на частоте 30 Гц, или 1 г при работе на частоте 300 Гц. Поэтому предпочтительно сократить количество полных разверток или добиться высокой частоты с использованием наложенных синусоидальных колебаний.

Подходящим пьезоэлектрическим материалом является цирконат-титанат свинца (ЦТС). Интерферометр Фабри Перо на основе ЦТС с униморфным исполнительным механизмом на кремнии, как правило, подвержен поломкам, расслаиванию или короткому замыканию вследствие многократного изгиба при высокой нагрузке, в особенности когда изгиб достигает максимума. Таким образом, цель настоящего изобретения состоит в создании перестраиваемого фильтра Фабри-Перо с увеличенным сроком службы. Цель достигнута так, как указано в пунктах формулы изобретения.

В настоящем изобретении предлагается, чтобы развертка, или регулировка длины волны, производилась исполнительным механизмом, отделенным от второго исполнительного механизма, который характеризуется более низкой деформацией и в котором применена частота  $f$  модуляции. Это приведет к снижению деформации, поскольку второй исполнительный механизм расположен ближе к нулевой точке, а амплитуда колебаний с частотой  $f$  модуляции намного меньше, чем полная развертка по длине волны. Это значительно увеличивает срок службы. Можно также сделать второй исполнительный механизм с более тонким слоем ЦТС, что уменьшает деформацию, но также уменьшает и механические перемещения. Или можно сделать второй исполнительный механизм из ЦТС при меньшей величине деформации. Как правило, это продлевает срок службы, но уменьшает механические перемещения. Этого можно достигнуть, например, модифицируя нижний электрод неглубоким травлением ЦТС для изменения ростовой структуры или термической обработкой соответствующей области некоторым способом.

В другой альтернативе второй исполнительный механизм имеет электростатическую модуляцию. Электростатическая модуляция дает небольшую длину рабочего хода и не подходит для развертки с большой амплитудой по длине волны, но, с другой стороны, она позволяет отработать большое количество циклов. Таким образом, имеет место развертка с использованием исполнительного механизма на основе ЦТС и с модуляцией на частоте  $f$  с использованием электростатического исполнительного механизма. Электростатический исполнительный механизм может иметь вид пластины, или пальца/кулачка, или вертикального кулачка.

Кроме того, исполнительный механизм может быть электромагнитным, когда, например, магнит установлен на перемещающейся части интерферометра Фабри-Перо, а высокочастотную развертку осуществляют приложением магнитного поля, как в громкоговорителе или электродвигателе. Или в подвижной части интерферометра Фабри Перо FP можно установить электрический проводник, такой как катушку, и использовать внешний магнит для создания поля так, чтобы можно было обеспечить быструю развертку фильтра.

Кроме того, исполнительный механизм может быть тепловым, при этом исполнительный механизм на основе ЦТС используется для быстрой модуляции. Исполнительные механизмы могут также быть выполнены в виде биморфного ЦТС. Следует отметить, что ЦТС - лишь один из нескольких пьезоэлектрических материалов, подходящих для исполнительных механизмов, и помимо него имеется много подходящих электрострикционных материалов.

Далее, цель состоит в устранении эффекта сдавливания пленки [squeeze film effect] или затухания модуляции на высокой частоте. Эффект сдавливания пленки обусловлен воздухом, который должен выходить по узкому каналу между двумя поверхностями. Зеркала, имеющие форму фотонных кристаллов, имеют большие сквозные отверстия и могут функционировать как выпускные каналы, уменьшающие эффект сдавливания пленки. Другая альтернатива состоит в уменьшении модуляции путем размещения датчика в вакууме.

Для многослойных зеркал (интерференционного фильтра/зеркала) подходят и другие типы зеркал, металлические зеркала, комбинации металлических зеркал и многослойных зеркал, зеркала, основанные

на фотонных кристаллах, или зеркала, основанные на поверхностных плазмонах. Зеркала, основанные на поверхностных плазмонах, могут быть сделаны, например, с использованием нанесения металлического рисунка на оптически прозрачную подложку.

При электростатической модуляции может быть предпочтительно использовать концевой ограничитель, чтобы избежать склеивания поверхностей. Как правило, такой концевой ограничитель состоит из одного или большего количества непроводящих разделительных блоков, например, изготовленных из оксида кремния. Размер разделительных блоков может быть сделан по возможности малым, но позволяющим избежать склеивания поверхностей, так называемого "прилипания".

Измерение расстояния между зеркалами в интерферометре Фабри-Перо может быть выполнено множеством различных способов, например с использованием датчиков, основанных на измерении емкости, оптической триангуляции, оптического ближнего поля, интерферометрических измерений, принципах пьезоэлектрических измерений, магнитных и индуктивных измерений, при этом многие из них подходят для интегрирования в кремний.

Интерферометр Фабри-Перо, поддерживающий модуляцию, особенно подходит для использования в фотоакустических приложениях. Часто для модуляции света, попадающего в фотоакустическую ячейку, используют амплитудный модулятор (чоппер). Это часто приводит к поглощению части света в стенках и окне фотоакустической ячейки, в результате чего генерируется фотоакустический сигнал. Этот фотоакустический сигнал от стенок и окна дает существенный сдвиг (базовый уровень) и мешать измерять слабые полезные сигналы, например концентрацию газа. Если используется оптический источник широкого диапазона, имеющий по существу ту же мощность на соответствующей длине волны, модуляция длины волны не приведет к модуляции оптической мощности. Это подробно описано в документе WO2017/089624, который включен в настоящее описание путем ссылки.

Модуляция длины волны не приводит к генерации сигнала сдвига от окон и стенок (или, по меньшей мере, значительно снижает этот сигнал) и облегчает измерение более слабых сигналов, а также облегчает изготовление датчиков с низким дрейфом (с долговременно стабильной нулевой точкой).

Ниже изобретение будет рассмотрено более подробно со ссылками на сопровождающие чертежи, иллюстрирующие различные примеры изобретения. На чертежах:

- на фиг. 1 показано поперечное сечение возможной конструкции интерферометра Фабри-Перо;
- на фиг. 2 показано поперечное сечение одного из вариантов выполнения настоящего изобретения;
- на фиг. 3 показано поперечное сечение второго варианта выполнения настоящего изобретения;
- на фиг. 4 показано поперечное сечение третьего варианта выполнения настоящего изобретения;
- на фиг. 5 показано поперечное сечение четвертого варианта выполнения настоящего изобретения;
- на фиг. 6 показано поперечное сечение пятого варианта выполнения настоящего изобретения;
- на фиг. 7 показано поперечное сечение шестого варианта выполнения настоящего изобретения;
- на фиг. 8 показано поперечное сечение седьмого варианта выполнения настоящего изобретения;
- на фиг. 9 показан пример возможного варианта выполнения исполнительного механизма;
- на фиг. 10 показан второй возможный вариант выполнения исполнительного механизма;
- на фиг. 11 показано возможное расположение электродов для емкостного измерения расстояния;
- на фиг. 12 показан третий возможный вариант выполнения исполнительного механизма;
- на фиг. 13 показан четвертый возможный вариант выполнения исполнительного механизма;
- на фиг. 14 показан пятый возможный вариант выполнения исполнительного механизма;
- на фиг. 15 показан шестой возможный вариант выполнения исполнительного механизма;
- на фиг. 16 показан седьмой возможный вариант выполнения исполнительного механизма.

На фиг. 1 показано известное решение для создания интерферометра Фабри-Перо с электрической перестройкой длины волны. Два зеркала 2, 4, обращенные друг к другу, образуют резонатор для света 100, проходящего через них. Верхнее зеркало 4 установлено в рамке с помощью мембраны, обеспечивающей, таким образом, перемещение с использованием исполнительного механизма. Механическое перемещение создано с использованием пьезоэлектрического исполнительного механизма 3. Пьезоэлектрический исполнительный механизм 3, например, из ЦТС установлен на мембране, например на механически обработанном кремниевом диске/подложке. Установку можно осуществить, например, с использованием золь-гель-осаждения (CHD), импульсного лазерного осаждения (PLD) или напыления. Слой ЦТС на слое кремния совместно образуют униморф. Когда на слой ЦТС подано положительное напряжение, он сокращается, в то время как кремниевый слой нет. Поскольку эти два материала скреплены друг с другом, сокращение ЦТС заставляет униморф согнуться, и, изменяя электрическое напряжение на пьезоэлектрическом исполнительном механизме 3, можно переместить передаточный элемент вверх и вниз. Если оптический элемент плоский и имеет на поверхности частично отражающее, а частично прозрачное покрытие 1, и если он установлен вместе с другой прозрачной поверхностью, покрытой частично отражающим, а частично прозрачным покрытием 2, и если, кроме того, эти две поверхности идут параллельно, то поверхности 1 и 2 составляют интерферометр Фабри-Перо. Регулируя расстояние между двумя поверхностями, можно управлять длиной (длинами) волны пропускаемого света 100.

Как сказано выше, интерферометр Фабри-Перо на фиг. 1 может быть изготовлен из кремния. Обычно в этом случае используют два кремниевых диска/подложки. На нижней кремниевой подложке на

фиг. 1, как правило, имеется зеркальное покрытие 2 в воздушном зазоре интерферометра Фабри-Перо, а электроды 9, 10 (фиг. 2) часто располагают на одной и той же поверхности для эффективного измерения расстояния в воздушном зазоре между зеркальными поверхностями 1, 2. На стороне кремниевого диска, обратной воздушному зазору, часто наносят антиотражающее покрытие. На фиг. 1 видно, что на верхнем кремниевом диске часто имеется зеркальное покрытие 1, обращенное к воздушному зазору интерферометра Фабри-Перо, и видно, что верхний кремниевый диск разделен: один так называемый SOI-диск (кремний на изоляторе) с толстым слоем подложки под ним и тонкий составной слой (устройство) сверху. Тонкий составной слой вместе с пьезоэлектрическим слоем составляет исполнительный механизм на основе униформа. Оптический элемент 4 и исполнительный механизм на основе униформа обычно подвергают механической обработке посредством сухого травления (DRIE), так чтобы они были подвижными. Наконец, два диска устанавливают вместе, часто с разделительным блоком между ними.

Для того чтобы интерферометр Фабри-Перо функционировал как спектрометр, необходимо, чтобы две отражающие поверхности были параллельными. Чтобы гарантировать их параллельность, можно использовать множество исполнительных механизмов для управления их параллельностью. На фиг. 2 показано, как можно использовать внешние исполнительные механизмы 5, 8, расположенные близко к рамке, для управления как расстоянием между зеркалами, так и, возможно, параллельностью. Параллельность и расстояние можно измерять с использованием емкостных датчиков, здесь обозначенных как электроды 9 и 10. Верхний элемент, содержащий верхнее зеркало 4, может, например, быть заземлен, и тогда можно считывать расстояние от электродов 9, 10 до верхнего элемента, измеряя емкость. Внешние исполнительные механизмы 5, 8 можно также использовать для регулировки расстояния между зеркалами и, таким образом, длины волны света, проходящего через интерферометр Фабри-Перо. Внутренние исполнительные механизмы 6, 7 можно затем использовать для модуляции длины волны. Эта модуляция может, например, быть синусоидальной модуляцией с частотой  $f$ , а эта частота может лежать между 10 и 100 кГц, но, как правило, между 10 и 1000 Гц. Модуляция заставляет длину волны света, проходящего через фильтр, меняться с частотой модуляции, и часто применяют детектирование гармоник, когда сигнал демодулируют на частотах  $f$ ,  $2f$ ,  $3f$ ,  $4f$  или более высоких гармониках. Преимущество детектирования гармоник состоит в том, что вариации амплитуды, обусловленные источником и другими факторами, уменьшаются, поэтому сигнал не чувствителен к изменениям исходной амплитуды и т.п. Амплитуда модуляций длины волны, и какая именно гармоника частоты  $f$  (и фаза) используются при демодуляции, как правило, зависит от ширины спектральной характеристики, которую следует измерить, так же, как и характеристики любых интерферирующих компонентов (как хорошо известно). Амплитуда модуляции может быть синусоидальной или иметь другую форму, такую как треугольная, прямоугольная или другие виды модуляции амплитуды, которые применяются, например, в спектроскопии лазерных диодов.

В приведенном выше примере внешние исполнительные механизмы 5, 8 использовались для регулировки длины волны, а внутренние исполнительные механизмы 6, 7 использовались для модуляции длины волны. Можно, конечно, было сделать наоборот: чтобы внутренние исполнительные механизмы 6, 7 использовались для регулировки длины волны, а внешние исполнительные механизмы 5, 8 - для модуляции длины волны. В некоторых случаях предпочтительно использовать исполнительные механизмы для регулировки наклона зеркала, а модуляцию осуществлять путем изменения ширины и амплитуды передаваемого сигнала.

В одном из вариантов выполнения настоящего изобретения для регулировки длины волны может использоваться исполнительный блок, например, с внешними исполнительными механизмами 5, 8, и эта регулировка длины волны может, например, быть выполнена посредством линейного изменения сигнала, которое повторяют с частотой  $F$ . Частота  $F$ , как правило, намного меньше частоты  $f$  модуляции. На практике часто используют линейное изменение (пилообразное изменение) с частотой  $F$  от 0,01 до 10 Гц, где длина волны прошедшего света начинается с 3 мкм, и эта длина волны линейно увеличивается со временем до, например, 6 мкм в пределах каждого периода  $F$ . Кроме того, диапазон длин волн 7-14 мкм представляет большой интерес для обнаружения газов.

В других вариантах выполнения настоящего изобретения предпочтительно осуществлять ступенчатую регулировку длины волны. Пользователь, как правило, обнаруживает множество длин волн, подходящих для заданного приложения, и затем регулирует длину волны для первого измерения для первого набора исполнительных механизмов и удерживает эту длину волны в течение некоторого времени с использованием различных наборов исполнительных механизмов для модуляции с частотой  $f$ , и демодулирует измеренный сигнал в течение заданного периода времени. Затем скачкообразно переключают длину волны к следующему значению. Если модуляция происходит симметрично относительно отрегулированной длины волны, то среднее расстояние между зеркалами не меняется, и, если усреднить сигнал по достаточно длинному временному промежутку, то измеренное среднее значение по существу не зависит от модуляции. Тогда можно использовать электроды 9 и 10 для измерения расстояния до верхнего зеркала на фиг. 2.

Если расстояние, измеренное при модуляции, отличается от расстояния, измеренного без модуляции, это может указывать, что на амплитуду модуляции влияет эффект сдавливания пленки или другие возмущающие эффекты, и ситуацию можно исправить систематическим отображением поведения систе-

мы и применением корректирующих алгоритмов. Как правило, это можно сделать с использованием пьезоэлектрических исполнительных механизмов, таких как ЦТС, где материал характеризуется сильным гистерезисом и где реальная амплитуда смещения может быть функцией напряжений, приложенных ранее.

Если имеется модуляция, например синусоидальная, но добавлен постоянный компонент, т.е. модулированный сигнал меняется между нулем и максимумом  $A$  (то есть, как  $A \cdot (1 + \sin(\omega t))$ ), усредненное измеренное расстояние даст оценку центральной длины волны, а усредненное расстояние, измеренное без модуляции, даст оценку длины волны при нулевой модуляции, и эти два значения можно использовать для оценки глубины модуляции. Полная глубина модуляции в этом случае, как правило, будет удвоенной разностью длин волн между значением с модуляцией и значением без модуляции. Это полезно, когда один набор исполнительных механизмов используется для регулировки длины волны, а другой набор исполнительных механизмов используется для осуществления модуляции.

На фиг. 3 показан альтернативный вариант выполнения настоящего изобретения с другим креплением верхней зеркальной поверхности 11. Одна или обе зеркальные поверхности 11 и 12 могут быть выполнены как мембраны из фотонного кристалла. В некоторых вариантах выполнения настоящего изобретения может потребоваться избежать эффекта сдавливания пленки или уменьшить модуляцию на высоких частотах. В мембранах из фотонного кристалла, используемых в качестве зеркал, имеются большие сквозные отверстия, и они выполняют роль выпускных каналов для уменьшения эффекта сдавливания пленки, что можно видеть на фиг. 3, где верхнее зеркало 11 обеспечивает каналы в пространство вне полости Фабри-Перо. Другими типами зеркал, которые можно использовать, являются многослойные зеркала (интерференционный фильтр/зеркало), металлические зеркала, зеркала на основе фотонных кристаллов и зеркала на основе поверхностных плазменных волн, или зеркала на основе комбинаций зеркал, перечисленных выше. На фиг. 3 показано также, что в некоторых случаях можно предпочтительно удалить подложку, оставив лишь мембрану 11.

На фиг. 4 показан вариант выполнения настоящего изобретения, в котором для регулировки расстояния и длины волны используется набор исполнительных механизмов на верхней поверхности, в то время как набор электродов 13 и 14 может использоваться в качестве исполнительных механизмов как для регулировки положения, так и для регулировки модуляции. Как и на фиг. 2, этот вариант может включать заземление верхнего кремниевого диска и изолирование интерфейса между дисками.

На фиг. 5 показан вариант выполнения настоящего изобретения, в котором первый набор исполнительных механизмов 15 и 16 используется для регулировки длины волны, а второй набор исполнительных механизмов 17 и 18 используется для модуляции. Или же первый и второй наборы могут поменяться назначениями. В варианте выполнения настоящего изобретения на фиг. 5 набор исполнительных механизмов помещен с каждой стороны от зазора в интерферометре Фабри-Перо (то есть на верхнем диске и на нижнем диске). Две подвижные части могут иметь различную ширину и предпочтительно могут быть изготовлены с одинаковой массой и постоянной упругости пружины (или резонансной частотой) так, чтобы внешнее воздействие оказывало на них, по существу, одинаковый эффект.

На фиг. 6 показан вариант выполнения настоящего изобретения, в котором первый исполнительный блок с исполнительными механизмами 15, 16 установлен на верхней мембране диска для регулировки длины волны, а второй исполнительный блок содержит первый и второй наборы электродов 19, 20, а электроды 21 и 22 используется для модуляции длины волны путем подачи напряжения между наборами. Кроме того, имеются два электрода под центральным элементом, которые могут использоваться для измерения расстояния между кремниевыми дисками и, таким образом, длины волны. Подавая напряжение на первый набор электродов 19, 20, но не на второй набор 21, 22 можно наклонять зазор интерферометра Фабри-Перо, а подавая напряжение на второй набор электродов 21, 22 и одновременно на первый набор электродов 19, 20, можно уменьшить ширину воздушного зазора в интерферометре Фабри-Перо. Добавив прямоугольную модуляцию напряжения, можно получить двоичную модуляцию, где длина волны меняется между двумя положениями, что подходит для дифференциальной спектроскопии. Кроме того, часто предпочтительно перемещать электроды полностью совместно, лишь разделенными разделительной деталью. Можно также модулировать расстояние между электродами, модулирующими сигналы другой формы, такой как синусоидальная, но это потребовало бы принятия мер против вхождения в синхронизм, то есть когда электроды движутся полностью вместе.

На фиг. 7 показан другой вариант выполнения настоящего изобретения согласно тому же принципу, что и на фиг. 6, но все подвижные части и мембраны находятся на одной стороне.

На фиг. 8 показана упрощенная версия вариантов выполнения настоящего изобретения, показанных на фиг. 6 и 7, где уменьшено количество подвижных частей/областей. Первый набор исполнительных механизмов 15, 16 используется для регулировки длины волны, в то время как набор электродов 19, 20, 21 и 22 используется для модуляции длины волны. Кроме того, дополнительный набор электродов 23 и 24 используется для измерения расстояния в воздушном зазоре в интерферометре Фабри-Перо. Преимущество этого варианта состоит в том, что имеется меньше подвижных деталей, но недостатком является то, что диапазон механических перемещений обусловлен электростатической модуляцией и меняется с длиной волны. В некоторых вариантах выполнения настоящего изобретения это может быть преимуще-

ством, если уменьшение амплитуды модуляции с длиной развертки дает лучшее разрешение между несколькими детектируемыми газами, но обычно это является недостатком, так как часто предпочтительна постоянная амплитуда модуляции.

На фиг. 9 и 10 показан вариант выполнения настоящего изобретения, где для регулировки длины волны используется набор исполнительных механизмов 28, 29 и 30. Исполнительные механизмы могут, например, быть униформами, изготовленными из ЦТС и кремния. В данном примере используются три исполнительных механизма, чтобы регулировать как высоту, так и параллельность.

На фиг. 11 показано, как установлены электроды на нижнем слое. Три электрода используются для измерения как высоты, так и параллельности. Электроды установлены так, чтобы они были расположены близко к подвижному оптическому элементу 4 (зеркалу.). Электроды 25, 26 и 27 установлены с возможностью поворота относительно исполнительных механизмов на фиг. 9, как показано на фиг. 11, или же они установлены в той же ориентации, что и исполнительные механизмы. Оптимальная конфигурация зависит от используемого алгоритма управления и регулировки. На фиг. 9 для модуляции длины волны используется набор исполнительных механизмов 31, 32 и 33. На фиг. 10 для модуляции используется только одно кольцо 34 исполнительного механизма. Поскольку длина модуляции обычно очень мала по сравнению с полной длиной регулировки (диапазоном) интерферометра Фабри-Перо, можно получить хорошую модуляцию с использованием только кольцевого исполнительного механизма. Поскольку в материале ЦТС деформация и толщина часто меняются, оказалось необходимо использовать несколько исполнительных механизмов, если имеется необходимость регулировки в более широком диапазоне длин волн. На фиг. 9 можно легко поменять набор исполнительных механизмов, который используется для регулировки длины волны или модуляции. На фиг. 10 изменения также возможны, но менее существенные.

В варианте выполнения настоящего изобретения, показанном на фиг. 12, имеется три спиралеобразных плеча с исполнительными механизмами 35, 36 и 37. Эти спиралеобразные плечи предпочтительно могут быть изготовлены по всей толщине из кремниевой пластины, или же они могут быть изготовлены только в верхнем слое (приборном слое). Если исполнительный механизм представляет собой униформ, то этот исполнительный механизм предпочтительно не должен покрывать все плечо, а идти лишь от одной точки крепления приблизительно до середины. Один набор исполнительных механизмов 35, 36 и 37 предпочтительно может использоваться для регулировки длины волны, в то время как другой набор исполнительных механизмов 38, 39 и 40 предпочтительно может использоваться для модуляции длины волны, но можно поменять функции между этими наборами исполнительных механизмов.

На фиг. 13 показан вариант выполнения настоящего изобретения, где исполнительные механизмы помещены на трех поперечинах. Поперечины могут иметь одинаковую ширину по всей своей длине или их ширина может уменьшаться, как показано на чертеже. Набор исполнительных механизмов 44, 45 и 46 может использоваться для модуляции, а другой набор 41, 42 и 43 может использоваться для регулировки длины волны, или наоборот.

На фиг. 14 показан вариант выполнения настоящего изобретения, где каждый набор исполнительных механизмов состоит из четырех элементов, но мембрана не открыта (имеет отверстие), в то время как на фиг. 15 показан соответствующий компонент с четырьмя поперечинами. Преимущество решения, показанного на фиг. 14, состоит в том, что оно легче в изготовлении, в то время как недостаток в том, что это решение дает меньший механический диапазон при использовании тех же самых исполнительных механизмов и при той же толщине кремниевого слоя в униформе. На фиг. 16 показан вариант выполнения настоящего изобретения с длинными плечами исполнительного механизма, и при этом исполнительные механизмы 63, 64, 65 и 66 подходят для регулировки длины волны, в то время как короткие исполнительные механизмы 67, 68, 69 и 70 подходят для модуляции (короткие и быстродействующие).

Во всех вариантах выполнения настоящего изобретения, описанных выше, можно переключать функции внутреннего и внешнего набора исполнительных механизмов, можно использовать различную толщину кремния во внутренних и внешних исполнительных механизмах и можно менять толщину пьезоэлектрического материала (если таковой используется) во внутренних и внешних исполнительных механизмах. Использование более тонкого пьезоэлектрического материала предпочтительно в исполнительных механизмах, используемых для модуляции, поскольку пьезоэлектрический материал подвергается меньшему механическому напряжению при сгибе. Длина модуляции также будет меньше, но преимущество, связанное с меньшей деформацией, может превышать этот недостаток. Кроме того, в исполнительных механизмах можно модифицировать деформацию на пьезоэлектрическом материале при модуляции. Это можно реализовать, например, обеспечив рост материала в другом режиме в соответствующей области, а это можно сделать, изменяя начальные условия при росте кристалла ЦТС.

На чертежах оптический элемент 4 в середине представляет собой или окружность, или квадрат, но этот элемент может, конечно, иметь любую другую подходящую форму. Реализация будет, главным образом, зависеть от формы источника и других оптических элементов.

На чертежах и в описании мы обсудили по сути лишь исполнительные механизмы. У всех исполнительных механизмов и электродов имеются электрические соединения с окружающими элементами (и приводная электроника). При использовании для измерения расстояний емкостных датчиков особенно

предпочтительно сделать фиксированными дополнительные расстояния, то есть установить вспомогательную емкость, так чтобы можно было компенсировать изменения температуры, давления, влажности и другие влияния, которые могут воздействовать на емкость и измерение расстояний.

Итак, настоящее изобретение относится к интерферометру Фабри-Перо, содержащему две плоские зеркальные поверхности, установленные в рамке, при этом между зеркалами имеется известное расстояние, и по меньшей мере одна из зеркальных поверхностей частично прозрачна, а частично отражающая, что обеспечивает создание резонатора. В интерферометре имеется по меньшей мере два исполнительных блока, каждый из которых содержит по меньшей мере один исполнительный механизм, при этом первый исполнительный блок регулирует указанное расстояние между указанными зеркалами, таким образом задавая базовое расстояние между зеркалами, а следовательно базовую длину волны. Вторым исполнительным блоком модулирует указанное расстояние на выбранной частоте, при этом соответствующие перемещения предпочтительно имеют меньшую амплитуду, чем корректировки, вносимые первым исполнительным блоком. Два исполнительных блока совместно обеспечивают вариацию расстояний между зеркалами в диапазоне, соответствующем диапазону длин волн фильтрации в указанном интерферометре Фабри-Перо. По меньшей мере одно из указанных зеркал связано с рамкой через кремниевую мембрану, и по меньшей мере один из указанных исполнительных блоков содержит пьезоэлектрический материал на указанной мембране, таким образом образуя биморфный или униморфный исполнительный блок.

Оба исполнительных блока могут быть биморфными или униморфными, или во втором исполнительном блоке можно, например, использовать электростатические силы. У различных типов исполнительных механизмов имеются различные характеристики, и, таким образом, например, исполнительные блоки на основе ЦТС могут использоваться для общего управления длиной волны, в то время как модуляцию осуществляют с использованием электростатических сил.

Модуляция, а также регулировка - это такое параллельное перемещение относительно оптической оси фильтра, при котором длина волны фильтрации разворачивается вперед-назад. Модуляция предпочтительно может быть синусоидальной, в то время как регулируемая длина волны фильтрации регулируется при линейном изменении так, чтобы длина волны менялась в пределах указанного диапазона, например в диапазоне 3-6 или 7-14 мкм. Альтернативно, модулирующее перемещение является непараллельным, т.е. меняется угол между зеркальными плоскостями, так что при приложении модуляции спектр становится последовательно более широким и более узким.

Можно рассмотреть различные положения исполнительных блоков. Первый исполнительный блок и второй исполнительный блок могут быть расположены так, чтобы перемещать одно и то же зеркало в интерферометре Фабри-Перо, или же оба могут быть установлены на мембране в различных радиальных положениях, или второй блок может быть, например, электростатическим исполнительным механизмом. Альтернативно, первый исполнительный блок перемещает одно зеркало в интерферометре Фабри-Перо, а другой исполнительный блок перемещает второе зеркало в интерферометр Фабри-Перо.

Расстояние между зеркалами, соответствующее длине волны фильтрации, можно измерить путем измерения емкости между выбранными областями, а прикладывая модуляцию только с отрицательным или только положительным смещением относительно значения длины волны можно измерить глубину модуляции.

Зеркала могут быть изготовлены из различных материалов: диэлектриков, металлических слоев или могут состоять из мембраны на основе фотонного кристалла или базироваться на материале с поверхностными плазмонами.

Мембрану предпочтительно изготавливать в одном процессе, чтобы придать ей управляемые свойства при установке элементов ЦТС или других подходящих элементов. В зависимости от приложения в мембране могут иметься отверстия, а биморфные или униморфные исполнительные механизмы, установленные на плече мембраны, идут от указанной рамки до указанного зеркала. Плечи могут иметь осевую ориентацию или другие технические решения.

Кроме того, изобретение относится к системе, содержащей интерферометр Фабри-Перо, рассмотренный выше, дополнительно содержащей средства для обнаружения фазового сдвига между прикладываемой модуляцией и реальными модуляционными изменениями в зависимости от длины волны, например из-за эффекта сдавливания пленки, при этом система способна компенсировать этот сдвиг путем изменения амплитуды и, возможно, фазы прикладываемой модуляции.

Как сказано выше, предпочтительное применение интерферометра Фабри-Перо согласно изобретению относится к фотоакустическому детектору.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Спектрометр для обнаружения газа, содержащий интерферометр Фабри-Перо, содержащий две плоские по существу параллельные зеркальные поверхности, установленные в рамке, при этом между зеркалами имеется известное расстояние, и по меньшей мере одна из зеркальных поверхностей является частично отражающей и частично прозрачной, кроме того, имеются по меньшей мере два исполнительных блока, каждый из которых содержит по меньшей мере один исполнительный механизм, при этом

первый исполнительный блок регулирует указанное расстояние между указанными зеркалами так, чтобы регулировать фильтруемую длину волны в пределах заданного диапазона, а второй исполнительный блок модулирует указанное расстояние с выбранной частотой в диапазоне 10-1000 Гц, в результате чего оба блока совместно обеспечивают вариацию расстояния между зеркалами в диапазоне, соответствующем диапазону длин волн, фильтруемых в указанном интерферометре Фабри-Перо, причем амплитуда перемещений, обеспечиваемых вторым исполнительным блоком, меньше амплитуды перемещений, обеспечиваемых первым исполнительным блоком,

при этом по меньшей мере одно из указанных зеркал связано с рамкой через кремниевую мембрану, и, по меньшей мере, второй из указанных исполнительных блоков содержит пьезоэлектрический материал на указанной мембране, таким образом образуя биморфный или униморфный исполнительный блок,

причем второй исполнительный механизм работает при более низкой деформации, чем первый исполнительный механизм, предпочтительно близкой к нулевой деформации, чтобы увеличить срок службы исполнительного механизма.

2. Спектрометр по п.1, в котором модуляция представляет собой параллельное перемещение относительно оптической оси фильтра так, чтобы длина волны фильтра сканировалась вперед и назад.

3. Спектрометр по п.1, в котором модуляция является синусоидальной.

4. Спектрометр по п.1, в котором длина волны фильтра подстраивается с линейным изменением так, чтобы длина волны регулировалась в пределах заданного диапазона, при этом линейное изменение представляет собой линейное увеличение длины волны со временем в пределах каждого периода.

5. Спектрометр по п.1, в котором первый исполнительный блок и второй исполнительный блок перемещают одно и то же зеркало в интерферометре Фабри-Перо.

6. Спектрометр по п.1, в котором первый исполнительный блок перемещает одно зеркало в интерферометре Фабри-Перо, а другой исполнительный блок перемещает второе зеркало в интерферометре Фабри-Перо.

7. Спектрометр по п.1, который выполнен с возможностью измерения расстояния между зеркалами, соответствующего длине волны фильтрации, путем измерения емкости между выбранными областями, и сравнения усредненной длины волны фильтрации с модуляцией и без модуляции для использования этой информации для оценки глубины модуляции.

8. Спектрометр по п.1, в котором модуляция обеспечивается с использованием перемещения, обеспечивающего изменяемый угол между зеркальными плоскостями, так что при приложении модуляции спектр становится последовательно более широким и более узким.

9. Спектрометр по п.1, в котором по меньшей мере одно из зеркал представляет собой мембрану из фотонного кристалла.

10. Спектрометр по п.1, в котором по меньшей мере одно из зеркал выполнено на основе материала с поверхностными плазмонами.

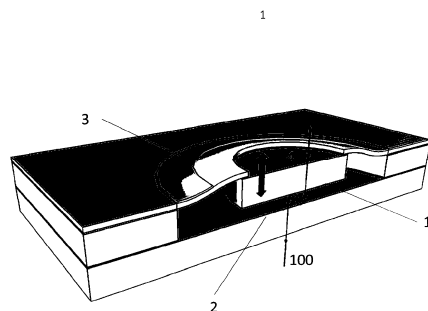
11. Спектрометр по п.1, в котором в указанной мембране имеются отверстия, а биморфные или униморфные исполнительные механизмы, установленные на плечах мембраны, идут от указанной рамки до указанного зеркала.

12. Спектрометр по п.1, в котором по меньшей мере в одном исполнительном блоке используются электростатические силы.

13. Спектрометр по п.1, содержащий средства для обнаружения фазового сдвига между прикладываемой модуляцией и реальными модуляционными изменениями длины волны, например, вызванного эффектом сдавливания пленки, при этом система способна компенсировать этот сдвиг путем изменения амплитуды и, возможно, фазы прикладываемой модуляции.

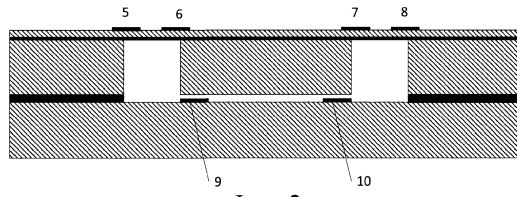
14. Спектрометр по п.1, который выполнен с возможностью обнаружения света, прошедшего через интерферометр, с использованием обнаружения гармоник, путем демодуляции сигнала на частотах  $f$ ,  $2f$ ,  $3f$ ,  $4f$  или на более высокой кратной частоте.

15. Применение спектрометра по п.1 в фотоакустическом детекторе.

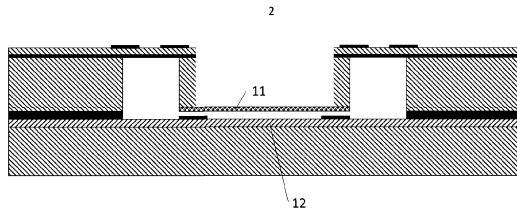


Фиг. 1

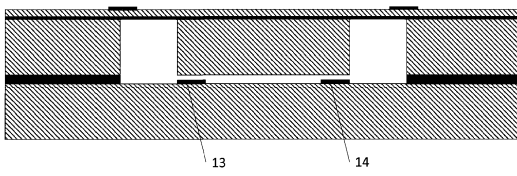




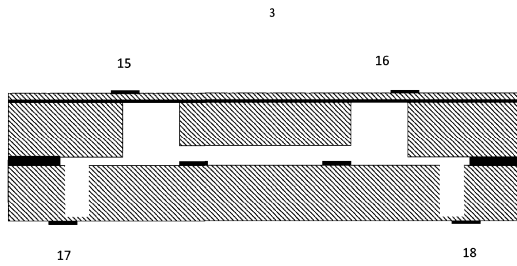
Фиг. 2



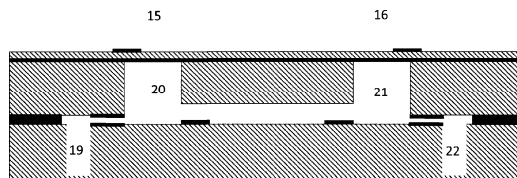
Фиг. 3



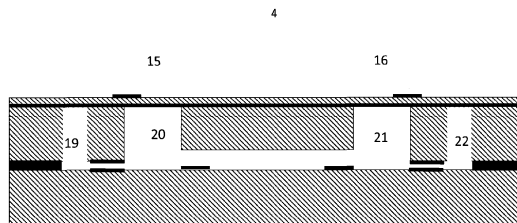
Фиг. 4



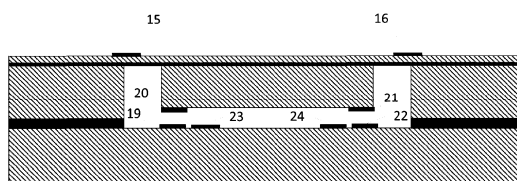
Фиг. 5



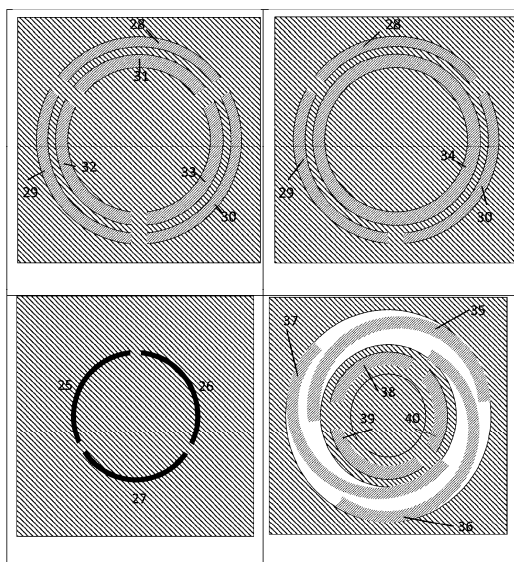
Фиг. 6



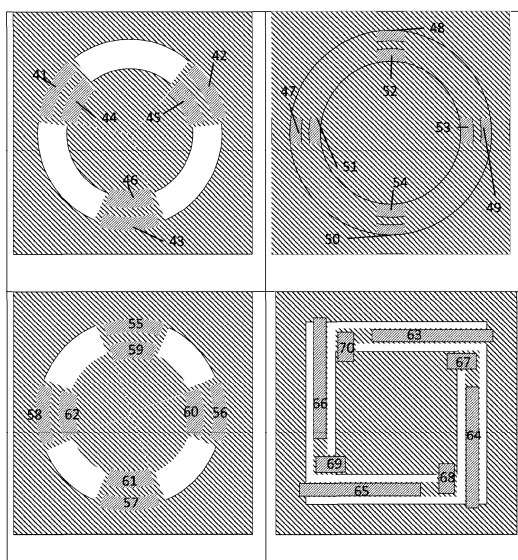
Фиг. 7



Фиг. 8



Фиг. 9-12



Фиг. 13-16