

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(21) **202392672** (13) **A1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки
2023.12.29

(51) Int. Cl. *G02B 6/12* (2006.01)
F03H 3/00 (2006.01)
G02B 6/293 (2006.01)
F03G 7/00 (2006.01)

(22) Дата подачи заявки
2022.03.23

(54) ПЛАНАРНЫЙ ФОТОННО-РЕЗОНАНСНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

(31) 102021000007118

(72) Изобретатель:

(32) 2021.03.24

Кампанелла Карло Эдоардо, Де

(33) IT

Амичис Джованни, Д'Анна Альфонсо

(86) PCT/IB2022/052641

(IT)

(87) WO 2022/201050 2022.09.29

(74) Представитель:

(71) Заявитель:

Фелицына С.Б. (RU)

КОПСИС С.Р.Л. (IT)

(57) Раскрыт фотонный двигатель, который содержит по меньшей мере один ввод оптического излучения; первую конструкцию оптического волновода, содержащую по меньшей мере один первый оптический резонатор, лежащий в первой области пространства для образования статической части двигателя в заданной базовой системе координат; конструкцию оптических волноводов для возбуждения первой конструкции оптического волновода на основе входного оптического излучения; по меньшей мере вторую конструкцию оптического волновода, содержащую по меньшей мере один второй оптический резонатор, лежащий во второй области пространства плоскости на заданном поперечном расстоянии связи, причём вторая конструкция оптического волновода выполнена с возможностью перемещения во второй области пространства плоскости относительно первой конструкции оптического волновода, согласно, по меньшей мере, заданному направлению перемещения, для образования подвижной части двигателя в заданной базовой системе координат, при этом поперечное расстояние связи выполнено с возможностью установления затухающей волновой связи оптических мод колебаний по меньшей мере между одним первым оптическим резонатором первой конструкции оптического волновода и по меньшей мере одним вторым оптическим резонатором второй конструкции оптического волновода, первый и второй оптические резонаторы выполнены с возможностью возбуждения основной симметричной резонансной моды колебаний на первой заданной длине волны и основной антисимметричной резонансной моды колебаний на второй заданной длине волны, и, когда избирательно установлена основная симметричная мода колебаний, также устанавливается условие притяжения второго оптического резонатора по направлению к первому оптическому резонатору, которое генерирует во второй области пространства плоскости перемещение приближения второго оптического резонатора к первому оптическому резонатору в соответствии с заданным локальным направлением перемещения, а когда избирательно установлена основная антисимметричная резонансная мода колебаний, устанавливается условие отталкивания второго оптического резонатора от первого оптического резонатора, которое генерирует во второй области пространства плоскости перемещение удаления второго оптического резонатора от первого оптического резонатора в соответствии с заданным локальным направлением перемещения.

A1

202392672

202392672

A1

ПЛАНАРНЫЙ ФОТОННО-РЕЗОНАНСНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Настоящее изобретение относится к оптико-механическим системам. В частности, настоящее изобретение относится к оптико-механическому устройству, предназначенному для извлечения механической энергии из источника фотонов (т.е. лазерного источника). В частности, настоящее изобретение относится к фотонному двигателю, в котором используются оптико-механические принципы, и, более конкретно, к фотонному двигателю согласно преамбуле п. 1 формулы изобретения.

С 1821 года сэр Майкл Фарадей использовал магнитную силу, генерируемую с помощью токнесущего провода, для изоляции и непрерывного перемещения магнитного полюса в катушке. Это была первая демонстрация электрического двигателя. В устройствах такого типа магнитный поток требует непрерывной инверсии, чтобы обеспечить вращение электрического двигателя.

Учитывая области применения как микро-, так и макромасштаба, на сегодняшний день современные технологии в области роторных двигателей являются следующими:

а) электрические двигатели и микроэлектромеханические двигатели (МЭМС), основанные на законе Фарадея-Неймана-Ленца, работают на взаимодействии магнитных полей и электрических токов в токопроводящих катушках. Недостатками этих устройств являются конструктивные ограничения в очень маленьких сборочных узлах, ограниченные до миллиметрового масштаба, а также опасности, возникающие вследствие использования высоких напряжений и токов, всегда необходимых для получения полезных крутящих моментов;

б) поршневые и вращающиеся двигатели внутреннего сгорания, обычно работающие на невозобновляемых видах топлива, вызывающие загрязнение окружающей среды и связанные с этим проблемы, размеры которых измеряются в метровом масштабе и характеризуются высокими рабочими температурами и множеством гидравлических соединений, а также движущихся механических компонентов, что снижает надёжность системы;

с) реактивные двигатели, например газовые турбины (такие как турбовинтовые и турбовальные), основанные на третьем законе динамики Ньютона и обычно основанные на термодинамическом цикле Джоуля-Брайтона; они обычно известны самой высокой температурой, достигаемой во время работы. Их габариты сопоставимы с размерами вышеупомянутых двигателей, но связанные с ними проблемы с акустикой и загрязнением окружающей среды значительно выше;

d) молекулярные двигатели с электромагнитным или химическим приводом, способные совершать вращательные или линейные перемещения;

e) оптические микродвигатели, использующие давление излучения, возникающее в результате взаимодействия света, переносимого оптическим волноводом, со свободно перемещаемой структурой.

В настоящее время наиболее серьёзными ограничениями для существующих двигателей являются низкая выходная мощность в случае микродвигателей или значительный вес, размер и выбросы загрязняющих веществ в случае макродвигателей.

Давление излучения генерируется оптическими силами, вызывающими механические смещения в оптико-механических системах. Однако принципы оптико-механических резонаторов являются наиболее эффективной стратегией повышения интенсивности оптических сил, действующих на вещество, достигаемой с помощью улучшения взаимодействия света с веществом, происходящего в резонансных фотонных системах. На сегодняшний день исследование оптико-механических систем, усиленных резонатором, ограничено системами линейно изменяющегося перемещения, обеспечивающими однонаправленное приведение в действие.

В патенте США 2009/0116788 раскрывается управление оптическими резонансами между двумя разнесёнными связанными фотонными устройствами с сильным удержанием, при этом оптические резонансы используются для генерации оптически индуцированных сил и достижения точного механического приведения в действие в оптико-механической системе, состоящей из двух связанных фотонных устройств с сильным удержанием. В документе раскрывается осевое сближение или отклонение между двумя многоуровневыми фотонными устройствами, выполненными в виде кольцевых резонаторов.

В международной заявке WO 2018/087789 на патент того же заявителя раскрывается фотонный двигатель, выполненный с возможностью эффективного преобразования оптической энергии в механический крутящий момент.

В частности, упомянутая заявка относится к фотонному двигателю, содержащему:

- по меньшей мере один ввод оптического излучения;
- первую конструкцию оптического волновода, включающую в себя по меньшей мере один первый оптический резонатор, расположенный в первой плоскости для формирования статической части упомянутого двигателя в заданной базовой системе координат двигателя;
- конструкцию оптического волновода для возбуждения, соединённую с упомянутой первой конструкцией оптического волновода на заданном расстоянии связи

оптических мод колебаний с упомянутым по меньшей мере одним первым оптическим резонатором и выполненный с возможностью приема по меньшей мере одного оптического излучения заданной длины волны от упомянутого по меньшей мере одного входа оптического излучения, а также для оптического соединения упомянутого оптического излучения с упомянутым по меньшей мере одним первым оптическим резонатором;

- по меньшей мере вторую конструкцию оптического волновода, включающую в себя по меньшей мере один второй оптический резонатор, расположенный во второй плоскости, параллельной упомянутой первой плоскости, на заданном расстоянии вертикального расположения в виде стопки, перпендикулярном упомянутым плоскостям, причём вторая конструкция оптического волновода выполнена с возможностью перемещения в упомянутой второй плоскости относительно упомянутой первой конструкции оптического волновода согласно по меньшей мере заданному направлению перемещения, чтобы сформировать перемещающуюся часть упомянутого двигателя в заданной базовой системе координат двигателя,

при этом упомянутое заданное расстояние вертикального расположения в виде стопки выполнено с возможностью установления связи оптических мод колебаний на основе затухающей волны между по меньшей мере одним первым оптическим резонатором упомянутой первой конструкции оптического волновода и по меньшей мере одним вторым оптическим резонатором упомянутой второй конструкции оптического волновода в состоянии близости упомянутых первого и второго оптических резонаторов в плоскости, поперечной упомянутой первой и второй плоскостям, где происходит локальное перемещение упомянутой второй конструкции, причём упомянутый первый и второй оптические резонаторы выполнены с возможностью направления по меньшей мере одной резонансной симметричной моды колебаний на заданной первой длине волны или по меньшей мере одной резонансной антисимметричной моды колебаний на заданной второй длине волны, или по меньшей мере комбинации или суперпозиции по меньшей мере одной резонансной симметричной моды колебаний на заданной первой длине волны и по меньшей мере одной резонансной антисимметричной моды колебаний на заданной второй длине волны в зависимости от упомянутого расстояния вертикального расположения в виде стопки, а также расстояния между упомянутыми первым и вторым оптическими резонаторами в поперечной плоскости, и

при этом, когда избирательно устанавливается резонансная симметричная мода колебаний, устанавливается условие притяжения упомянутого второго оптического резонатора в направлении к упомянутому первому оптическому резонатору, которое

генерирует на упомянутой второй плоскости перемещение приближения второго оптического резонатора к первому оптическому резонатору, в соответствии с упомянутым заданным локальным направлением перемещения, или когда избирательно устанавливается резонансная антисимметричная мода колебаний, устанавливается условие отталкивания упомянутого второго оптического резонатора от упомянутого первого оптического резонатора, которое генерирует на упомянутой второй плоскости перемещения отклонение второго оптического резонатора от первого оптического резонатора, в соответствии с упомянутым заданным локальным направлением перемещения.

Раскрыт иллюстративный фотонный резонансный двигатель М предшествующего уровня техники, который содержит конструкцию из двух наборов волноводных фотонных резонаторов, оптически связанных друг с другом и имеющих одну и ту же ось вращения, которые взаимно вращаются благодаря генерируемым асимметричным оптическим силам, которые индуцируются с помощью резонансных явлений и показаны на фиг. 1a и 1b.

Оптико-механическая система фотонного резонансного двигателя М состоит из двух параллельных плоскостей, лежащих в непосредственной близости: плоскости ротора P_R , свободно вращающейся, и плоскости статора P_S , находящейся в состоянии покоя, изображенных на фиг. 1a и 1b.

Фотонный двигатель М содержит:

- по меньшей мере один вход S оптического излучения;
- первую конструкцию оптического волновода, включающую в себя по меньшей мере один, а предпочтительно множество первых оптических резонаторов 10, 20, 30, 40 и ведущий кольцевой резонатор MR, расположенный в плоскости статора для формирования статической части упомянутого двигателя в заданной базовой системе координат x, y, z двигателя;
- конструкцию оптического волновода для возбуждения, предпочтительно включающую в себя по меньшей мере один волновод WG1 оптической шины возбуждения, а в изображённом варианте осуществления изобретения включающий в себя пару волноводов WG1 и WG2 оптической шины возбуждения, связанных с упомянутой первой конструкцией оптического волновода на заданном расстоянии связи оптических мод колебаний от ведущего кольцевого резонатора MR или, в более общем смысле, по меньшей мере от одного первого оптического резонатора, и выполненных с возможностью приема по меньшей мере одного оптического излучения заданной длины волны от входа S оптического излучения и оптической связи упомянутого оптического излучения с упомянутым по меньшей мере одним первым оптическим резонатором;

- по меньшей мере вторую конструкцию оптического волновода, включающую в себя по меньшей мере один, а предпочтительно множество, вторых оптических резонаторов 10', 20', 30', 40', расположенных в плоскости ротора, параллельно плоскости статора, на заданном расстоянии расположения друг над другом, перпендикулярном упомянутой плоскости.

Вторая конструкция оптического волновода выполнена с возможностью перемещения в плоскости ротора относительно упомянутой первой конструкции оптического волновода, в соответствии по меньшей мере с заданным направлением перемещения, чтобы сформировать перемещающуюся часть двигателя М в заданной базовой системе координат x, y, z двигателя.

В показательном варианте осуществления изобретения, изображенном на фиг. 1а и 1б, плоскость статора содержит некоторое количество оптических кольцевых резонаторов 10, 20, 30, 40, расположенных в круговой геометрии и одновременно возбуждаемых через окружающий их ведущий кольцевой резонатор MR. Аналогичным образом плоскость ротора предпочтительно содержит такое же количество оптических кольцевых резонаторов 10', 20', 30', 40', расположенных таким же образом, как и в плоскости статора. Плоскости ротора и статора оптически связаны посредством затухающей связи между зеркально отображаемыми кольцевыми резонаторами.

Для некоторых входных длин волн возбуждения фотонный резонансный двигатель вращается, отслеживая длину волны оптического источника, благодаря оптико-механическому крутящему моменту, генерируемому посредством силы давления излучения, получаемой в результате связи между резонаторами статора и резонаторами ротора. Асимметричные оптические силы, связанные с резонансными симметричными и антисимметричными модами колебаний, возбуждающими кольца, создают полезный крутящий момент на роторе. Вариант осуществления фотонного резонансного двигателя показан на фиг. 1а, где схематически изображен вид сверху плоскости ротора и статора, и на фиг. 1б, где представлен трехмерный вид фотонного резонансного двигателя.

В отличие от этого, на фиг. 2а-с показаны поперечные сечения плоскости статора и плоскости ротора, когда они соединены посредством механического соединения, изготовленного из диоксида кремния (предположительно, это встроенный штифт на роторе и соответствующее посадочное гнездо на статоре, показанные на виде с пространственным разделением деталей на фиг. 2а), когда ротор находится в состоянии покоя (показан на фиг. 2б), а также при малых поворотах (θ) ротора относительно состояния покоя (показано на фиг. 2с).

В дальнейшем описывается пример реализации фотонно-резонансного двигателя, основанного на взаимодействии оптических резонаторов.

Базовый элемент (фундаментальная ячейка) фотонно-резонансного двигателя включает в себя два расположенных друг над другом волноводных кольцевых резонатора, связанных друг с другом посредством затухающей связи. Вертикальное расстояние между кольцами обозначено q , боковое расстояние между статорным кольцом и ведущим кольцом обозначено d , а боковое расстояние между ведущим кольцом и шинным волноводом обозначено g . Используя метод конечных элементов (FEM), можно найти связь между физическими параметрами q , d и g и долями оптических мощностей, которые регулируют спектральные характеристики фотонного резонансного двигателя.

Вся оптическая резонансная полость состоит из замкнутого контура из N пар расположенных вертикально друг поверх друга кольцевых резонаторов (CVSRR) с внутренним радиусом r , равномерно распределённых по периодическому круговому распределению с периодом $2\pi/N$ рад. Согласно раскрытому показательному варианту осуществления изобретения $N=4$ и, таким образом, четыре CVSRR взаимодействуют друг с другом только посредством замкнутого контура, состоящего из более широкого кольца, лежащего в плоскости статора (т.е. совпадающего с плоскостью, где расположены нижние кольца четырех CVSRR), называемого «ведущим кольцом», радиус R_{MR} которого выбран, вместе с q , так, чтобы избежать поперечного перекрестного взаимодействия между ведущим кольцом и кольцами ротора.

Ведущее кольцо возбуждается через один или два шинных волновода $WG1$ и $WG2$, лежащие в плоскости статора.

Фотонный двигатель можно оптически смоделировать с помощью способа матрицы переноса, способа матрицы рассеяния и теории связанных мод (CMT, coupled mode theory), как описано ниже, посредством анализа его базового элемента, состоящего из двух вертикально расположенных кольцевых резонаторов, то есть верхнего кольца, принадлежащего к плоскости ротора, а нижнего кольца, принадлежащего к плоскости статора, как проиллюстрировано на фиг. 3а.

Оптическая характеристика одной пары вертикально расположенных кольцевых резонаторов (VSRR) может быть получена с помощью теории связанных мод (CMT) и затем использована для построения матрицы передачи, связанной с этой парой (блоком).

Обозначив символом ζ криволинейную координату вдоль двух вертикально расположенных кольцевых резонаторов (VSRR), в зависимости от осей x , y в плоскости статора и ротора, амплитуды оптического сигнала, распространяющегося в нижнем и верхнем кольцах, соответственно составят $a_1(\zeta)$ и $a_2(\zeta)$. Зависимость этих двух амплитуд

от криволинейной координаты ζ можно смоделировать с помощью теории связанных мод (СМТ), которая представляет эти два связанных дифференциальных уравнения:

$$\frac{1}{d\zeta} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \frac{j\omega}{c} \begin{bmatrix} n_g & [n_{Sym}(q, \theta) - n_{Asym}(q, \theta)]/2 \\ [n_{Sym}(q, \theta) - n_{Asym}(q, \theta)]/2 & n_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} \beta & k(q, \theta) \\ k(q, \theta) & \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

где j - мнимая единица, ω - угловая частота (т.е. $2\pi c/\lambda$, где c - скорость света в вакууме, а λ - длина волны), n_{Sym} и n_{Asym} - эффективные индексы, соответственно связанные с симметричными и антисимметричными модами колебаний, а n_g — групповой индекс отдельно стоящего (невозмущенного) волновода. n_{Sym} и n_{Asym} можно оценить с помощью способа конечных элементов (FEM), рассматривая электромагнитное распределение оптического поля в поперечном сечении двух связанных волноводов, тогда как n_g является результатом электромагнитного анализа поперечного сечения невозмущенного отдельно стоящего волновода. Важно отметить, что n_{Sym} и n_{Asym} являются функциями расстояния ζ между сечениями двух связанных оптических волноводов, которое можно оценить, рассматривая расстояние между центрами двух вертикально расположенных кольцевых резонаторов (VSRR), как показано на фиг. 4.

Это расстояние ζ зависит от вертикального расстояния q между двумя VSRR и от угла θ поворота после фиксирования расстояния R между осью вращения и центрами колец. Другими словами, что касается структуры, изображенной на фиг. 1, с помощью изоляции одной пары VSRR на фиг. 4 кольцо ротора может поворачиваться на угол θ , таким образом воздействуя на распределение электромагнитного поля и, в свою очередь, на n_{Sym} и n_{Asym} . Таким образом, вращательная динамика системы рассматривается через вращательную зависимость n_{Sym} и n_{Asym} в уравнении (1). В третьем члене уравнения (1), β — постоянная распространения невозмущенного волновода (т.е. $\beta = 2\pi n_{eff}/\lambda = \omega n_{eff}/c$), k — постоянная распространения, зависящая от q и θ и связанная с комбинацией n_{Sym} и n_{Asym} .

Если пренебречь потерями распространения, то двумя общими решениями $a_1(\zeta)$ и $a_2(\zeta)$ системы, описываемыми с помощью уравнения (1), являются:

$$\begin{bmatrix} a_1(\zeta) \\ a_2(\zeta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k(q, \theta)\zeta) \exp\left(j\beta\zeta - \frac{\alpha}{2}\zeta\right) & j \sin(k(q, \theta)\zeta) \exp\left(j\beta\zeta - \frac{\alpha}{2}\zeta\right) \\ j \sin(k(q, \theta)\zeta) \exp\left(j\beta\zeta - \frac{\alpha}{2}\zeta\right) & \cos(k(q, \theta)\zeta) \exp\left(j\beta\zeta - \frac{\alpha}{2}\zeta\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1(0) \\ a_2(0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Две амплитуды $a_1(0)$ и $a_2(0)$ могут быть определены с помощью наложения граничных условий. Первое граничное условие:

$$a_2(L) = a_2(0) \quad (3)$$

Уравнение (3) является условием замкнутости вследствие круглой формы и вследствие того условия, что верхнее кольцо соединено только с нижним кольцом, а не с

ведущим кольцом. L — средний периметр каждого кольца пары вертикально расположенных кольцевых резонаторов (VSRR), (т.е. $L=2\pi r$).

Предполагая наличие единственного источника возбуждения (т.е. E_{i1} на фиг. 3b)), связь между ведущим кольцом и одним из нижних колец моделируется следующей матрицей передачи:

$$\begin{bmatrix} E \\ a_1(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & jh \\ jh & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i1} \\ a_1(0) \end{bmatrix} \quad (4)$$

где E_{i1} — амплитуда сигнала на ведущем кольце до взаимодействия с парой резонаторов VSRR, а E_t — амплитуда сигнала на ведущем кольце после взаимодействия с парой резонаторов VSRR (см. фиг. 3а)). Второе уравнение системы уравнений (4) определяет второе граничное условие как:

$$a_1(L) = \frac{a_1(0) - jhE}{r} \quad (5)$$

С помощью наложения двух граничных условий (уравнения (3) и (5)) на систему уравнений в уравнениях (2), получаем:

$$a_1(L) = -\frac{jhe^{j\beta L} [e^{j\beta L} - \cos(k(q,\theta)L)]}{1 + \tau e^{2j\beta L} - (1-\tau)e^{j\beta L} \cos(k(q,\theta)L)} E_{i1} \quad (6)$$

При фиксировании порядка резонанса m , условия резонанса (полученные посредством приравнивания знаменателя уравнения (6) к нулю) возникают при $\omega \approx \omega_{\pm}^m$, где ω_{+}^m симметричная резонансная частота, а ω_{-}^m — антисимметричная резонансная частота. Эти резонансы представляют собой комбинации различий между n_{Sym} и n_{Asym} , а их выражения имеют следующий вид:

$$\omega_{\pm}^m \approx \omega_m \mp \frac{\omega_m (n_{\text{Asym}}(q,\theta) - n_{\text{Sym}}(q,\theta))}{2n_g} \pm \frac{\omega_m}{n_g} \left(\frac{\Delta\omega}{\omega} - \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right) = \omega_m \pm \frac{\lambda_m}{n_g} k(q,\theta) \quad (7)$$

где ω^m резонансная частота (λ_m является резонансной длиной волны) единственного кольцевого резонатора (в плоскости статора), возникающая, когда расстояние между двумя вертикально расположенными кольцевыми резонаторами (VSRR) достаточно велико, чтобы избежать взаимодействия между ними.

ω^m (λ_m) определяется выражением:

$$\omega_m = \frac{2\pi m}{L} \rightarrow \lambda_m = \frac{L}{m} \quad (8)$$

Условие резонанса соответствует условию, при котором $\omega L/c=2\pi m$, где m соответствует порядку резонанса. Объединив уравнения (4) и (6), мы получаем амплитуду оптического поля, передаваемого на ведущее кольцо через пару резонаторов VSRR, как:

$$t(\lambda, q, \theta) = \frac{E_t}{E_{in}} = \tau + \frac{h^2 e^{j\beta(\lambda)L} [e^{j\beta(\lambda)L} - \cos[k(q, \theta)L]]}{1 + \tau e^{2j\beta(\lambda)L} - (1 - \tau) e^{j\beta(\lambda)L} \cos[k(q, \theta)L]} \quad (9)$$

Модель была проверена с помощью способа конечных разностей во временной области в трёхмерном пространстве (3D-FDTD).

Оптические волноводные структуры, образующие кольцевые резонаторы и два шинных волновода фотонного резонансного двигателя, предпочтительно представляют собой кремниевые проволоки (показатель преломления кремния $n_{Si} = 3,45$), характеризующиеся сечением шириной $W = 500$ нм и высотой $H = 300$ нм. Кремниевые кольцевые резонаторы ротора и кремниевые кольцевые резонаторы статора закреплены на двух дисках из диоксида кремния (показатель преломления $n_{SiO_2} = 1,46$), принадлежащих двум различным кремниевым подложкам. Две различные плоскости ротора и статора соединены с помощью механического соединения, изготовленного из диоксида кремния (предполагается, что это встроенный штифт на роторе и соответствующее утопленное гнездо на статоре) и окружены воздухом ($n_{air} = 1$).

Волноводные компоненты предпочтительно реализуются с использованием технологии кремниевой фотоники, позволяющей добиться предельной миниатюризации интегрированных оптических устройств и, таким образом, улучшить оптико-механические эффекты благодаря сильному взаимодействию света с веществом, которое можно использовать в качестве фундаментальной стратегии для достижения наилучших рабочих характеристик фотонно-резонансного двигателя.

В частном случае пары вертикально расположенных кольцевых резонаторов рассматривается сетка собственных значений, полученных посредством нахождения резонансных длин волн, обнуляющих знаменатель уравнения (9). На фиг. 5а изображена динамика расщепления моды, когда $\theta = 0$ [рад] и q , вертикальное расстояние, является свободным параметром (т.е. два вертикально расположенных кольцевых резонатора (VSRR) могут свободно перемещаться в осевом направлении). Для простоты мы можем переименовать $k(q, 0)$ в $k(q)$, и в результате асимметричные резонансы, связанные с расщеплением мод, будут определяться следующим образом:

$$\lambda_{\pm}^m(q) \approx \lambda_m \pm \frac{\lambda_m}{n_g} k(q) \quad (10)$$

Фиксируя $q=q^*$ (т.е. с помощью фиксирования расстояния, связанного с вертикальной связью, чтобы работать в условиях ниже состояния «захвата», как раскрыто

у П.Т. Ракича, М.А. Поповича, М. Солячича и Е.П. Иппена, «Захват, объединение и спектральное связывание оптических резонансов посредством оптически индуцированных потенциалов», “Trapping, corralling and spectral bonding of optical resonances through optically induced potentials”, Nat. Photonics 1(11), 658–665 (2007), что соответствует пересечению двух асимметричных резонансов двух смежных резонансных порядков) и учитывая возможность роторного кольца свободно вращается на угол θ по отношению к кольцу статора, динамику расщепления мод вращающейся конструкции можно оценить с помощью уравнения:

$$k(q^*, \theta) = [n_{\text{sym}}(q^*, \theta) - n_{\text{asym}}(q^*, \theta)] / 2.$$

Интуитивно понятно, что в отношении варианта осуществления фотонного двигателя на фиг. 1, характеризующегося четырьмя парами вертикально расположенных кольцевых резонаторов (VSRR), распределённых в виде круговой конструкции, то же самое условие расщепления мод, которое возникает при $\theta = 0$ в одной паре VSRR, будет возникать для $\theta = 2\pi r/N$ (r — целое число, а N — общее количество пар VSRR, как проиллюстрировано на фиг. 5b).

При угловых условиях $\theta = (2p+1)\pi/N$ кольцевой резонатор ротора полностью развязан со всеми кольцевыми резонаторами статора, и обмен электромагнитной энергией между кольцевыми резонаторами ротора и статора не происходит. В спектре пропускания это условие визуально проявляется как исчезновение расщепления мод, поскольку две резонансные линии совпадают с резонансной линией отдельно стоящего кольцевого резонатора статора ($\lambda_{\pm}^m \approx \lambda_m$). Кроме того, в силу непрерывности собственных значений и вращательной симметрии, т.е. $\lambda_{\pm}^m(\theta^*) = \lambda_{\pm}^m(-\theta^*)$, динамика расщепления мод характеризуется минимумами, смещёнными при $\lambda_{\pm}^m \approx \lambda_m$ для углов $\theta = (2p+1)\pi/N$, а максимумы смещены при:

$$\lambda_{\pm}^m \approx \lambda_m \pm \frac{\lambda_m}{n_g} k(q^*) \quad (11)$$

для углов $\theta = 2\pi r/N$. В частности, динамика вращательного расщепления мод определяется уравнением:

$$\lambda_{\pm}^m(\theta) \approx \lambda_m \pm \frac{\lambda_m}{n_g} [n_{\text{sym}}(q^*, \theta) - n_{\text{asym}}(q^*, \theta)] / 2 \quad (12)$$

Условия, выраженные через уравнения. (10) – (12) графически представлены на фиг. 5, где динамика расщепления мод представлена применительно к одной паре вертикально расположенных кольцевых резонаторов (VSRR). На фиг. 5a расстояние q между кольцами является переменным, а угол поворота θ равен нулю; в то время как на

фиг. 5b всё по-другому, где угол поворота между кольцами θ варьируется от 0 до 2π , а q является фиксированным и равным q^* .

Теперь вернёмся к рассмотрению геометрической конструкции, представленной на фиг. 4, где ξ — расстояние между двумя центрами двух колец одной пары кольцевых резонаторов VSRR, $q=q^*$ — фиксированное вертикальное расстояние между двумя VSRR, R — расстояние между осью вращения и центрами VSRR, θ — угол поворота кольца ротора относительно соответствующего статорного кольца, а нулевой опорный угол для вращений ($\theta = 0$) предполагается в конфигурации идеального вертикального расположения друг поверх друга, следующее описание предполагает истинность для малых углов поворота вблизи $\theta = 0$ и θ , увеличивающегося только в положительном направлении ($d\theta > 0$, т.е. всегда сохраняющего одно и то же направление вращения).

Физические параметры оптических резонаторов, в том числе геометрические характерные особенности волноводных колец и их поперечных сечений, сходятся в эквивалентную концентрированную точку, совпадающую с геометрическим центром каждого кольцевого резонатора (расположенного на расстоянии R от оси вращения). При этом предположении оптико-механическая теория фокусируется на модели с сосредоточенными параметрами, позволяющей изучать взаимные силы, действующие вдоль перемещающейся линии, соединяющей эти точки (т.е. см. P_S и P_R , эквивалентные точки статора и ротора на фиг. 6a).

Механическим поведением фотонного резонансного двигателя управляет оптико-механическая сила F_ξ , обусловленная усиленным резонатором излучаемым давлением, действующим между P_S и P_R . При этом F_ξ может быть получена с помощью квантового аргумента или классического аргумента, поскольку это сила, генерируемая между двумя слабосвязанными резонаторами, как описано М. Л. Повинелли, Стивеном Дж. Джонсоном, Марко Лончаром, Михаем Ибанеску, Элизабет Дж. Смайт, Федерико Капассо и Дж. Д. Джоаннопулос, «Высокодобротное усиление оптических сил притяжения и отталкивания между связанными резонаторами моды типа шепчущей галереи», «High-Q enhancement of attractive and repulsive optical forces between coupled whispering-gallery-mode resonators», Opt. Express 13, 8286-8295 (2005). Его выражение определяется следующим образом:

$$F_\xi = -\frac{1}{\omega_0^2} \frac{d(\Delta\omega)}{d\xi} PQ_m \quad \begin{matrix} \omega = \frac{2\pi c}{\lambda} \rightarrow \delta\omega = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \delta\lambda \rightarrow \Delta\omega = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \Delta\lambda \\ \rightarrow \end{matrix} \quad F_\xi = \frac{1}{2\pi c} \frac{d(\Delta\lambda)}{d\xi} PQ_m \quad (17)$$

где P является оптической мощностью, циркулирующей в одной паре вертикально расположенных кольцевых резонаторов (VSRR), и P определяется выражением:

$$P_i = P_i E_{i\lambda} \quad (18)$$

где P_i является мощностью входного источника (например, лазера) а E_N - коэффициент повышения мощности (уравнение 16);

и где Q_m является добротностью отдельно стоящего кольцевого резонатора, отнесённая к m -му порядку резонанса, которую можно оценить для угловых условий $\theta = (2p+1)\pi/N$ (условие отсутствия связи).

Резонансная электромагнитная энергия U_r , запасённая в одном кольце статора, определяется выражением:

$$U_r = \frac{\lambda_m}{2\pi c} PQ_m \quad (19)$$

В предположении малых углов поворота вблизи нулевого опорного угла вместо длины хорды можно рассматривать линейризованное расстояние $R\theta$ (соответствующее проекции расстояния ξ на плоскость x - y , см. фиг. 6б и фиг. 4а). Таким образом, ξ можно выразить как:

$$\xi = \sqrt{R^2\theta^2 + q^{*2}} \quad (20)$$

С учётом уравнения (20) и уравнения (21), $\Delta\lambda(\theta) = \lambda_m^{\pm}(\theta) - \lambda_m$ где $d(\Delta\lambda(\theta)) = d(\lambda_m^{\pm}(\theta)) \approx d(\lambda_{pm}^{\pm}(\theta))$, уравнение (17) может быть выражено как:

$$F_{\xi} \approx \frac{1}{2\pi c} \frac{d(\Delta\lambda(\theta))}{d(\xi(\theta))} PQ_m = \frac{1}{2\pi c} \frac{d(\Delta\lambda(\theta))}{d\theta} \frac{d\theta}{d(\xi(\theta))} PQ_m \approx \pm \frac{r\sqrt{R^2\theta^2 + q^{*2}}}{2R^2\theta mc} \frac{d(n_{Sym}(\theta) - n_{Asym}(\theta))}{d\theta} PQ_m \quad (21)$$

Мы традиционно определяем как отрицательные силы притяжения, связанные с симметричной резонансной линией, и как положительные силы отталкивания, связанные с антисимметричной резонансной линией. Таким образом, F_{ξ} может быть выражено как $F_{\xi\lambda^+}$ и $F_{\xi\lambda^-}$, для симметричной и антисимметричной резонансной линии, т.е., λ_{pm}^+ and λ_{pm}^- , соответственно:

$$F_{\xi\lambda^+} = - \frac{r\sqrt{R^2\theta^2 + q^{*2}}}{2R^2\theta mc} \frac{d(n_{Sym}(\theta) - n_{Asym}(\theta))}{d\theta} PQ_m \quad [N] \quad (22)$$

$$F_{\xi\lambda^-} = + \frac{r\sqrt{R^2\theta^2 + q^{*2}}}{2R^2\theta mc} \frac{d(n_{Sym}(\theta) - n_{Asym}(\theta))}{d\theta} PQ_m \quad [N] \quad (23)$$

Вследствие приведения к эквивалентной системе с сосредоточенными параметрами, $F_{\xi\lambda^+}$ и $F_{\xi\lambda^-}$ действуют вдоль ξ (т.е. перемещающейся линии, соединяющей центры связанных колец статора и ротора.). Что касается угла γ (см. фиг. 6б), то он определяется как:

$$\gamma = \arctg\left(\frac{R|\theta|}{q^*}\right) \quad (24)$$

две частные проекции общей силы $F_{\xi\lambda^{+(-)}}$, которые учитываются как осевая составляющая, $F_{z\lambda^{+(-)}}$ и тангенциальная составляющая $F_{\theta\lambda^{+(-)}}$, определяются выражениями:

$$F_{z\lambda^{+(-)}} = F_{\xi\lambda^{+(-)}} \cos(\gamma) [N] \quad (25)$$

$$F_{\theta\lambda^{+(-)}} = F_{\xi\lambda^{+(-)}} \sin(\gamma) [N] \quad (26)$$

$F_z \lambda^{+(-)}$ уравнивается силами реакции, определяемыми внешней рамой, в то время как $F_\theta \lambda^{+(-)}$ вызывает перемещение ротора.

Что касается конкретной конфигурации фотонного двигателя, показанной на фиг. 1 и 2, где $N = 4$, на фиг. 7 кривая, представляющая распределение оптико-механической силы для симметричной резонансной линии λ^+ (см. сетку собственных значений на фиг. 5b) представлена как функция угла поворота. Распределение оптико-механической силы для антисимметричной резонансной линии λ^- инвертировано по отношению к симметричной и для простоты не приводится.

Крутящий момент $C_1(\theta)$, оказываемый одной парой связанных колец и действующий на ротор, вычисляется посредством умножения значения тангенциальной силы $F_{\theta \lambda^{+(-)}}$ на расстояние R от точки P_R до оси вращения. Как указывалось ранее, это предположение (подразумевающее перпендикулярные направления для $F_{\theta \lambda^{+(-)}}$ и R) приемлемо при рассмотрении малых углов поворота вблизи нулевого опорного угла:

$$C_1(\theta) = F_{\theta \lambda^{+(-)}} \cdot R [Nm] \quad (27)$$

В представленной конфигурации ($N=4$ CVSRRs, равномерно распределены через 2π rad), N синфазные функции можно суммировать, чтобы получить общий крутящий момент $C(\theta)$:

$$C(\theta) = N \cdot C_1(\theta) [Nm] \quad (28)$$

Легко заметить, что общий крутящий момент линейно увеличивается с увеличением динамического параметра $F_{\theta \lambda^{+(-)}}$ и топологических/геометрических параметров N и R .

На фиг. 8 показано оптико-механическое распределение крутящего момента для симметричной резонансной линии λ^+ в зависимости от угла θ поворота.

Одной из технологий с использованием средств управления, которые можно использовать для поддержания вращения в такой системе и извлечения полезного крутящего момента из ротора, является синхронизация по времени: при работе с симметричной резонансной линией (силами притяжения) требуется сохранять (лазерный) источник активным только во время фазы приближения и выключать его, когда кольца ротора находятся в идеальном состоянии вертикального расположения в виде стопки с соответствующими кольцами статора. После этой фазы вследствие сил инерции, ротор

будет продолжать своё перемещение до тех пор, пока не достигнет следующего состояния связи затухающей волны с другим кольцом статора.

Альтернатива этой технологии с использованием средств управления состоит в работе с антисимметричной резонансной линией (силами отталкивания), включении (лазерного) источника только тогда, когда кольца ротора находятся в идеальном состоянии вертикального расположения друг поверх друга с соответствующими кольцами статора, и поддержании его во включенном состоянии в течение всей фазы выхода, пока оптическая связь между противостоящими кольцами не спадёт.

Другой способ состоит в использовании комбинации предыдущих вариантов, обеспечивающей переход от притяжения (во время фазы приближения) к отталкиванию (во время фазы выхода из сферы притяжения).

Более сложная, но эффективная технология, которую можно применить для получения полного управления перемещением, представляет собой пошаговую архитектуру: рассматривая, в качестве примера, симметричную резонансную линию (силы притяжения) одного статорного кольца, когда оно является активным, которое притягивает ближайшее кольцо ротора до тех пор, пока оно не будет удерживаться в локальном нулевом положении (условие вертикального расположения в виде стопки). Для получения второго перемещения (этапа) приводной блок выключает предыдущее статорное кольцо и активирует следующее. Вышеупомянутое кольцо ротора покидает своё фактическое положение, поскольку его притягивает другое кольцо статора, и тянет весь ротор до тех пор, пока он не достигнет нового положения стабилизации. Этот механизм повторяется (даже в обоих направлениях вращения) в соответствии с действиями, предписываемыми приводным блоком.

Фотонный двигатель этого типа, описанный в предшествующем уровне техники, имеет невыгодную высокую технологическую сложность вследствие необходимости строить ротор и статор на разных подложках с использованием технологий, которые ещё не утвердились в области микрообработки на кремнии. Кроме того, возникают трудности с поддержанием фиксированного расстояния вертикального расположения в виде стопки между ротором и статором во время работы двигателя, поскольку во время работы двигателя механические колебания вне плоскости могут оказывать воздействие на расстояние вертикального расположения в виде стопки, что делает эксплуатационные характеристики двигателя неуправляемыми.

Задача настоящего изобретения состоит в том, чтобы создать планарный фотонный двигатель, который характеризуется меньшей технологической сложностью конструкции и эксплуатации.

Согласно настоящему изобретению, эта задача достигается с помощью фотонного двигателя, имеющего признаки п. 1 формулы изобретения.

Конкретные варианты осуществления изобретения являются предметом зависимых пунктов формулы изобретения, содержание которых является неотъемлемой частью настоящего описания.

В частности, изобретение относится к планарному фотонному двигателю, содержащему первую конструкцию оптических волноводов, включающую в себя множество первых оптических резонаторов, образующих статическую часть упомянутого двигателя или статора, и вторую конструкцию оптических волноводов, содержащую по меньшей мере один второй оптический резонатор, образующий подвижную часть упомянутого двигателя или ротора, которые лежат соответственно в первой и второй областях пространства общей плоскости, отделённых друг от друга заданным поперечным расстоянием связи, при этом вторая конструкция оптических волноводов выполнена с возможностью перемещения во второй области плоскости относительно первой конструкции оптических волноводов.

Расстояние поперечной связи выполнено с возможностью установления затухающей волновой связи оптических мод колебаний между по меньшей мере одним первым оптическим резонатором первой конструкции оптических волноводов и по меньшей мере одним вторым оптическим резонатором второй конструкции оптических волноводов в состоянии близости первого и второго оптических резонаторов, в результате чего создаётся состояние притяжения или отталкивания второго оптического резонатора к первому оптическому резонатору, и соответственно от него, что генерирует приближающееся или соответственно удаляющееся перемещение второго оптического резонатора к первому оптическому резонатору, и соответственно от первого оптического резонатора, в соответствии с заданным локальным направлением перемещения.

Изобретение также относится к узлу фотонного двигателя, включающему в себя множество элементарных блоков, каждый из которых содержит фотонный двигатель, как определено выше, причём упомянутые элементарные блоки механически соединены на плоскости или в трёхмерном объёме.

Настоящее изобретение основано на градиенте распределения электромагнитного поля, генерирующего оптические силы, вызывающие механические смещения в оптико-механических системах. Согласно аспекту изобретения, оптомеханическая система, в которой оптические силы генерируются предпочтительно посредством круговой конструкции резонаторов, лежащих в двух расположенных в одной плоскости областях пространства в относительном перемещении, предпочтительно вращательном

перемещении, и которая ведёт себя как фотонный резонансный двигатель. Фотонный резонансный двигатель представляет собой оптомеханическую вращающуюся систему с усовершенствованным резонатором, сконструированную с помощью динамики связанного резонатора, и предпочтительно может быть изготовлена как миниатюризированная система с использованием технологий кремниевой фотоники и кремниевой микрообработки. Находящиеся в стадии становления технологии производства полупроводников, такие как кремниевая фотоника, позволяют изготавливать оптико-механические микросистемы, в которых относительная интенсивность силы увеличивается с помощью миниатюрных размеров. Консолидированные технологии изготовления посредством микрообработки на кремнии позволяют построить сборочную и поддерживающую структуру двигателя, а также позволяют масштабировать конструкции структуры.

Вариант осуществления настоящего изобретения включает в себя фотонный резонансный двигатель, который использует фотонные резонансные структуры для преобразования электромагнитных сил с целью генерации полезной механической энергии. Такой фотонный резонансный двигатель может приводиться в действие посредством оптически индуцированной силы, генерируемой посредством отслеживания длины волны оптического сигнала (т.е. лазерного источника). В частности, конструкция оптически связанных оптических резонаторов, жёстко соединённых с одной и той же осью вращения, согласно аспекту изобретения, относительно вращается благодаря генерируемым асимметричным оптическим силам, возбуждаемым с помощью явления резонанса.

Фотонный резонансный двигатель по существу представляет собой двигатель, питаемый от источника когерентного излучения (т.е. лазерным лучом), возбуждающим структуру волноводов. Он представляет собой входной сигнал, который позволяет фотонам проникать в электромагнитный волновод, который возбуждает конструкцию оптических резонаторов, распределённых по двум расположенным в одной плоскости областям пространства, находящимся в относительном перемещении (например, скользящие плоскости, вращающиеся системы и т.д.). Хотя основные строительные блоки могут быть изготовлены в различных формах, раскрытый показательный вариант осуществления принимает круглую форму как для резонансных элементов, так и для перемещающихся областей пространства, причём одна из областей пространства, находящихся в относительном перемещении, является фиксированной, в то время как другая может свободно вращаться.

Согласно аспекту изобретения, фотонный двигатель может включать в себя один или более электромагнитных резонаторов. В частности, фотонный двигатель может включать в себя одну или более конструкций оптических резонаторов, оптически связанных через две расположенные в одной плоскости области пространства при относительном вращении. В этом варианте осуществления изобретения фотонный двигатель должен содержать по меньшей мере две области пространства общей плоскости, находящиеся в непосредственной близости: область роторного пространства, свободно вращающуюся, и область статорного пространства, находящуюся в фиксированном положении. Согласно аспекту изобретения, статорная область пространства содержит определенное количество оптических замкнутых путей, называемых в дальнейшем «кольцевыми резонаторами», которые могут быть предпочтительно, но не исключительно, расположены в круговой геометрии и возбуждаться через один или более внутренних или внешних электромагнитных резонаторов (ведущие электромагнитные резонаторы), такие как окружающий их ведущий кольцевой резонатор. Ведущий кольцевой резонатор может возбуждаться через один или несколько шинных волноводов (волноводы возбуждения). Роторная область пространства, аналогичным образом, содержит некоторое количество оптических кольцевых резонаторов, число которых связано с количеством кольцевых резонаторов, позиционируемых в статорной области пространства, предпочтительно расположенных так же, как в статорной области пространства. Расположенные в одной плоскости области пространства ротора и статора оптически связаны посредством затухающей связи. Асимметричные оптические силы, связанные с асимметричными резонансными модами колебаний, позволяют генерировать оптико-механический крутящий момент. Можно уловить импульс фотонов с помощью мультрезонансной системы, усиленной резонатором, и извлечь полезный оптико-механический крутящий момент.

Роторная и статорная области пространства могут быть построены из двух полупроводниковых электрокерамических пластин, изготовленных с использованием традиционных технологий микропроизводства, широко применяемых в фотонике и отрасли с передовой технологией МЭМС. Оптимальные механические условия, позволяющие обеспечить относительное вращение между ротором и статором, могут быть получены посредством принятия конкретных микромеханических решений, уже доступных в современном технологическом ландшафте.

Для правильно выбранных длин волн возбуждения фотонный резонансный двигатель пассивно вращается или поступательно перемещается с помощью отслеживания длины волны оптического источника, под действием крутящего момента, генерируемого с

помощью затухающей связи резонаторов в расположенных в одной плоскости областях пространства ротора и статора, тем самым генерируя оптически индуцированный крутящий момент. Асимметричные оптические силы, связанные с резонансными симметричными и антисимметричными модами колебаний, с помощью которых возбуждаются резонаторы, содержащиеся в фотонном двигателе, позволяют генерировать и использовать оптико-механический крутящий момент, который возникает между ротором и статором.

В дополнение к широкому спектру практических применений, некоторые из которых уже были упомянуты выше, фотонный резонансный двигатель демонстрирует, как физически возможно улавливать импульс фотонов с помощью оптической системы, усиленной резонатором, для извлечения оптико-механического крутящего момента из взаимодействия света с материей.

Фундаментальные строительные блоки фотонного резонансного двигателя состоят из оптических кольцевых резонаторов, принадлежащих соответственно статорной области пространства и роторной области пространства, взаимно связанных с помощью связи на затухающих волнах, в которых поперечное расстояние связи между расположенными в одной плоскости областями пространства статора и ротора, поперечное расстояние между ведущим кольцом и статорными кольцами, а также поперечное расстояние между ведущим кольцом и шинным волноводом (волноводом возбуждения) определяют распределение оптической мощности в каждом кольце, что, следовательно, определяет спектральные характеристики фотонного резонансного двигателя. Кольцевые резонаторы могут иметь или не иметь согласованные формы и размеры, а форма их колец может быть круглой, эллиптической или иметь форму любой другой замкнутой кривой. В общем варианте осуществления изобретения фотонный резонансный двигатель включает в себя пару колец, например концентрических, из кольцевых резонаторов N , M , например, но не исключительно, расположенных равномерно в круговом периодическом распределении соответственно с периодом $2\pi/N$, $2\pi/M$. Различное количество резонаторов между статорной областью пространства и роторной областью пространства полезно для определения дисбаланса сил. В предпочтительном варианте осуществления фотонный резонансный двигатель включает в себя, например, N пар кольцевых резонаторов, но не обязательно расположенных равномерно в круговом периодическом распределении с периодом $2\pi/N$. В другом варианте осуществления фотонный резонансный двигатель включает в себя две линейные конструкции, например, но не исключительно, из равного числа кольцевых резонаторов, равномерно расположенных в периодическом распределении.

Хотя с помощью волноводов могут поддерживаться два различных оптических моды колебаний (Quasi-TE и Quasi-TM), только основная мода колебаний (Quasi-TE) избирательно возбуждается некоторым количеством способов, например, посредством регулировки поляризации лазерного источника.

Предпочтительно, в случае принятия предшествующего уровня техники из области микрообработки на кремнии и построения ротора и статора на одной и той же подложке, получается полностью плоская структура фотонного двигателя, которая позволяет решить проблему управления двигателем в случае неплоских, выходящих за пределы плоскости механических колебаний. Эта архитектура оптико-механического исполнительного механизма является жизнеспособной оптико-механической альтернативой оптическим электростатическим приводам MEMS для применения в потребительских товарах (например, проекционных дисплеях, проекторах, ТВ-лазерах, пикопроекторах и системах автофокусировки), автомобилестроении (например, LiDAR), биомедицинских (например, микроэндоскопы), космических и телекоммуникационных (например, оптические переключатели) приложениях электростатических датчиков MEMS (включающих в себя, но не ограничиваясь этим, гироскопы и акселерометры), а также исполнительные механизмы MEMS (включающие в себя, но не ограничиваясь этим, микротурбины и микроклапаны).

Дополнительные характеристики и преимущества изобретения будут раскрыты более подробно в последующем описании предпочтительных вариантов осуществления, приведённых в качестве неограничивающего примера со ссылкой на прилагаемые чертежи, в которых:

фиг. 1-8 - описаны со ссылкой на предшествующий уровень техники;

фиг. 9 представляет собой схематический вид в перспективе первого варианта осуществления планарного фотонного резонансного двигателя, согласно изобретению;

фиг. 10 представляет собой схематический вид в перспективе второго варианта осуществления планарного фотонного резонансного двигателя, согласно изобретению; и

фиг. 11 показывает элементарную ячейку фотонного резонансного двигателя, показанного на фиг. 9 и 10.

Со ссылкой на фиг. 9 и 10 показано, как пара расположенных в одной плоскости конструкций резонансных оптических волноводов (фотонных резонаторов), соответственно первая конструкция статорных волноводов и вторая конструкция роторных волноводов, распределённых в двух расположенных в одной плоскости и оптически связанных областях пространства, перемещаются возвратно-поступательно вследствие эффекта асимметричных оптических сил, которые генерируются и вызываются

благодаря резонансным явлениям, подобным тем, которые описаны со ссылкой на предшествующий уровень техники. Специалист в данной области техники поймёт, что оптическое и оптико-механическое моделирование фотонного резонансного двигателя, описанное выше со ссылкой на конфигурации предшествующего уровня техники, также применимо к конфигурациям плоского фотонного резонансного двигателя с соответствующими адаптациями.

Оптомеханическая система фотонного резонансного двигателя M , являющаяся предметом настоящего изобретения, содержит две расположенные в одной плоскости области пространства, т.е. определённые в общей плоскости Π , лежащие в непосредственной близости: область Π_R ротора, свободно вращающуюся, и неподвижную область Π_S статора, изображённую на фиг. 9 и 10.

Фотонный двигатель M содержит:

- по меньшей мере один вход S оптического излучения (в варианте осуществления изобретения, показанном на фиг. 9, обеспечиваются два источника $S1$ и $S2$);

- первую конструкцию оптического волновода, включающую в себя по меньшей мере один, а предпочтительно множество первых оптических резонаторов R и ведущий кольцевой резонатор MR , расположенный в области Π_S статора общей плоскости для формирования статической части вышеупомянутого двигателя в заданной базовой системе координат x, y, z двигателя;

- конструкцию оптического волновода возбуждения, которая предпочтительно содержит по меньшей мере один волновод оптической шины возбуждения (волновод возбуждения) (в варианте осуществления, показанном на фиг. 9, обеспечиваются два волновода $WG1$ и $WG2$ оптической шины), соединённую с упомянутой первой конструкцией оптического волновода на заданном расстоянии связи оптической моды колебаний по отношению к ведущему кольцевому резонатору MR или, в более общем смысле, по меньшей мере к одному первому оптическому резонатору, и выполненную с возможностью приёма по меньшей мере одного оптического излучения заданной длины волны от входа оптического излучения и оптического соединения вышеупомянутого оптического излучения в упомянутый по меньшей мере один первый оптический резонатор;

- по меньшей мере одну вторую конструкцию оптического волновода, включающую в себя по меньшей мере один или предпочтительно множество вторых оптических резонаторов R' , расположенных в области Π_R ротора общей плоскости, концентрично или параллельно статорной области на заданном боковом расстоянии связи.

Вторая конструкция оптического волновода выполнена с возможностью перемещения в роторной области пространства относительно первой конструкции оптического волновода согласно по меньшей мере заданному направлению перемещения, чтобы сформировать подвижную часть двигателя M в заданной базовой системе координат x, y, z двигателя.

В показательном варианте осуществления изобретения, изображённом на фиг. 9, статорная область Π_S пространства содержит некоторое количество оптических кольцевых резонаторов R , расположенных в круговой геометрии и возбуждаемых одновременно через окружающий их ведущий кольцевой резонатор MR . Концентрически внутренняя роторная область Π_R пространства содержит равное количество согласованных оптических кольцевых резонаторов R' , расположенных таким же образом, как и статорная область Π_S пространства. Исключительно в качестве примера, пары резонаторов R и R' , которые сформированы таким образом, что все они являются радиально выровненными, радиальное смещение некоторых пар, при взаимном положении областей пространства статора и ротора, при этом другие пары радиально выровнены, возможно использовать для определения дисбаланса сил. Расположенные в одной плоскости области пространства ротора и статора оптически связаны посредством затухающей связи между расположенными поблизости кольцевыми резонаторами. Условие близости изменяется от 100 нм до примерно 1500 нм и зависит от радиуса колец: чем больше радиус, тем меньше расстояние затухающей связи. Кроме того, имеется возможность применения угла отклонения относительно радиального выравнивания резонаторов, который может изменяться от 1 до 10 градусов и служит для разбалансировки радиальных сил от тангенциальных сил.

Весь резонансный оптический резонатор состоит из замкнутого кольца из N пар поперечно связанных кольцевых резонаторов (LCRR). Ведущее кольцо возбуждается через один или два шинных волновода (волновода возбуждения) $WG1$ и $WG2$, лежащих в непосредственной близости от статорной области пространства. N пар LCRR взаимодействуют между собой только через замкнутое кольцо, образованное кольцом большего размера, лежащим в плоскости статора (совпадающей с плоскостью расположения наружных колец). Поперечное расстояние между статорным кольцом и ведущим кольцом MR обозначается буквой d , а поперечное расстояние между ведущим кольцом MR и расстоянием шинного волновода (волновода возбуждения) $WG1$ и $WG2$ обозначается буквой g . Используя способ конечных элементов (FEM), можно установить связь между физическими параметрами q, d и g , при этом могут быть найдены доли

оптических мощностей, регулирующие спектральные характеристики фотонного резонансного двигателя.

Согласно одному варианту, роторная область пространства расположена концентрически снаружи от статорной области пространства.

В показательном варианте осуществления изобретения, изображённом на фиг. 10, статорная область Π_S пространства содержит некоторое количество оптических кольцевых резонаторов R , расположенных в линейной геометрии и возбуждаемых одновременно через фланкирующий их линейный ведущий резонатор MR . Параллельная роторная область Π_R пространства содержит — в качестве примера, но не обязательно — равное количество оптических кольцевых резонаторов R' , расположенных таким же образом, как и статорная область пространства. Расположенные в одной плоскости области пространства ротора и статора оптически связаны посредством затухающей связи между расположенными поблизости кольцевыми резонаторами. Условие близости изменяется от 100 нм до примерно 1500 нм и зависит от радиуса колец: чем больше радиус, тем меньше расстояние затухающей связи.

Базовый элемент (элементарная ячейка) фотонного резонансного двигателя, согласно показательному варианту осуществления изобретения, показан на фиг. 11 и включает в себя два кольцевых резонатора R , R' направляемой волны, соединённых поперечно затухающим способом в локализованной области C , упомянутой области поперечного соединения, в которой поперечное расстояние между кольцами обозначено как q . Показанная конфигурация базового элемента представляет собой временную конфигурацию, в которой взаимное положение между двумя резонаторами R , R' , изменяемое в зависимости от перемещения области ротора относительно области статора, является положением максимальной близости, при этом центры кольцевых резонаторов ориентированы ортогонально к локальному направлению перемещения резонатора, принадлежащего роторной области пространства.

Фотонный двигатель, представленный на фигурах, может быть оптически смоделирован с помощью способа матрицы переноса, способа матрицы рассеяния и теории связанных мод (СМТ). Используя модель с сосредоточенными параметрами, оптико-механическая сила (давление излучения), регулирующая механическое поведение фотонного двигателя, выводится с помощью квантовой теории.

Сила F между двумя слабосвязанными резонаторами может быть получена из смещения ($\Delta\lambda$) резонансной длины волны, возникающего в результате вращения на угол θ вокруг оси, перпендикулярной плоскости, в которой расположены резонаторы. Сила F определяется выражением:

$$F = \frac{1}{2\pi c} \frac{d(\Delta\lambda(\theta))}{d\xi(\theta)} P Q_m$$

где ξ — расстояние между кольцом статора и кольцом ротора, соответствующее углу θ . Q_m — добротность одного кольца ротора/статора (связанная с m -м порядком резонанса), а P — оптическая мощность, циркулирующая в резонаторах.

P определяется как $P_i E_N$, где P_i — входная мощность лазера, а E_N — коэффициент повышения мощности благодаря наличию ведущего резонатора, который позволяет обеспечить рециркуляцию фотонов в резонаторах.

Резонансная электромагнитная энергия, запасённая в кольцевом резонаторе статора, равна $PQ\lambda_m/2\pi c$ ($\lambda_m = 2\pi r/n_{\text{eff}}$, где r - радиус кольца статора/ротора, а n_{eff} - эффективный показатель преломления отдельного поперечного сечения волновода кольца статора/ротора). Q_m можно оценивать в одном кольцевом резонаторе статора/ротора без возмущения, связанного с наличием другого кольца ротора/статора, и вычислять при угле $\theta = \pi r/N$ вращения (r представляет собой целое число, а N представляет собой общее количество пар резонаторов в варианте осуществления изобретения, в котором количество резонаторов статора равно количеству резонаторов ротора). Асимметричные оптические силы F , связанные с симметричными и асимметричными резонансными модами колебаний, посредством возбуждения резонаторов фотонного двигателя позволяют генерировать перемещение роторной области пространства относительно статорной области пространства и использовать сгенерированное перемещение с помощью оптико-механических средств.

Естественно, не затрагивая принципа изобретения, варианты его осуществления могут отличаться от тех, которые были описаны посредством неограничивающих примеров, не выходя за пределы объёма защиты, определённого прилагаемой формулой изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Фотонный двигатель, содержащий:

по меньшей мере один ввод оптического излучения;

первую конструкцию оптического волновода, включающую в себя множество первых оптических резонаторов для образования статической части упомянутого двигателя в заданной базовой системе координат двигателя;

конструкцию оптического волновода для возбуждения, связанную с упомянутой первой конструкцией оптического волновода на заданном расстоянии связи оптических мод колебаний по меньшей мере с одним первым оптическим резонатором и выполненную с возможностью приёма по меньшей мере одного оптического излучения заданной длины волны от упомянутого по меньшей мере одного входа оптического излучения и оптической связи упомянутого оптического излучения с упомянутым по меньшей мере одним первым оптическим резонатором;

по меньшей мере вторую конструкцию оптическую волновода, содержащую по меньшей мере один второй оптический резонатор, выполненный с возможностью перемещения относительно упомянутой первой конструкции оптического волновода в соответствии по меньшей мере с одним заданным направлением перемещения, для образования подвижной части упомянутого двигателя в заданной базовой системе координат двигателя,

отличающийся тем, что упомянутая первая конструкция оптического волновода и упомянутая вторая конструкция оптического волновода лежат соответственно в первой и второй областях пространства, находящихся в общей плоскости, взаимно разделённые заданным поперечным расстоянием связи, и вторая конструкция оптического волновода выполнена с возможностью перемещения в упомянутой второй области пространства,

упомянутое заданное поперечное расстояние связи выполнено с возможностью установления связи оптических мод колебаний по затухающей волне между по меньшей мере одним первым оптическим резонатором упомянутой первой конструкции оптического волновода и по меньшей мере одним вторым оптическим резонатором упомянутой второй конструкции оптического волновода в состоянии близости упомянутых первого и второго оптических резонаторов в плоскости в результате локального перемещения упомянутой второй конструкции оптического волновода в соответствующей второй области пространства, и

упомянутые по меньшей мере первый и второй оптические резонаторы выполнены с возможностью направления одной основной резонансной симметричной моды колебаний на заданной первой длине волны и одной основной резонансной

антисимметричной моды колебаний на заданной второй длине волны в зависимости от упомянутого поперечного расстояния связи, а также расстояния между упомянутыми первым и вторым оптическими резонаторами в плоскости,

при этом, когда избирательно установлена основная резонансная симметричная мода колебаний, создаётся состояние притяжения упомянутого второго оптического резонатора по отношению к упомянутому первому оптическому резонатору, что генерирует в упомянутой второй области пространства на упомянутой плоскости перемещение приближения второго оптического резонатора к первому оптическому резонатору в соответствии с заданным локальным направлением перемещения, а когда избирательно установлена основная резонансная антисимметричная мода колебаний, создаётся условие отталкивания упомянутого второго оптического резонатора от упомянутого первого оптического резонатора, которое генерирует во второй области пространства в упомянутой плоскости перемещение удаления второго оптического резонатора от первого оптического резонатора в соответствии с заданным локальным направлением перемещения,

фотонный двигатель дополнительно содержит средство управления, выполненное с возможностью управления по меньшей мере одним параметром излучения от упомянутого по меньшей мере одного входа оптического излучения, чтобы избирательно устанавливать упомянутую симметричную и антисимметричную моду,

при этом упомянутое средство управления выполнено с возможностью синхронного управления длиной волны излучения от упомянутого входа оптического излучения так, чтобы избирательно переключаться с основной резонансной симметричной моды колебаний на основную резонансную антисимметричную моду колебаний, когда упомянутый по меньшей мере один второй оптический резонатор вдоль упомянутого заданного направления перемещения во второй области пространства упомянутой общей плоскости находится вблизи условия максимальной близости или вблизи упомянутого бокового расстояния связи по отношению к первому оптическому резонатору в первой области пространства упомянутой общей плоскости.

2. Фотонный двигатель по п. 1, в котором параметр излучения от упомянутого входа оптического излучения представляет собой по меньшей мере одно из: длины волны упомянутого излучения, распределения во времени включения/выключения упомянутого излучения, мощности упомянутого излучения.

3. Фотонный двигатель по п. 1 или 2, в котором упомянутая первая конструкция оптического волновода содержит множество первых оптических резонаторов, расположенных вдоль по меньшей мере одного заданного пути в первой области

пространства упомянутой общей плоскости, а упомянутая вторая конструкция оптического волновода содержит множество вторых оптических резонаторов, расположенных вдоль по меньшей мере одного заданного пути во второй области пространства упомянутой общей плоскости.

4. Фотонный двигатель по п. 3, в котором упомянутые средства управления выполнены с возможностью автоматического управления по меньшей мере одним параметром излучения от упомянутого по меньшей мере одного входа оптического излучения, чтобы избирательно устанавливать основную резонансную симметричную моду колебаний, когда положение упомянутого по меньшей мере одного второго оптического резонатора вдоль упомянутого по меньшей мере одного заданного пути во второй области пространства упомянутой общей плоскости отстаёт от положения связанного с ним первого оптического резонатора первой области пространства упомянутой общей плоскости согласно упомянутому заданному направлению перемещения, и основную резонансную антисимметричную моду колебаний, когда положение упомянутого по меньшей мере одного второго оптического резонатора вдоль упомянутого по меньшей мере одного заданного пути во второй области пространства упомянутой общей плоскости опережает положение упомянутого связанного с ним первого оптического резонатора первой области пространства упомянутой общей плоскости согласно упомянутому заданному направлению перемещения.

5. Фотонный двигатель по п. 3, в котором упомянутый по меньшей мере один заданный путь в первой области пространства упомянутой общей плоскости и упомянутый по меньшей мере один заданный путь во второй области пространства упомянутой общей плоскости являются замкнутыми путями.

6. Фотонный двигатель по п. 5, в котором упомянутые замкнутые пути представляют собой круговые пути.

7. Фотонный двигатель по п. 5 или 6, в котором замкнутый путь вторых оптических резонаторов в упомянутой второй конструкции оптического волновода является соосным замкнутому пути первых оптических резонаторов в упомянутой первой конструкции оптического волновода.

8. Фотонный двигатель по п. 3, в котором упомянутый по меньшей мере один заданный путь в первой области пространства упомянутой общей плоскости и упомянутый по меньшей мере один заданный путь во второй области пространства упомянутой общей плоскости являются прямолинейными путями.

9. Фотонный двигатель по п. 3, в котором упомянутые оптические резонаторы расположены равномерно вдоль упомянутых заданных путей.

10. Фотонный двигатель по любому пп. 1-9, в котором упомянутые первый и второй оптические резонаторы являются кольцевыми резонаторами, предпочтительно круговыми кольцевыми резонаторами.

11. Фотонный двигатель по п. 10, в котором упомянутые первые оптические резонаторы содержат подгруппу кольцевых резонаторов с избирательным возбуждением и по меньшей мере один ведущий кольцевой резонатор возбуждения.

12. Фотонный двигатель по п. 11, в котором упомянутая подгруппа первых кольцевых резонаторов и упомянутые вторые кольцевые резонаторы имеют одинаковый диаметр.

13. Фотонный двигатель по любому из пп. 1-12, в котором упомянутые первый и второй оптические резонаторы представляют собой оптические резонаторы моды типа шепчущей галереи.

14. Фотонный двигатель по любому из пп. 1-13, в котором упомянутое заданное поперечное расстояние связи между первой областью пространства и второй областью пространства упомянутой общей плоскости основано по меньшей мере на одном из: первой длины волны оптического излучения от упомянутого входа оптического излучения, материалов упомянутых оптических резонаторов, геометрических характеристик упомянутых оптических резонаторов.

15. Фотонный двигатель по любому из пп. 1-14, в котором упомянутая конструкция оптического волновода возбуждения содержит по меньшей мере один оптический волновод возбуждения, расположенный в одной плоскости с упомянутой первой конструкцией оптического волновода.

16. Фотонный двигатель по п. 15, в котором упомянутая первая конструкция оптического волновода включает в себя множество первых оптических резонаторов, расположенных вдоль по меньшей мере одного заданного кругового пути в первой области пространства упомянутой общей плоскости, и упомянутый по меньшей мере один оптический волновод возбуждения проходит вдоль пути, по меньшей мере частично бокового по отношению к упомянутому по меньшей мере одному круговому пути.

17. Фотонный двигатель по п. 15, в котором упомянутая первая конструкция оптического волновода содержит множество первых оптических резонаторов, расположенных вдоль заданного прямолинейного пути в первой области пространства упомянутой общей плоскости, и упомянутый по меньшей мере один оптический волновод возбуждения проходит вдоль пути, который является боковым по отношению к упомянутому прямолинейному пути.

18. Фотонный двигатель по любому из пп. 1-17, в котором упомянутый вход оптического излучения представляет собой по меньшей мере один источник когерентного излучения или связан по меньшей мере с одним источником когерентного излучения.

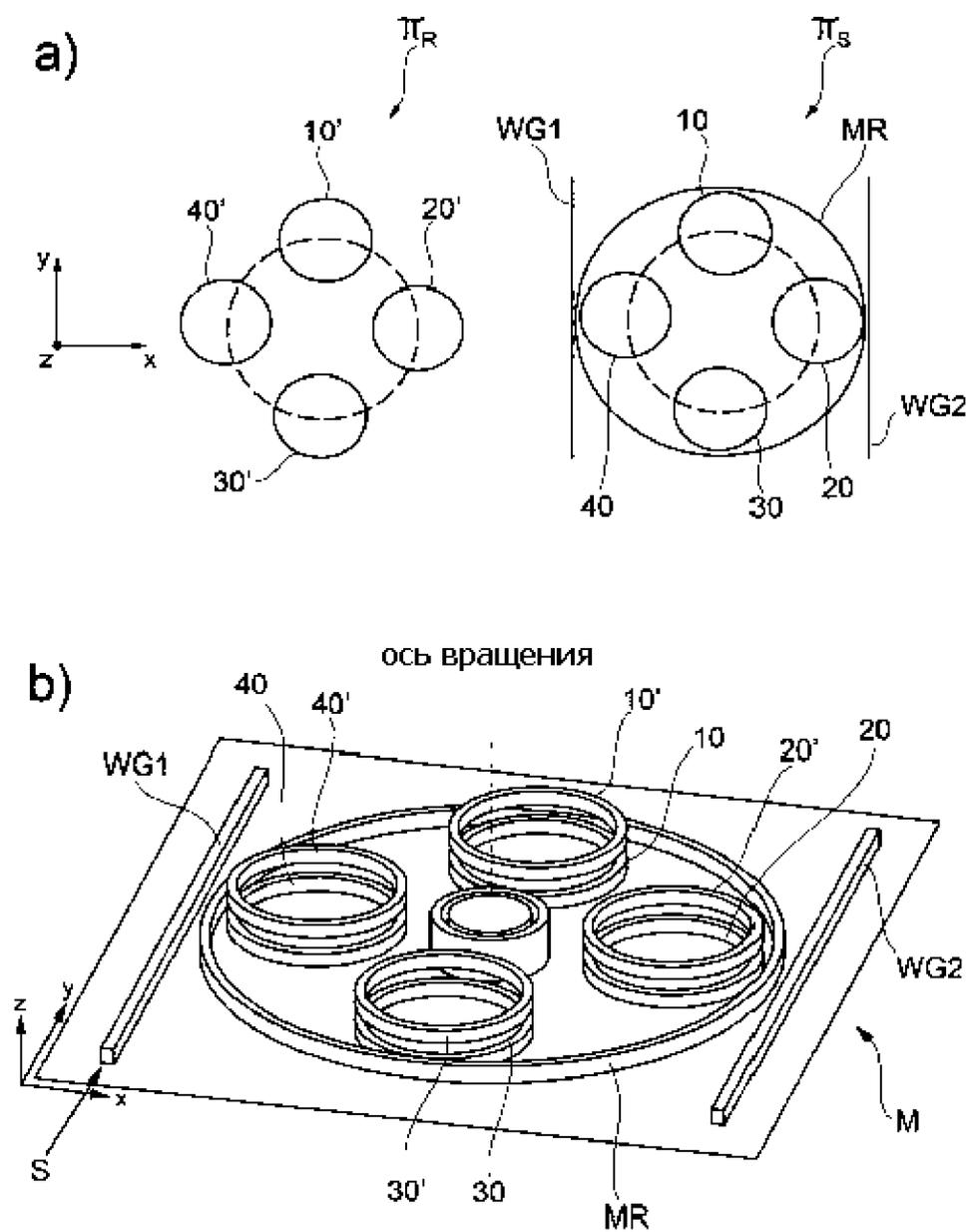
19. Фотонный двигатель по п. 18, в котором упомянутый источник когерентного излучения представляет собой лазерный источник, рабочая полоса пропускания которого зависит по меньшей мере от размера и материалов упомянутых первого и второго оптических резонаторов и от диэлектрика между упомянутыми первой и второй конструкциями оптического волновода.

20. Фотонный двигатель по любому из пп. 1-19, в котором каждый из упомянутых первого и второго оптических резонаторов и упомянутая конструкция оптического волновода возбуждения выполнены в виде оптических волокон, интегрированных оптических проводников на диэлектрической подложке, активных или пассивных полупроводниковых структур, плазмонных структур, полимерных структур.

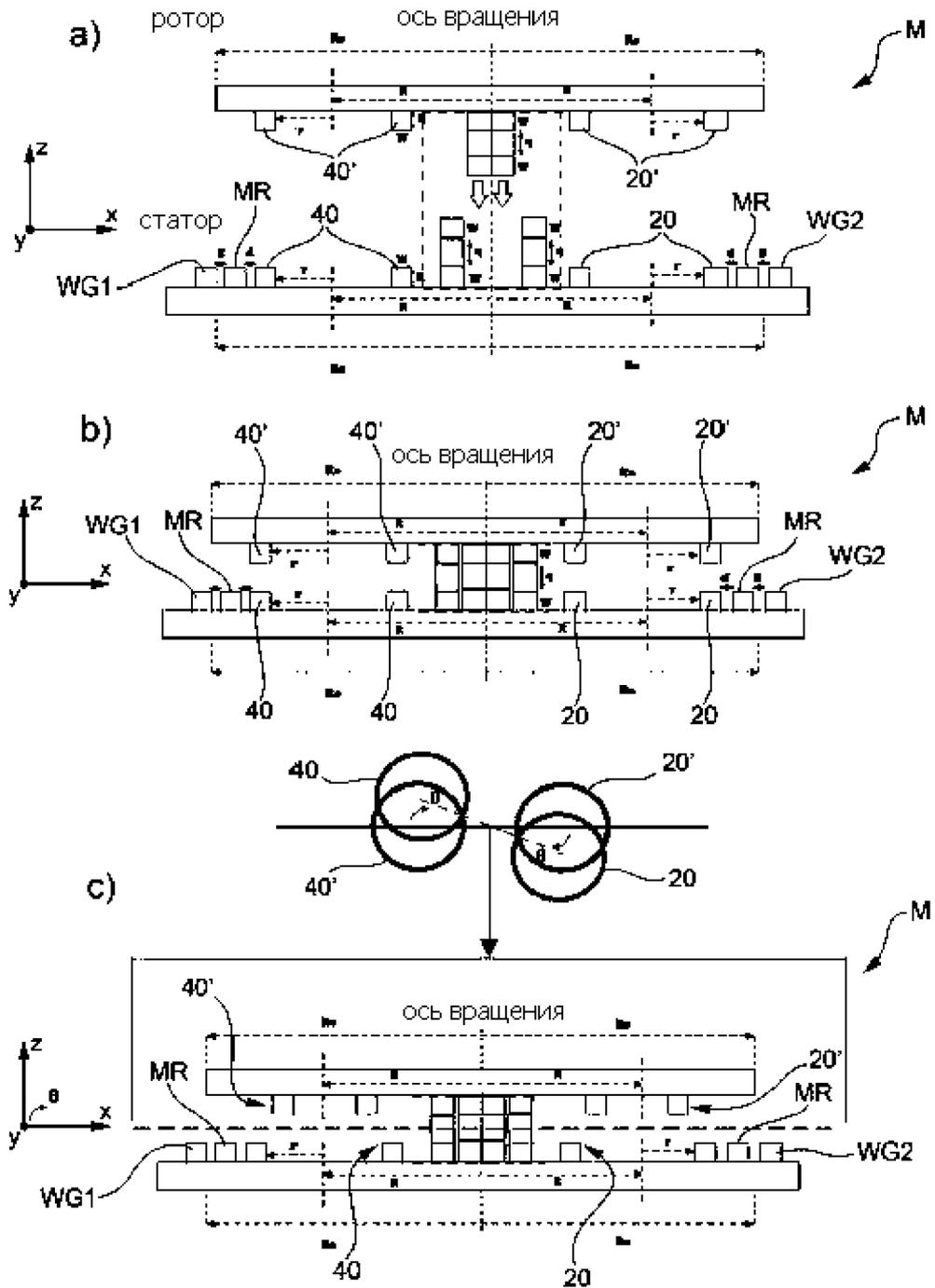
21. Фотонный двигатель по любому из пп. 1-20, в котором первая конструкция оптического волновода сформирована на подложке статической части, выполненной с возможностью механического соединения с первой неподвижной структурой машины, находящейся в состоянии покоя, а вторая конструкция оптического волновода сформирована на подложке подвижной части, выполненной с возможностью механического соединения со второй структурой машины, являющейся подвижной относительно упомянутой первой неподвижной структуры машины.

22. Узел фотонного двигателя, содержащий множество элементарных блоков, каждый из которых содержит фотонный двигатель по любому из пп. 1-21, причём упомянутые элементарные блоки механически связаны на плоскости.

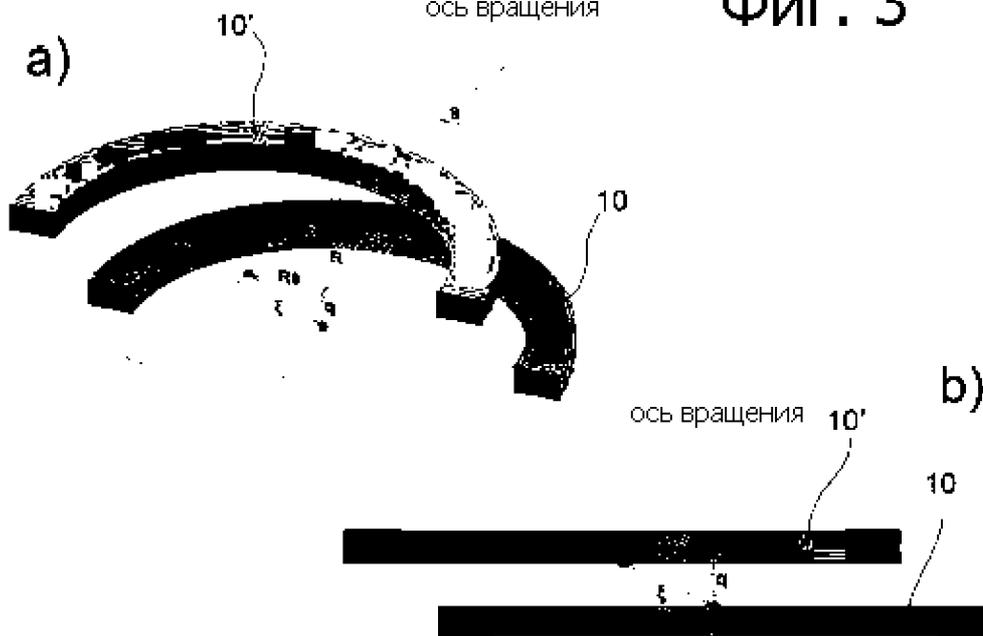
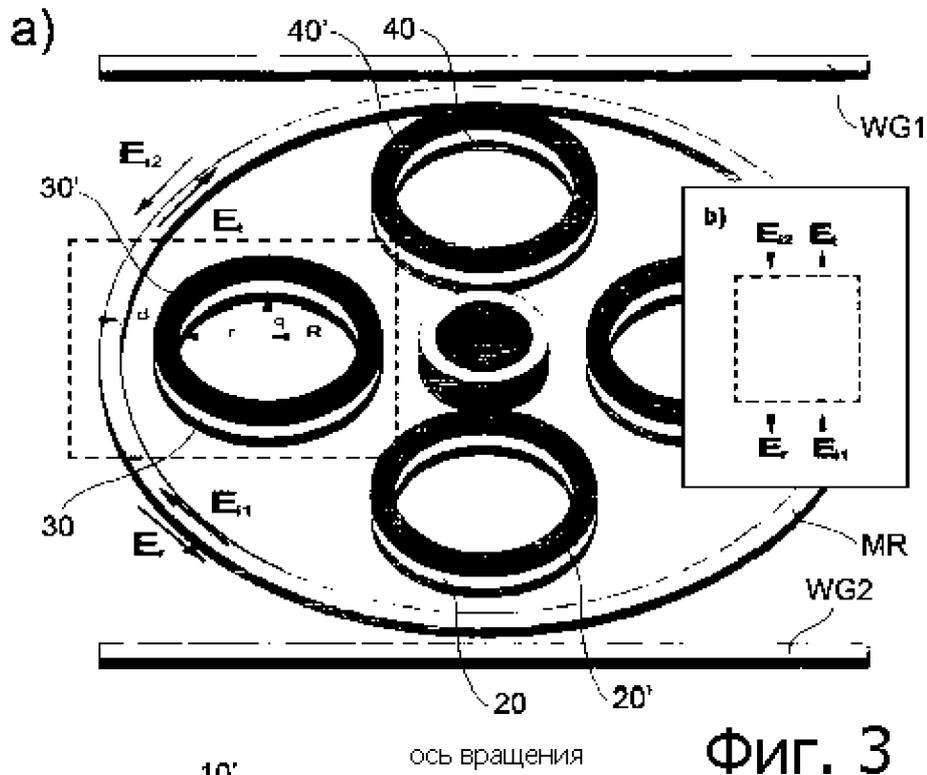
23. Узел фотонного двигателя, содержащий множество элементарных блоков, каждый из которых содержит фотонный двигатель по любому из пп. 1-21, причём упомянутые элементарные блоки механически связаны в трёхмерном объёме.

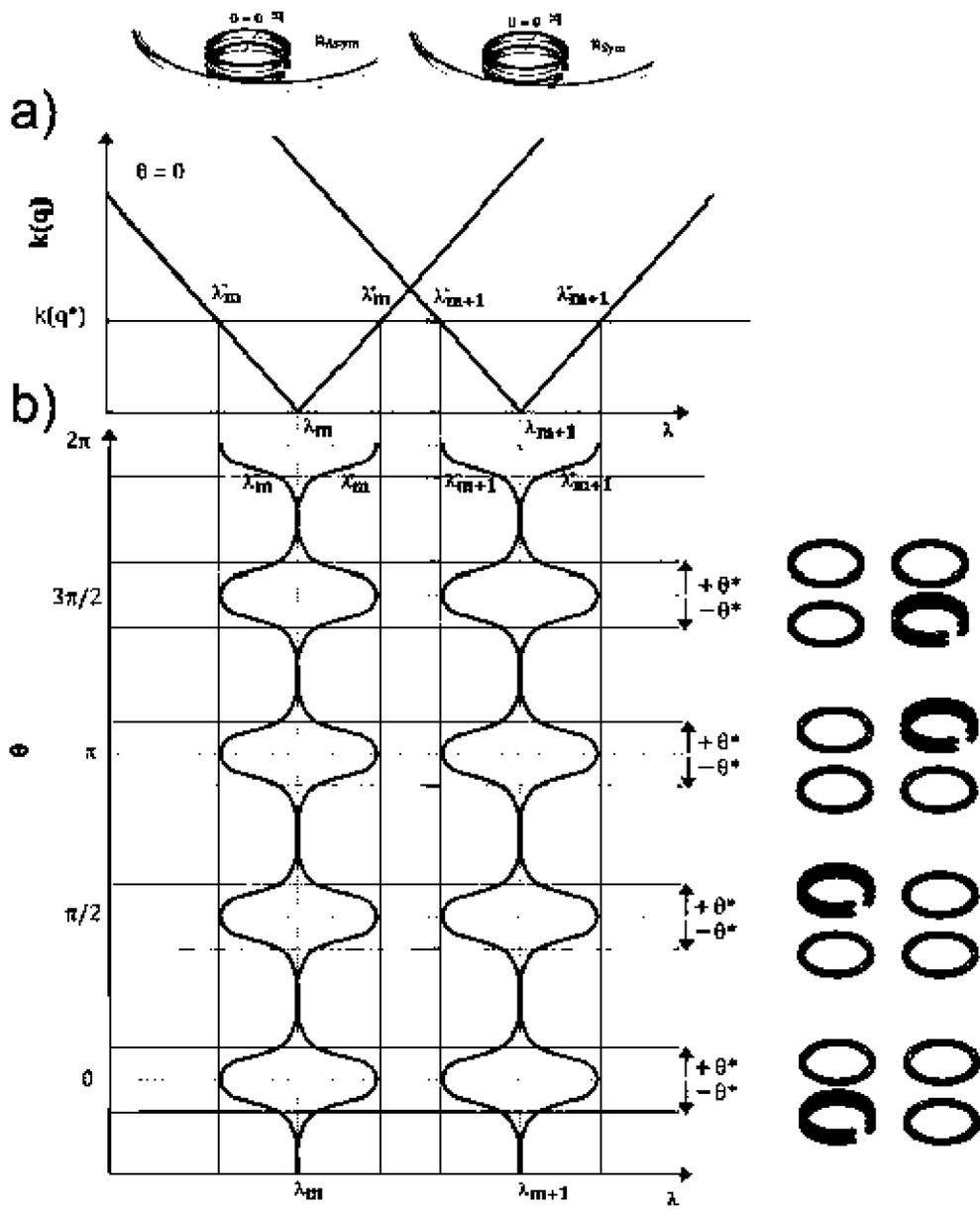


ФИГ. 1

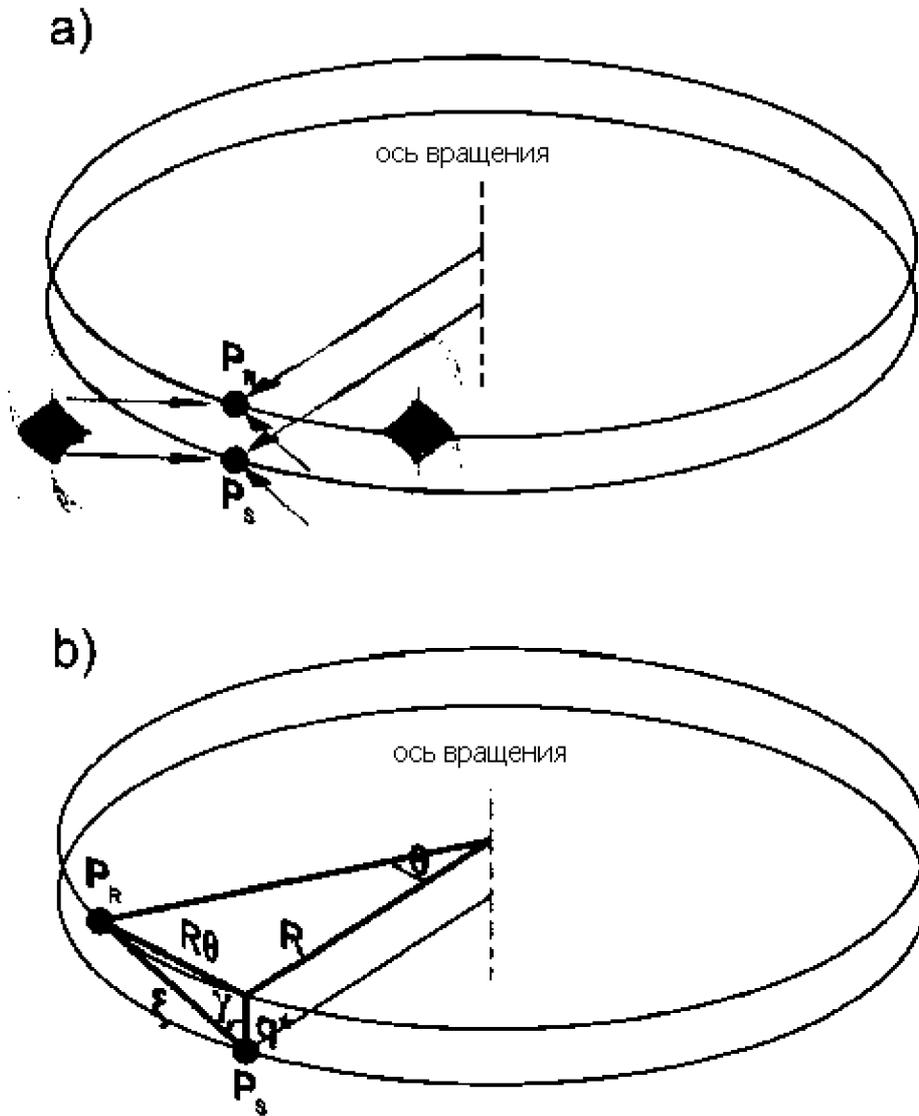


ФИГ. 2

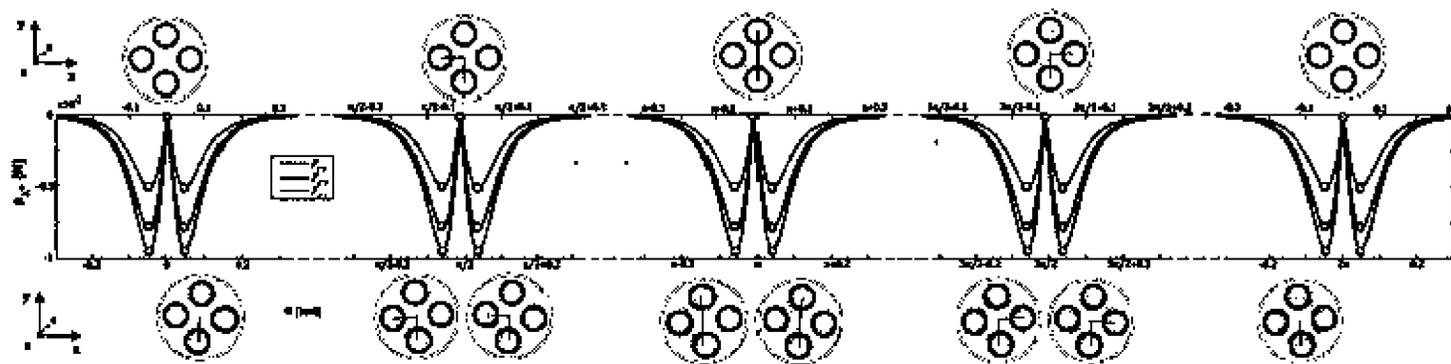




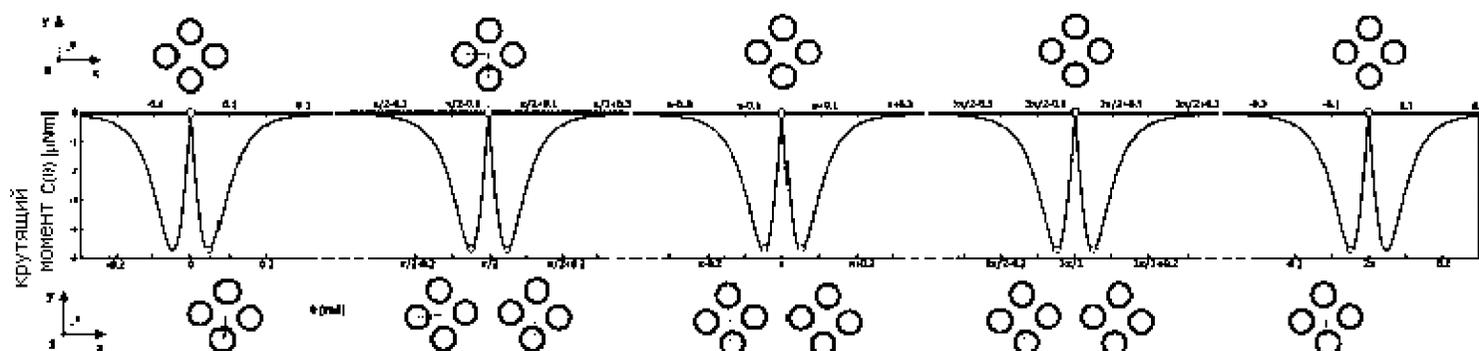
ФИГ. 5



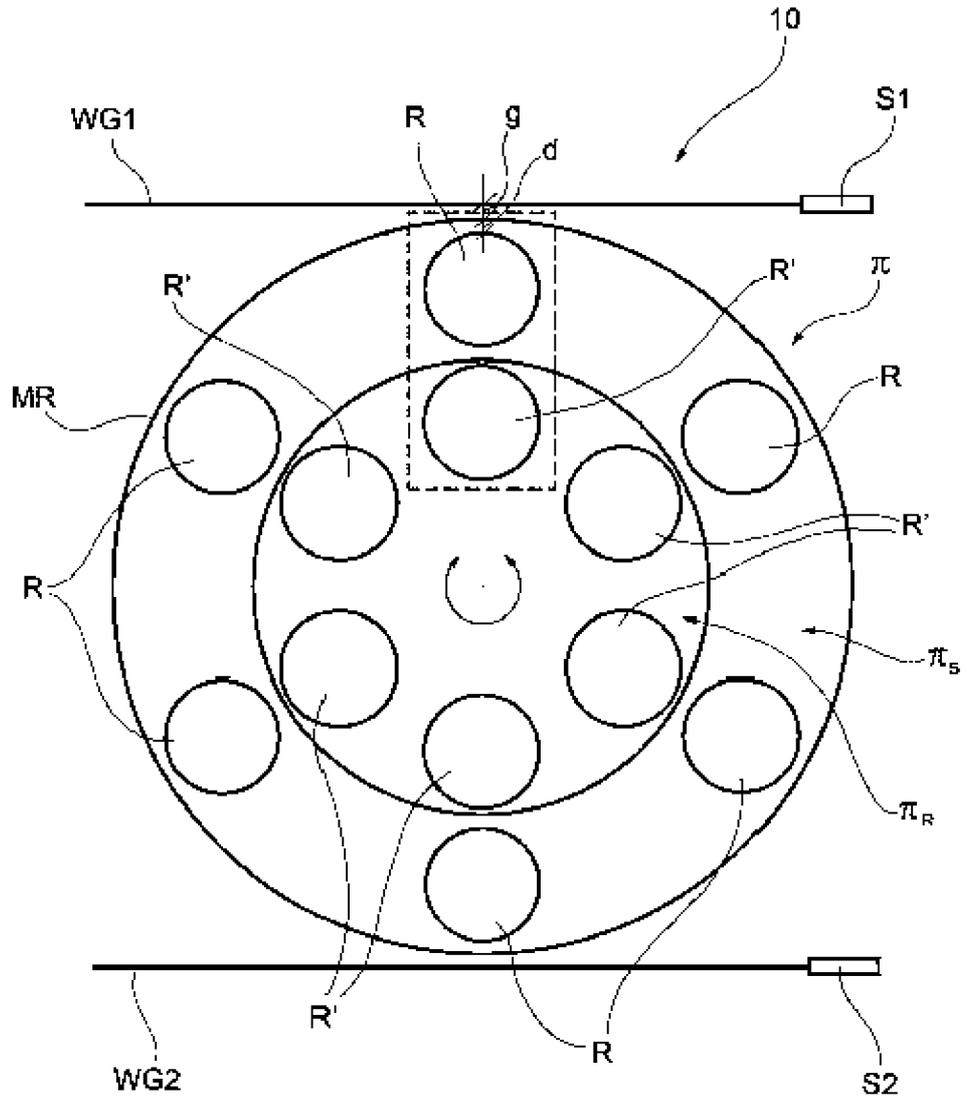
ФИГ. 6



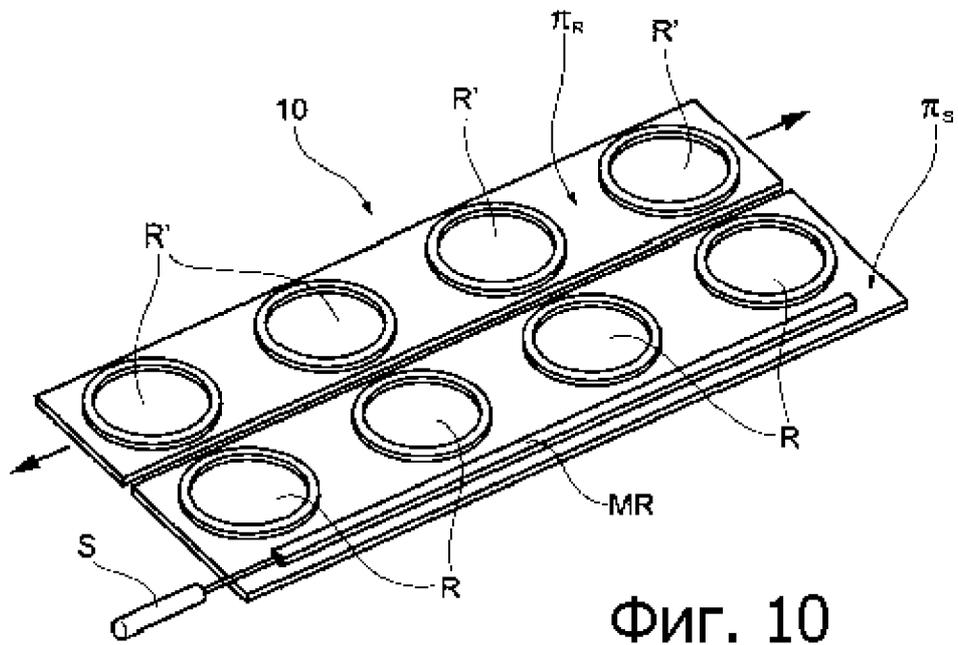
ФИГ. 7



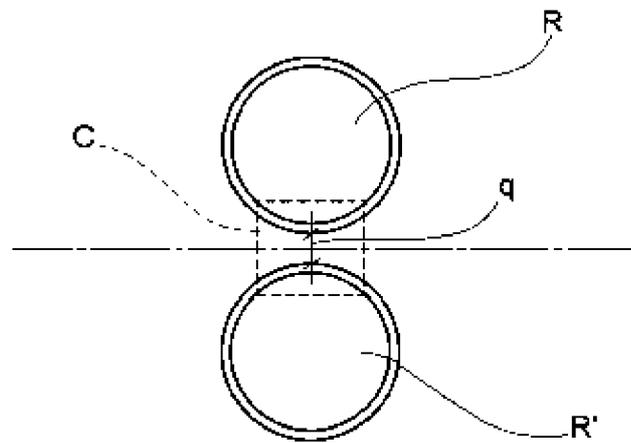
ФИГ. 8



ФИГ. 9



ФИГ. 10



ФИГ. 11