



РОССИЙСКОЕ АГЕНТСТВО
ПО ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: **98111786/28, 16.06.1998**

(24) Дата начала действия патента: **16.06.1998**

(46) Опубликовано: **10.07.2000**

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: K.A.MURHY, M.F.GUNTHER, A.WANG, R.O.CLAUS, A.M.VENGSAKAR. Extrinsic Fabry-Perot Optical Fiber Sensor. 8th Optical Fiber Sensor Conf., Jan. 29 - 31, 1992, Monterrey, CA. Conf. Proc., p.193 - 196. G.HE, F.W.CUOMO, A.J.ZUCKERWAR. Diaphragm size and sensitivity for fiber optic pressure sensors. Proc. SPIE, 1991, vol.1584, p.152 - 156. SU 1571449 A1, 15.06.1990. DE 3611852 A1, 16.10.1986.

Адрес для переписки:

117296, Москва, а/я 111, Рандошкину В.В.

(71) Заявитель(и):

**Научный центр волоконной оптики при
Институте общей физики РАН**

(72) Автор(ы):

**Дианов Е.М.,
Беловолов М.И.,
Бубнов М.М.,
Семенов С.Л.**

(73) Патентообладатель(ли):

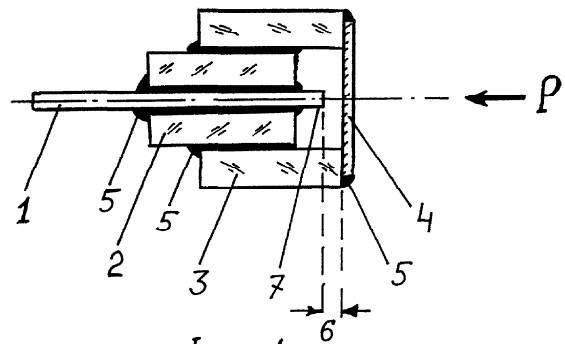
**Научный центр волоконной оптики при
Институте общей физики РАН**

(54) ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ (ЕГО ВАРИАНТЫ) И СПОСОБ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ

(57) Реферат:

Изобретения относятся к области измерения гидростатического и быстро меняющегося давления с помощью оптических средств и промышленно применимы при аэродинамических исследованиях летательных и малогабаритных космических аппаратов, в робототехнике, при дистанционном мониторинге давления (скважины, емкости, баллоны), в медико-биологических исследованиях, гидроакустике, системах охраны. В одном варианте датчик содержит интерферометр Фабри-Перо, одна из отражающих поверхностей которого образована торцом одномодового волоконного световода, который установлен по оси первого капилляра и закреплен в нем. Датчик содержит дополнительно второй капилляр и упругую диафрагму, закрепленную на одном торце второго капилляра и образующую вторую отражающую поверхность интерферометра Фабри-Перо. Первый капилляр установлен и закреплен по оси второго капилляра со стороны его второго торца. По другому варианту отражающие поверхности интерферометра Фабри-Перо

образованы торцами волоконных световодов. Один из световодов выполнен одномодовым. Концы световодов установлены по оси первого капилляра. Отрезок второго световода закреплен в эластичной мембране, установленной со стороны одного торца второго капилляра. Первый капилляр установлен и закреплен по оси второго капилляра со стороны его второго торца. Технический результат - повышение чувствительности, температурной и вибрационной стабильности датчика. 3 с. и 32 з.п. ф-лы, 6 ил.



Фиг. 1



RUSSIAN AGENCY
FOR PATENTS AND TRADEMARKS

(19) **RU** (11) **2 152 601** (13) **C1**
(51) Int. Cl.⁷ **G 01 L 11/02, 23/06**

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21), (22) Application: **98111786/28, 16.06.1998**

(24) Effective date for property rights: **16.06.1998**

(46) Date of publication: **10.07.2000**

Mail address:

117296, Moskva, a/ja 111, Randoshkinu V.V.

(71) Applicant(s):

**Nauchnyj tsentr volokonnoj optiki pri
Institute obshej fiziki RAN**

(72) Inventor(s):

**Dianov E.M.,
Belovolov M.I.,
Bubnov M.M.,
Semenov S.L.**

(73) Proprietor(s):

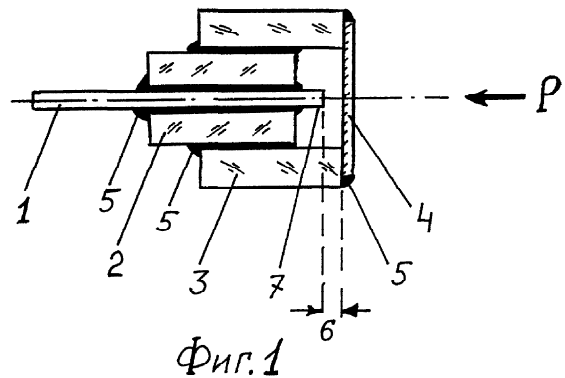
**Nauchnyj tsentr volokonnoj optiki pri
Institute obshej fiziki RAN**

(54) **FIBER-OPTIC PRESSURE TRANSDUCER (DESIGN VERSIONS) AND ITS MANUFACTURING PROCESS**

(57) Abstract:

FIELD: instrumentation engineering. SUBSTANCE: transducer designed for measuring hydrostatic and rapidly varying pressure by means of optical devices is meant for industrial application in ground analyses of flying vehicles and small spacecraft, robotics, remote pressure monitoring (wells, tanks, cylinders), medicine, biology, hydroacoustics, and guard systems. Transducer of one design version has Fabry-Perot interferometer one of whose reflecting surfaces is formed by butt end of single-mode fiber optic conductor installed along the axis of first capillary tube and secured thereon. In addition, transducer has second capillary tube and flexible diaphragm mounted on one of its ends to form second reflecting surface of Fabry-Perot interferometer. First capillary tube is mounted and secured along the axis of second capillary tube on second butt-end side. According to second design version, reflecting surfaces of Fabry-Perot interferometer are formed by ends of fiber-optic conductors. One

of the latter is single-mode conductor. Section of second optical conductor is secured in flexible diaphragm mounted on one butt-end side of second capillary tube. First capillary tube is mounted and secured along the axis of second capillary tube on its second butt end. EFFECT: improved sensitivity, thermal and vibration stability of transducer. 35 cl, 6 dwg



RU 2 1 5 2 6 0 1 C 1

RU 2 1 5 2 6 0 1 C 1

Изобретение относится к области измерения быстро меняющегося давления с помощью оптических средств и промышленно применимо при аэродинамических исследованиях летательных и малогабаритных космических аппаратов, в робототехнике, в том числе в микрозахватах с малыми усилиями, при дистанционном мониторинге давления (скважины, емкости, баллоны), в медицине и медико-биологических исследованиях, гидроакустике, системах охраны.

Известен волоконно-оптический датчик давления, содержащий капилляр, в котором вдоль оси капилляра установлен волоконный световод, и упругую диафрагму, которая закреплена на одном торце капилляра [G.He, F.W.Cuomo, A.J.Zuckerwar. Diaphragm size and sensitivity for fiber optic pressure sensors. Proc. SPIE, 1991, vol.1584, p.152-156]. В этом датчике давления оптический сигнал для измерения прогиба диафрагмы доставляется по одному подводящему многомодовому волоконному световоду с диаметром сердцевины 50 мкм и оболочки 120 мкм, а отраженный от изогнутой давлением диафрагмы свет собирается шестью такими же многомодовыми волоконными световодами, расположенными вокруг подводящего световода, образуя оптический жгут с плотной регулярной упаковкой волоконных световодов. Чувствительным элементом датчика является майларовая металлизированная диафрагма толщиной 25,4 мкм, что придает датчику высокочастотные свойства.

Недостатком этого датчика является то, что он не обладает высокой чувствительностью из-за применения многомодовых волоконных световодов, исключающих образование интерферометра для измерения воздействия давления, обладает значительными потерями света при собирании отраженного от диафрагмы излучения сердцевинами волоконных световодов, не плотно охватывающими световое поле излучения, а доля выходящего сигнального излучения сильно зависит от размеров диафрагмы и расстояния от конца пучка волоконных световодов до диафрагмы. Этот датчик давления является, по существу, аналоговым прибором с низкой крутизной преобразования перемещения диафрагмы в оптический сигнал.

Наиболее близким к заявляемому является известный волоконно-оптический датчик давления, содержащий интерферометр Фабри-Перо, одна из отражающих поверхностей которого образована торцом одномодового волоконного световода, который установлен по оси первого капилляра и закреплён в нём [K.A.Murphy, M.F.Gunther, A.Wang, R.O.Claus, A.M.Vengsarkar. Extrinsic Fabry-Perot Optical Fiber Sensor. 8th Optical Fiber Sensor Conf., Jan. 29-31, 1992, Monterey, CA. Conf. Proc., p. 193- 196]. Этот интерферометрический датчик построен на основе низкодобротного интерферометра Фабри-Перо, образованного скототыми торцами с 4% френелевским отражением одномодового волоконного световода и торца отрезка многомодового волоконного световода, вклеенными внутри стеклянного капилляра с помощью эпоксидного клея. Датчик обладает синусоидальным интерферометрическим сигналом отклика на давление, изменяющего величину зазора между торцами (длину резонатора), и вследствие этого обладает высокой крутизной преобразования давления в длину резонатора и, соответственно, в выходной сигнал датчика.

Недостатком прототипа является невозможность регистрировать с высокой точностью давление газа или жидкости в связи с фиксированностью в конструкции торца отрезка многомодового световода, играющего роль подвижного зеркала, а задача связи его с диафрагмой и расположение самой диафрагмы осталась не решенной.

С помощью заявляемых изобретений решается техническая задача повышения чувствительности, температурной и вибрационной стабильности датчика давления.

Поставленная задача решается тем, что известный волоконно-оптический датчик давления, содержащий интерферометр Фабри-Перо, одна из отражающих поверхностей которого образована торцом одномодового волоконного световода, который установлен по оси первого капилляра и закреплён в нём, дополнительно содержит второй капилляр и упругую диафрагму, которая закреплена на одном торце второго капилляра, а ее поверхность образует вторую отражающую поверхность интерферометра Фабри-Перо,

причем первый капилляр установлен и закреплен по оси второго капилляра со стороны его второго торца.

В частности, капилляры могут быть выполнены из кварцевого стекла.

5 В частности, упругая диафрагма может быть выполнена из металлической фольги или металлизированной полимерной пленки.

В частности, толщина упругой диафрагмы может составлять не менее 10 мкм.

В частности, внутренний диаметр первого капилляра может превышать диаметр волоконного световода на величину от 0,8 до 4%.

10 В частности, зазор между внутренней поверхностью второго капилляра и внешней поверхностью первого капилляра может составлять от 5 до 20 мкм.

В частности, второй капилляр может быть вставлен в первый капилляр на глубину от 1 до 2 мм.

В частности, длина капилляров может составлять от 2 до 4 мм.

15 В частности, конец волоконного световода может выступать из первого капилляра на длину от 0,5 до 1 мм.

В частности, расстояние между отражающими поверхностями интерферометра Фабри-Перо может составлять от 10 до 1000 мкм.

В частности, капилляры могут быть скреплены между собой с помощью эпоксидного клея.

20 В частности, волоконный световод может быть закреплен в первом капилляре с помощью эпоксидного клея.

Поставленная задача решается также тем, что известный волоконно-оптический датчик давления, содержащий интерферометр Фабри-Перо, отражающие поверхности которого образованы торцами волоконных световодов, один из которых выполнен одномодовым, 25 причем концы световодов установлены по оси первого капилляра, дополнительно содержит второй капилляр и эластичную мембрану, отрезок второго волоконного световода закреплен в эластичной мембране, установленной со стороны одного торца второго капилляра, а первый капилляр установлен и закреплен по оси второго капилляра со стороны его второго торца.

30 В частности, капилляры могут быть выполнены из кварцевого стекла.

В частности, эластичная мембрана может быть выполнена из кремнийорганического эластомера.

В частности, толщина эластичной мембраны может составлять от 100 до 400 мкм.

35 В частности, внутренний диаметр первого капилляра может превышать диаметр волоконного световода на величину от 10 до 40%.

В частности, зазор между внутренней поверхностью второго капилляра и внешней поверхностью первого капилляра может составлять от 5 до 20 мкм.

В частности, первый капилляр может быть вставлен во второй капилляр на глубину от 1 до 3 мм.

40 В частности, длина капилляров может составлять от 2 до 4 мм.

В частности, конец первого волоконного световода может быть вставлен в первый капилляр на длину от 300 до 500 мкм.

В частности, конец второго волоконного световода может быть вставлен в первый капилляр на длину от 250 до 400 мм.

45 В частности, расстояние между торцами волоконных световодов может составлять от 30 до 100 мкм.

В частности, свободный объем внутри первого капилляра может быть заполнен газообразным веществом.

50 В частности, первый капилляр может быть закреплен во втором капилляре с помощью эпоксидного клея.

В частности, первый волоконный световод может быть закреплен в первом капилляре с помощью эпоксидного клея.

Поставленная задача решается также тем, что в известном способе изготовления

волоконно-оптического датчика давления, включающем закрепление мембраны на торце первого капилляра, в первый капилляр вставляют отрезок волоконного световода, затем со стороны торца первого капилляра в него вносят полимеризующуюся жидкость, смачивающую торец первого капилляра и волоконный световод, количество жидкости
5 выбирают такой, чтобы ее было достаточно для образования менисков на внутренней поверхности второго капилляра и отрезке волоконного световода, а также тонкой пленки из жидкости, герметично закупоривающей весь торец второго капилляра.

В частности, в первый капилляр можно вставлять отрезок многомодового волоконного световода.

10 В частности, конец отрезка волоконного световода можно вставлять с зазором в первый капилляр, вставленный во второй капилляр со стороны торца, противоположного тому, со стороны которого вставляют волоконный световод.

В частности, в качестве полимеризующейся жидкости можно использовать кремний-органический эластомер, образующий после полимеризации эластичную резиноподобную
15 пленку.

В частности, в качестве полимеризующейся жидкости можно использовать силиконовую резину, герметик или аквасил.

В частности, внутренний диаметр первого капилляра может превышать диаметр вставленного в него волоконного световода на величину от 8 до 36%.

20 В частности, сразу после внесения полимеризирующей жидкости ее излишки можно убирать с помощью отрезка сухого волоконного световода или тонкой проволоки.

В частности, после полимеризации жидкости выступающий из капилляра конец отрезка волоконного световода можно обрезать.

В частности, торец волоконного световода, вставляемого в первый капилляр, можно
25 изготавливать путем скалывания после скрайбирования и последующего разрыва при растягивании вдоль оси световода.

Заявляемые изобретения, представляющие собой варианты устройства и способ изготовления элемента устройства, связаны единым изобретательским замыслом.

Заявляемые изобретения поясняются чертежами, где на фиг.1 и 2 приведены варианты
30 волоконно-оптического датчика давления. На фиг.3 приведена схема измерительной системы датчика давления. На фиг.4 показан интерферометрический сигнал - отклик датчика на изменение давления ΔP . На фиг.5 показаны калибровочные зависимости датчика давления при аналоговых и цифровых измерениях. На фиг.6 приведены основные стадии технологии изготовления датчика давления.

35 Волоконно-оптический датчик давления (фиг.1), предназначенный для измерения высокочастотных изменений давления с малыми амплитудами смещения диафрагмы, содержит одномодовый волоконный световод 1, первый капилляр 2, второй капилляр 3, упругую диафрагму 4, места склейки эпоксидным клеем 5 и интерферометр Фабри-Перо 6, образованный торцом 7 световода 1 и диафрагмой 4.

40 Волоконно-оптический датчик давления (фиг.2), предназначенный для измерения изменений давления с повышенной чувствительностью, содержит одномодовый волоконный световод 1, первый капилляр 2, второй капилляр 3, эластичную мембрану 8, отрезок многомодового волоконного световода 9, с отражающим торцом 10, места склейки эпоксидным клеем 5 и интерферометр Фабри-Перо 6, образованный торцами 7 и 10
45 световодов 1 и 9 соответственно.

В датчике давления (фиг.2) внутренний диаметр второго капилляра 3 выбран на 10-20 мкм больше внешнего диаметра отрезка многомодового волоконного световода 9, благодаря чему этот отрезок 9 может свободно двигаться в осевом направлении. Вклеивание другого конца отрезка световода 9 в середину эластичной полимерной
50 мембраны 8 осесимметрично с вклеенным концом одномодового волоконного световода 7, чем создается геометрия интерферометра 6 для прецизионного измерения изменения длины резонатора и, как следствие, давления P.

Разработанный высокочувствительный помехозащищенный волоконно-оптический

датчик гидростатического давления на диапазон 0,5 - 1,5 атм имеет две измерительные калибровочные шкалы: аналоговую с чувствительностью 0,01 атм и высокочувствительную интерферометрическую шкалу с разрешением и минимальной чувствительностью около 10^{-4} атм. За счет этого достигается повышение чувствительности, температурной и

5 вибрационной стабильности датчика давления.

Датчик давления (фиг.2) представляет собой низкочастотный резонатор-интерферометр Фабри-Перо 6 на конце одномодового волоконного световода 1 с 4% френелевским отражением от границы раздела кварцевое стекло - воздух. Другое подвижное зеркало резонатора образовано торцом 10 короткого (1-3 мм) отрезка световода 9, имеющего

10 малую инерционную массу и вклеенного в середину эластичной мембраны 9 диаметром 500 - 700 мкм, закрывающей герметично малый объем воздуха $\sim 1-3 \text{ мм}^3$ внутри второго капилляра 3 с внешним диаметром 0,5 - 0,9 мм. Торцы 7 и 10 световодов 1 и 9, образующие резонатор Фабри-Перо 6 с зазором около 50 мкм, помещены внутри первого капилляра 2 с внутренним диаметром 135 - 145 мкм. Это позволяет подвижному отрезку

15 волоконного световода 9, расположенному строго по центру, двигаться свободно в осевом направлении практически без трения, что обуславливает стабильность геометрии и величины сигнала-отклика интерферометра 6 при механических вибрациях в поперечном направлении. Малые инерционная масса материала эластичной мембраны 8 и вклеенного короткого отрезка световода 9 приводят к высокой устойчивости конструкции по

20 отношению к инерционным силам вследствие ускорений в продольном направлении, а в поперечном направлении силы ускорения не нарушают геометрию интерферометра 6 и практически совсем не сказываются на работе датчика давления. Высокая термостойкость кварцевых капилляров 2 и 3 (коэффициент линейного расширения меньше $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$) и малый объем воздуха внутри этих капилляров приводят к повышению стабильности показаний и калибровок датчика при изменении температуры. Расчеты и эксперименты показали, что величина параметра температурной стабильности разработанного датчика составляет $\Delta P/\Delta T \approx 0,001 \text{ атм}/^\circ\text{C}$. То обстоятельство, что резонатор интерферометра 6 образуется сколами на торцах 7 и 10 волоконных световодов 1 и 9 с 4% френелевским

25 отражением, приводит к воспроизводимости синусоидального интерферометрического отклика датчика при работе его на конце длинного волоконного световода 1, когда сигнал интерферометра образуется путем сложения (интерферирования) одномодового излучения, отраженного от торца 7 световода 1, являющегося магистральным, с излучением такой же геометрии, но однократно отраженным от торца 10 подвижного отрезка световода 9 и введенного обратно в световод 1.

30 При изготовлении датчика упругую диафрагму 4 предварительно расправляют и натягивают на вспомогательной кольцевой оправке большого диаметра. Затем ее закрепляют на торце второго капилляра 3 с помощью эпоксидного клея 6, а излишек материала диафрагмы 4 обрезают.

40 При воздействии давления на эластичную мембрану 9 величина ее прогиба передается (преобразуется) в изменение длины L резонатора интерферометра 6 - расстояния между торцами 7 и 10 волоконных световодов 1 и 9, которое и измеряется по фазе и/или амплитуде синусоидального отклика интерферометра 6

$$I = I_0(1 + \sin\varphi),$$

45 где фаза сигнала биений $\varphi = 4\pi L/\lambda$, λ - рабочая длина волны лазерного источника 11 в измерительной системе (фиг. 3). Источник 11 может быть выполнен в виде лазерного модуля с волоконным выходом 12. На фиг.3 также показан направленный ответвитель 13 Y- или X-типа для ввода излучения лазерного источника 11 в одномодовый волоконный световод 1 и вывода его в фотоприемник 14, а также интерферометр 6 датчика давления.

50 Измерительная система датчика давления (фиг.3), кроме перечисленных выше элементов, включает не показанные на чертеже схему питания-модуляции лазера и, при необходимости, встроенный оптический изолятор, предусилитель и схему обработки (в простейшем случае демодулятор или фазовый детектор), имеющими выход на регистрирующие устройства (самописцы, компьютеры). Оптический изолятор в составе

модуля бывает необходим, так как в прецизионных измерениях обычно используются
одночастотные лазеры, спектр излучения которых может искажаться возвращенным
обратно излучением вследствие эффектов составного резонатора. Синусоидальный сигнал
в измерительной системе образуется в фотоприемнике 14, где фотодиод (германиевый,
кремниевый или на основе четверных соединений) играет роль квадратичного детектора
суммарного светового поля двух отраженных от граней резонатора световых полей.

Формула для интерферометрического отклика датчика получается из известной функции
Эйри в предположении малого значения коэффициента отражения зеркал резонатора, в
данном случае $R = 0,04 \ll 1$.

Измеряемое давление P пропорционально изменению длины резонатора ΔL , которое в
свою очередь может быть определено при соответствующей калибровке отклика из
изменения фазы интерферометрического сигнала $\Delta\phi$:

$$P \sim \Delta L = \lambda \Delta\phi / 4\pi.$$

Приведенная выше формула, показывающая простую связь длины резонатора с
изменением фазы, может использоваться для абсолютных измерений давления после
установления коэффициента пропорциональности или аппаратной функции в ходе
калибровки. Фазовые измерения для синусоидальных сигналов хорошо развиты в
настоящее время и возможно построение метрологически точных приборов при условии
достаточно высокой развязки от паразитных и родственных других физических воздействий
(температура и др.). Разработанный датчик давления (фиг.2) позволяет строить такие
приборы, учитывая малые габариты, вес и отсутствие металлов в своей конструкции. В
совокупности перечисленные качественные и количественные параметры разработанных
датчиков давления (фиг. 1 и 2) не встречаются в известных конструкциях датчиков.
Изменяя упругость применяемой мембраны 8, ее размеры и материал можно создавать
датчики предложенной конструкции с оптимизированными свойствами для каждого
применения, например, по диапазону измеряемых давлений от $\sim 10^{-4}$ атм до 10-100 атм и
выше.

Вследствие того, что исходная длина измерительного резонатора Фабри-Перо в
конструкции датчика (фиг.2) выбрана малой (~ 50 мкм), то в качестве источников
излучения 11 можно применять как обычные полупроводниковые лазеры из диапазона 0.8-
1.6 мкм с шириной спектра излучения $\Delta\lambda = 2-3$ нм, так и РОС-лазеры с узким спектром
генерации ($< 10^{-3}$ нм). Последние предпочтительно применять в тех случаях, когда
предъявляются повышенные требования к разрешающей способности по измеряемому
давлению или необходимо измерять малые абсолютные значения давлений, требующие
точного поддержания и измерения фазы интерференционного отклика датчика в
измерительной системе.

Типичный вид отклика датчика давления приведен на фиг.4 (показан фрагмент отклика в
диапазоне $\pm 0,1$ атм около давления 1 атм). В интервале измеряемых давлений от 0,5 атм
до 1,5 атм наблюдалось до 60 периодов биений сигнала, причем зависимость числа
периодов N от давления была практически линейна во всем диапазоне изменения
давления 0,5 - 1,5 атм (фиг.5). Один период изменения сигнала на выходе фотоприемника
14 соответствует изменению длины резонатора интерферометра b , а точнее $2\Delta L$, на
величину рабочей длины волны, в данном случае $\lambda = 1,5$ мкм. В указанном диапазоне
изменения давления полный прогиб мембраны 8 составил $\Delta L = 60\lambda/2 = 30\lambda = 45$ мкм.
Линейность зависимости N от ΔP (фиг.5) указывает на то, что мембрана 8 работает в
пределах упругости и никаких задержек и гистерезиса в показаниях не наблюдается.
Результаты измерений и реакция датчика являются полностью воспроизводимыми.
Зависимость $N(\Delta P)$ является в сущности калибровочной для данного датчика. Давление
может определяться простым счетом числа периодов с дискретностью
(разрешением) $\Delta P / \Delta N \approx 1/60 = 0,017$ атм. Датчик давления при работе в режиме отсчета
числа периодов как измерительный прибор является цифровым (или псевдоцифровым),
что может проявляться как существенное достоинство для некоторых применений.

Из фиг.4 также видно, что огибающая синусоидального отклика датчика образует вторую калибровочную кривую в аналоговой форме (показана на фиг.5), появление которой связано с зависимостью эффективности ввода отраженного от подвижного торца 10 световода 9 излучения от расстояния между торцами 7 и 10; при увеличении давления торцы 7 и 10 сближаются, резонатор интерферометра 6 укорачивается, а амплитуда интерференционного сигнала возрастает. Возрастание амплитуды осцилляций указывает на увеличение давления, и это обстоятельство может использоваться для установления знака изменения давления при работе его в цифровом режиме. Наконец, рабочая точка интерферометра может быть выбрана на середине синусоидального отклика (фиг.4), при этом датчик (фиг.2) и система (фиг. 3) могут работать в режиме регистрации малых вариаций давления с большой крутизной преобразования. Экспериментальные исследования показали, что в этом случае легко достигается минимальная чувствительность/разрешение по давлению на уровне $\Delta P_{\min} \approx 10^{-4}$ атм. Эта величина определяется шумовыми свойствами регистрирующей аппаратуры, и она может быть улучшена еще на 1 - 2 порядка при соответствующем выборе способа обработки.

При изготовлении датчика давления (фиг.2) на 1-й стадии капилляры 2 и 3 длиной 3-5 мм склеивают эпоксидным клеем в местах 5 с рассовмещением вдоль оптической оси на 1-2 мм. Это является заготовкой корпуса датчика. На 2-й стадии во второй капилляр 3 на глубину 0,5 - 1 мм вставляют торец 10 многомодового волоконного световода 9, который с помощью трехкоординатного столика центрируют в радиальном направлении так, чтобы световод 9 не касался внутренних стенок капилляра 3. На 3-й стадии со стороны торца капилляра 3, куда вставлен волоконный световод 9, наносят небольшое количество полимеризующейся жидкости 15 так, чтобы она смочила как волоконный световод 9, так и торец капилляра 3. Сразу же после этого излишки жидкости 15 удаляют с помощью сухого отрезка волоконного световода или тонкой проволоки. Втянутая в первый капилляр 3 полимеризующаяся жидкость 15 благодаря хорошей смачиваемости кварцевого стекла, из которого выполнены первый капилляр 2 и волоконный световод 9, образует мениски, которые автоматически способствуют центрированию световода 9 внутри первого капилляра 2 и образуют эластичную мембрану 8. После полимеризации жидкости 15 выступающий наружу конец световода 9 обрезают. На 4-й стадии во второй капилляр 3 вводят на глубину $\sim 0,5 - 1$ мм торец 7 одномодового волоконного световода 1 с 4% френелевским отражением от торца 7. После этого световод 1 в местах склейки 5 смачивают эпоксидным клеем и вдвигают навстречу многомодовому волоконному световоду 9. Зазор $\sim 30-100$ мкм между торцами 7 и 10 световодов 1 и 9 устанавливают, исходя из предполагаемого диапазона измерения давлений и упругости мембраны 8. Упругость мембраны 8 изменяют в некоторых пределах, варьируя ее толщину при изготовлении. Воспроизводимость чувствительности датчика давления (фиг.2) определяется воспроизводимостью толщины диафрагмы, которая практически составляет 0,2 - 0,5 мм в самом тонком месте мениска. Особенность технического решения данного датчика, заключающаяся во вклеивании короткого отрезка многомодового световода 9 в мембрану 8, позволяет преобразовывать (передавать) ее прогиб в изменение длины оптического резонатора интерферометра 6 внутри первого капилляра 2 независимо от формы мембраны 8. Важна лишь ее упругость и осесимметричная форма, которая формируется силами поверхностного натяжения, когда полимер еще жидкий.

Датчик давления (фиг.2) имеет еще одну особенность конструкции, которая определяет его быстродействие. Вследствие того, что подвижный отрезок световода 9 введен во второй капилляр 3 с внутренним диаметром 135-145 мкм, всего на 10-20 мкм превышающим внешний диаметр (125 мкм) волоконного световода 9, при быстром перемещении световода 9 создается воздушное демпфирование его движения (эффект насоса), что ограничивает скорость его перемещения. Измерения зависимости амплитуды интерферометрического отклика датчика от частоты изменения внешнего давления показали, что частотный диапазон датчика ограничивается частотами около 600 - 700 Гц. Как следствие, данный датчик (фиг. 2) следует рассматривать как сравнительно

низкочастотный и предназначенный для измерения гидростатических или медленно меняющихся давлений. Эти свойства датчика также могут проявляться как достоинства, когда наряду с плавными изменениями давления присутствуют вихри и турбулентности, а также акустические сигналы с высокими частотами.

5 Экспериментальные данные (фиг. 4 и 5) свидетельствуют о том, что осевое изменение длины резонатора $2\Delta L$ на величину $\lambda = 1,5$ мкм приводит к одному периоду изменения интерферометрического отклика, который соответствует изменению измеряемого давления ΔP на $\sim 0,017$ атм. с разрешением на периоде биений не хуже $\delta P = 10^{-4}$ атм. Из этих данных следует, что измерительная лазерная система (фиг. 3) позволяет
10 регистрировать минимальные абсолютные перемещения мембраны 8 и торца 10 подвижного световода 9 величиной около $\delta L = \lambda \delta P / \Delta P \approx 10$ нм.

При изготовлении датчика давления (фиг. 1) одномодовый световод 1 клеивали неподвижно во второй капилляр 3 так, чтобы его торец 7 выступал примерно на 1 мм, а на торец первого капилляра 2 наклеивали с помощью эпоксидного клея диафрагму 4 из
15 алюминиевой фольги толщиной 10 мкм, герметично закрывающую внутренний объем величиной 1 - 2 мм³. Вследствие того, что алюминиевая фольга имеет высокую отражательную способность $R \approx 0,95$, для выравнивания интенсивностей интерферирующих сигналов на фотоприемнике 14 (фиг. 3) и получения синусоидального
20 интерферометрического отклика зазор между торцом 7 одномодового волоконного световода и плоскостью диафрагмы 4 увеличен до 100 - 200 мкм без ущерба для светосилы измерительной системы датчика. Благодаря высокой упругости алюминиевой мембраны, малой толщине и малому диаметру (< 1 мм) датчик давления (фиг. 1) обладает высокочастотными свойствами и способен регистрировать изменения давления с
25 верхней частотой вплоть до 100 кГц. Очевидно, что динамический диапазон датчика (фиг. 1) является еще более широким, чем у другого варианта датчика (фиг. 2), вследствие большего начального зазора между торцом 7 одномодового световода 1 и диафрагмой 4.

Экспериментальные данные (фиг. 4 и 5) получены для датчика давления (фиг. 2), в котором первый капилляр 2, выполненный из кварцевого стекла, имел длину 4 мм, внешний
30 диаметр 1 мм и внутренний диаметр 0,7 мм. Второй капилляр 3, выполненный из кварцевого стекла, имел длину 4 мм, внешний диаметр 700 мкм и внутренний диаметр 140 мкм. Второй капилляр 3 вставляли в первый капилляр 2 на глубину 2 мм. Волоконные световоды 1 и 9 имели внешний диаметр 125 мкм. Волоконный световод 9 вставляли во второй капилляр 3 на глубину 1 мм. Эластичную мембрану 8 изготавливали из силиконовой
35 резины. Толщина мембраны 8 в узком месте составляла 3 мм. Расстояние между торцами 7 и 10 световодов 1 и 9 составляло 50 мкм. Отрезок волоконного световода 9 выступал из мембраны на 1 мм.

Измерительная система (фиг. 3) содержала в качестве источника излучения 11 лазерный модуль с волоконным выходом 12 на основе полупроводникового диода с длиной
40 волны излучения 1,5 мкм и шириной спектра излучения $\Delta\lambda = 3$ нм. Для ввода излучения лазерного источника 11 в одномодовый волоконный световод 1 и вывода его в фотоприемник 14 использовали направленный ответвитель 13 Y-типа. Фотоприемником 14 служил германиевый фотодиод ФД-10Г.

45 Формула изобретения

1. Волоконно-оптический датчик давления, содержащий интерферометр Фабри-Перо, одна из отражающих поверхностей которого образована торцом одномодового волоконного световода, который установлен по оси первого капилляра и закреплен в нем, отличающийся тем, что он дополнительно содержит второй капилляр и упругую диафрагму,
50 которая закреплена на одном торце второго капилляра, а ее поверхность образует вторую отражающую поверхность интерферометра Фабри-Перо, причем первый капилляр установлен и закреплен по оси второго капилляра со стороны его второго торца.

2. Датчик по п. 1, отличающийся тем, что капилляры выполнены из кварцевого стекла.
3. Датчик по п. 1, отличающийся тем, что упругая диафрагма выполнена из

металлической фольги или металлизированной полимерной пленки.

4. Датчик по п.1, отличающийся тем, что толщина упругой диафрагмы составляет не менее 10 мкм.

5. Датчик по п.1, отличающийся тем, что внутренний диаметр первого капилляра превышает диаметр волоконного световода на величину от 0,8 до 4%.

6. Датчик по п.1, отличающийся тем, что зазор между внутренней поверхностью второго капилляра и внешней поверхностью первого капилляра составляет от 5 до 20 мкм.

7. Датчик по п. 1, отличающийся тем, что второй капилляр вставлен в первый капилляр на глубину от 1 до 2 мм.

8. Датчик по п.1, отличающийся тем, что длина капилляров составляет от 2 до 4 мм.

9. Датчик по п. 1, отличающийся тем, что конец волоконного световода выступает из первого капилляра на длину от 0,5 до 1 мм.

10. Датчик по п.1, отличающийся тем, что расстояние между отражающими поверхностями интерферометра Фабри-Перо составляет от 10 до 1000 мкм.

11. Датчик по п.1, отличающийся тем, что капилляры скреплены между собой с помощью эпоксидного клея.

12. Датчик по п.1, отличающийся тем, что волоконный световод закреплен в первом капилляре с помощью эпоксидного клея.

13. Волоконно-оптический датчик давления, содержащий интерферометр Фабри-Перо, отражающие поверхности которого образованы торцами волоконных световодов, первый из которых выполнен одномодовым, причем концы световодов установлены по оси первого капилляра, отличающийся тем, что он дополнительно содержит второй капилляр и эластичную мембрану, отрезок второго волоконного световода закреплен в эластичной мембране, установленной со стороны одного торца второго капилляра, а первый капилляр установлен и закреплен по оси второго капилляра со стороны его второго торца.

14. Датчик по п.13, отличающийся тем, что капилляры выполнены из кварцевого стекла.

15. Датчик по п.13, отличающийся тем, что эластичная мембрана выполнена из кремнийорганического эластомера.

16. Датчик по п.13, отличающийся тем, что толщина эластичной мембраны составляет от 100 до 400 мкм.

17. Датчик по п.13, отличающийся тем, что внутренний диаметр первого капилляра превышает диаметр волоконного световода на величину от 10 до 40%.

18. Датчик по п.13, отличающийся тем, что зазор между внутренней поверхностью второго капилляра и внешней поверхностью первого капилляра составляет от 5 до 20 мкм.

19. Датчик по п.13, отличающийся тем, что первый капилляр вставлен во второй капилляр на глубину от 1 до 3 мм.

20. Датчик по п.13, отличающийся тем, что длина капилляров составляет от 2 до 4 мм.

21. Датчик по п.13, отличающийся тем, что конец первого волоконного световода вставлен в первый капилляр на длину от 300 до 500 мкм.

22. Датчик по п.13, отличающийся тем, что конец второго волоконного световода вставлен в первый капилляр на длину от 250 до 400 мм.

23. Датчик по п.13, отличающийся тем, что расстояние между торцами волоконных световодов составляет от 30 до 100 мкм.

24. Датчик по п.13, отличающийся тем, что свободный объем внутри первого капилляра заполнен газообразным веществом.

25. Датчик по п.13, отличающийся тем, что первый капилляр закреплен во втором капилляре с помощью эпоксидного клея.

26. Датчик по п.13, отличающийся тем, что первый волоконный световод закреплен в первом капилляре с помощью эпоксидного клея.

27. Способ изготовления волоконно-оптического датчика давления, включающий закрепление мембраны на торце первого капилляра, отличающийся тем, что в первый капилляр вставляют отрезок волоконного световода, затем со стороны торца капилляра в него вносят полимеризующуюся жидкость, смачивающую торец капилляра и волоконный

световод, количество жидкости выбирают такой, чтобы ее было достаточно для образования менисков на внутренней поверхности первого капилляра и отрезке волоконного световода, а также тонкой пленки из жидкости, герметично закупоривающей весь торец первого капилляра.

5 28. Способ по п.27, отличающийся тем, что в качестве отрезка волоконного световода используют многомодовый волоконный световод.

29. Способ по п. 27, отличающийся тем, что конец отрезка волоконного световода вставляют с зазором во второй капилляр, вставленный в первый капилляр со стороны торца, противоположного тому, со стороны которого вставляют волоконный световод.

10 30. Способ по п.27, отличающийся тем, что в качестве полимеризирующейся жидкости используют кремнийорганический эластомер, образующий после полимеризации эластичную резиноподобную пленку.

31. Способ по п.27, отличающийся тем, что в качестве полимеризующейся жидкости используют силиконовую резину, герметик или аквасил.

15 32. Способ по п.29, отличающийся тем, что внутренний диаметр второго капилляра превышает диаметр вставленного в него волоконного световода на величину от 8 до 36%.

33. Способ по п.27, отличающийся тем, что сразу после внесения полимеризующейся жидкости ее излишки убирают с помощью отрезка сухого волоконного световода или тонкой проволоки.

20 34. Способ по п.27, отличающийся тем, что после полимеризации жидкости выступающий из капилляра конец отрезка волоконного световода обрезают.

35. Способ по п.27 или 29, отличающийся тем, что торец волоконного световода, вставляемого в капилляр, изготавливают путем скалывания после скрайбирования и последующего разрыва при растягивании вдоль оси световода.

25

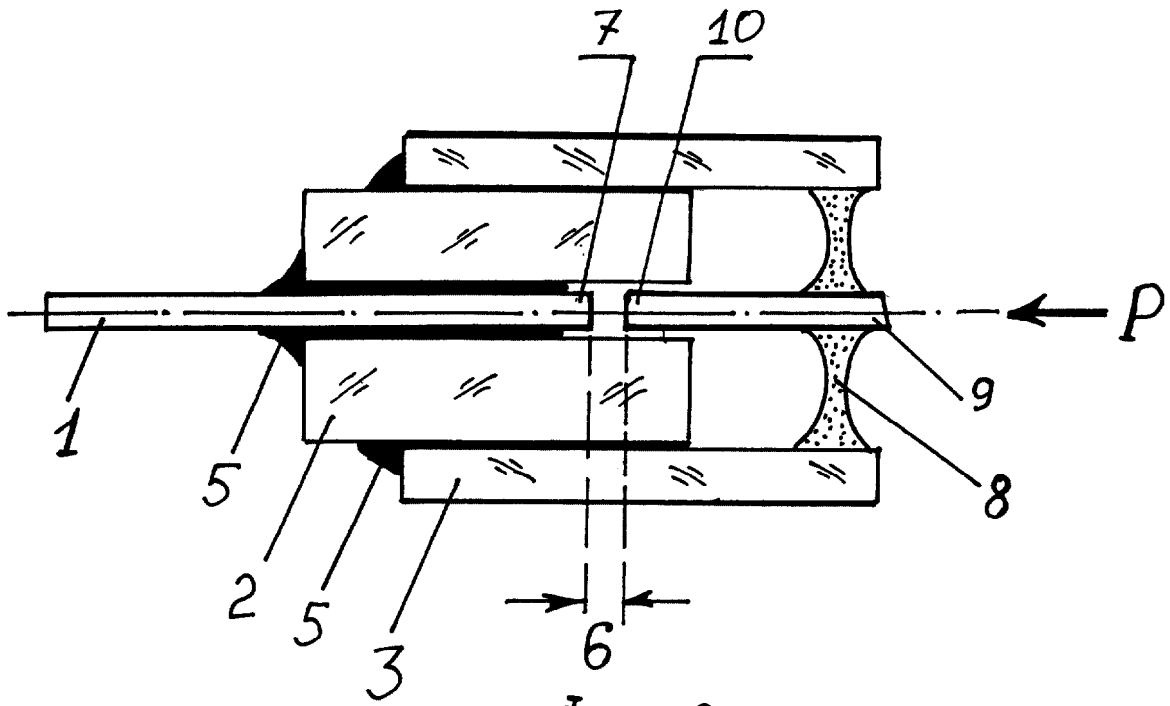
30

35

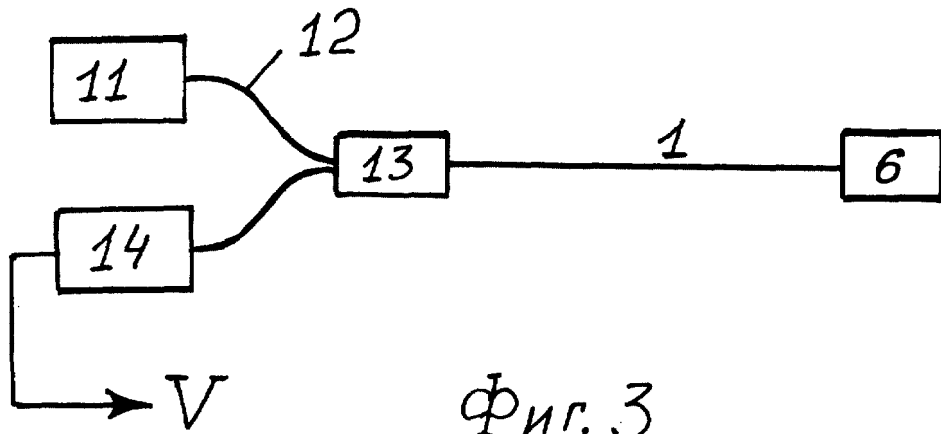
40

45

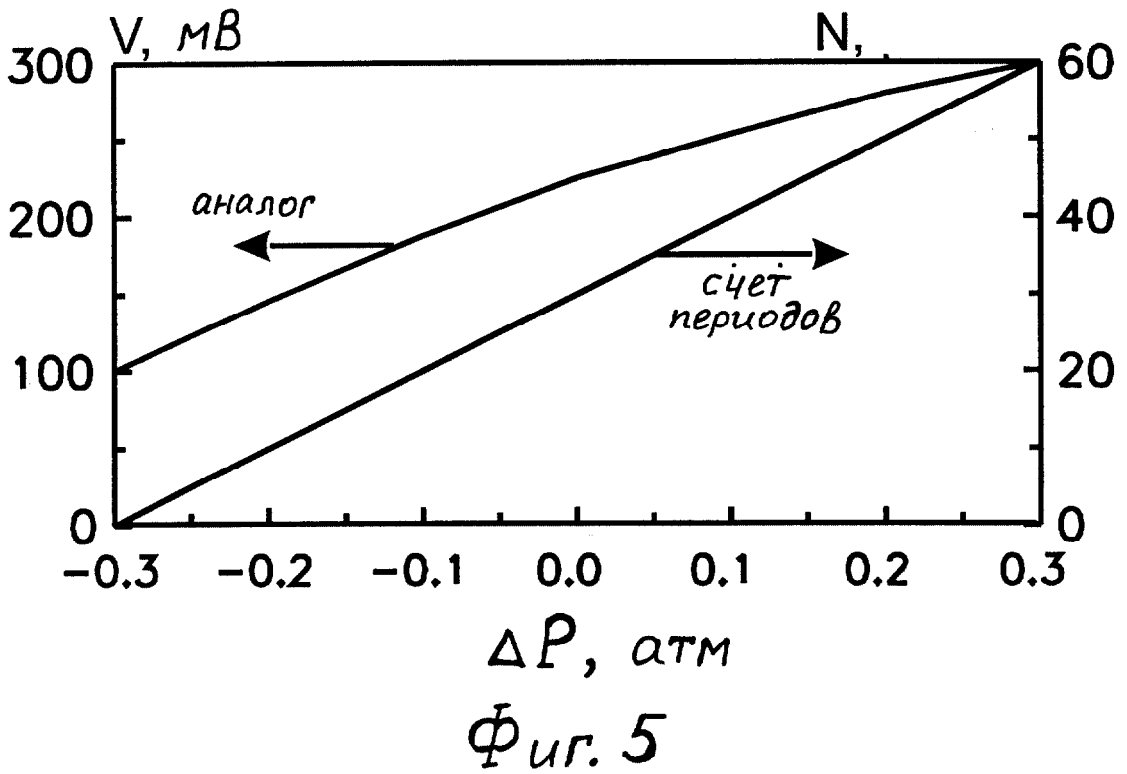
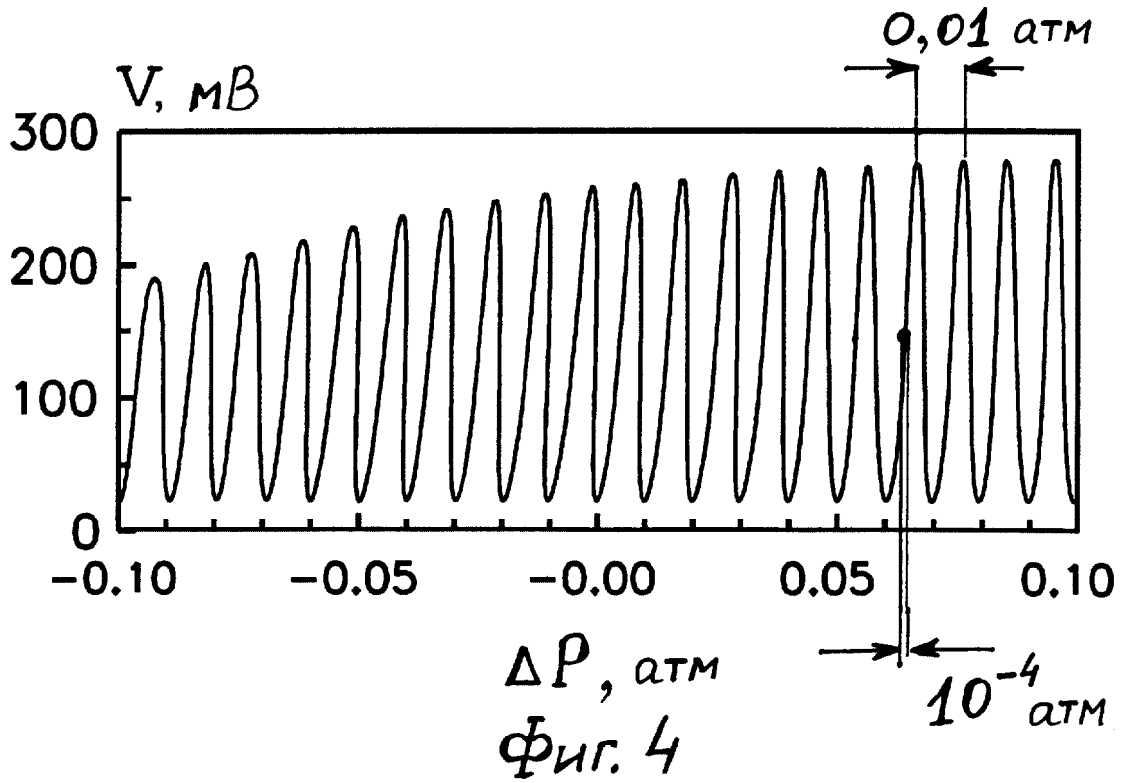
50



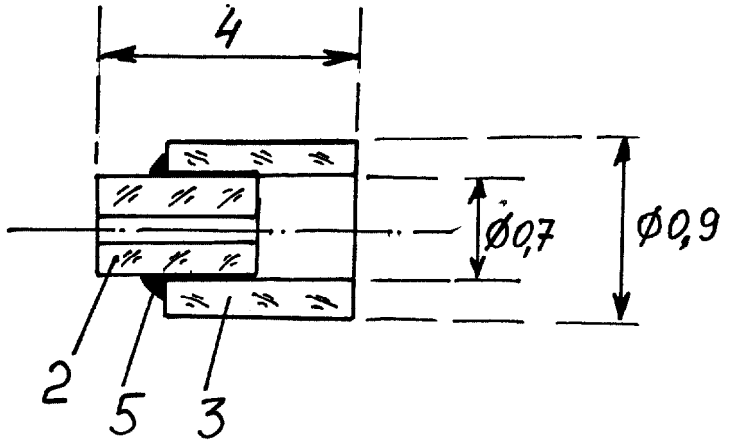
Фиг. 2



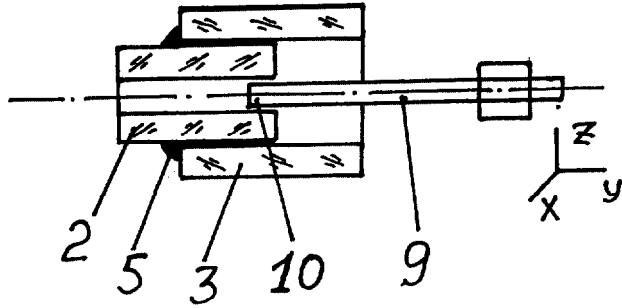
Фиг. 3



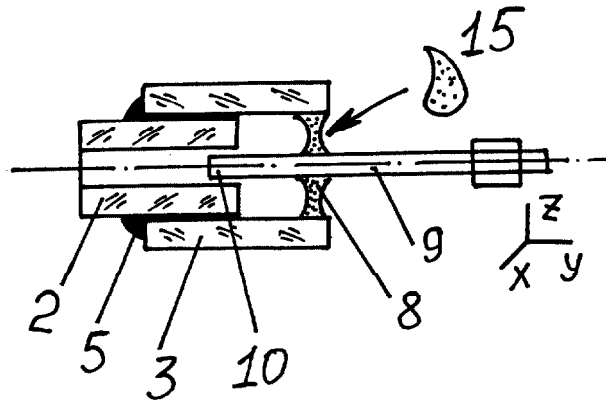
1 стадия



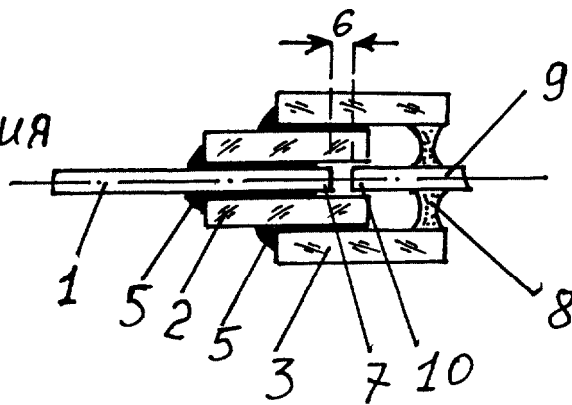
2 стадия



3 стадия



4 стадия



Фиг. 6