

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11)

014088

(13)

B1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации
и выдачи патента: **2010.08.30**

(51) Int. Cl. **H01S 3/063** (2006.01)

(21) Номер заявки: **200802157**

(22) Дата подачи: **2008.10.09**

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

(43) **2010.04.30**

(96) **2008000108 (RU) 2008.10.09**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВА-
ТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВА-
НИЯ "НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТ-
ВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ" (НГУ); ЗАО
"ТЕХНОСКАН - ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕ-
МЫ" (RU)**

(72) Изобретатель:

**Кобцев Сергей Михайлович, Смирнов
Сергей Валерьевич (RU)**

(56)

US-B2-6873639

Бутусов М.М. Волоконная оптика и
приборостроение. Ленинград,
Машиностроение, 1987, стр. 202, абзац 2,
стр. 203, абзац 3, стр. 204, абзац 1, фиг.
4.126

SU-A-148117

JP-A-6034834

US-A1-20060078009

US-A1-20050105866

SU-A1-1793504

US-A1-4829529

014088

B1

-
- (57) Изобретение относится к области оптики, в частности к технике лазеров и оптических усилителей, и может использоваться для усиления оптического сигнала и получения лазерной генерации. Устройство для усиления оптического сигнала состоит из одного или более источников накачки и замкнутого объема, имеющего, например, торообразную форму. Внутри замкнутого объема введен один или более отрезков усиливающего оптического волокна, вход и выход которых выведены за пределы замкнутого объема. Замкнутый объем имеет одно или более окон для ввода излучения накачки и обеспечивает условия полного внутреннего отражения оптического излучения от источника накачки, так что излучение накачки неоднократно проходит через замкнутый объем и пересекает усиливающее волокно, создавая в нем инверсию населенностей квантовых уровней энергии и обеспечивая тем самым усиление оптического сигнала, распространяющегося по усиливающему оптическому волокну. Предложенное устройство является эффективным волоконным усилителем, который может иметь одну или несколько независимых пар входов/выходов, может быть легко изготовлен без создания специальных производственных условий и использования сложного производственного оборудования. Дополнительным преимуществом устройства является возможность использования дешевых лазерных источников накачки с низким качеством пучка.
-

B1

014088

Изобретение относится к области оптики, в частности к технике лазеров и оптических усилителей.

Уровень техники

Усилители оптического сигнала играют ключевую роль в области оптических телекоммуникаций, лазерной техники и фотоники. Так, оптические усилители являются неотъемлемой частью современных высокоскоростных оптических линий связи и служат для компенсации затухания передаваемого сигнала, а также в схемах периодической компрессии оптических импульсов, кодирующих передаваемую информацию. Другим исключительно важным и широко распространённым применением оптических усилителей являются лазеры и лазерные системы. Действительно, любая схема лазера включает оптический усилитель и систему положительной обратной связи (оптический резонатор). Мощные лазерные системы, используемые в промышленности для резки металлов, сварки и других технологических процессов, состоят обычно из задающего лазера и одного или нескольких оптических усилителей, обеспечивающих высокий уровень мощности оптического излучения на выходе из лазерной системы. Чрезвычайная широта области применений лазеров и лазерной техники обуславливает актуальность задачи усовершенствования устройств для усиления оптического сигнала.

Известно устройство для усиления оптического сигнала и в том числе для получения лазерной генерации, состоящее из оптического волокна, сердцевина которого легирована редкоземельными металлами (эрбием или эрбием и иттербием). С помощью оптических ответвителей в волокно вводится сигнал и излучение накачки; излучение накачки создаёт инверсию населённости уровней редкоземельных металлов; при прохождении по волокну с инверсной населённостью уровней происходит усиление оптического сигнала (патент US 5161050 [1]). Недостатком такой схемы является относительно невысокий уровень мощности усиленного сигнала, что связано с существенным ограничением мощности излучения накачки, которое можно заводить в волокно через ответвитель. Типичные ограничения на мощность заводимого через ответвитель излучения составляют 1-3 Вт.

Известны устройства для усиления оптического сигнала и лазерной генерации, включающие оптическое волокно с двумя оболочками - внутренней и внешней, и схемы введения оптического сигнала и излучения накачки в волокно. Кварцевая сердцевина волокна легирована редкоземельными металлами и обеспечивает усиление распространяющегося по ней оптического сигнала. Излучение накачки распространяется по внутренней кварцевой оболочке волокна и пересекает сердцевину, поглощаясь атомами редкоземельных металлов и создавая в них инверсную населённость квантовых уровней энергии (статья Optics Letters. 1998, vol. 23, p. 1037-1039 [2]). Недостатком таких устройств является сложность одновременного введения в волокно оптического сигнала и накачки. Для введения излучения накачки в оптическое волокно с двумя оболочками одновременно с введением оптического сигнала используются дихроичные зеркала, боковая накачка через многомодовые ответвители, а также введение накачки через бороздки, вытравленные на поверхности оболочек волокна. Однако ни одна из этих схем введения излучения накачки не обеспечивает достаточно простого, эффективного и одновременно надёжного способа введения излучения накачки в волоконный усилитель или лазер, особенно в случае использования нескольких источников накачки при создании мощных лазеров.

Наиболее близким аналогом-прототипом предлагаемому изобретению является устройство, защищённое патентом US 7221822 [3] "Многоволоконное устройство для мощных волоконных лазеров и усилителей". Конструкция прототипа включает два или более отрезка оптического волокна. Как минимум, по одному из отрезков волокон распространяется оптическое излучение накачки, ещё, как минимум, один из отрезков волокна служит для усиления оптического сигнала, для чего его сердцевина легирована редкоземельными металлами. Боковые поверхности смежных отрезков оптических волокон находятся в оптическом контакте друг с другом на длине, обеспечивающей необходимое поглощение излучения накачки в усиливающем волокне. Отрезки оптических волокон, входящие в состав устройства, в средней части имеют общую оболочку, образующую замкнутый объём; концы отрезков, выходящие за пределы замкнутого объёма служат для ввода-вывода излучения. Как минимум, в один из отрезков усиливающих оптических волокон вводится оптический сигнал, как минимум, ещё в одно из волокон вводится излучение накачки. Поскольку волокна в устройстве находятся в оптическом контакте, излучение накачки, распространяющееся в оболочечных модах, как минимум, одного из волокон, проникает в одно или несколько активных волокон, где поглощается атомами редкоземельных металлов и создает инверсную населённость их уровней. Это приводит к эффективному усилению оптического сигнала, распространяющегося в активном волокне.

Недостатком прототипа является сложность изготовления системы, состоящей из двух или более волокон, боковые поверхности которых находятся в оптическом контакте друг с другом на достаточно большой длине, обеспечивающей эффективное поглощение излучения накачки в усиливающем волокне. Так, например, в патенте описан способ изготовления, состоящий в том, что две или более заготовок оптических волокон вытягиваются под определённым давлением и с определённой скоростью в башне для вытяжки оптических волокон, причём давление и скорость выбираются таким образом, чтобы обеспечить продольный оптический контакт боковых поверхностей оптических волокон. Таким образом, для изготовления устройства-прототипа требуются большие дорогостоящие стационарные промышленные установки по вытяжке волокна, что обуславливает высокую себестоимость изготовления устройства.

прототипа, особенно в случае изготовления малых партий устройств, либо устройств, состоящих из нестандартных волокон. Ещё одним недостатком прототипа является необходимость введения излучения накачки в оптическое волокно, сопряженная с необходимостью использования источника накачки с высоким качеством оптического пучка, отличающихся меньшей надёжностью и более высокой стоимостью от источников накачки с более низким качеством пучка.

Задачей, решаемой настоящим изобретением, является создание устройства для усиления оптического сигнала, которое позволило бы упростить процедуру его изготовления, сократить время изготовления одного образца и существенно снизить его себестоимость, а также снизить требования на качество пучка источников оптической накачки.

Сущность изобретения

Поставленная задача решена за счет того, что в известном устройстве, состоящем из одного или более источников накачки и замкнутого объема, в который введен один или более отрезков усиливающего оптического волокна, вход и выход которых выведены за пределы замкнутого объема, замкнутый объем, имеющий, например, торообразную форму, снабжен одним или более окнами для входа и выхода отрезков усиливающего оптического волокна и имеет одно или более окон для ввода излучения накачки и обеспечивает условия полного внутреннего отражения оптического излучения от источника накачки, так что излучение накачки неоднократно проходит через замкнутый объем и пересекает усиливающее волокно.

Замкнутый объем имеет торообразную форму, т.е. имеет вид трубки, начало и конец которой соединены, что позволяет излучению накачки неоднократно проходить через замкнутый объем. Трубка с соединенными началом и концом может, например, образовывать окружность (при этом замкнутый объем представляет собой тор) или спираль, начало и конец которой соединены.

Замкнутый объем имеет стенку, изготовленную из материала, прозрачного для оптического излучения накачки, например из стекла, кварца или другого материала, которая может быть покрыта (или не покрыта) с внешней поверхности оболочкой.

Пространство между усиливающим оптическим волокном, находящимся в замкнутом объеме, и внутренней поверхностью стенки замкнутого объема равномерно заполняется материалом, прозрачным для оптического излучения накачки, который может быть в жидком, гелеобразном или другом состоянии (материал заполнения). При этом абсолютное значение разности показателей преломления стенки замкнутого объема и материала заполнения не должно превосходить величины, обеспечивающей превышение коэффициента усиления оптического сигнала над коэффициентом его затухания в устройстве, а также превышение возможностей теплоотвода из устройства над суммарной мощностью потерь оптического излучения накачки и оптического сигнала в устройстве.

Средняя часть одного или более отрезков усиливающего оптического волокна, размещенная в замкнутом объеме, может состоять из сердцевины и оболочки, показатели преломления которых обеспечивают распространение оптического сигнала в сердцевине усиливающего волокна за счёт эффекта полного внутреннего отражения на границе сердцевины с оболочкой.

Средняя часть усиливающего оптического волокна, размещенная в замкнутом объеме, может иметь однородный показатель преломления по поперечному сечению, превышающий показатель преломления материала заполнения.

Пространство между усиливающим оптическим волокном и внутренней поверхностью стенки замкнутого объема равномерно заполнено материалом заполнения. При этом возможны следующие варианты соотношений показателей преломления материалов, образующих элементы системы: материала стенки замкнутого объема n_2 , материала заполнения n_3 , внешней среды, окружающей замкнутый объем n_{12} , наименьшего по поперечному сечению показателя преломления среднего участка отрезка усиливающего волокна n_{7min} ;

первый вариант:

$$n_{7min} > n_3 > n_{12}$$

Здесь первое неравенство означает возможность входа излучения в усиливающее волокно из материала заполнения, второе неравенство обуславливает невыход излучения в окружающую среду из замкнутого объема за счёт полного внутреннего отражения на границе с окружающей средой;

второй вариант:

$$n_{7min} > n_3 > n_2$$

Здесь первое неравенство означает возможность входа излучения в усиливающее волокно из материала заполнения, второе неравенство обеспечивает возможность полного внутреннего отражения на границе материала заполнения со стенкой замкнутого объема;

третий вариант (для устройства, внешняя поверхность стенки замкнутого объема которого покрыта оболочкой с показателем преломления n_1):

$$n_{7min} > n_3 > n_1$$

Здесь первое неравенство означает возможность входа излучения в усиливающее волокно из материала заполнения, второе неравенство обуславливает невыход излучения в оболочку из замкнутого объ-

ёма за счёт полного внутреннего отражения на границе оболочки со стенкой замкнутого объёма.

Внутренний и внешний радиусы замкнутого объёма должны обеспечивать выполнение условия полного внутреннего отражения для лучей накачки, идущих внутри замкнутого объёма в плоскости, содержащей внешний и внутренний радиусы его, по касательной к внутренней стенке замкнутого объёма. Это достигается, например, в следующих вариантах:

первый вариант: замкнутый объём выполнен в форме тора, стенка которого покрыта снаружи оболочкой, причём радиусы тора удовлетворяют соотношению

$$r / R > n_1 / n_3$$

где r - малый (внутренний) радиус тора,

R - большой (внешний) радиус тора,

n_1 - показатель преломления оболочки стенки тора,

n_3 - показатель преломления материала заполнения;

второй вариант: замкнутый объём выполнен в форме тора, радиусы которого удовлетворяют соотношению

$$r / R > n_{12} / n_3$$

где r - малый (внутренний) радиус тора,

R - большой (внешний) радиус тора,

n_3 - показатель преломления материала заполнения,

n_{12} - показатель преломления внешней среды, окружающей замкнутый объём;

третий вариант: замкнутый объём выполнен в форме тора, радиусы которого удовлетворяют соотношению

$$r / R > n_2 / n_3$$

где r - малый (внутренний) радиус тора,

R - большой (внешний) радиус тора,

n_2 - показатель преломления стенки тора,

n_3 - показатель преломления материала заполнения.

На одно или более окон для ввода оптического излучения накачки может быть нанесено просветляющее оптическое покрытие для уменьшения оптических потерь излучения накачки при вводе в замкнутый объём.

Окна в стенке замкнутого объёма для входа и выхода отрезков усиливающего оптического волокна могут иметь светоотражающее покрытие для уменьшения потерь излучения накачки, распространяющегося внутри замкнутого объёма.

Одно или более окон для ввода оптического излучения накачки могут быть выполнены в виде бороздок на внешней поверхности стенки замкнутого объёма, причём бороздки имеют, как минимум, две боковые стенки, как минимум, одна из них шлифована, оптическое излучение накачки вводится через шлифованные боковые стенки бороздки, размеры которых достаточны для введения оптического пучка лучей накачки под углом Брюстера, а угол, который образуют шлифованные боковые стенки бороздки к внешней поверхности стенки замкнутого объёма, позволяет введенному в замкнутый объём оптическому излучению накачки распространяться, испытывая полное внутреннее отражение на стенке замкнутого объёма.

Одно или более окон для ввода излучения накачки могут быть выполнены в виде герметизируемых отверстий в стенке замкнутого объёма, через которые внутрь замкнутого объёма дополнительно введены отрезки оптического волокна накачки, по которым излучение накачки вводится внутрь замкнутого объёма. При этом по крайней мере часть длины каждого отрезка волокна накачки, расположенной внутри замкнутого объёма, лишена оболочки, так что излучение накачки выходит из волокна накачки через его боковую поверхность в замкнутый объём, причём числовая апертура волокна накачки обеспечивает выход излучения накачки в замкнутый объём в диапазоне углов, для которых выполняются условия полного внутреннего отражения, а показатель преломления волокна накачки не превосходит показателя преломления материала заполнения. Одно или более окон для ввода излучения накачки может быть объединено с одним или более окнами для входа и выхода отрезков усиливающего оптического волокна.

Излучение накачки может быть введено в замкнутый объём в двух противоположных направлениях.

Замкнутый объём может иметь дополнительные ввод и вывод для прокачки материала заполнения.

Как минимум один из отрезков усиливающего оптического волокна может быть использован в качестве усиливающей среды для получения лазерной генерации. Для этого вход и выход отрезка усиливающего волокна должны быть встроены в лазерный резонатор, имеющий как минимум одно частично пропускающее зеркало либо (в случае кольцевого резонатора) ответвитель для вывода генерируемого лазерного излучения.

В устройстве, включающем как минимум два отрезка усиливающего оптического волокна, как минимум один из отрезков усиливающего оптического волокна может быть использован в качестве усиливающей среды для получения лазерной генерации, а еще как минимум один - для усиления генерируемого лазерного излучения. Для этого вход и выход первого отрезка усиливающего волокна должны быть

встроены в лазерный резонатор, имеющий как минимум одно частично пропускающее зеркало либо (в случае кольцевого резонатора) ответвитель для вывода генерируемого лазерного излучения. Генерируемое при этом лазерное излучение, отводимое из резонатора через частично пропускающее зеркало либо через ответвитель, вводится во второй отрезок усиливающего волокна устройства, где происходит его усиление. В результате с выхода второго отрезка усиливающего волокна может быть получено мощное лазерное излучение (мощностью до нескольких ватт и больше).

Для механической фиксации устройства могут быть использованы места присоединения окон для ввода оптического излучения накачки к стенке замкнутого объёма, места герметизации окон в стенке замкнутого объёма для входа и выхода отрезков усиливающего оптического волокна, ввод и вывод для прокачки материала заполнения.

Перечень чертежей

Описание предлагаемого устройства для усиления оптического сигнала поясняется чертежами:

фиг. 1 - схема устройства для усиления оптического сигнала; фиг. 2 - поперечный разрез замкнутого объёма; фиг. 3 - поперечный разрез замкнутого объёма с другим числом усиливающих волокон; фиг. 4 - схема устройства с изображением хода лучей оптического излучения накачки в замкнутом объёме; фиг. 5 - схема устройства для усиления оптического сигнала с окном для ввода излучения накачки в виде бороздки; фиг. 6 - ход лучей накачки при вводе внутрь замкнутого объёма через входное окно в виде бороздки; фиг. 7 - вариант схемы устройства, в котором полное внутреннее отражение излучения накачки происходит на внутренней границе стенки замкнутого объёма, с изображением хода лучей оптического излучения накачки в замкнутом объёме; фиг. 8 - вариант схемы устройства, в котором полное внутреннее отражение излучения накачки происходит на внешней границе стенки замкнутого объёма с внешней средой, с изображением хода лучей оптического излучения накачки в замкнутом объёме; фиг. 9 - вариант схемы устройства, в котором излучение накачки вводится в замкнутый объём через окно для ввода накачки по волокну накачки.

На чертежах: 1 - оболочка стенки замкнутого объёма, 2 - стенка замкнутого объёма, 3 - материал заполнения, 4 - один или более витков усиливающего оптического волокна, 5 - герметизируемое окно в стенке замкнутого объёма для входа и выхода отрезков усиливающего оптического волокна, 6 - вход усиливающего волокна, 7 - средняя часть усиливающего волокна, 8 - выход усиливающего волокна, 9 - окно для ввода излучения накачки, ориентированное под углом Брюстера и(или) покрытое просветляющим оптическим покрытием, 10 - направление распространения входящего в усиливающее устройство оптического сигнала, 11 - направление распространения выходящего усиленного оптического сигнала, 12 - внешняя среда, 13 - излучение накачки, 14 - окно для ввода излучения накачки, выполненное в виде бороздки на стенке замкнутого объёма, 15 - шлифованная боковая стенка бороздки, через которую вводится оптическое излучение накачки, 16 - излучение накачки, прошедшее через боковую стенку бороздки внутрь стенки замкнутого объёма, 17 - окно для ввода излучения накачки, выполненное в виде герметизируемого отверстия в стенке замкнутого объёма, 18 - волокно накачки.

Сведения, подтверждающие возможность осуществления изобретения - работа устройства

Излучение накачки 13 вводится через окно 9 внутрь замкнутого торообразного объёма, ограниченного стенкой 2 (см. фиг. 4), которая может быть изготовлена из стекла, кварца или другого материала, прозрачного для оптического излучения накачки. Наружная поверхность стенки 2 замкнутого объёма может быть покрыта оболочкой 1. Прошедшее через окно 9 излучение накачки 13 распространяется внутри замкнутого объёма, заполненного материалом заполнения 3. При этом излучение накачки 13 падает на стенку 2 замкнутого объёма, преломляется на границе раздела материала заполнения 3 и стенки 2, заходит внутрь стенки 2 замкнутого объёма, доходит до границы раздела стенки 2 замкнутого объёма и оболочки 1 стенки замкнутого объёма и испытывает там полное внутреннее отражение, возвращаясь в стенку 2 и далее в материал заполнения 3. Полное внутреннее отражение излучения накачки 13 от стенки 2 замкнутого объёма происходит многократно, как показано на фиг. 3, в результате чего излучение накачки 13 многократно пересекает замкнутый объём и введённый в него через окно 5 средний участок 7 усиливающего оптического волокна, делающий внутри замкнутого объёма один или более витков 4. Проходя через средний участок усиливающего волокна 7, образующего витки 4, излучение накачки 13 создаёт инверсию населённости квантовых уровней энергии. Усиливаемый оптический сигнал 10 вводится во входной участок 6 усиливающего волокна, откуда, распространяясь по волокну, попадает в средний участок усиливающего волокна 7, образующий витки 4, где усиливается за счёт созданной инверсной населённости квантовых уровней энергии. После этого усиленный оптический сигнал попадает в выходной участок 8 усиливающего волокна и на выход устройства 11. Для работы устройства необходимо изготовление замкнутого объёма с подходящей геометрией и правильный выбор показателей преломления материалов. Так, для того чтобы излучение накачки 13, распространяющееся в материале заполнения 3 в замкнутом объёме, вошло в образующую витки 4 среднюю часть 7 отрезка усиливающего волокна и не испытало при этом полного внутреннего отражения, наименьший по поперечному сечению средней части 7 отрезка усиливающего волокна показатель преломления должен быть больше показателя преломления материала заполнения 3. Для обеспечения многократного прохождения излучения накачки 13 через замкнутый объём необходимо, чтобы показатель преломления материала заполнения 3, запол-

няющего замкнутый объём, был больше показателя преломления оболочки 1, покрывающей наружную поверхность стенки 2. Наряду с последним условием на показатели преломления, другое условие должно быть наложено на геометрию замкнутого объёма. Так, замкнутый объём может быть выполнен в форме тора, при этом отношение малого и большого радиусов тора должно быть не меньше отношения показателей преломления оболочки 1 стенки тора и материала заполнения 3. Замкнутый объём может быть выполнен в виде трубки, замкнутой в виде кольца, при этом должно выполняться условие

$$(R-d) / R > n_1 / n_3$$

где R - наименьший радиус кривизны кольцеобразной трубки, в форме которой выполнен замкнутый объём,

d - максимальная толщина такой трубки,

n_1 - показатель преломления оболочки 1 замкнутого объёма,

n_3 - показатель преломления материала заполнения 3.

В другом варианте устройства внешняя поверхность замкнутого объёма может не покрываться оболочкой, при этом полное внутреннее отражение оптического излучения накачки 13 происходит на границе стенки замкнутого объёма с материалом заполнения 3 (см. фиг. 7). Так, излучение накачки 13 вводится через окно 9 внутрь замкнутого торообразного объёма, ограниченного стенками 2. Прошедшее через окно 9 излучение накачки 13 распространяется внутри замкнутого объёма, заполненного материалом заполнения 3. При этом излучение накачки 13 падает на стенку 2 замкнутого объёма, испытывает там полное внутреннее отражение и возвращается в материал заполнения 3. Полное внутреннее отражение излучения накачки 13 от стенки 2 замкнутого объёма происходит многократно, как показано на фиг. 7, в результате чего излучение накачки 13 многократно пересекает замкнутый объём и введённый в него через окно 5 средний участок 7 усиливающего оптического волокна, делающий внутри замкнутого объёма один или более витков 4. Проходя через средний участок усиливающего волокна 7, образующего витки 4, излучение накачки 13 создаёт инверсию населённости квантовых уровней энергии. Усиливаемый оптический сигнал 10 вводится во входной участок 6 усиливающего волокна, откуда, распространяясь по волокну, попадает в средний участок усиливающего волокна 7, образующий витки 4, где усиливается за счёт созданной инверсной населённости квантовых уровней энергии. После этого усиленный оптический сигнал попадает в выходной участок 8 усиливающего волокна и на выход устройства 11. Для обеспечения многократного прохождения излучения накачки 13 через замкнутый объём необходимо, чтобы показатель преломления материала заполнения 3 был больше показателя преломления материала стенки 2 замкнутого объёма. Наряду с последним условием на показатели преломления, другое условие должно быть наложено на геометрию замкнутого объёма. Так, замкнутый объём может быть выполнен в форме тора, при этом отношение малого и большого радиусов тора должно быть не меньше отношения показателей преломления стенки 2 тора и материала заполнения 3. Замкнутый объём может быть выполнен в виде трубки, замкнутой в виде кольца, при этом должно выполняться условие

$$(R-d) / R > n_2 / n_3$$

где R - наименьший радиус кривизны кольцеобразной трубки, в форме которой выполнен замкнутый объём,

d - максимальная толщина такой трубки,

n_2 - показатель преломления стенки 2 замкнутого объёма,

n_3 - показатель преломления материала заполнения 3.

В другом варианте устройства внешняя поверхность замкнутого объёма также может не покрываться оболочкой, при этом полное внутреннее отражение оптического излучения накачки 13 происходит на границе стенки замкнутого объёма с внешней средой 12 (см. фиг. 8). Так, излучение накачки 13 вводится через окно 9 внутрь замкнутого торообразного объёма, ограниченного стенками 2. Прошедшее через окно 9 излучение накачки 13 распространяется внутри замкнутого объёма, заполненного материалом заполнения 3. При этом излучение накачки 13 падает на стенку 2 замкнутого объёма, преломляется на границе раздела материала заполнения 3 и стенки 2, заходит внутрь стенки 2 замкнутого объёма, доходит до границы раздела стенки 2 замкнутого объёма и внешней среды 12 и испытывает там полное внутреннее отражение, возвращаясь в стенку 2 и далее в материал заполнения 3. Полное внутреннее отражение излучения накачки 13 от стенки 2 замкнутого объёма происходит многократно, как показано на фиг. 8, в результате чего излучение накачки 13 многократно пересекает замкнутый объём и введённый в него через окно 5 средний участок 7 усиливающего оптического волокна, делающий внутри замкнутого объёма один или более витков 4. Проходя через средний участок усиливающего волокна 7, образующего витки 4, излучение накачки 13 создаёт инверсию населённости квантовых уровней энергии. Усиливаемый оптический сигнал 10 вводится во входной участок 6 усиливающего волокна, откуда, распространяясь по волокну, попадает в средний участок усиливающего волокна 7, образующий витки 4, где усиливается за счёт созданной инверсной населённости квантовых уровней энергии. После этого усиленный оптический сигнал попадает в выходной участок 8 усиливающего волокна и на выход устройства 11. Для обеспечения многократного прохождения излучения накачки 13 через замкнутый объём необходимо, чтобы показатель преломления материала заполнения 3 был больше показателя преломления внешней среды 12.

Наряду с последним условием на показатели преломления, другое условие должно быть наложено на геометрию замкнутого объёма. Так, замкнутый объём может быть выполнен в форме тора, при этом отношение малого и большого радиусов тора должно быть не меньше отношения показателей преломления внешней среды 12 и материала заполнения 3. Замкнутый объём может быть выполнен в виде трубки, замкнутой в виде кольца, при этом должно выполняться условие

$$(R-d) / R > n_{12} / n_3$$

где R - наименьший радиус кривизны кольцеобразной трубки, в форме которой выполнен замкнутый объём,

d - максимальная толщина такой трубки,

n_3 - показатель преломления материала заполнения 3,

n_{12} - показатель преломления внешней среды 12.

Средняя часть 7 одного или более отрезков усиливающих волокон, входящих в состав устройства, может иметь однородный показатель преломления по поперечному сечению, причём значение показателя преломления средней части усиливающего волокна должно быть больше показателя преломления материала заполнения 3. При этом усиливаемый оптический сигнал распространяется в средней части 7 отрезка(ов) усиливающего волокна, не выходя из него в материал заполнения 3, за счёт эффекта полного внутреннего отражения.

Средняя часть 7 одного или более отрезков усиливающих волокон, входящих в состав устройства, может состоять из сердцевин и оболочки, причём показатель преломления сердцевин отрезка усиливающего волокна больше показателя преломления оболочки замкнутого объёма. При этом усиливаемый оптический сигнал распространяется в сердцевине средней части 7 отрезка(ов) усиливающего волокна, не выходя из неё в материал заполнения 3 за счёт эффекта полного внутреннего отражения.

Одно или несколько окон для ввода излучения накачки могут быть выполнены в виде бороздок 14 на стенке 2 замкнутого объёма. Бороздки 14 имеют как минимум две боковых стенки, как минимум одна из которых шлифована. Шлифованная стенка 15 бороздки 14 ориентирована под углом Брюстера к вводимому в замкнутый объём пучку излучения накачки 13. Ориентация стенки 15 бороздки 14 относительно поверхности стенки 2 замкнутого объёма даёт возможность вводить излучение накачки 13 внутрь замкнутого объёма в диапазоне углов, позволяющем излучению накачки 13 распространяться, испытывая полное внутреннее отражение и многократно пересекая замкнутый объём, как показано на фиг. 5. В остальном работа устройства аналогична описанной выше.

Показатели преломления материала заполнения 3 и стенки 2 замкнутого объёма подбираются достаточно близкими друг к другу для уменьшения мощности рассеиваемого излучения. Действительно, при введении излучения накачки 13 через окно 9 или через окно, выполненное в виде бороздки 14, излучение накачки попадает сначала в стенку 2 замкнутого объёма, проходя через стенку 2, излучение накачки падает на границу стенки 2 и материала заполнения 3. При этом часть энергии уходит в виде отражённой волны обратно в стенку 2 замкнутого объёма и далее в оболочку 1 и(или) во внешнюю среду 12. Для более эффективной работы устройства необходимо минимизировать потери энергии, для чего следует уменьшить абсолютное значение разности показателей преломления стенки 2 замкнутого объёма и материала заполнения 3. Максимально допустимое значение указанного модуля разности показателей преломления должно выбираться из двух условий: превышение коэффициента усиления оптического сигнала над коэффициентом его затухания в устройстве, а также условия превышения возможностей теплоотвода из устройства над суммарной мощностью потерь оптического излучения накачки и оптического сигнала в устройстве.

Одно или несколько окон для ввода излучения накачки могут быть выполнены в виде отверстий 17 в стенке замкнутого объёма, через которые внутрь замкнутого объёма введены отрезки волокна накачки 18, причем в данной конструкции одно или несколько окон для ввода излучения накачки в виде отверстий 17 могут быть объединены вместе с окнами 5 для входа и выхода отрезков усиливающего оптического волокна. Излучение накачки 13 вводится в один или более отрезок волокна накачки 18 и, распространяясь по нему, входит внутрь замкнутого объёма. Волокно накачки 18 лишено оболочки по крайней мере на части длины, расположенной внутри замкнутого объёма, так что излучение накачки 13 выходит из волокна накачки через его боковую поверхность в материал заполнения 3. При этом числовая апертура волокна накачки обеспечивает выход излучения накачки 13 в материал заполнения 3 в диапазоне углов, для которых выполняются условия полного внутреннего отражения излучения накачки 13 на границе замкнутого объёма. Далее излучение накачки 13 распространяется внутри замкнутого объёма, многократно пересекая его и отрезки усиливающего волокна 7, образующие витки 4, и не выходя из замкнутого объёма за счёт эффекта полного внутреннего отражения на его границе. В остальном работа устройства аналогична описанному выше.

Для увеличения возможностей теплоотвода из устройства, особенно для создания устройств усиления оптического сигнала с высокой мощностью, можно использовать прокачку текучего материала заполнения 3. С этой целью замкнутый объём может быть дополнительно снабжён вводом и выводом для прокачки материала заполнения 3.

Излучение накачки 13 может распространяться в замкнутом объёме сразу в двух (встречных) направлениях. Для этого замкнутый объём должен быть снабжён двумя или более окнами 9 или бороздками 14, причём как минимум через одно из окон излучение вводится в замкнутый объём одним направлением, а ещё через одно - в противоположном направлении. Другим вариантом является наличие как минимум одного окна 9, поддерживающего ввод излучения в замкнутый объём сразу в двух противоположных направлениях, либо использование сразу двух шлифованных боковых стенки 15 как минимум одной бороздки 14 для ввода излучения накачки в замкнутый объём в двух противоположных направлениях.

Для уменьшения потерь энергии накачки при вводе в замкнутый объём, окна 9 и боковые стенки 15 бороздок 14 могут покрываться просветляющим оптическим покрытием.

Для уменьшения потерь энергии, обусловленных поглощением излучения накачки 13 в окне 5 и выходом излучения накачки 13 через окно 5 для входа и выхода отрезков усиливающего волокна, окно 5 может покрываться светоотражающим покрытием. При этом по крайней мере часть излучения накачки 13, попадающее при распространении внутри замкнутого объёма на окно 5, будет возвращена обратно в замкнутый объём, что повысит эффективность работы устройства.

Описываемое устройство может использоваться как в качестве усилителя оптического сигнала, так и в качестве активной среды для получения лазерной генерации. При наличии двух и более отрезков усиливающего волокна в замкнутом объёме устройство может использоваться для этих целей одновременно. В последнем случае лазерное излучение, генерируемое с помощью одного из отрезков усиливающего волокна, может быть подано на вход второго отрезка усиливающего волокна, не занятого для лазерной генерации, в результате чего будет получено усиленное лазерное излучение с высоким уровнем мощности.

Для механической фиксации устройства, особенно в отсутствие оболочки 1 стенки 2 замкнутого объёма, могут использоваться места присоединения к стенке 2 окон 9 для ввода излучения накачки, ввод и вывод для прокачки материала заполнения 3, а также места герметизации окон 5 в стенке 2 замкнутого объёма.

Таким образом, предлагаемое изобретение является эффективным волоконным усилителем, который может иметь одну или несколько независимых пар входов/выходов, может быть легко изготовлен без создания специальных производственных условий и использования сложного производственного оборудования. Дополнительным преимуществом устройства является возможность использования дешёвых лазерных источников накачки с низким качеством пучка.

Использованные источники информации

1. Патент US 5161050
2. Optics Letters. 1998, vol. 23, p. 1037-1039
3. Патент US 7221822

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Устройство для усиления оптического сигнала, состоящее из одного или более источников накачки и замкнутого объёма, в который введен один или более отрезков усиливающего оптического волокна, вход и выход которых выведены за пределы замкнутого объёма, отличающееся тем, что замкнутый объём, имеющий торообразную форму, снабжен одним или более окнами для входа и выхода отрезков усиливающего оптического волокна и имеет одно или более окон для ввода излучения накачки и обеспечивает условия полного внутреннего отражения оптического излучения от источника накачки, так что излучение накачки неоднократно проходит через замкнутый объём, пересекая усиливающее оптическое волокно.

2. Устройство по п.1, отличающееся тем, что замкнутый объём имеет стенку, изготовленную из стекла, кварца или другого материала, прозрачного для оптического излучения накачки.

3. Устройство по п.1, отличающееся тем, что замкнутый объём имеет стенку, изготовленную из материала, прозрачного для излучения накачки, причём внешняя поверхность стенки покрыта оболочкой, обеспечивающей полное внутреннее отражение излучения накачки.

4. Устройство по п.1, отличающееся тем, что средняя часть одного или более отрезков усиливающего оптического волокна, размещенная в замкнутом объёме, состоит из сердцевины и оболочки, показатели преломления которых обеспечивают распространение излучения оптического сигнала в сердцевине усиливающего волокна за счёт эффекта полного внутреннего отражения на границе сердцевины с оболочкой.

5. Устройство по п.1, отличающееся тем, что пространство между усиливающим оптическим волокном и внутренней поверхностью стенки замкнутого объёма равномерно заполнено материалом заполнения, прозрачным для оптического излучения накачки, который может быть в жидком, гелеобразном или другом состоянии.

6. Устройство по п.5, отличающееся тем, что абсолютное значение разности показателей преломления материала стенки замкнутого объёма и материала заполнения не превосходит величины, обеспечивающей превышение коэффициента усиления оптического сигнала над коэффициентом его затухания в

устройстве, а также превышение возможностей теплоотвода из устройства над суммарной мощностью потерь оптического излучения накачки и оптического сигнала в устройстве.

7. Устройство по п.5, отличающееся тем, что средняя часть усиливающего оптического волокна, размещенная в замкнутом объеме, имеет однородный показатель преломления по поперечному сечению, превышающий показатель преломления материала заполнения.

8. Устройство по п.5, отличающееся тем, что показатели преломления материалов удовлетворяют следующим условиям:

$$n_{7\min} > n_3 > n_{12},$$

где n_3 - показатель преломления материала заполнения,

$n_{7\min}$ - наименьший по поперечному сечению показатель преломления среднего участка отрезка усиливающего волокна,

n_{12} - показатель преломления внешней среды, окружающей замкнутый объем.

9. Устройство по п.5, отличающееся тем, что стенка замкнутого объема покрыта снаружи оболочкой с показателем преломления n_1 , соотношение которого с показателем преломления материала заполнения n_3 и наименьшим по поперечному сечению показателем преломления среднего участка отрезка усиливающего волокна $n_{7\min}$ удовлетворяет условию

$$n_{7\min} > n_3 > n_1.$$

10. Устройство по п.5, отличающееся тем, что показатели преломления материалов удовлетворяют следующим условиям:

$$n_{7\min} > n_3 > n_2,$$

где n_2 - показатель преломления стенки замкнутого объема,

n_3 - показатель преломления материала заполнения,

$n_{7\min}$ - наименьший по поперечному сечению показатель преломления среднего участка отрезка усиливающего волокна.

11. Устройство по п.5, отличающееся тем, что замкнутый объем выполнен в форме тора, стенка которого покрыта снаружи оболочкой, причём радиусы тора удовлетворяют соотношению

$$r/R > n_1/n_3,$$

где r - малый (внутренний) радиус тора,

R - большой (внешний) радиус тора,

n_1 - показатель преломления оболочки стенки тора,

n_3 - показатель преломления материала заполнения.

12. Устройство по п.5, отличающееся тем, что замкнутый объем выполнен в форме тора, радиусы которого удовлетворяют соотношению

$$r/R > n_{12}/n_3,$$

где r - малый (внутренний) радиус тора,

R - большой (внешний) радиус тора,

n_3 - показатель преломления материала заполнения,

n_{12} - показатель преломления внешней среды, окружающей замкнутый объем.

13. Устройство по п.5, отличающееся тем, что замкнутый объем выполнен в форме тора, радиусы которого удовлетворяют соотношению

$$r/R > n_2/n_3,$$

где r - малый (внутренний) радиус тора,

R - большой (внешний) радиус тора,

n_2 - показатель преломления стенки тора,

n_3 - показатель преломления материала заполнения.

14. Устройство по п.1, отличающееся тем, что на одно или более окон для ввода оптического излучения накачки нанесено просветляющее оптическое покрытие.

15. Устройство по п.1, отличающееся тем, что окна в стенке замкнутого объема для входа и выхода отрезков усиливающего оптического волокна имеют светоотражающее покрытие.

16. Устройство по п.1, отличающееся тем, что одно или более окон для ввода оптического излучения накачки выполнены в виде бороздок на внешней поверхности стенки замкнутого объема, причём бороздки имеют как минимум две боковые стенки, как минимум одна из них шлифована, оптическое излучение накачки вводится через шлифованные боковые стенки бороздки, размеры которых достаточны для введения оптического пучка лучей накачки под углом Брюстера, а угол, который образуют шлифованные боковые стенки бороздки к внешней поверхности стенки замкнутого объема, позволяет введенному в замкнутый объем оптическому излучению накачки распространяться, испытывая полное внутреннее отражение на стенке замкнутого объема.

17. Устройство по п.1, отличающееся тем, что одно или более окон для ввода излучения накачки выполнены в виде герметизируемых отверстий в стенке замкнутого объема, через которые внутрь замкнутого объема дополнительно введены отрезки оптического волокна накачки, по которым излучение накачки вводится внутрь замкнутого объема, при этом по крайней мере часть длины каждого отрезка

волокна накачки, расположенной внутри замкнутого объёма, лишена оболочки, так что излучение накачки выходит из волокна накачки через его боковую поверхность в замкнутый объём, причём числовая апертура волокна накачки обеспечивает выход излучения накачки в замкнутый объём в диапазоне углов, для которых выполняются условия полного внутреннего отражения, а показатель преломления волокна накачки не превосходит показателя преломления материала заполнения.

18. Устройство по п.17, отличающееся тем, что одно или более окон для ввода излучения накачки объединено с одним или более окнами для входа и выхода отрезков усиливающего оптического волокна.

19. Устройство по п.1, отличающееся тем, что имеет одно или более окон для ввода излучения накачки в замкнутый объём в двух противоположных направлениях.

20. Устройство по п.1, отличающееся тем, что замкнутый объём дополнительно снабжен вводом и выводом для прокачки материала заполнения.

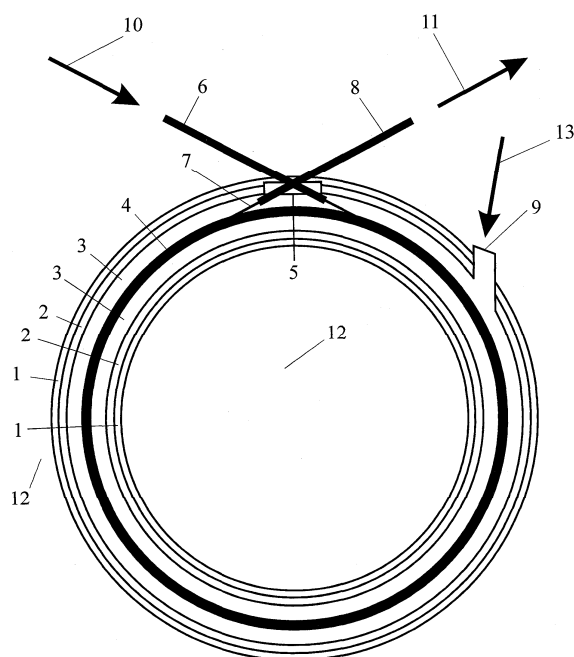
21. Устройство по п.1, отличающееся тем, что как минимум один из отрезков усиливающего оптического волокна служит в качестве усиливающей среды для получения лазерной генерации.

22. Устройство по п.1, отличающееся тем, что содержит два или более отрезков усиливающего оптического волокна, как минимум один из которых служит в качестве усиливающей среды для получения лазерной генерации, а еще как минимум один - для усиления генерируемого лазерного излучения.

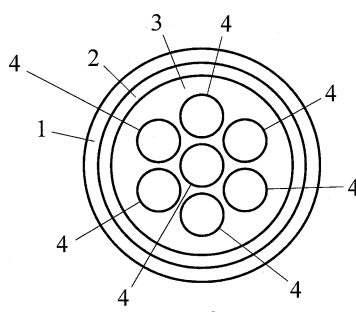
23. Устройство по п.1, отличающееся тем, что для механической фиксации устройства использованы места присоединения окон для ввода оптического излучения накачки к стенке замкнутого объёма, места герметизации окон в стенке замкнутого объёма для входа и выхода отрезков усиливающего оптического волокна, ввод и вывод для прокачки материала заполнения.

24. Устройство по п.1, отличающееся тем, что один или более отрезков усиливающего волокна образуют внутри замкнутого объёма один или несколько витков.

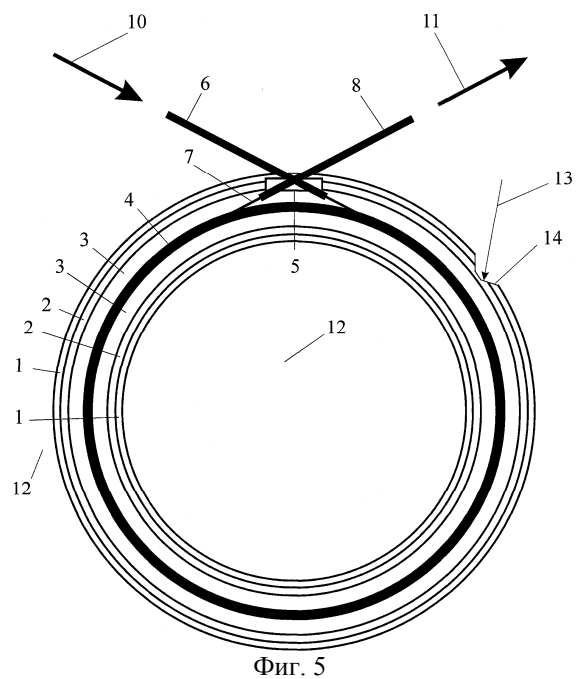
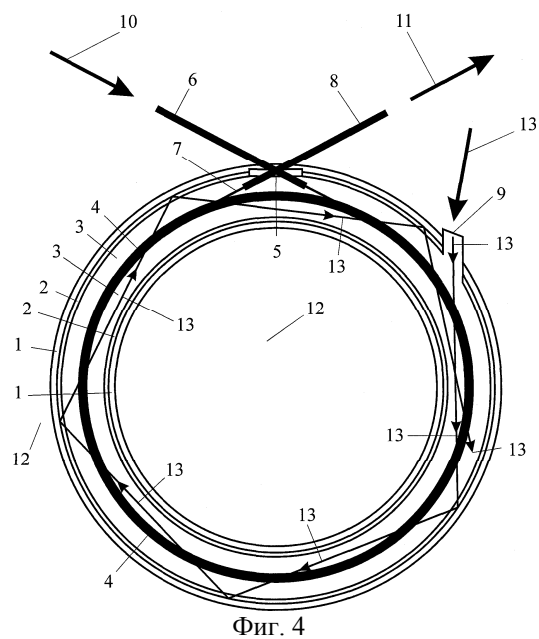
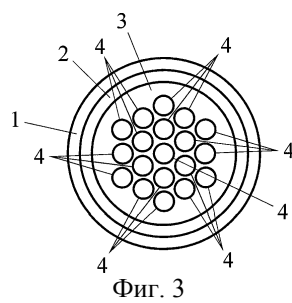
25. Устройство по п.1, отличающееся тем, что замкнутый объём выполнен в виде спиралеобразной трубки, начало и конец которой соединены.

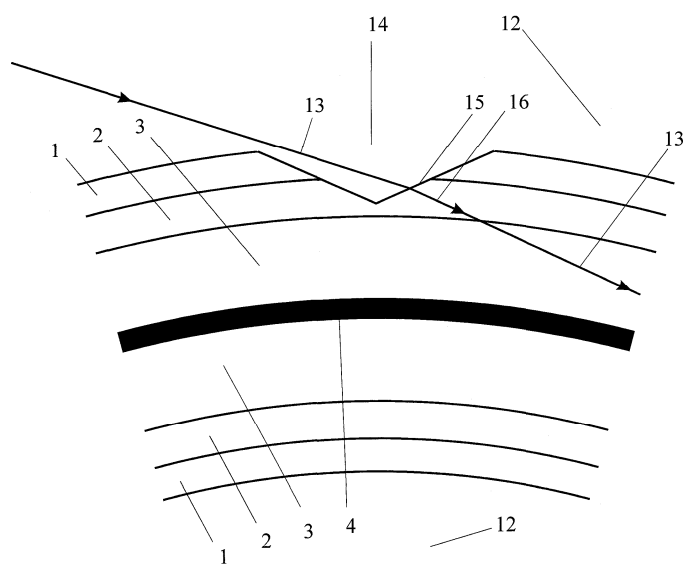


Фиг. 1

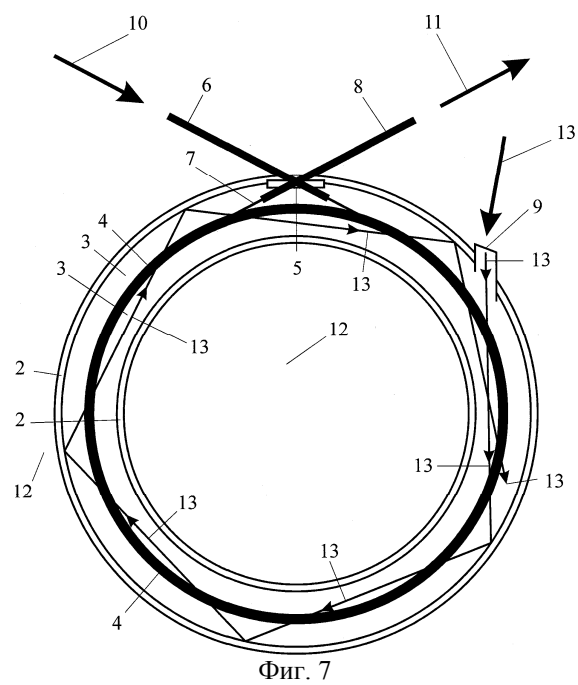


Фиг. 2

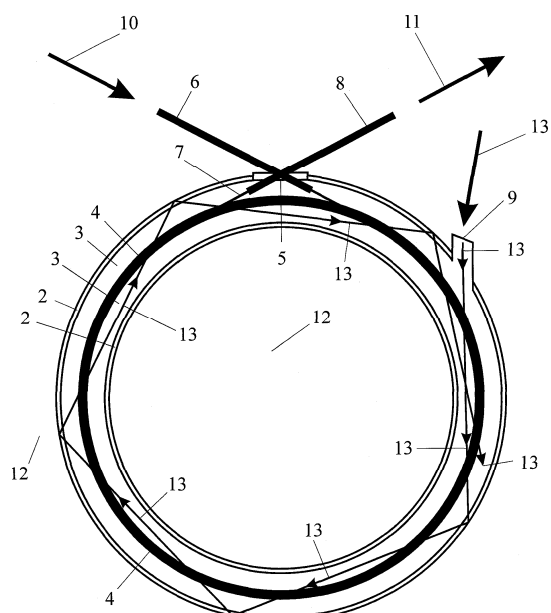




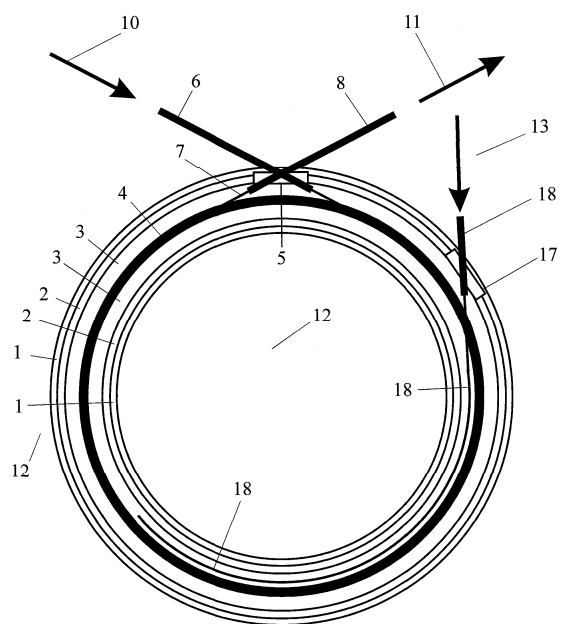
ФИГ. 6



ФИГ. 7



Фиг. 8



Фиг. 9

