

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **036511**

(13) **B1**

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

(45) Дата публикации и выдачи патента
2020.11.18

(51) Int. Cl. **G02B 6/12 (2006.01)**
G02B 6/293 (2006.01)

(21) Номер заявки
201991162

(22) Дата подачи заявки
2017.06.01

(54) **ФОТОННЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ**

(31) **62/420,450**

(56) **WO-A1-2013052953**
US-A1-2009116788

(32) **2016.11.10**

(33) **US**

(43) **2019.11.29**

(86) **PCT/IT2017/000111**

(87) **WO 2018/087789 2018.05.17**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
КОПСЫС С.р.л. (IT)

(72) Изобретатель:
Кампанелла Карло Эдоардо (IT)

(74) Представитель:
Пронин В.О. (RU)

(57) Изобретение относится к оптико-механическим системам, предметом которого, в частности, является оптико-механическое устройство, ориентированное на извлечение механической энергии от фотонного источника. Фотонный двигатель содержит статическое первое оптическое резонаторное устройство, лежащее в первой плоскости; по меньшей мере второе подвижное оптическое резонаторное устройство, лежащее в параллельной плоскости на расстоянии образования стека, адаптированное к установлению связи в режиме затухающей волны между первым и вторым резонаторами, которые направляют резонансные симметричные или резонансные антисимметричные моды или комбинацию или взаимное наложение указанных симметричных и антисимметричных мод, в зависимости от расстояния образования стека, а также расстояния между первым и вторым резонаторами, и где после избирательного установления резонансной моды симметричных колебаний создается состояние притяжения второго резонатора по отношению к первому резонатору или при установлении резонансной антисимметричной моды устанавливается состояние отталкивания второго резонатора от первого резонатора.

B1

036511

036511

B1

Изобретение относится к оптико-механическим системам. В частности, предметом настоящего изобретения является оптико-механическое устройство, ориентированное на извлечение механической энергии от фотонного источника (то есть, источника лазерного излучения). В частности, настоящее изобретение относится к фотонному двигателю, действие которого основано на принципах оптико-механики.

Уже в 1821 году сэр Майкл Фарадей применил магнитную силу, образованную токонесящим проводом, для изолирования и непрерывного перемещения магнитного полюса в катушке. Это было первой демонстрацией электрического двигателя. В устройствах данного вида для обеспечения вращения электродвигателя требуется непрерывная смена полюсов магнитного потока.

При оценке приложений как в микро-, так и в макромасштабе существующими до сего дня технологиями в области вращательных двигателей являются:

а) электрические двигатели и микроэлектромеханические двигатели (MEMS), работающие на основе взаимодействия магнитных полей и электрических токов в проводящих катушках, определяемого законом Фарадея- Неймана-Ленца. Характерными для этих устройств недостатками являются монтажные ограничения при сборке узлов очень малого размера вплоть до миллиметровой шкалы и опасности, возникающие при работе с высокими напряжениями и сильными токами, всегда требуемыми для получения полезных крутящих моментов;

б) двигатели внутреннего сгорания с вращательным и возвратно-поступательным движением, обычно питающиеся не возобновляемыми видами топлива, вызывающими загрязнение окружающей среды, и сопутствующие нарушения, измеряемые по метровой шкале, и характеризующиеся высокой рабочей температурой и наличием нескольких гидравлических соединений и подвижных механических компонентов, понижающих надежность системы;

в) реактивные двигатели, в частности, газовые турбины (например, в форме Турбопропа и Турбошафта), опирающиеся на третий закон динамики Ньютона и обычно реализующие термодинамический цикл Джоуля-Брайтона; для них типично доведение рабочей температуры до максимально высоких значений. По габаритам они сравнимы с указанными выше двигателями, однако их работе сопутствуют намного более высокие уровни акустических помех и степени загрязнения окружающей среды;

г) электромагнитные или приводимые в действие химической энергией молекулярные двигатели, способные совершать вращательные или линейные перемещения;

е) оптические микродвигатели, использующие радиационное давление, являющееся производной от взаимодействия между световым сигналом, переносимым оптическим волноводом, и свободно перемещающейся конструкцией.

В настоящее время наиболее серьезными ограничениями для существующих двигателей являются низкая выдаваемая мощность в случае микродвигателей или большие значения габаритов, веса и загрязняющие выделения в случае макродвигателей.

Радиационное давление формирует оптические силы, индуцирующие механические смещения в оптико-механических системах. Принципы действия оптико-механики с объемным резонатором являются при этом наиболее эффективной стратегией для повышения мощности оптических сил, воздействующих на предмет и получаемых путем усовершенствования взаимодействия между светом и предметом, имеющего место в резонансных фотонных системах. В настоящее время исследования усиленных объемным резонатором оптико-механических систем ограничено системами линейного смещения, допускающими однонаправленное приведение в действие.

В заявке US 2009/0116788 раскрывается управление оптическими резонансами между двумя разнесенными в пространстве, связанными между собой с жестким ограничением фотонными устройствами, где оптические резонансы используются для генерации индуцируемых оптическим способом усилий и обеспечения точного приведения в действие механических средств в оптико-механической системе, состоящей из двух фотонных устройств, связанных между собой с жестким ограничением. Раскрывается осевое приближение или расхождение между двумя уложенными в стек фотонными устройствами, выполненными в виде кольцевых резонаторов,

Целью настоящего изобретения является создание оптико-механической системы, эффективно преобразующей оптическую мощность в механический крутящий момент.

Согласно настоящему изобретению, данная цель достигается посредством фотонного двигателя, имеющего отличительные признаки по п.1 формулы изобретения.

Конкретные варианты реализации являются предметом определения в зависимых пунктах формулы, содержимое которых является неотъемлемой частью данного описания.

В частности, изобретение относится к фотонному двигателю, содержащему:

по меньшей мере один вход оптического излучения;

первую конструкцию оптических волноводов, включающую в себя по меньшей мере один первый оптический резонатор, расположенный в первой плоскости для образования статической части указанно-го двигателя в предварительно заданной системе исходных координат двигателя;

конструкцию оптических волноводов возбуждения, связанную с указанной первой конструкцией оптических волноводов на предварительно заданном расстоянии связи в оптическом режиме к указанному по меньшей мере одному первому оптическому резонатору и выполненную с возможностью приема

по меньшей мере одного оптического излучения на определенной длине волны от указанного по меньшей мере одного входа оптического излучения и с возможностью оптического связывания указанного оптического излучения с указанным по меньшей мере одним первым оптическим резонатором;

по меньшей мере вторую конструкцию оптических волноводов, включая по меньшей мере один второй оптический резонатор, расположенный во второй плоскости, параллельной указанной первой плоскости на предварительно заданном

расстоянии образования стека по перпендикуляру к указанным плоскостям, причем вторая конструкция оптических волноводов выполнена с возможностью перемещения в указанной второй плоскости по отношению к указанной первой конструкции оптических волноводов в соответствии по меньшей мере с предварительно заданным направлением движения так, чтобы образовать подвижную часть указанного двигателя в предварительно определенной системе исходных координат двигателя,

причем указанное предварительно заданное расстояние образования стека адаптировано к установлению связи в режиме затухающей волны оптических мод между одним первым оптическим резонатором указанной первой конструкции оптических волноводов и по меньшей мере одним вторым оптическим резонатором указанной второй конструкции оптических волноводов в состоянии взаимной близости указанных первого и второго оптических резонаторов в плоскости, поперечной к указанным первой и второй плоскостям, где происходит локальное перемещение указанной второй конструкции, причем указанные первый и второй оптический резонаторы адаптированы к сопровождению по меньшей мере одной резонансной моды симметричных колебаний на предварительно заданной первой длине волны или по меньшей мере одной резонансной моды антисимметричных колебаний на предварительно заданной второй длине волны или по меньшей мере комбинации или наложения по меньшей мере одной резонансной моды симметричных колебаний на предварительно заданной первой длине волны и по меньшей мере одной резонансной моды антисимметричных колебаний на предварительно заданной второй длине волны в зависимости от указанного расстояния образования стека, а также от расстояния между указанными первым и вторым оптическими резонаторами в поперечной плоскости, и

где после избирательного установления резонансной моды симметричных колебаний создается состояние притяжения указанного второго оптического резонатора по отношению к указанному первому оптическому резонатору, в котором в указанной второй плоскости генерируется движение приближения второго оптического резонатора к первому оптическому резонатору согласно указанному предварительно заданному направлению локального перемещения, а после избирательного установления резонансной моды антисимметричных колебаний устанавливается состояние отталкивания указанного второго оптического резонатора от указанного первого оптического резонатора, в котором в указанной второй плоскости генерируется движение отдаления второго оптического резонатора от первого оптического резонатора в соответствии с указанным предварительно заданным направлением локального перемещения.

Согласно второму аспекту фотонный двигатель содержит средства регулировки, настроенные на управление по меньшей мере параметром излучения от указанного по меньшей мере одного входа оптического излучения таким образом, чтобы избирательно устанавливать по меньшей мере одну из двух резонансных мод - симметричных колебаний и антисимметричных колебаний.

Согласно другому аспекту указанная первая конструкция оптических волноводов включает в себя множество первых оптических резонаторов, и указанные средства регулировки настроены на управление по меньшей мере параметром оптического излучения от указанного по меньшей мере одного входа оптического излучения, принимаемого указанным устройством возбуждения оптических волноводов с тем, чтобы оптически связать указанное оптическое излучение по отдельности с каждым из указанного множества первых оптических резонаторов последовательно вдоль указанного предварительно заданного направления перемещения и избирательно установить по меньшей мере одну из указанных резонансных мод - симметричных или антисимметричных колебаний - между указанным каждым из указанного множества первых оптических резонаторов и по меньшей мере одним вторым оптическим резонатором в состоянии приближения указанного каждого из указанного множества первых оптических резонаторов.

Согласно другому аспекту параметром излучения от указанного входа оптического излучения является по меньшей мере один из следующих: длина волны, фаза, поляризация указанного излучения, соотношение времени включения/выключения указанного излучения, мощность указанного излучения.

Согласно другому аспекту указанная первая конструкция оптических волноводов включает в себя множество первых оптических резонаторов, расположенных вдоль по меньшей мере одного предварительно определенного тракта в первой плоскости и указанная вторая конструкция оптических волноводов включает в себя множество вторых оптических резонаторов, расположенных вдоль по меньшей мере одного предварительно определенного тракта во второй плоскости.

Согласно другому аспекту указанные средства регулировки настроены на управление по меньшей мере параметром излучения от указанного по меньшей мере одного входа оптического излучения с тем, чтобы избирательно устанавливать резонансную моду симметричных колебаний, когда позиция указанного по меньшей мере одного второго оптического резонатора вдоль указанного по меньшей мере одного предварительно определенного тракта во второй плоскости оказывается позади позиции связанного первого оптического резонатора вдоль указанного по меньшей мере одного предварительно определенного

тракта в первой плоскости в соответствии с указанным предварительно заданным направлением перемещения, и резонансную моду антисимметричных колебаний, когда позиция указанного по меньшей мере одного второго оптического резонатора вдоль указанного по меньшей мере одного предварительно определенного тракта во второй плоскости оказывается впереди позиции указанного связанного первого оптического резонатора вдоль указанного по меньшей мере одного предварительно определенного тракта в первой плоскости в соответствии с указанным предварительно заданным направлением перемещения.

Согласно другому аспекту указанный по меньшей мере один предварительно определенный тракт в первой плоскости и указанный по меньшей мере один предварительно определенный тракт во второй плоскости являются замкнутыми трактами и предпочтительно представляют собой круговые тракты.

Согласно другому аспекту замкнутый тракт вторых оптических резонаторов в указанной второй конструкции оптических волноводов является коаксиальным к замкнутому тракту первых оптических резонаторов в указанной первой конструкции оптических волноводов.

Согласно другому аспекту указанный по меньшей мере один предварительно определенный тракт в первой плоскости и указанный по меньшей мере один предварительно определенный тракт во второй плоскости являются прямолинейными трактами.

Согласно другому аспекту указанные оптические резонаторы равномерно распределены вдоль указанных предварительно определенных трактов.

Согласно другому аспекту, указанные первый и второй оптические резонаторы представляют собой кольцевые резонаторы, предпочтительно кольцевые резонаторы круглого сечения, и указанные первые оптические резонаторы содержат поднабор избирательно возбуждаемых кольцевых резонаторов и по меньшей мере один главный кольцевой резонатор возбуждения. Предпочтительно, указанный поднабор первых кольцевых резонаторов и указанные вторые кольцевые резонаторы имеют одинаковый диаметр.

Согласно другому аспекту указанные первый и второй оптические резонаторы являются оптическими резонаторами моды типа шепчущей галереи.

Согласно другому аспекту указанное предварительно заданное расстояние образования стека между первой плоскостью и второй плоскостью основывается по меньшей мере на одной из следующих характеристик: указанная предварительно заданная длина волны оптического излучения от указанного входа оптического излучения, материалы указанных оптических резонаторов, геометрические характеристики указанных оптических резонаторов.

Согласно другому аспекту указанная конструкция оптических волноводов возбуждения содержит по меньшей мере один возбуждающий оптический волновод, совмещенный в плоскости с указанной первой конструкцией оптических волноводов. В первом варианте реализации или конфигурации указанная первая конструкция оптических волноводов включает в себя множество первых оптических резонаторов, расположенных вдоль по меньшей мере одного предварительно определенного кругового тракта в первой плоскости и указанный по меньшей мере один возбуждающий оптический волновод проходит вдоль тракта, по меньшей мере частично сбоку от указанного по меньшей мере одного кругового тракта. В другом варианте исполнения указанная первая конструкция оптических волноводов включает в себя множество первых оптических резонаторов, расположенных вдоль предварительно определенного прямолинейного тракта в первой плоскости и указанный по меньшей мере один возбуждающий оптический волновод проходит вдоль тракта сбоку от указанного прямолинейного тракта.

Согласно другому аспекту указанная конструкция оптических волноводов возбуждения содержит по меньшей мере один возбуждающий оптический волновод в плоскости, отличающейся от указанной первой плоскости первой конструкции оптических волноводов.

Согласно другому аспекту указанный вход оптического излучения представляет собой по меньшей мере один источник когерентного излучения либо связан по меньшей мере с одним источником когерентного излучения. Предпочтительно, указанный источник когерентного излучения представляет собой лазерный источник с рабочей шириной полосы, зависимой от габаритов и материалов указанных первого и второго оптических резонаторов и от диэлектрика между указанными первой и второй конструкциями оптических волноводов.

Согласно другому аспекту с указанной конструкцией оптического волновода возбуждения связан по меньшей мере один пробный оптический волновод.

Согласно другому аспекту каждый из указанных первого и второго оптических резонаторов и указанная конструкция оптического волновода возбуждения изготовлены в виде оптических волокон, интегральных оптических направляющих на диэлектрической подложке, полупроводниковых активных или пассивных структур, плазмонных структур, полимерных структур.

Согласно другому аспекту первая конструкция оптических волноводов образована на подложке статического типа, выполненной с возможностью механического соединения с первой фиксированной машинной конструкцией в состоянии покоя, а вторая конструкция оптических волноводов образована на подложке подвижного типа, выполненной с возможностью механического соединения со второй машинной конструкцией, перемещаемой относительно указанной первой фиксированной машинной конструкции.

Изобретение дополнительно относится к фотонному двигателю в сборе, включая множество эле-

ментарных ячеек, каждая из которых содержит фотонный двигатель в определении, приведенном выше, причем указанные элементарные ячейки связаны между собой в плоскости или в трехмерном объеме.

Итак, настоящее изобретение основывается на радиационном давлении, формирующем оптические силы, вызывающие механические смещения в оптико-механических системах. Согласно аспекту изобретения оптико-механическая система, в которой генерируются оптические силы посредством преимущественно круговых конструкций резонаторов, расположенных в двух перемещающихся относительно друг друга, преимущественно вращающихся плоскостях, функционирует подобно фотонному резонансному двигателю. Фотонный резонансный двигатель представляет собой усиленную резонаторами оптико-механическую вращательную систему, действующую по принципу динамики связанных резонаторов и пригодную для высокоэффективного производства в виде миниатюрной фотонной системы на кремниевой подложке. Развивающиеся технологии производства полупроводников - таких как кремниевая фотоника - позволяют изготавливать оптико-механические микросистемы, в которых относительная устойчивость к силовому воздействию повышается благодаря миниатюрным габаритам.

Практическим воплощением настоящего изобретения является фотонный резонансный двигатель, в котором используются фотонные резонансные структуры для преобразования электромагнитных сил с целью генерации полезной механической энергии. Такой фотонный резонансный двигатель можно приводить в действие посредством индуцируемой оптическим способом силы, генерируемой путем следования за длиной волны оптического сигнала (то есть, лазерного источника). В частности, конструкция из оптически связанных между собой оптических резонаторов, жестко соединенных с одной и той же осью вращения согласно аспекту изобретения, совершает относительное вращательное движение благодаря генерируемым асимметричным оптическим силам, индуцируемым явлением резонанса.

Фотонный резонансный двигатель является, по существу, двигателем, питающимся от источника когерентного излучения (то есть, лазерного луча), возбуждающего волноводную конструкцию. Двигатель содержит порт, через который фотоны проникают вовнутрь электромагнитного волновода, который возбуждает конструкцию из оптических резонаторов, расположенную на двух параллельных тесно прилегающих одна к другой и перемещающихся относительно друг друга поверхностях (то есть, в плоскостях скольжения, во вращательных системах и т.п.). Хотя основные структурные элементы могут быть изготовлены с разнообразием форм, в раскрытом в качестве примера варианте реализации принята округлая форма и для резонансных элементов, и для подвижных поверхностей, и одна из поверхностей в состоянии относительного взаимного перемещения неподвижна, а другая совершает свободное вращение.

Согласно аспекту изобретения фотонный двигатель может включать в себя один или более электромагнитных резонаторов. В частности, фотонный двигатель может содержать одну или более конструкций оптических резонаторов, оптически связанных через две плоскости, вращающиеся относительно друг друга. В данном варианте реализации необходимо наличие в фотонном двигателе по меньшей мере двух параллельных плоскостей в тесной близости друг к другу: свободно вращающейся роторной плоскости и статорной плоскости в состоянии покоя. Согласно аспекту изобретения, статорная плоскость содержит ряд оптических замкнутых трактов, далее именуемых "кольцевыми резонаторами", которые предпочтительно могут быть расположены в виде круговой геометрической фигуры и возбуждаться посредством одного или более внутренних или внешних электромагнитных резонаторов (главных электромагнитных резонаторов) - таких как охватывающий их по периметру главный кольцевой резонатор. Главный кольцевой резонатор может получать возбуждение от одного или более шинных волноводов. Аналогично, роторная плоскость содержит оптические кольцевые резонаторы, число которых совпадает с количеством кольцевых резонаторов на статорной плоскости и которые предпочтительно расположены таким же образом, как резонаторы статорной плоскости. Роторная и статорная плоскости оптически связаны между собой в режиме затухающей волны, например, между зеркальными кольцевыми резонаторами. Асимметричные оптические силы, соответствующие резонансным модам асимметричных колебаний, обеспечивают генерацию оптомеханического крутящего момента. Можно улавливать импульс движения фотонов через мультрезонаторную систему с усилением объемным резонатором и извлекать полезный оптико-механический крутящий момент.

Роторная и статорная плоскости могут быть построены на двух полупроводниковых пластинах, изготовленных с использованием обычных методик производства микроустройств, широко распространенных на предприятиях по выпуску фотонной техники. Оптимальные механические состояния, в которых обеспечивается поворот ротора относительно статора, могут быть обеспечены путем принятия специфических решений по микромеханике, уже доступных в рамках современной технологии.

При своевременно выбранной длине волны возбуждения фотонный резонансный двигатель пассивно вращается, следуя за длиной волны оптического источника, под действием крутящего момента, сгенерированного посредством связи между резонаторами в плоскостях статора и ротора, что вызывает генерацию крутящего момента, индуцированного оптическим излучением. Асимметричные оптические силы, соответствующие резонансным модам симметричных и антисимметричных колебаний, возбуждающие кольца, содержащиеся в фотонном двигателе, обеспечивают возможность генерации и эксплуатации оптико-механического крутящего момента в роторе.

Наряду с широким диапазоном практического применения фотонный резонансный двигатель демонстрирует заложенную в него физическую возможность улавливания импульсов движения фотонов посредством оптической системы с усилением объемным резонатором для извлечения оптико-механического крутящего момента из процесса взаимодействия света и предмета.

Основными структурными элементами фотонного резонансного двигателя являются вертикально уложенные в стек, связанные по затухающей волне оптические кольцевые резонаторы, где расстояние по вертикали между кольцами, боковое расстояние между главным кольцом и статорными кольцами, боковое расстояние между главным кольцом и шинным волноводом определяют распределение оптической мощности в каждом кольце, что впоследствии регулирует спектральные характеристики фотонного резонансного двигателя. В предпочтительном варианте реализации фотонный резонансный двигатель содержит замкнутую петлю из N пар уложенных в стеки по вертикали кольцевых резонаторов (CVSRRs) с равномерным чередованием по схеме периодического кругового распределения с периодом $2\pi/N$.

В предпочтительном варианте реализации $N=4$, и четыре CVSRR взаимодействуют между собой по замкнутой петле, состоящей из другого кольца, расположенного в плоскости статора (совпадающей с плоскостью, где находятся нижние кольца четырех CVSRR), и именуется "главным кольцевым резонатором". Радиус главного кольца надлежащим образом выбирают так, чтобы устранить боковую перекрестную связь между парами VSRR. Главное кольцо возбуждается через шинный волновод (или через ряд волноводов), расположенный в плоскости статора. Независимо от способности волноводов поддерживать различные оптические моды (Quasi-TE и Quasi-TM), избирательно возбуждается только основная мода (Quasi-TE) несколькими способами - например, путем регулировки поляризации лазерного источника.

При этом фотонный двигатель может быть оптически смоделирован по методу матрицы переходов, методу матрицы рассеяний и по теории связанных видов колебаний (СМТ). При использовании модели сосредоточенных параметров определяют с помощью квантовой теории оптико-механическую силу (радиационное давление), регулирующие механические характеристики фотонного двигателя.

Сила F между двумя слабо связанными резонаторами может быть определена по величине сдвига длины волны ($\Delta\lambda$), возникающего при повороте на θ вокруг оси, перпендикулярной плоскости, где находятся резонаторы. Сила F определяется следующим выражением:

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

где ξ - расстояние между кольцом в статоре и роторным кольцом, соответствующее углу θ ; Q_m является коэффициентом добротности одиночного кольца статора/ротора (соответствующим m -ому порядку резонанса), в то время как P - оптическая мощность, циркулирующая в уложенных в вертикальные стеки кольцевых резонаторах (VSRR).

P определяется посредством $P_i E_N$, где P_i представляет собой входную мощность лазера, а E_N является коэффициентом повышения мощности вследствие наличия главного резонатора, обеспечивающего рециркуляцию фотонов в VSRR.

Энергия электромагнитного резонанса, накопленная в кольцевом резонаторе статора, равняется $PQ\lambda_m/2\pi c$ ($\lambda_r = 2\pi/n_{\text{eff}}$, где r - радиус кольца статора/ротора и n_{eff} - эффективный показатель преломления поперечного сечения волновода кольца автономного статора/ротора). Q_m можно определить в одиночном кольцевом резонаторе статора ротора при отсутствии помех, связанных с наличием кольца другого статора/ротора, и с вычислением при угле поворота $\theta = \pi r/N$ (r является целым числом, а N - суммарное количество пар VSRR).

Другие характеристики и преимущества изобретения будут более подробно изложены в последующем описании предпочтительных вариантов реализации, иллюстрируемых примерами, не подразумевающими ограничений, со ссылками на сопроводительные чертежи, среди которых

фиг. 1a и 1b представляют собой схематичный вид сверху плоскости статора и ротора в варианте реализации фотонного резонансного двигателя согласно изобретению и вид в перспективе указанного фотонного двигателя, включая плоскость статора и ротора (соответственно);

на фиг. 2a, 2b и 2c показано поперечное сечение плоскости статора и плоскости ротора фотонного резонансного двигателя, показанного на фиг. 1b, в разобранном виде, в собранном виде в состоянии покоя и в рабочем состоянии при малом угле поворота (θ) по сравнению с состоянием покоя (соответственно);

на фиг. 3a и 3b показаны базовый элемент фотонного двигателя, состоящий из пары уложенных в стек по вертикали кольцевых резонаторов (VSRR), и блок сосредоточенных параметров, связанный с матрицей переходов для пары VSRR (соответственно) применительно к варианту реализации фотонного двигателя, представленному на фиг. 1b;

на фиг. 4a и 4b показана одиночная пара VSRR, где роторное кольцо свободно поворачивается на угол θ (вокруг оси вращения) по отношению к кольцу статора - соответственно в трехмерном изображении и в поперечном сечении;

фиг. 5a и 5b иллюстрируют динамику расщепления моды для одиночной пары VSRR - соответст-

венно в зависимости от межкольцевого расстояния и межкольцевого угла поворота;

фиг. 6 иллюстрирует эволюцию эффективного показателя преломления моды симметричных колебаний в зависимости от угла поворота между плоскостью статора и плоскостью ротора, а также (во вкладках) распределения электромагнитного поля моды симметричных колебаний на указанных позициях поворота вдоль кривой эффективного показателя преломления;

фиг. 7 иллюстрирует эволюцию эффективного показателя преломления моды антисимметричных колебаний в зависимости от угла поворота между плоскостью статора и плоскостью ротора, а также (во вкладках) распределения электромагнитного поля моды антисимметричных колебаний на указанных позициях поворота вдоль кривой эффективного показателя преломления;

фиг. 8 является схематическим представлением конфигурации с разомкнутой петлей для N пар уложенных в стеки по вертикали кольцевых резонаторов (VSRR) с боковыми связями к главному кольцевому резонатору статора;

на фиг. 9a и 9b показан коэффициент усиления E_N и изображена динамика расщепления моды для фотонного резонансного двигателя, состоящего из четырех пар уложенных в стеки по вертикали кольцевых резонаторов (VSRR), замкнутых по петле внутри главного кольцевого резонатора - соответственно: в зависимости от межкольцевого расстояния и в зависимости от межкольцевого угла поворота;

фиг. 10 является геометрическим представлением эквивалентной системы с сосредоточенными параметрами одиночной пары VSRR;

фиг. 11 иллюстрирует распределение оптомеханической силы для линии симметричного резонанса λ^+ в зависимости от угла поворота θ между плоскостью статора и плоскостью ротора;

фиг. 12 иллюстрирует распределение оптомеханического крутящего момента для линии симметричного резонанса λ^+ в зависимости от угла поворота θ между плоскостью статора и плоскостью ротора;

и

фиг. 13-17 представляют собой схематичные виды в перспективе других вариантов реализации фотонного резонансного двигателя согласно изобретению.

В последующем описании раскрывается пример реализации фотонного резонансного двигателя M , содержащего конструкцию из двух наборов волноводных фотонных резонаторов, оптически связанных между собой и имеющих одну и ту же ось вращения, совершая поворот относительно друг друга благодаря генерируемым асимметричным оптическим силам, которые индуцируются явлением резонанса.

Оптико-механическая система фотонного резонансного двигателя M , соответствующего варианту реализации настоящего изобретения, содержит две тесно приближенные друг к другу параллельные плоскости: плоскость ротора P_R со свободой вращения и плоскость статора P_S в неподвижном состоянии - см. фиг. 1a и 1b.

Фотонный двигатель M содержит:

по меньшей мере один вход S оптического излучения;

первую конструкцию оптических волноводов, включающую в себя по меньшей мере один, а предпочтительно множество первых оптических резонаторов 10, 20, 30, 40 и главный кольцевой резонатор MR, установленный в плоскости статора с целью образования статической части указанного двигателя в предварительно определенной базовой системе координат x, y, z двигателя;

вторую конструкцию оптических волноводов возбуждения, предпочтительно включающую в себя по меньшей мере один шинный волновод WG1 оптического возбуждения, а в показанном варианте реализации включающую в себя пару шинных волноводов WG1 и WG2 оптического возбуждения, связанных с указанной первой конструкцией оптических волноводов на предварительно определенном расстоянии связи на оптических модах до главного кольцевого резонатора MR или в более общем случае по меньшей мере до одного первого оптического резонатора и выполненную с возможностью приема по меньшей мере одного оптического излучения на предварительно заданной длине волны от входа S оптического излучения и оптического связывания указанного оптического излучения с указанным по меньшей мере одним первым оптическим резонатором;

по меньшей мере вторую конструкцию оптических волноводов, включающую в себя по меньшей мере один, а предпочтительно множество вторых оптических резонаторов 10', 20', 30', 40', установленных в плоскости ротора, параллельной плоскости статора, на предварительно заданном расстоянии образования стека по перпендикуляру к указанным плоскостям.

Вторая конструкция оптических волноводов выполнена с возможностью перемещения в плоскости ротора по отношению к указанной первой конструкции оптических волноводов в соответствии по меньшей мере с одним предварительно определенным направлением перемещения таким образом, чтобы образовать подвижную часть двигателя M в предварительно заданной базовой системе координат x, y, z двигателя.

В примере реализации изобретения, иллюстрируемом фиг. 1a и 1b, плоскость статора содержит ряд оптических кольцевых резонаторов 10, 20, 30, 40, расположенных по круговому тракту и одновременно получающих возбуждение через охватывающий их по периметру главный кольцевой резонатор MR. Аналогично, плоскость ротора содержит предпочтительно такое же количество оптических кольцевых

резонаторов 10', 20', 30', 40', расположенных таким же образом, как в плоскости статора. Плоскости ротора и статора оптически связаны между собой в режиме затухающей волны между зеркальными кольцевыми резонаторами.

При определенных значениях длины волны входного сигнала возбуждения фотонный резонансный двигатель вращается, следуя за длиной волны оптического источника, под действием оптико-механического крутящего момента, генерируемого посредством силы радиационного давления, являющейся производной от связи между резонаторами статора и резонаторами ротора. Асимметричные оптические силы, соответствующие резонансным модам симметричных и антисимметричных колебаний, возбуждающим кольца, создают полезный крутящий момент на роторе. На фиг. 1а фотонный резонансный двигатель изображен в эскизном варианте на виде сверху плоскостей ротора и статора, а на фиг. 1б представлено трехмерное изображение фотонного резонансного двигателя.

В другом графическом варианте на фиг. 2а-с показаны поперечные сечения плоскости статора и плоскости ротора, где они связаны между собой через механический стык, выполненный из двуокиси кремния (предположительно имеется встроенный штырь на роторе и соответствующее посадочное гнездо, как показано на развернутом виде - см. фиг. 2а), когда ротор находится в состоянии покоя (см. фиг. 2б) и повернут на небольшой угол (в) по отношению к состоянию покоя (см. фиг. 2с).

Далее описан пример реализации фотонного резонансного двигателя на основе взаимодействия оптических резонаторов.

В соответствии с вариантом реализации изобретения базовый элемент (основная ячейка) фотонного резонансного двигателя включает в себя два уложенных в вертикальный стек волноводных кольцевых резонатора, связанных между собой в режиме затухающей волны. Расстояние между кольцевыми резонаторами по вертикали обозначается q , боковое расстояние между статором кольцевого резонатора и главным кольцевым резонатором обозначается d , а боковое расстояние между главным кольцевым резонатором и шинным волноводом обозначается g . С помощью метода конечных элементов (Finite Element Method; FEM) можно определить соотношения между физическими параметрами q , d и g и долями оптической мощности, регулируемыми спектральными характеристиками фотонного резонансного двигателя.

Объемный оптический резонатор в целом образован замкнутой петлей из N пар уложенных в стеки по вертикали кольцевых резонаторов (CVSRR) с внутренним радиусом r , равномерно рассредоточенных по схеме периодического кругового распределения с периодом $2\pi/N$ рад. Согласно раскрытому варианту реализации, $N=4$ и соответственно четыре CVSRR взаимодействуют между собой только по замкнутой петле, представляющей собой расширенное кольцо, расположенное в плоскости статора (то есть, совпадающее с плоскостью, в которой расположены нижние кольца четырех CVSRR) и именуемое 'главным кольцом', радиус R_{MR} которого выбирают вместе с q с целью устранить боковую перекрестную связь между главным кольцом и кольцами роторов.

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

Фотонный двигатель может быть смоделирован по методу матрицы переходов, по методу матрицы рассеяния и по теории связанных видов колебаний (coupled mode theory; CMT), как описано далее, путем анализа его базового элемента, состоящего из двух уложенных в стек по вертикали кольцевых резонаторов, а именно - верхнего кольца, принадлежащего плоскости ротора, и нижнего кольца, принадлежащего плоскости статора, как показано на фиг. 3а.

Оптические свойства одиночной пары VSRR можно определить с помощью теории связанных видов колебаний (CMT) и далее использовать для построения матрицы переходов, соответствующей данной паре (блоку).

Если обозначить символом ζ , координату криволинейной траектории вдоль двух VSRR, то в зависимости от оси x , y в плоскости статора и ротора амплитуды оптического сигнала, распространяющегося в нижнем и верхнем кольцах, равняются $a_1(\zeta)$ и $a_2(\zeta)$, соответственно. Зависимость двух этих амплитуд от координаты ζ , криволинейной траектории можно смоделировать по теории связанных видов колебаний, из которой выводят два следующих 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 является мнимой единицей, ω является угловой частотой (то есть, $2\pi c/\lambda$, где c обозначает скорость свет в вакууме и λ обозначает длину волны), n_{Sym} и n_{ASym} представляют собой эффективные индексы, относящиеся к модам симметричных и антисимметричных колебаний (соответственно), в то время как n_g является групповым индексом автономного (без возмущений) волновода. n_{Sym} и n_{ASym} могут быть оценены посредством метода конечных элементов при рассмотрении электромагнитного распределения оптического поля в поперечном сечении двух связанных волноводов, в то время как n_g получают в результате электромагнитного анализа поперечного сечения автономного волновода без возмущений. Важно заметить, что n_{Sym} и n_{ASym} являются функциями расстояния ζ между поперечными сечениями двух свя-

занных оптических волноводов, которое можно оценить путем рассмотрения расстояния между осями двух VSRR, как показано на фиг. 4.

Расстояние ξ зависит от расстояния по вертикали q между двумя VSRR и от угла поворота θ при фиксированном расстоянии R между осью вращения и осями колец. Иными словами, применительно к структуре, изображенной на фиг. 1, при изолировании одиночной пары VSRR, как показано на фиг. 4, роторное кольцо получает возможность поворота на угол θ , воздействуя тем самым на распределение электромагнитного поля и, как следствие, на значения n_{Sym} и n_{Asym} . При этом динамику вращательных перемещений системы оценивают по зависимости n_{Sym} и n_{Asym} во вращательном режиме в уравнении (1). В третьем члене уравнения (1) является константой распространения волновода без возмущений (то есть, $\beta = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda = \omega_{\text{eff}}/c$), k является константой распространения, функцией q и θ , связанных с комбинацией n_{Sym} и n_{Asym} .

Если пренебречь потерями распространения, то двумя генеральными решениями $a_1(\zeta)$ и $a_2(\zeta)$ системы, описываемой уравнением 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 путем наложения граничных условий. Первым граничным условием является:

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

Уравнение (3) является условием замкнутости, связанным с круговой формой и с условием, согласно которому верхнее кольцо связано только с нижним кольцом, но не с главным кольцом. L является усредненным периметром каждого кольца в паре VSRR (то есть, $L=2\pi r$).

Если предположить наличие одиночного источника возбуждения (то есть, E_{i1} на фиг. 3b)), связь между главным кольцом и одним из нижних колец моделируется посредством следующей матрицы переходов:

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

где E_{i1} - амплитуда сигнала в главном кольце перед взаимодействием с парой VSRR и E^t - амплитуда сигнала в главном кольце после взаимодействия с парой VSRR (см. фиг. 3a). Второе уравнение системы уравнений (4) определяет второе граничное условие следующим образом:

$$a_1(L) = \frac{a_1(0) - jhE_{i1}}{\tau} \quad (5)$$

При наложении двух граничных условий (уравнения (3) и (5)) на систему в уравнении (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 фиксированном порядке "m" резонанса условия резонанса (получаемые при представлении знаменателя уравнения (6) равным нулю) возникают при $\omega \approx \omega^{\text{m}\pm}$, где $\omega^{\text{m}+}$ является частотой резонанса симметричных колебаний и $\omega^{\text{m}-}$ является частотой резонанса антисимметричных колебаний. Эти резонансы являются комбинациями расхождения между n_{Sym} и n_{Asym} , и они выражаются следующим образом:

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

где ω^{m} является частотой резонанса (λ_m является длиной волны резонанса) одиночного кольцевого резонатора (в плоскости статора), происходящего при расстоянии между двумя VSRR, достаточно большим для исключения взаимодействия между ними.

ω^{m} (λ_r) определяется следующим образом:

$$\omega_m = \frac{2c\pi}{Ln_{\text{eff}}} \rightarrow \lambda_m = \frac{Ln_{\text{eff}}}{m} \quad (8)$$

Условие резонанса соответствует условию, при котором $\omega L/c = 2\pi m$, где m соответствует порядку резонанса. Путем объединения уравнений (4) и (6) получаем амплитуду оптического поля, передаваемую по главному кольцу через пару VSRR, в следующем виде:

$$t(\lambda, q, \theta) = \frac{E_r}{E_{i1}} = \tau + \frac{h^2 e^{j\beta(\lambda)L} [e^{j\beta(\lambda)L} - \cos[k(q,\theta)L]]}{1 + \tau e^{2j\beta(\lambda)L} - (1-\tau)e^{j\beta(\lambda)L} \cos[k(q,\theta)L]} \quad (9)$$

Действительность данной модели была оценена посредством трехмерного конечно-разностного ме-

тогда анализа во временной области (3D-FDTD).

Оптические волноводные структуры, образующие кольцевые резонаторы и два шинных волновода фотонного резонансного двигателя, предпочтительно представляют собой силиконовые проволы (показатель преломления кремния $n_{Si} = 3,45$), характеризующиеся поперечным сечением шириной $W = 500$ нм и высотой $H = 300$ нм. Силиконовые кольцевые резонаторы ротора и статора крепятся к двум дискам из двуокиси кремния (показатель преломления $n_{SiO_2} = 1,46$), принадлежащих двум разным силиконовым подложкам. Две разные плоскости (ротора и статора) соединены между собой через механический стык, изготовленный из двуокиси кремния (предполагается наличие встроенного штыря в роторе и соответствующего посадочного гнезда в статоре) и окруженный воздухом ($n_{возд} = 1$).

Волноводные компоненты предпочтительно реализованы по технологии кремниевой фотоники, обеспечивающей крайне высокую степень миниатюризации устройств интегральной оптики и соответственно усиление оптико-механических эффектов благодаря сильному взаимодействию между светом и предметом воздействия, что может быть использовано в качестве фундаментальной стратегии для оптимального функционирования фотонного резонансного двигателя.

В конкретном случае с парой уложенных в стек по вертикали кольцевых резонаторов рассматривается матрица собственных значений, получаемая путем нахождения длин волн резонанса, при которых обнуляется знаменатель уравнения (9). Фиг. 5а иллюстрирует динамику расщепления моды, когда $\theta=0$ [рад] и q , расстояние по вертикали, является свободным параметром (то есть, два VSRР имеют свободу перемещения в осевом направлении). Для упрощения мы можем переименовать $k(q,0)$ в $k(q)$, и в результате асимметричные резонансы, связанные с расщеплением моды, регулируются посредством:

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

Путем фиксации $q=q^*$ (то есть, путем фиксации расстояния, относящегося к вертикальной связи, с целью функционирования в состоянии ниже состояния "улавливания", как описано в работе авторов Р. Т. Rakich, М. А. Popović, М. Soljačić, and Е. Р. Ippen, "Улавливание, осваивание и спектральное связывание оптических резонансов посредством индуцируемых оптическими средствами потенциалов," Nat. Photonics 1(11), 658-665 (2007), что соответствует пересечению двух асимметричных резонансов двух соседних порядков резонанса) и путем рассмотрения кольца ротора, свободно поворачивающегося на угол θ по отношению к кольцу статора, динамику расщепления мод вращательной структуры можно оценивать посредством

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

Интуитивно, применительно к варианту реализации фотонного двигателя на фиг. 1, характеризующемся наличием четырех пар VSRР, распределенных по кругу, такое же состояние расщепления моды, какое происходит при $\theta=0$ в одиночной паре VSRР, возникает при $\theta=2\pi r/N$ (r является целым числом и N обозначает суммарное количество пар VSRР, показанных на фиг. 5b).

В состояниях с углом поворота $\theta=(2r+1)\pi/N$ кольцевой резонатор ротора полностью "развязан" относительно всех кольцевых резонаторов статора, и обмен электромагнитной энергией между кольцевыми резонаторами статора и ротора полностью отсутствует. В спектре передачи данное состояние визуально распознаётся как исчезновение расщепления моды, поскольку две линии резонанса совпадают с линией резонанса кольцевого резонатора автономного статора ($\lambda_{\pm}^m \approx \lambda_m$). Кроме того, вследствие непрерывности собственных значений и ротационной асимметрии - то есть, $\lambda_{\pm}^m(\theta^*) = \lambda_{\pm}^m(-\theta^*)$ - динамика расщепления моды характеризуется смещением минимума при $\lambda_{\pm}^m \approx \lambda_m$ для углов $\theta=(2r+1)\pi/N$ и смещением максимума 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 расщепления ротационной моды определяется уравнением:

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

Состояния, выражаемые уравнениями (10) - (12), графически представлены на фиг. 5, где изображена динамика расщепления моды применительно к одиночной паре VSRР. На фиг. 5 а расстояние q между кольцами является переменным, в то время как угол поворота θ равняется нулю; иначе, на фиг. 5b межкольцевой угол поворота θ изменяется от 0 до 2π , в то время как q фиксировано равняется q^* .

Исходя из предыдущих оценок, фиксированное значение $q=q^*=400$ нм и принимается радиус поворота $R=r \cdot W/2 \approx 5$ мкм, действительный для поперечных сечений волновода, приближенных к оси вращения. С помощью этих параметров, задействованных в методе конечных элементов, смоделируем ротационную динамику n_{Sym} (см. фиг. 6) и n_{Asym} (см. фиг. 7) для малых углов в пределах условий $\theta=2\pi r/N$ в диапазоне углов $[2\pi r/N-0.4, 2\pi r/N+0.4]$. Ясно, что независимо от соотношения приведенного здесь изложения по ротационной динамике с поперечными сечениями волнопроводов, максимально приближенными к

оси вращения оптического двигателя (то есть, $R-r-W/2 \approx 5$ мкм), полученные результаты указывают на такой же тренд для поперечных сечений волноводов с более высокими значениями радиусов поворота. Поэтому при применении вращения по часовой стрелке для $n_{\text{Sym}}(\theta)$ отображается квазираспределение Лоренца, показанное на фиг. 6.

При этом были успешно интерполированы числовые данные метода конечных элементов (FEM) с помощью следующей функции:

$$n_{\text{Sym}}(\theta) \approx n_g + \frac{1}{2\pi} \frac{a}{\left(\theta^2 + \left(\frac{1}{2}a\right)^2\right)^\gamma} \quad (13)$$

где $a=12$ и $\gamma=1,87$.

Фиг. 6 иллюстрирует также распределение электромагнитного поля, соответствующее повороту поперечного сечения волновода ротора, при переходе от вкладки 1) к вкладке 13).

Следуя такому же условию оценки, как для $n_{\text{Sym}}(\theta)$, показана оценка для $n_{\text{Asym}}(\theta)$ на фиг. 7.

С целью упрощения интерполяция $n_{\text{Asym}}(\theta)$ была выполнена при помощи квазифункции Лоренца с сохранением параметров предыдущего уравнения (13):

$$n_{\text{Asym}}(\theta) \approx n_g - \frac{1}{2\pi} \frac{a}{\left(\theta^2 + \left(\frac{1}{2}a\right)^2\right)^\gamma} \quad (14)$$

Хотя числовые данные метода конечных элементов (FEM) для $n_{\text{Asym}}(\theta)$ были интерполированы с высокой степенью аппроксимации по отношению к интерполированию $n_{\text{Sym}}(\theta)$, данное выражение по интуитивной оценке показывает, что $n_{\text{Asym}}(\theta)$ по своим характеристикам полностью перевернута по отношению к $n_{\text{Sym}}(\theta)$.

Из фиг. 6 и фиг. 7 легко заметить, что $n_{\text{Sym}}(\theta) \approx n_{\text{Asym}}(\theta) \approx n_g$ при $\theta < -10^\circ$ и $\theta > 10^\circ$. Для поперечных сечений волноводов, более удаленных от оси вращения (то есть, при расстояниях в диапазоне от $R-r-W/2$ до $R+r+W/2$) получаются угловые интервалы взаимодействия для $n_{\text{Sym}}(\theta)$ и $n_{\text{Asym}}(\theta)$, более узкие по сравнению с показанными на фиг. 6 и фиг. 7, действительными при $R-r-W/2 \approx 5$ мкм, поскольку область связи, выражаемая линейным расстоянием, остается постоянной при любом радиусе R .

После определения динамики расщепления ротационной моды одиночной пары VSRR приступаем к разработке оптической модели для N пар VSRR в конфигурации с замкнутой петлей и с возбуждением посредством двух шинных волноводов (то есть, WG1 и WG2 на фиг. 1,2).

Вначале обратимся к фиг. 8, где представлена конфигурация разомкнутой петли N пар параллельно связанных между собой VSRR и где значение фазы, соответствующей фазовой задержке вдоль главного кольца, равняется $\Phi_{\text{MR}} = 4\pi^2 n g R_{\text{MR}} / \lambda$, где радиус главного кольца R_{MR} равняется $R+r+d+3W/2$. N пар VSRR (то есть, $N=4$ на фиг. 1(a)) смещаются с целью их равномерного пространственного разнесения (то есть, периодически смещаются) таким образом, что значение фазы, относящееся к оптическому тракту между $p^{\text{ой}}$ парой VSRR и $(p+1)^{\text{ой}}$ парой, равняется $\Phi_{\text{EX}} = \Phi_{\text{MR}} / N$, где N - количество пар VSRR.

Согласно работе автора D.G. Rabus "Интегральный кольцевой резонатор", Компендиум. Нью-Йорк: издательство Springer-Verlag, 2007 образование внутри резонатора амплитуды электрического оптического поля в связи с наличием главного кольца может быть выражено следующим образом:

$$E_{\text{Out}} = \frac{j\zeta t(\lambda)^N e^{j\Phi_{\text{ex}}}}{1 - t(\lambda)^{2N} \sqrt{1 - \zeta^2} e^{j2\Phi_{\text{ex}}}} E_{\text{In}} \quad (15)$$

где ζ - амплитуда оптического поля, переносимая от шинного волновода WG1/WG2 к главному кольцу и зависящая от геометрического зазора g между WG1/WG2 и главным кольцом (см. фиг. 2a).

Коэффициент усиления мощности E_N в главном кольце равняется:

$$E_N = \frac{|E_{\text{EX}}|^2}{|E_{\text{IN}}|^2} = \zeta^2 \left| \frac{t(\lambda)^N}{1 - \psi t(\lambda)^{2N} e^{j2\Phi_{\text{ex}}}} \right|^2 \quad (16)$$

E_N является базовым параметром, поскольку в нем учитывается усиление мощности внутри резонатора по отношению к мощности $|E_{\text{IN}}|^2$, возбуждающей шинные волноводы WG1/WG2. В системе оптического резонанса, где величина оптико-механической силы линейно зависит от входной оптической мощности, при значениях ζ , допускающих ослабленную связь (то есть, ниже состояния критической связи) оптического резонатора, усиление мощности E_N внутри резонатора представляет коэффициент повышения уровня (например, по отношению к одиночной паре VSSR, напрямую возбуждаемой через шинный волновод).

Таблица 1. Фотонный резонансный двигатель: физические параметры, символы и предполагаемые значения

Физические параметры	Символы	Предполагаемые значения
Показатель преломления силикона	n_{Si}	3,45
Показатель преломления двуокиси кремния	n_{SiO_2}	1,46
Показатель преломления воздуха	n_{air}	1
Ширина волновода	W	500 нм
Высота волновода	H	300 нм
Пары уложенных в вертикальные стеки кольцевых резонаторов (VSRR)	N	4
Вертикальный зазор между кольцами/коэффициент связи между кольцами на единицу микронов	$q/k@1,55$ $мкм^*$	400 нм/0,0164*
Нормализованная амплитуда поля при связи от главного кольца к кольцам	h	0,1
Нормализованная амплитуда поля при связи от шинных волноводов к главному кольцу	ζ	0,1
Радиус кольца	r	5 мкм
Радиус кольца	R	15 мкм
Расстояние между осью вращения и центром колец	R_{MR}	$R+r+d+3W/2$
Радиус главного кольца	R_0	$>R_{MR}$
Радиус ротора	P_i	100 мВт
Входная мощность		

Применительно к физическим параметрам, приведенным в табл. 1, на фиг. 9а представлена динамика изменения коэффициента усиления E_N из уравнения 16 в зависимости от длины волны λ и $k(q)$ с целью дополнительного включения в анализ динамики расщепления фазы. Вследствие наличия четырех пар VSRR, замкнутых по петле внутри главного кольца, динамика расщепления моды отличается от динамики для одиночной пары VSRR. При значениях $k(q)$ в диапазоне от $0,002 \text{ мкм}^{-1}$ и $0,02 \text{ мкм}^{-1}$ фотонный двигатель демонстрирует динамику расщепления, характеризующуюся центральной линией резонанса с центром в λ_m (по аналогии с фиг. 5а) и двумя линиями асимметричного резонанса, здесь именуемыми λ_{pm}^+ и λ_{pm}^- (по аналогии с λ^+ и λ^- на фиг. 5а), которые не сходятся в состояние вырожденной моды (λ_m , как показано на фиг. 5а). При $k(q)=0$ (то есть, $q \rightarrow \pm\infty$) мы доказали, что резонанс λ_{pm}^+ и λ_{pm}^- принимает значения в зависимости от всех физических параметров, указанных в табл. 1. Аналогично динамике расщепления углового режима для одиночной пары VSRR, представленной на фиг. 5b, на фиг. 9b взаимодействие четырех пар VSRR с $q = q^*$, замкнутых по петле внутри главного кольца, позволяет угловое взаимодействие в диапазоне $[2\pi r/N-0,4, 2\pi r/N+0,4]$ при следовании тренду, аналогичному тому, который рассмотрен на фиг. 5b. Правда, тренд аналогичен, но не идентичен представленному на фиг. 5b ввиду наличия прямой линии резонанса с центром в λ_m , что устраняет сходимость при λ_m двух линий асимметричного резонанса λ_{pm}^+ и λ_{pm}^- . Мы доказали, что тренд идеально совпадает с трендом на фиг. 5b только для одиночной пары VSRR.

Теперь, возвращаясь к рассмотрению геометрической конструкции, изображенной на фиг. 4, где ξ является расстоянием между двумя центрами двух колец одиночной пары VSRR, $q=q^*$ является фиксированным расстоянием по вертикали между двумя VSRR, R является расстоянием между осью вращения и центрами VSRR, θ является углом поворота кольца ротора по отношению к соответствующему кольцу статора и предполагается нулевой базовый угол для вращений ($\theta = 0$) в конфигурации с идеальным образованием стека, последующее описание подразумевает действительность при малых углах поворота вблизи $\theta = 0$ и увеличение θ только в положительном направлении ($d\theta > 0$, то есть, всегда поддерживается одно и то же направление вращения).

Физические параметры оптических резонаторов, включая геометрические характеристики волноводных колец и их поперечные сечения, сводятся в эквивалентную концентрированную точку, совпадающую с геометрическим центром каждого кольцевого резонатора (расположенного на расстоянии R от оси вращения). При таком предположении в центре внимания оптико-механической теории находится модель с сосредоточенными параметрами, позволяющая исследовать взаимные силы, действующие

вдоль подвижной линии, соединяющей эти точки между собой (то есть, см. эквивалентные точки статора и ротора P_S и P_R на фиг. 10а).

Механические характеристики фотонного резонансного двигателя регулируются оптико-механической силой F_ξ , создаваемой усиленным резонатором радиационным давлением, действующим между P_S и P_R . Значение F_ξ может быть получено посредством квантового аргумента или классического аргумента генерируемыми между двумя резонаторами со слабой связью, как указано авторами M. L. Povinelli, Steven G. Johnson, Marko Loncar, Mihai Ibanescu, Elizabeth J. Smythe, Federico Capasso и J. D. Joannopoulos в работе "Наращивание оптических сил притяжения и отталкивания при высокой добротности между связанными резонаторами моды типа шепчущей галереи," Opt. Express 13, 8286-8295 (2005). Оно определяется следующим уравнением:

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

где P является оптической мощностью, циркулирующей в одиночной паре VSRR, и P определяется следующим уравнением:

$$P = P_i E_N \quad (18)$$

где P_i - мощность входного источника (например, лазера) и E_N - коэффициент усиления мощности (уравнение 16) и где Q_m является коэффициентом добротности автономного кольцевого резонатора, соотносимым с m -ым порядком резонанса, который может быть оценен для угловых состояний $\theta = (2p+1)\pi/N$ (состояние без связи).

Энергия U_r электромагнитного резонанса, хранящаяся в кольцевом резонаторе одиночного статора, определяется следующим выражением:

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

При предположении о малых углах поворота, близких к нулевому базовому углу, можно учитывать вместо длины хорды преобразованное к линейному виду расстояние $R\theta$ (соответствующее проекции расстояния ξ на плоскость x - y - см. фиг. 10b и фиг. 4а). Таким образом, ξ можно представить в следующем виде:

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

Учитывая уравнение (20) и уравнение (12), $\Delta\lambda(\theta) = \lambda_{m\pm}(\theta) - \lambda_\tau$, так что $d(\Delta\lambda(\theta)) = d(\lambda_{m\pm}(\theta)) \approx d(\lambda_{pm\pm}(\theta))$, уравнение 17 можно представить в следующем виде:

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

Обычно считают негативом силы притяжения, соответствующие линии симметричного резонанса, и позитивом - силы отталкивания, соответствующие линии антисимметричного резонанса. Таким образом, F_ξ можно представить как $F_\xi\lambda^+$ и $F_\xi\lambda^-$ для линии симметричного и антисимметричного резонанса (см. фиг. 9b), λ_{pm}^+ и λ_{pm}^- (соответственно) представить как:

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

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

Вследствие редуцирования эквивалентной системы с сосредоточенными параметрами, $F_\xi\lambda^+$ и $F_\xi\lambda^-$ действуют вдоль ξ (то есть, подвижной линии, соединяющей центры колец статора и ротора). С учетом угла γ (см. фиг. 10b), определенного как:

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

двумя конкретными проекциями суммарной силы $F_\xi\lambda^{+(-)}$ считаются осевая составляющая, $F_{z\lambda}^{+(-)}$ и касательная составляющая $F_{\theta\lambda}^{+(-)}$, выражаемые следующими уравнениями:

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

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

$F_{z\lambda}^{+(-)}$ уравновешивается силами противодействия, определяемыми наружным каркасом, в то время как $F_{\theta\lambda}^{+(-)}$ вызывает движение ротора.

Применительно к конкретной конфигурации фотонного двигателя, приведенной на фиг. 1 и 2, где

$N=4$, на фиг. 11 изображена кривая, отображающая распределение оптико-механической силы для линии симметричного резонанса λ^+ (см. матрицу собственных значений на фиг. 5b и 9b) в зависимости от угла поворота. Распределение оптико-механической силы для линии антисимметричного резонанса λ^- является перевернутым по отношению к распределению для линии симметричного резонанса и не рассматривается в целях упрощения изложения.

Крутящий момент $C^1(\theta)$, создаваемый одиночной парой связанных колец и воздействующий на ротор, вычисляется путем умножения значения касательной составляющей $F\theta\lambda^{+(-)}$ на расстояние R от точки P_R до оси вращения. Как отмечено ранее, данное предположение (подразумевающее перпендикулярные направления для $F\theta\lambda^{+(-)}$ и R) приемлемо при рассмотрении малых углов поворота, близких по значению к нулевому базовому углу:

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

В представленной конфигурации ($N=4$ CVSRR, равномерно разнесенных по диапазону 2π радиан), для определения суммарного крутящего момента $C(\theta)$ можно просуммировать N совпадающих по фазе функций:

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

Легко заметить, что суммарный крутящий момент линейно возрастает при растущем динамическом параметре $F\theta\lambda^{+(-)}$ и при увеличении топологических/геометрических параметров N и R .

На фиг. 12 представлено распределение оптико-механического крутящего момента для линии λ^+ симметричного резонанса в зависимости от угла поворота θ .

Одной из методик с минимальным набором средств управления, которая может быть использована для поддержания вращения в такой системе и выделения полезного крутящего момента от ротора, является синхронный отсчет времени: при работе с линией асимметричного резонанса (силами притяжения) необходимо поддерживать активное состояние источника (лазера) только на фазе приближения колец и выключать его при образовании идеального стека между кольцами ротора и соответствующими кольцами статора. По окончании этой фазы ротор благодаря силам инерции сохраняет свое движение вплоть до вхождения в следующее состояние связи с кольцом другого статора.

Альтернативой данной методике с минимальным набором средств управления является работа с линией антисимметричного резонанса (силами отталкивания) с включением источника (лазера) только в состоянии идеального стека между кольцами ротора и кольцами соответствующего статора и поддержанием его включенного состояния в течение всей фазы выхода до момента, когда обрывается оптическая связь между взаимодействующими кольцами.

Другой способ состоит в использовании комбинации указанных выше методик, обеспечивая переключение с сил притяжения (на фазе приближения) на силы отталкивания (на фазе выхода).

Более сложная, но эффективная методика, которая может быть применена для получения полного контроля над перемещением, представлена архитектурой пошаговых действий: рассмотрим для примера линию симметричного резонанса (с силами притяжения) и одиночное кольцо статора, которое в активном состоянии притягивает к себе ближайшее кольцо ротора, пока не улавливается в положении локального нуля (состоянии образования стека). Для перехода к следующему движению (шагу) драйвер отключает предыдущее кольцо статора и активирует следующее кольцо. Упомянутое выше кольцо ротора покидает свое текущее положение, поскольку оно притягивается другим кольцом статора, и ротор целиком перемещается вплоть до занятия им нового установочного положения. Данный процесс повторяется (даже в обоих направлениях вращения) в зависимости от действий, предпринимаемых драйвером. Следует заметить, что предложенный выше вариант реализации настоящего изобретения является иллюстративным и не подразумевает ограничения настоящего изобретения. Специалист со средним уровнем знаний в данной области сможет легко реализовать данное изобретение в различных вариантах без отступления от заложенных в него принципов. Это относится, в частности, к возможностям варьирования первой конструкции оптических волноводов, второй конструкции оптических волноводов и конструкции оптического волновода возбуждения, связанного с указанными конструкциями оптических волноводов.

Фиг. 13 иллюстрирует альтернативный вариант реализации фотонного резонансного двигателя M согласно изобретению, в котором первая конструкция оптических волноводов включает в себя по меньшей мере два поднабора оптических кольцевых резонаторов с перемежающимся расположением вдоль общего кругового тракта на плоскости статора (на фигуре изображен в качестве примера ряд из восьми оптических кольцевых резонаторов - по четыре в каждом поднаборе). Первый поднабор оптических кольцевых резонаторов 13, 23, 33, 43 получает возбуждение через первый волновод $WG3$, встроенный в круговой тракт и имеющий оптимизированную форму - такую, при которой он подводится на предварительно определенное расстояние связи в оптическом режиме к каждому из оптических резонаторов 13, 23, 33, 43 первого поднабора, причем первый волновод $WG3$ выполнен с возможностью получения по меньшей мере одного оптического излучения с предварительно определенной длиной волны от первого входа $S3$ оптического излучения. Второй поднабор оптических кольцевых резонаторов 53, 63, 73, 83 по-

лучает возбуждение через второй волновод WG4, встроенный в круговой тракт и имеющий оптимизированную форму - такую, при которой он подводится на предварительно определенное расстояние связи в оптическом режиме к каждому из оптических резонаторов 53, 63, 73, 83 второго поднабора в некоторых конкретных намеченных точках, причем второй волновод WG4 выполнен с возможностью получения по меньшей мере одного оптического излучения с предварительно определенной длиной волны от второго входа S4 оптического излучения.

Фиг. 14 иллюстрирует альтернативный вариант реализации фотонного резонансного двигателя М согласно изобретению, в котором первая конструкция с оптических волноводов включает в себя поднабор оптических кольцевых резонаторов 14-84, размещенных вдоль общего кругового тракта на плоскости статора (на фигуре изображен в качестве примера круговой ряд из восьми оптических кольцевых резонаторов). Главный кольцевой резонатор MR2 встроен в круговой тракт и имеет обычную округлую форму, при которой он подводится на предварительно заданное расстояние связи в оптическом режиме к каждому оптическому резонатору через регулярно разнесенные угловые позиции. Главный кольцевой резонатор MR2 получает возбуждение через прямолинейный волновод WG5, выполненный с возможностью получения по меньшей мере одного оптического излучения с предварительно определенной длиной волны от входа S5 оптического излучения с прохождением по касательной вблизи главного кольцевого резонатора MR2.

Фиг. 15 иллюстрирует альтернативный вариант реализации фотонного резонансного двигателя М согласно изобретению, в котором первая конструкция с оптических волноводов включает в себя два поднабора оптических кольцевых резонаторов 15-85, 115-185, размещенных вдоль коаксиальных круговых трактов на плоскости статора (на фигуре изображены в качестве примера два круговых ряда - по восемь оптических кольцевых резонаторов в каждом). Главный кольцевой резонатор MR3 встроен в круговые тракты двух поднаборов оптических кольцевых резонаторов и имеет обычную округлую форму, при которой он подводится на предварительно заданное расстояние связи в оптическом режиме к каждому оптическому резонатору 15-85 наружного поднабора коаксиально расположенных оптических кольцевых резонаторов через регулярно разнесенные угловые позиции. Главный кольцевой резонатор MR3 получает возбуждение через прямолинейный волновод WG6, выполненный с возможностью получения по меньшей мере одного оптического излучения с предварительно определенной длиной волны от входа S6 оптического излучения с прохождением по касательной вблизи главного кольцевого резонатора MR3.

Фиг. 16 иллюстрирует альтернативный вариант реализации фотонного резонансного двигателя М согласно изобретению, в котором первая конструкция с оптических волноводов включает в себя ряд оптических кольцевых резонаторов 16, 26, 36, 46, размещенных вдоль линейного тракта на плоскости статора (на фигуре изображен в качестве примера ряд из четырех оптических кольцевых резонаторов). Оптические кольцевые резонаторы получают возбуждение через прямолинейный волновод WG7, проходящий сбоку от линейного тракта оптических кольцевых резонаторов таким образом, что он подводится на предварительно определенное расстояние связи в оптическом режиме к каждому из равномерно разнесенных оптических резонаторов, причем волновод WG7 выполнен с возможностью получения по меньшей мере одного оптического излучения с предварительно определенной длиной волны от входа S7 оптического излучения.

Фиг. 17 иллюстрирует еще один альтернативный вариант реализации фотонного резонансного двигателя М согласно изобретению, в котором первая конструкция оптических волноводов включает в себя три поднабора оптических кольцевых резонаторов, расположенных вдоль кругового тракта на плоскости статора, причем каждый поднабор оптических кольцевых резонаторов содержит пару оптических кольцевых резонаторов 17-27, 37-47, 57-67. Соответствующий главный кольцевой резонатор MR4, MR5, MR6 встроен в каждый поднабор оптических кольцевых резонаторов и имеет обычную эллипсоидальную форму, при которой он подводится на предварительно определенное расстояние связи в оптическом режиме к каждому оптическому резонатору поднабора на равномерно разнесенных угловых позициях. Каждый главный кольцевой резонатор MR4, MR5, MR6 получает возбуждение через соответствующий прямолинейный волновод WG8, WG9, WG10, выполненный с возможностью получения соответствующего оптического излучения с предварительно определенной длиной волны от соответствующего входа S8, S9, S10 с прохождением по касательной вблизи главного кольцевого резонатора.

Естественно, принцип изобретения остается одним и тем же; варианты реализации могут изменяться по сравнению с тем, что было рассмотрено на примерах, не подразумевающих ограничений, и специалисту со средним уровнем знаний в данной области понятно, что оптическое и оптико-механическое моделирование фотонного резонансного двигателя, описанное выше со ссылками на конструкцию, изображенную на фиг. 1а и 1б и проиллюстрированное ссылками на фиг. 2- 2, применимо также к конструкциям фотонного резонансного двигателя, раскрытым на фиг. 13-17, без отступления от объема патентной защиты, определяемого прилагаемой формулой изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Фотонный двигатель, характеризующийся тем, что он содержит по меньшей мере один вход оптического излучения;

первую конструкцию оптических волноводов, включающую в себя по меньшей мере один первый оптический резонатор, расположенный в первой плоскости для образования статической части указанного двигателя в предварительно заданной системе исходных координат двигателя;

конструкцию оптических волноводов возбуждения, связанную с указанной первой конструкцией оптических волноводов на предварительно заданном расстоянии связи оптической моды к указанному по меньшей мере одному первому оптическому резонатору и выполненное с возможностью приема по меньшей мере одного оптического излучения на предварительно определенной длине волны от указанного по меньшей мере одного входа оптического излучения и с возможностью оптического связывания указанного оптического излучения с указанным по меньшей мере одним первым оптическим резонатором;

по меньшей мере вторую конструкцию оптических волноводов, включая по меньшей мере один второй оптический резонатор, расположенный во второй плоскости, параллельной указанной первой плоскости на предварительно заданном расстоянии образования стека по перпендикуляру к указанным плоскостям, причем вторая конструкция оптических волноводов выполнена с возможностью перемещения в указанной второй плоскости по отношению к указанной первой конструкции оптических волноводов в соответствии по меньшей мере с предварительно заданным направлением движения так, чтобы образовать подвижную часть указанного двигателя в предварительно определенной системе исходных координат двигателя,

где указанное предварительно определенное расстояние образования стека адаптировано к установлению связи в режиме затухающей волны оптических мод между по меньшей мере одним первым оптическим резонатором указанной первой конструкции волноводов и по меньшей мере одним вторым оптическим резонатором указанной второй конструкции оптических волноводов в состоянии близости указанного первого и второго резонатора между собой в плоскости, поперечной относительно указанных первой и второй плоскости, где происходит локальное перемещение указанной второй конструкции,

причем первый и второй оптические резонаторы адаптированы к направлению по меньшей мере одной резонансной моды симметричных колебаний на предварительно заданной первой длине волны, или по меньшей мере одной резонансной моды антисимметричных колебаний на предварительно заданной второй длине волны, или по меньшей мере комбинации или взаимного наложения по меньшей мере одной резонансной моды симметричных колебаний на предварительно заданной первой длине волны и по меньшей мере одной резонансной моды антисимметричных колебаний на предварительно заданной второй длине волны в зависимости от указанного расстояния образования стека, а также от расстояния между указанными первым и вторым оптическими резонаторами в поперечной плоскости, и

где после избирательного установления резонансной моды симметричных колебаний создается состояние притяжения указанного второго оптического резонатора по отношению к указанному первому оптическому резонатору, в котором в указанной второй плоскости генерируется движение приближения второго оптического резонатора к первому оптическому резонатору согласно указанному предварительно заданному направлению локального перемещения, а после избирательного установления резонансной моды антисимметричных колебаний устанавливается состояние отталкивания указанного второго оптического резонатора от указанного первого оптического резонатора, в котором в указанной второй плоскости генерируется движение отдаления второго оптического резонатора от первого оптического резонатора в соответствии с указанным предварительно заданным направлением локального перемещения.

2. Фотонный двигатель по п.1, дополнительно содержащий средства регулировки, настроенные на управление, по меньшей мере, параметром излучения от указанного по меньшей мере одного входа оптического излучения таким образом, чтобы избирательно устанавливать по меньшей мере одну из двух резонансных мод - симметричных колебаний и антисимметричных колебаний.

3. Фотонный двигатель по п.2, в котором указанная первая конструкция оптических волноводов включает в себя множество первых оптических резонаторов и указанные средства регулировки настроены на синхронное управление длиной волны излучения от указанного входа оптического излучения так, чтобы избирательно переключаться с резонансной моды симметричных колебаний на резонансную моду антисимметричных колебаний, когда указанный по меньшей мере один второй оптический резонатор вдоль указанного предварительно определенного направления перемещения во второй плоскости приближается к состоянию образования стека по отношению к связанному первому оптическому резонатору вдоль указанного предварительно определенного направления перемещения в первой плоскости, или

на синхронное управление (сразу после фиксации резонансной моды симметричных колебаний) активацией входа оптического излучения только в течение фазы сближения с выключением входа, когда указанный по меньшей мере один второй оптический резонатор вдоль указанного предварительно определенного направления перемещения во второй плоскости приближается к состоянию образования стека по отношению к связанному первому оптическому резонатору вдоль указанного предварительно опреде-

ленного направления перемещения в первой плоскости и под действием силы инерции входит в следующее состояние связи с другим первым оптическим резонатором вдоль указанного предварительно определенного направления перемещения в первой плоскости, или

на синхронное управление (сразу после фиксации резонансной моды антисимметричных колебаний) активацией входа оптического излучения только в течение фазы выхода с включением входа, когда указанный по меньшей мере один второй оптический резонатор вдоль указанного предварительно определенного направления перемещения во второй плоскости находится вблизи состояния образования стека по отношению к связанному первому оптическому резонатору вдоль указанного предварительно определенного направления перемещения в первой плоскости, и с выключением его, когда указанный по меньшей мере один второй оптический резонатор вдоль указанного предварительно определенного направления перемещения во второй плоскости выходит из состояния связи с указанным первым оптическим резонатором и благодаря силе инерции входит в следующее состояние связи с другим первым оптическим резонатором вдоль указанного предварительно определенного направления перемещения в первой плоскости.

4. Фотонный двигатель по пп.1, 2 или 3, в котором параметром излучения от указанного входа оптического излучения является по меньшей мере один из следующих: длина волны, фаза, поляризация указанного излучения, соотношение времени включения/выключения указанного излучения, мощность указанного излучения.

5. Фотонный двигатель по любому из предшествующих пунктов, в котором указанная первая конструкция оптических волноводов включает в себя множество первых оптических резонаторов, расположенных вдоль по меньшей мере одного предварительно определенного тракта в первой плоскости и указанная вторая конструкция оптических волноводов включает в себя множество вторых оптических резонаторов, расположенных вдоль по меньшей мере одного предварительно определенного тракта во второй плоскости.

6. Фотонный двигатель по п.5, в котором указанные средства регулировки настроены на автоматическое управление по меньшей мере параметром излучения от указанного по меньшей мере одного входа оптического излучения с тем, чтобы избирательно устанавливать резонансную моду симметричных колебаний, когда позиция указанного по меньшей мере одного второго оптического резонатора вдоль указанного по меньшей мере одной предварительно определенного тракта во второй плоскости оказывается позади позиции связанного первого оптического резонатора вдоль указанного по меньшей мере одного предварительно определенного тракта в первой плоскости в соответствии с указанным предварительно заданным направлением перемещения, и резонансную моду антисимметричных колебаний, когда позиция указанного по меньшей мере одного второго оптического резонатора вдоль указанного по меньшей мере одного предварительно определенного тракта во второй плоскости оказывается впереди позиции указанного связанного первого оптического резонатора вдоль указанного по меньшей мере одного предварительно определенного тракта в первой плоскости в соответствии с указанным предварительно заданным направлением перемещения.

7. Фотонный двигатель по п.5, в котором указанный по меньшей мере один предварительно определенный тракт в первой плоскости и указанный по меньшей мере один предварительно определенный тракт во второй плоскости являются замкнутыми трактами.

8. Фотонный двигатель по п.7, в котором указанные замкнутые тракты являются круговыми трактами.

9. Фотонный двигатель по п.7 или 8, в котором замкнутый тракт вторых оптических резонаторов в указанной второй конструкции оптических волноводов является коаксиальным к замкнутому тракту первых оптических резонаторов в указанной первой конструкции оптических волноводов.

10. Фотонный двигатель по п.5, в котором указанная по меньшей мере один предварительно определенный тракт в первой плоскости и указанный по меньшей мере один предварительно определенный тракт во второй плоскости являются прямолинейными трактами.

11. Фотонный двигатель по п.5, в котором указанные оптические резонаторы равномерно распределены вдоль указанных предварительно определенных трактов.

12. Фотонный двигатель по любому из предшествующих пунктов, в котором указанные первый и второй оптические резонаторы являются кольцевыми резонаторами, предпочтительно круглыми кольцевыми резонаторами.

13. Фотонный двигатель по п.12, в котором указанные первые оптические резонаторы содержат поднабор избирательно возбуждаемых кольцевых резонаторов и по меньшей мере один главный кольцевой резонатор возбуждения.

14. Фотонный двигатель по п.13, в котором указанный поднабор первых кольцевых резонаторов и указанные вторые кольцевые резонаторы имеют одинаковый диаметр.

15. Фотонный двигатель по любому из предшествующих пунктов, в котором указанные первый и второй оптические резонаторы являются оптическими резонаторами моды типа шепчущей галереи.

16. Фотонный двигатель по любому из предшествующих пунктов, в котором указанное предварительно заданное расстояние образования стека между первой плоскостью и второй плоскостью основны-

вается по меньшей мере на одной из следующих характеристик: указанная предварительно заданная первая длина волны оптического излучения от указанного входа оптического излучения, материалы указанных оптических резонаторов, геометрические характеристики указанных оптических резонаторов.

17. Фотонный двигатель по любому из предшествующих пунктов, в котором указанная конструкция оптического волновода возбуждения содержит по меньшей мере один оптический волновод возбуждения, совмещенный в плоскости с указанной первой конструкцией оптических волноводов.

18. Фотонный двигатель по п.17, в котором указанная первая конструкция оптических волноводов включает в себя множество первых оптических резонаторов, расположенных вдоль по меньшей мере одного предварительно определенного кругового тракта в первой плоскости и указанный по меньшей мере один возбуждающий оптический волновод проходит вдоль тракта, по меньшей мере частично сбоку от указанного по меньшей мере одного кругового тракта.

19. Фотонный двигатель по п.17, в котором указанная первая конструкция оптических волноводов включает в себя множество первых оптических резонаторов, расположенных вдоль предварительно определенного прямолинейного тракта в первой плоскости и указанный по меньшей мере один возбуждающий оптический волновод проходит вдоль тракта сбоку от указанного прямолинейного тракта.

20. Фотонный двигатель по любому из пп.1-16, в котором указанная конструкция оптического волновода возбуждения содержит по меньшей мере один возбуждающий оптический волновод в плоскости, отличающейся от указанной первой плоскости первой конструкции оптических волноводов.

21. Фотонный двигатель по любому из предшествующих пунктов, в котором указанный вход оптического излучения представляет собой по меньшей мере один источник когерентного излучения либо связан по меньшей мере с одним источником когерентного излучения.

22. Фотонный двигатель по п.21, в котором указанный источник когерентного излучения представляет собой лазерный источник с рабочей шириной полосы, зависимой от габаритов и материалов указанных первого и второго оптических резонаторов и от диэлектрика между указанными первой и второй конструкциями оптических волноводов.

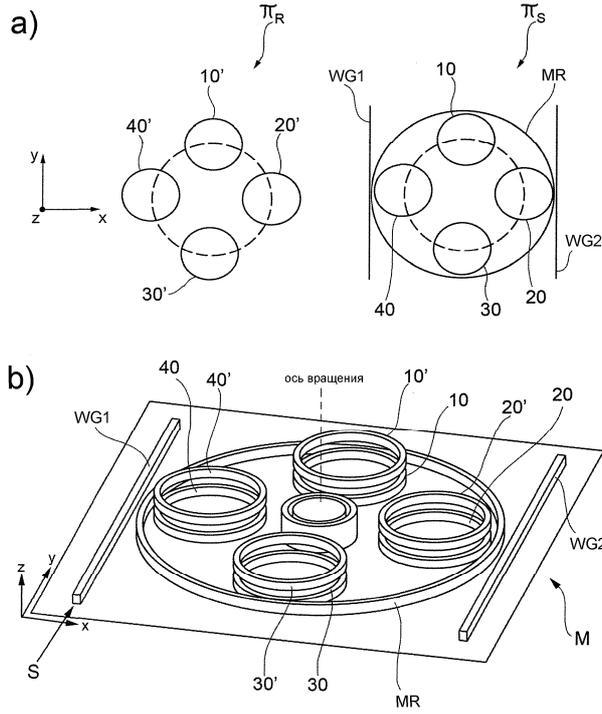
23. Фотонный двигатель по любому из предшествующих пунктов, в котором по меньшей мере пробный оптический волновод связан с указанной конструкцией оптического волновода возбуждения.

24. Фотонный двигатель по любому из предшествующих пунктов, в котором каждый из указанных первого и второго оптических резонаторов и указанная конструкция оптического волновода возбуждения изготовлены в виде оптических волокон, интегральных оптических направляющих на диэлектрической подложке, полупроводниковых активных или пассивных структур, плазмонных структур, полимерных структур.

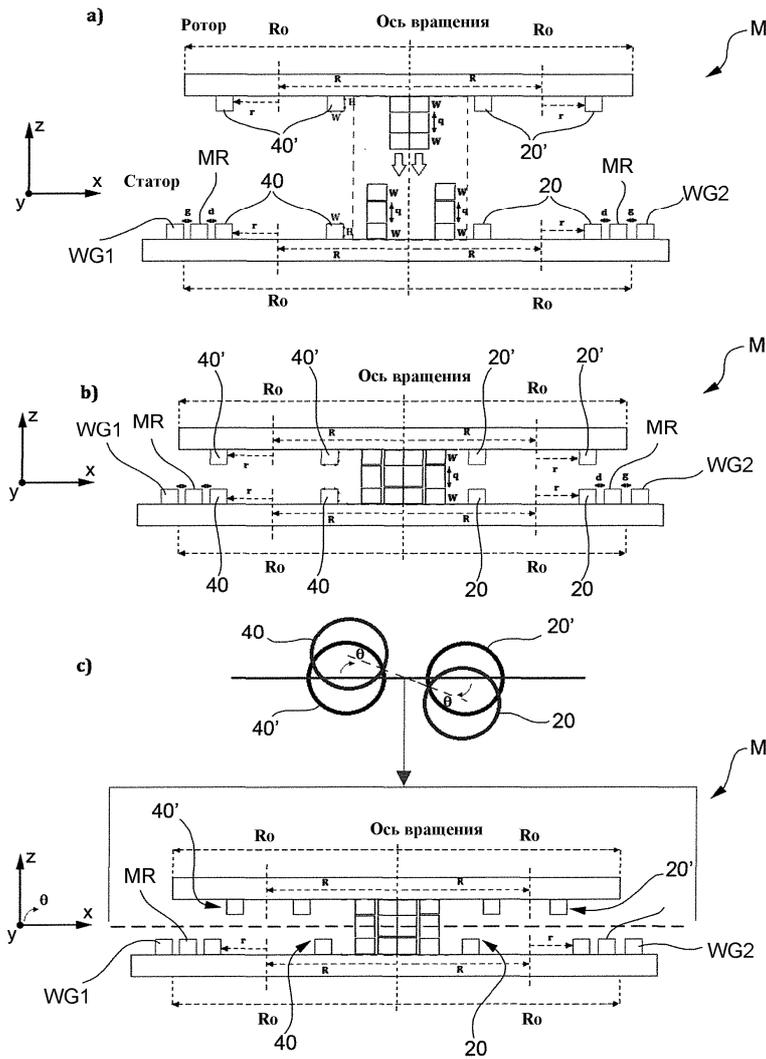
25. Фотонный двигатель по любому из предшествующих пунктов, в котором первая конструкция оптических волноводов образована на подложке статического типа, выполненной с возможностью механического соединения с первой фиксированной машинной конструкцией в состоянии покоя, а вторая конструкция оптических волноводов образована на подложке подвижного типа, выполненной с возможностью механического соединения со второй машинной конструкцией, перемещаемой относительно указанной первой фиксированной машинной конструкции.

26. Фотонный двигатель в сборе, включая множество элементарных ячеек, каждая из которых содержит фотонный двигатель, соответствующий любому из пп.1-25, причем указанные элементарные ячейки механически связаны между собой в плоскости.

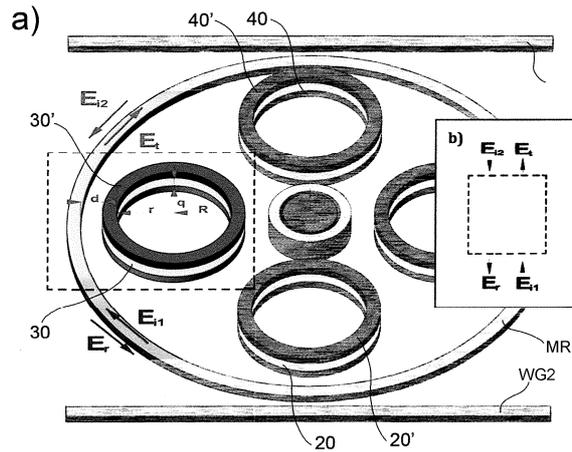
27. Фотонный двигатель в сборе, включая множество элементарных ячеек, каждая из которых содержит фотонный двигатель, соответствующий любому из пп.1-25, причем указанные элементарные ячейки механически связаны между собой в трехмерном объеме.



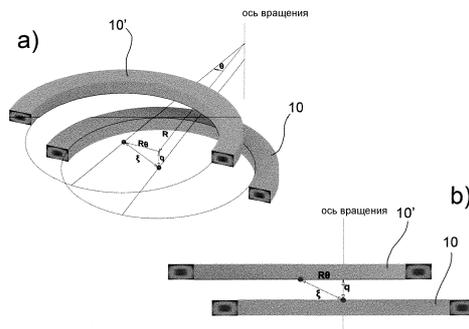
Фиг. 1



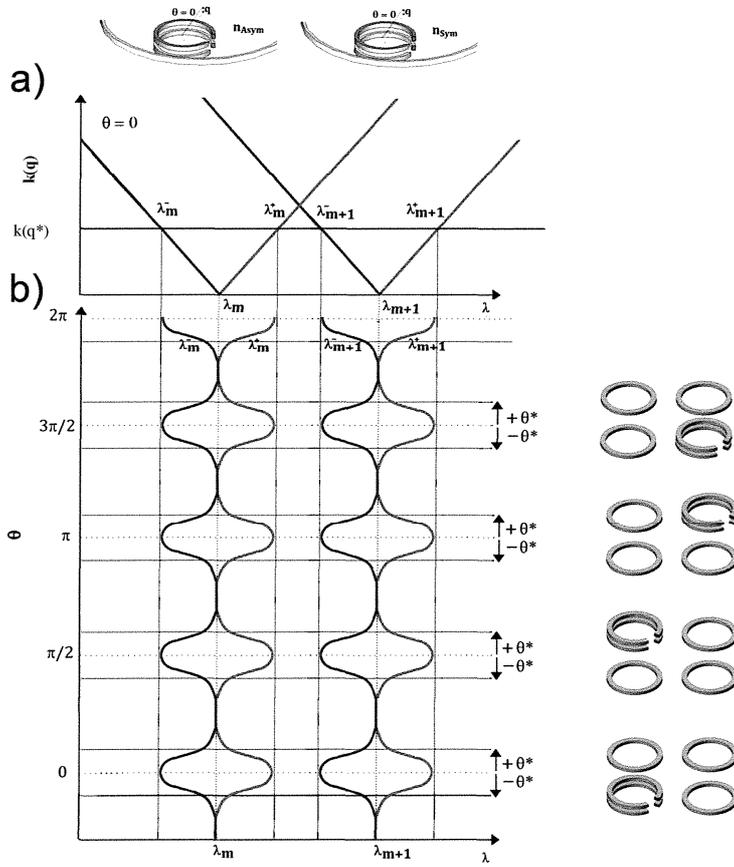
Фиг. 2



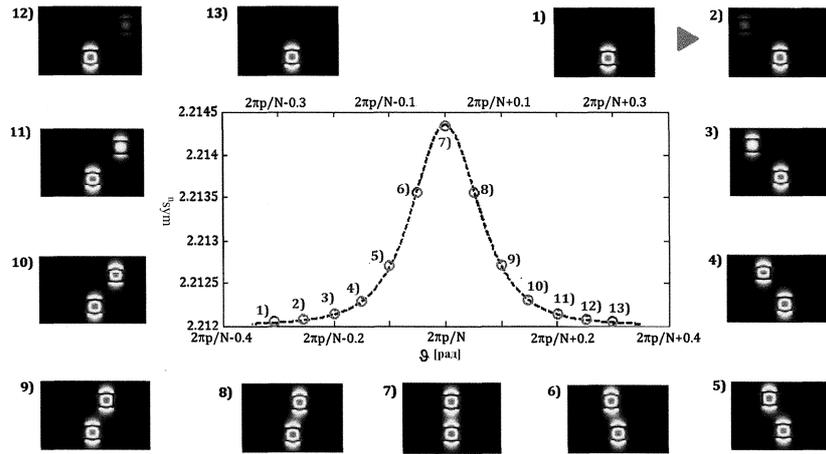
Фиг. 3



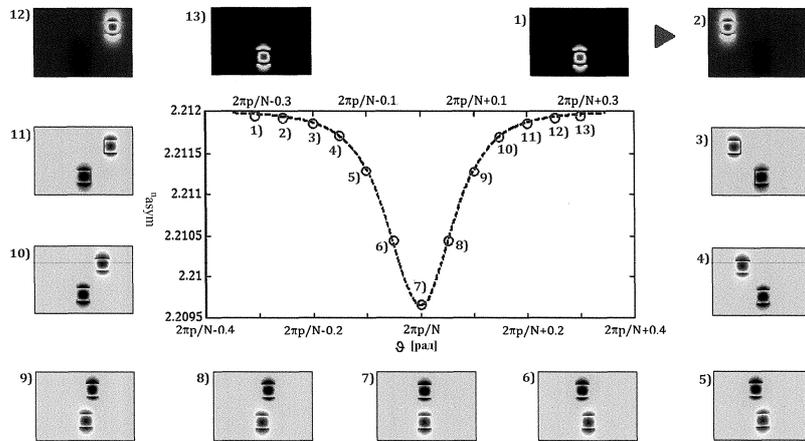
Фиг. 4



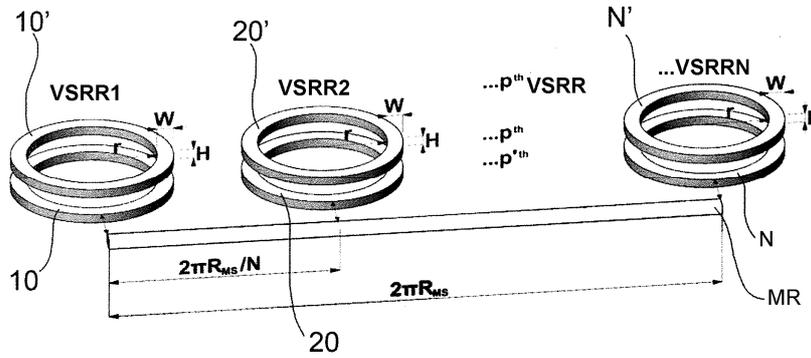
Фиг. 5



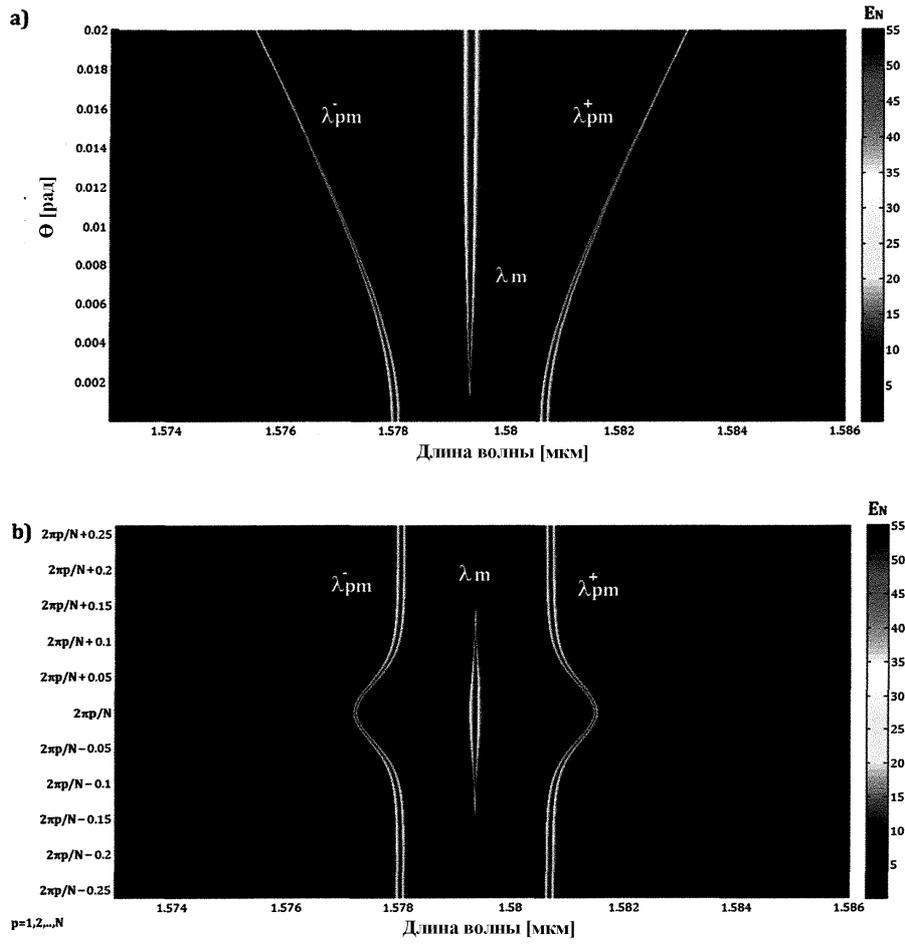
Фиг. 6



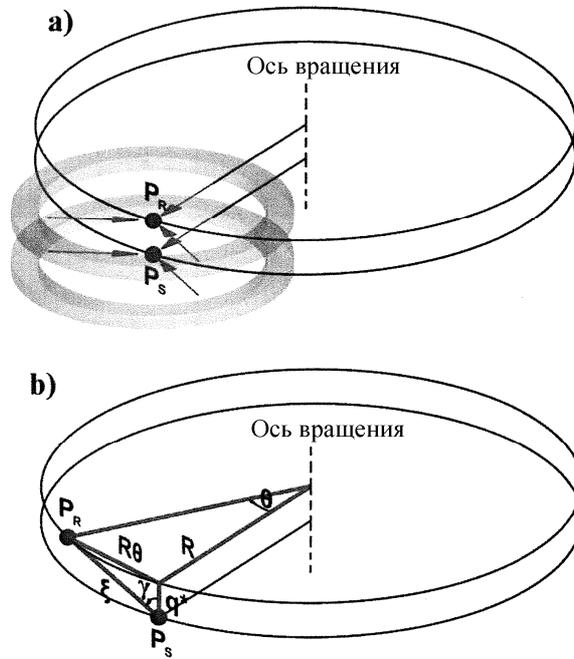
Фиг. 7



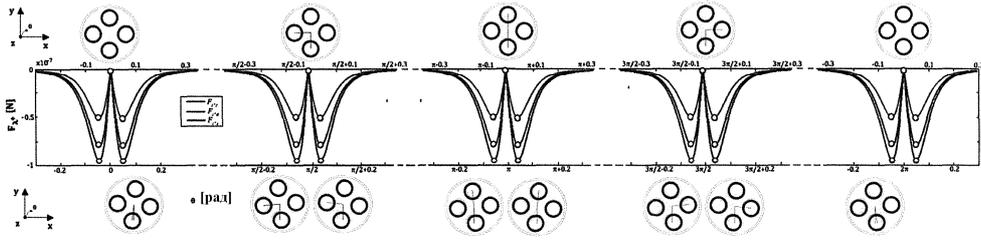
Фиг. 8



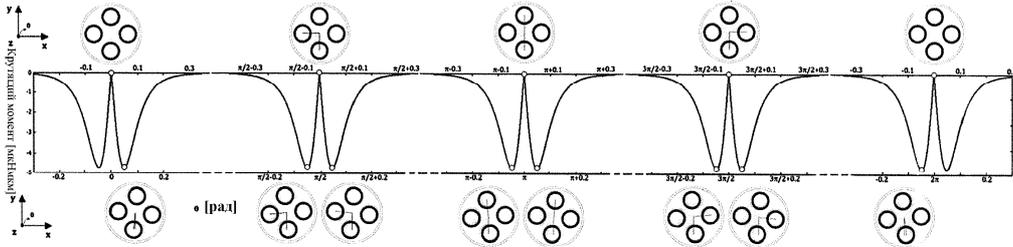
Фиг. 9



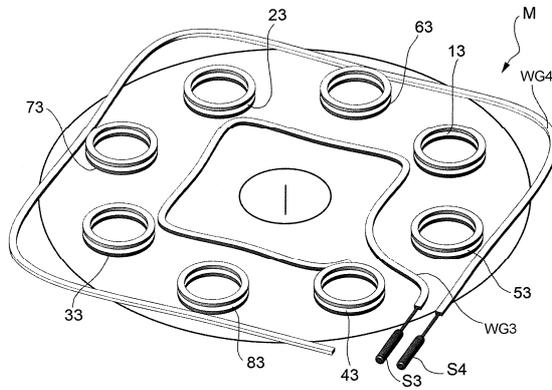
Фиг. 10



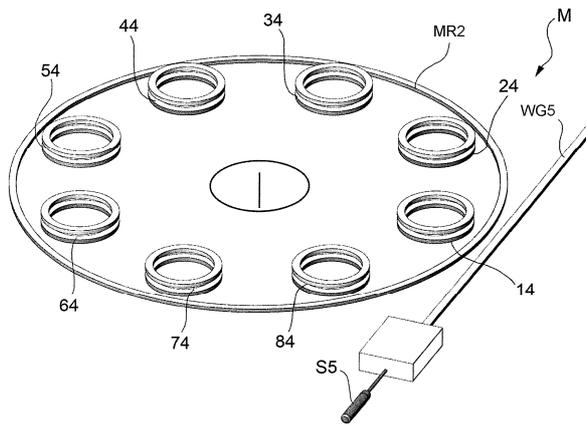
Фиг. 11



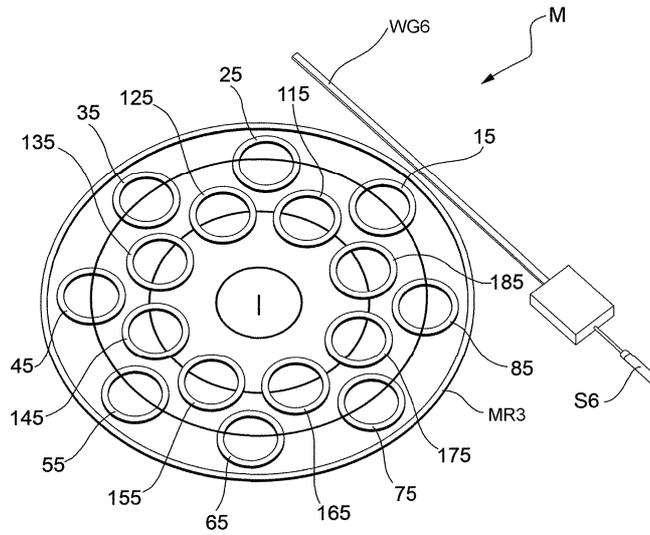
Фиг. 12



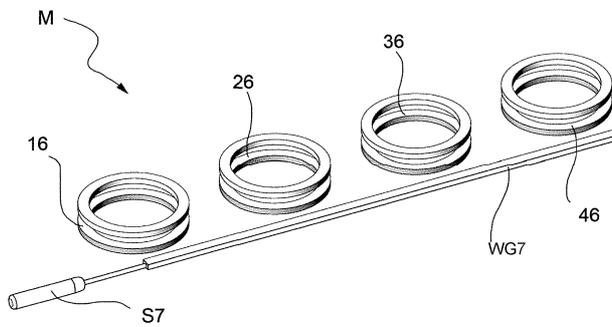
Фиг. 13



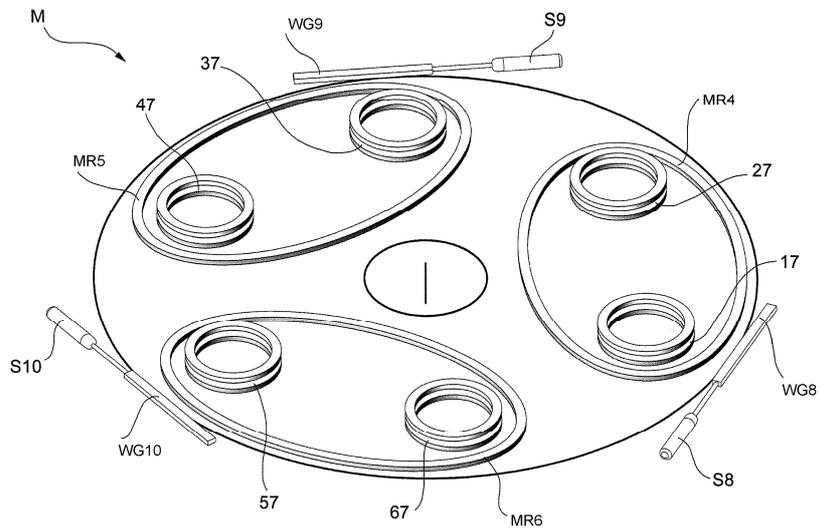
Фиг. 14



Фиг. 15



Фиг. 16



Фиг. 17