



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015154092, 16.12.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
16.12.2015Дата регистрации:  
04.05.2017

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 16.12.2015

(45) Опубликовано: 04.05.2017 Бюл. № 13

Адрес для переписки:

630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2,  
Новосибирский государственный университет,  
отдел защиты и управления ИС, Беляевой Н.А.

(72) Автор(ы):

Иваненко Алексей Владимирович (RU),  
Смирнов Сергей Валерьевич (RU),  
Кобцев Сергей Михайлович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

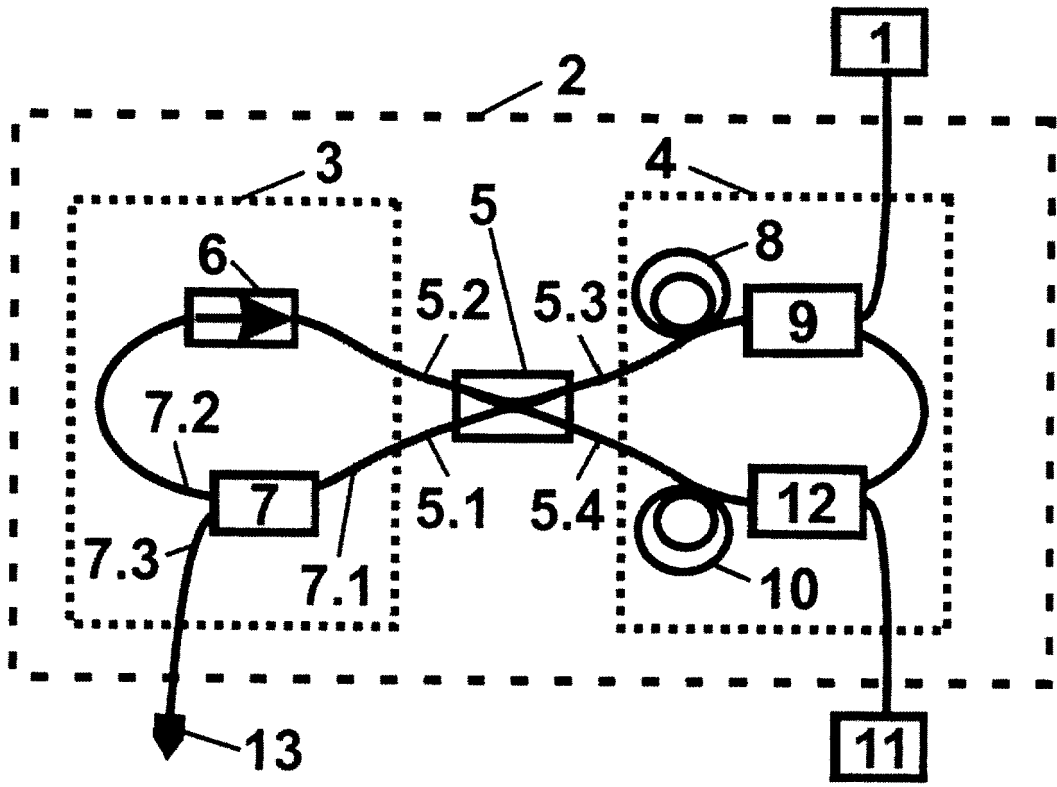
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Новосибирский национальный  
исследовательский государственный  
университет" (Новосибирский  
государственный университет, НГУ) (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: А.Э. Голубцов "ВОЛОКОННЫЙ  
ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫЙ NALM ЛАЗЕР С  
ДВУМЯ ТИПАМИ РЕЖИМОВ  
ИМПУЛЬСНОЙ ГЕНЕРАЦИИ",  
МАТЕРИАЛЫ 53-Й  
МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ  
СТУДЕНЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
МНСК-2015, 11-17 апреля 2015, всего -113  
стр. WO 2008063531 A2, 29.05.2008. EP  
2637265 A1, 11.09.2013. RU 2180768 C2,  
20.03.2002..

(54) Волоконный импульсный лазер с нелинейным петлевым зеркалом

(57) Реферат:

Изобретение относится к лазерной технике. Волоконный лазер содержит источник накачки и резонатор, выполненный полностью из элементов, сохраняющих поляризацию, и состоящий из двух волоконных петель - пассивной и активной, соединяющихся посредством сплавного волоконного четырехпортового ответвителя. В активную петлю резонатора введены дополнительный отрезок активного волокна, дополнительный волоконный объединитель длин волн и дополнительный источник накачки. Один конец дополнительного отрезка активного волокна соединен с четвертым портом сплавного волоконного четырехпортового ответвителя, а другой конец дополнительного отрезка активного волокна

соединен с выходным портом дополнительного волоконного объединителя длин волн, вход накачки которого соединен с дополнительным источником накачки, а сигнальный порт соединен с сигнальным портом основного волоконного объединителя длин волн. Технический результат заключается в обеспечении возможности реализации стабильной пассивной синхронизацией мод излучения, повышении эффективности преобразования энергии оптической накачки в энергию генерируемых импульсов, обеспечении надежности конструкции и в отсутствии необходимости технического обслуживания в процессе эксплуатации и после транспортировки. 1 ил.



Фиг.1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: **2015154092, 16.12.2015**

(24) Effective date for property rights:  
**16.12.2015**

Registration date:  
**04.05.2017**

Priority:

(22) Date of filing: **16.12.2015**

(45) Date of publication: **04.05.2017** Bull. № 13

Mail address:

**630090, g. Novosibirsk, ul. Pirogova, 2, Novosibirskij gosudarstvennyj universitet, otdel zashchity i upravleniya IS, Belyaevoj N.A.**

(72) Inventor(s):

**Ivanenko Aleksej Vladimirovich (RU),  
Smirnov Sergej Valerevich (RU),  
Kobtsev Sergej Mikhajlovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Novosibirskij natsionalnyj issledovatel'skij gosudarstvennyj universitet" (Novosibirskij gosudarstvennyj universitet, NGU) (RU)**

(54) **FIBER PULSE LASER WITH NON-LINEAR MIRROR**

(57) Abstract:

FIELD: physics.

SUBSTANCE: fiber laser contains a pumping source and a resonator made entirely of polarization-preserving elements and consisting of two fiber loops, passive and active, connected via a fused fiber four-port coupler. In the active loop of the resonator, an additional segment of the active fiber, an additional fiber combiner of wavelengths and an additional pump source are introduced. One end of the additional active fiber section is connected to the fourth port of the fused fiber four-port coupler and the other end of the additional active fiber section is connected to the output port of

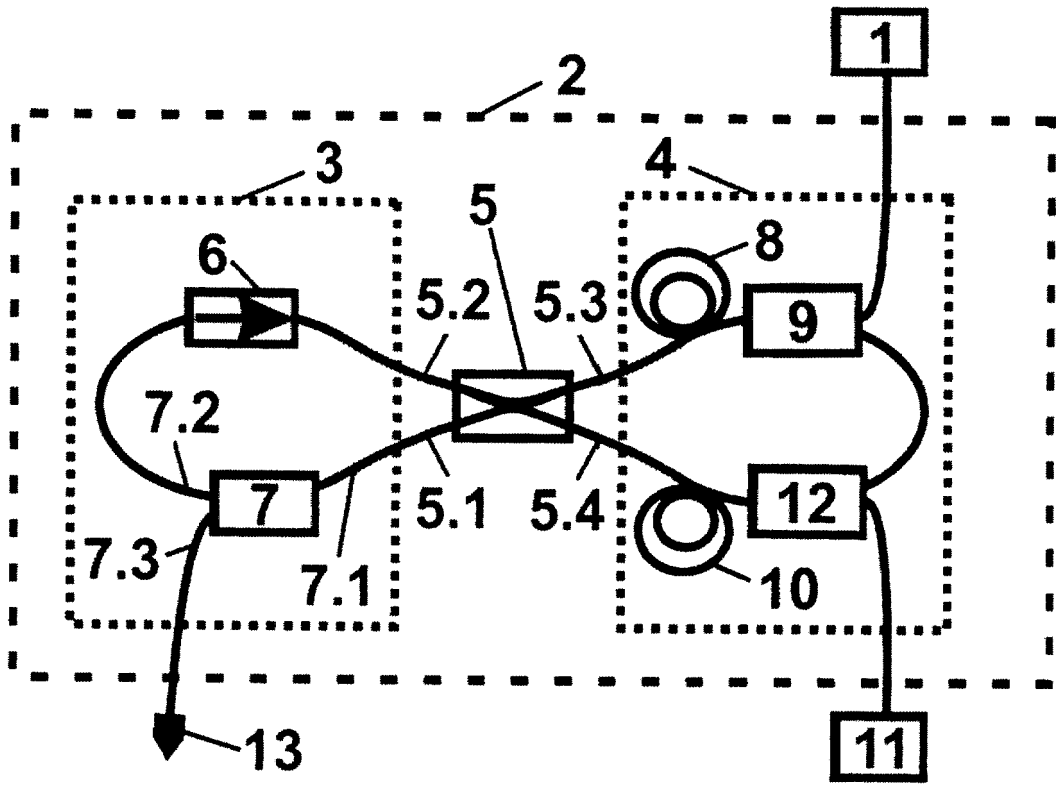
the additional fiber wavelength combiner whose pump input is connected to an additional pump source and the signal port is connected to the signal port of the main fiber combiner of wavelengths.

EFFECT: ensuring the possibility of implementing a stable passive mode synchronization of radiation, increasing the efficiency of converting the energy of optical pumping into the energy of generated pulses, ensuring the reliability of the design and the absence of maintenance in service and after transport.

1 dwg

RU 2 618 605 C1

RU 2 618 605 C1



Фиг.1

Изобретение относится к лазерам - приборам для генерации с использованием стимулирующего излучения когерентных электромагнитных волн.

Известен волоконный лазер с пассивной синхронизацией мод излучения за счет нелинейного петлевого зеркала (D.J. Richardson; R.I. Laming; D.N. Payne; V. Matsas; M.W. Phillips. Selfstarting, passively modelocked erbium fibre ring laser based on the amplifying Sagnac switch. Electronics Letters, Volume 27, Issue 6, p. 542-544 (1991) [1], I.N. Duling. Subpicosecond all-fibre erbium laser. Electronics Letters, Volume 27, Issue 6, p. 544-545 (1991) [2]). Режим пассивной синхронизации мод достигается настройкой состояния поляризации внутрирезонаторного излучения лазера с помощью волоконных контроллеров поляризации, используемых в резонаторе волоконного лазера в качестве двулучепреломляющих элементов фазовой задержки.

Недостатками данного технического решения является то, что в конструкции лазера в качестве двулучепреломляющих элементов фазовой задержки используются контроллеры поляризации, основанные на механической деформации волокна. Вносимые контроллерами поляризации фазовые задержки с течением времени могут изменяться вследствие пластических деформаций оптического волокна, что приводит к выходу лазера из заданного режима генерации и необходимости его подстройки, технического обслуживания высококвалифицированными специалистами, контроля параметров лазерного излучения с помощью специального оборудования, что сопряжено со значительными затратами времени и материальных ресурсов.

Также из существующего уровня техники известен волоконный лазер синхронизации мод излучения за счет нелинейного петлевого зеркала и с резонатором, состоящим полностью из элементов сохраняющих поляризацию (Nicholson J.W., Andrejco M. A polarization maintaining, dispersion managed, femtosecond figure-eight fiber laser. Optics Express, T. 14, №18, p. 8160-8167 (2006) [3]), что позволяет исключить из конструкции лазера контроллеры поляризации.

Для запуска режима синхронизации мод в конструкцию лазера внесен дополнительный элемент - высокочастотный оптический модулятор интенсивности с модулем управления. Режим пассивной синхронизации мод достигается настройкой частоты модулятора на частоту, равную частоте обхода резонатора, которая задается длиной резонатора.

Недостатками данного лазера являются необходимость использования в конструкции лазера дополнительных элементов: оптического модулятора интенсивности с модулем управления, что усложняет конструкцию лазера, увеличивает его стоимость и снижает ресурс работы. Помимо этого, при использовании в конструкции лазера оптических модуляторов излучения для старта режима синхронизации мод требуется точная настройка частоты модулятора с частотой обхода резонатора. Более того, высокочастотные оптические модуляторы интенсивности в волоконном исполнении обладают низким порогом разрушения по средней мощности излучения (средняя входная мощность излучения не должна превышать нескольких десятков милливатт (мВт), что ограничивает выходную среднюю мощность таких лазеров на уровне единиц мВт (для известного из уровня техники решения [3] средняя выходная мощность порядка 50 мкВт).

Наиболее близким к заявляемому устройству является волоконный лазер с пассивной синхронизацией мод за счет нелинейного петлевого зеркала и с резонатором, состоящим полностью из элементов сохраняющих поляризацию, описанный в работе: Agueraray C. et al. Mode-locked femtosecond all-normal all-PM Yb-doped fiber laser using a nonlinear amplifying loop mirror. Optics Express, T. 20, №10, с. 10545-10551 (2012) [4].

В известном из указанной работы прототипе режим синхронизации мод осуществляется за счет работы нелинейного петлевого зеркала при достижении определенной мощности излучения в нем. Работа прототипа основана на зависимости мощности излучения, отраженного нелинейным петлевым зеркалом в разные порты волоконного четырехпортового ответвителя от разности нелинейного набега фаз волн, прошедших нелинейное волоконное петлевое зеркало во встречных направлениях (Okhotnikov O.G., Araujo F.M. Cavity dumping of fiber lasers by phase-modulated optical loop mirrors. Optics Letters, Т. 21, №1, с. 57-58 (1996) [5]).

Недостатком данного технического решения является невозможность получения средней мощности генерации лазера выше нескольких сотен мВт. Мгновенный коэффициент пропускания  $T$  нелинейного петлевого зеркала является периодической функцией разности нелинейного набега фаз  $\Delta\varphi$ :  $T=1-2r(1-r)[1+\cos(\Delta\varphi)]$ , где  $r=0.5$  - коэффициент деления сплавного волоконного ответвителя,  $\Delta\varphi$  - разность нелинейного набега фаз встречных волн, приходящих на входы сплавного ответвителя [5]. При увеличении мощности излучения в нелинейном петлевом зеркале без использования специальных мер автоматически увеличивается разность нелинейного набега фаз  $\Delta\varphi$ . В случае, если разность нелинейного набега фаз становится больше  $\pi$ , периодическая зависимость коэффициента пропускания  $T(\Delta\varphi)$  нелинейного петлевого зеркала приводит к неустойчивой работе лазера, срыву режима генерации и/или формированию в его излучении стохастических суб-импульсов (Y.S. Fedotov, A.V. Ivanenko, S.M. Kobtsev, S.V. Smirnov. High average power mode-locked figure-eight Yb fibre master oscillator. Optics Express, Vol. 22, Issue 25, pp. 31379-31386 (2014) [6]), что делает излучение такого лазера неприемлемым для ряда практических применений.

Задачей, на решение которой направлено заявляемое изобретение, является создание волоконного лазера с пассивной синхронизацией мод, обеспечивающего стабильный режим генерации импульсного излучения со средней мощностью более 0.5 Вт.

Поставленная задача решается за счет того, что в волоконный лазер, содержащий источник накачки и резонатор, выполненный полностью из элементов, сохраняющих поляризацию, и состоящий из двух волоконных петель - пассивной и активной, соединяющихся посредством сплавного волоконного четырехпортового ответвителя; пассивная петля резонатора содержит выходной ответвитель, выводящий часть излучения из резонатора через третий порт и соединенный первым портом с первым портом сплавного волоконного четырехпортового ответвителя, а вторым портом соединенный с входом волоконного изолятора, выход которого соединен со вторым портом сплавного волоконного четырехпортового ответвителя; активная петля образует нелинейное петлевое зеркало и содержит отрезок активного волокна, один конец которого соединен с третьим портом сплавного волоконного четырехпортового ответвителя, а другой конец соединен с выходным портом основного волоконного объединителя длин волн, вход накачки которого соединен с источником накачки; согласно изобретению для достижения высоких средних мощностей излучения в режиме синхронизации мод в активную петлю резонатора введены дополнительный отрезок активного волокна, дополнительный волоконный объединитель длин волн и дополнительный источник накачки, при этом один конец дополнительного отрезка активного волокна соединен с четвертым портом сплавного волоконного четырехпортового ответвителя, а другой конец дополнительного отрезка активного волокна соединен с выходным портом дополнительного волоконного объединителя длин волн, вход накачки которого соединен с дополнительным источником накачки, а сигнальный порт соединен с сигнальным портом основного волоконного объединителя

длин волн.

Техническим результатом, обеспечиваемым приведенной совокупностью признаков, является возможность реализации в волоконном лазере стабильной пассивной синхронизацией мод излучения, обеспечивающей режим генерации одиночных импульсов с высокой средней мощностью более 0.5 Вт, высокую эффективность преобразования энергии оптической накачки в энергию генерируемых импульсов, надежность конструкции и отсутствие необходимости технического обслуживания в процессе эксплуатации и после транспортировки.

Сущность изобретения поясняется схемой предлагаемого устройства, представленной на фиг. 1.

Устройство состоит из следующих элементов:

- 1 - источник накачки,
- 2 - резонатор лазера,
- 3 - пассивная петля резонатора 2 лазера,
- 4 - активная петля резонатора 2 лазера,
- 5 - сплавной волоконный четырехпортовый ответвитель,
- 5.1 - первый порт сплавного волоконного четырехпортового ответвителя 5
- 5.2 - второй порт сплавного волоконного четырехпортового ответвителя 5,
- 5.3 - третий порт сплавного волоконного четырехпортового ответвителя 5,
- 5.4 - четвертый порт сплавного волоконного четырехпортового ответвителя 5,
- 6 - волоконный изолятор,
- 7 - волоконный выходной ответвитель,
- 7.1 - первый порт волоконного выходного ответвителя 7,
- 7.2 - второй порт волоконного выходного ответвителя 7,
- 7.3 - третий порт волоконного выходного ответвителя 7.
- 8 - отрезок активного волокна,
- 9 - объединитель длин волн,
- 10 - дополнительный отрезок активного волокна,
- 11 - дополнительный источник накачки,
- 12 - дополнительный объединитель длин волн,
- 13 - выход волоконного лазера.

Устройство работает следующим образом.

Излучение от источников накачки 1 и 11 с длиной волны  $\lambda_0$  вводится в резонатор 2 импульсного лазера через волоконные объединители 9 и 12 и поступает в отрезки активного волокна 8 и 10, где оно поглощается, вызывая переходы атомов в возбужденное квантовое состояние, в результате чего происходят генерация и усиление излучения на длине волны генерации  $\lambda_1$ .

Из активной петли 4, образующей нелинейное петлевое зеркало, излучение с длиной волны  $\lambda_1$  через сплавной волоконный четырехпортовый ответвитель 5 попадает в пассивную петлю 3. При входе в пассивную петлю 3 входное излучение на длине волны  $\lambda_1$  за счет сплавного волоконного четырехпортового ответвителя 5 разделяется на две части, проходящие через первый порт 5.1 и второй порт 5.2 сплавного волоконного четырехпортового ответвителя 5 и распространяющиеся в пассивной петле 3 в противоположных направлениях. Излучение на длине волны генерации  $\lambda_1$ , прошедшее в пассивную петлю 3 через второй порт 5.2 сплавного волоконного четырехпортового ответвителя 5, поглощается волоконным изолятором 6.

Другая часть излучения на длине волны генерации  $\lambda_1$ , прошедшая в пассивную петлю

3 через первый порт 5.1 сплавного волоконного четырехпортового ответвителя 5, поступает в волоконный ответвитель 7, где снова делится и частично выводится из резонатора 2 через выход 13. Оставшаяся в резонаторе часть излучения поступает на вход волоконного изолятора 6 и после прохождения его поступает через второй порт 5.2 сплавного волоконного четырехпортового ответвителя 5 в активную петлю 4. При входе в активную петлю 4 излучение на длине волны генерации  $\lambda_1$  разделяется сплавным волоконным четырехпортовым ответвителем 5 на две части, распространяющиеся в активной петле 4 во встречных направлениях. Эти части излучения при прохождении активной петли 4 получают разные нелинейные набеги фазы, зависящие от коэффициентов усиления в отрезках активного волокна 8 и 10 и длин отрезков активного волокна 8 и 10.

После прохождения активной петли указанные части излучения на длине волны генерации  $\lambda_1$  интерферируют друг с другом и вновь входят в пассивную петлю через сплавной волоконный четырехпортовый ответвитель 5. Коэффициент прохождения в первый порт 5.1 и второй порт 5.2 сплавного волоконного четырехпортового ответвителя 5 зависит от разности нелинейного набега фаз  $\Delta\varphi$  излучения при распространении в активной петле 4 и определяется формулой

$$T=1-2r(1-r)[1+\cos(\Delta\varphi)],$$

где  $T$  - доля энергии излучения, прошедшая из активной петли 4 в пассивную петлю 3 через первый порт 5.1 сплавного волоконного четырехпортового ответвителя 5 (соответственно,  $1-T$  - доля энергии, прошедшая из активной петли 4 в пассивную петлю 3 через второй порт 5.2 сплавного волоконного четырехпортового ответвителя 5),  $r$  - коэффициент деления сплавного волоконного четырехпортового ответвителя 5,  $\Delta\varphi$  - разность нелинейного набега фаз встречных волн при распространении через активную петлю 4 [5].

Нелинейный набег фазы излучения в активной петле 4 равен интегралу  $\int \gamma P dz$ , где  $\gamma$  - нелинейный коэффициент волокна,  $P$  - мощность излучения,  $z$  - координата вдоль волокна. Разность нелинейного набега фаз  $\Delta\varphi$  для встречных волн определяется асимметрией распределения мощности  $P(z)$  в активной петле 4 и при этом пропорционально мощности излучения  $P$ . В пределе очень малых мощностей излучения разность нелинейного набега фаз  $\Delta\varphi$  для встречных волн близка к нулю, что приводит к малому коэффициенту пропускания  $T$  в первый порт 5.1 сплавного волоконного четырехпортового ответвителя 5, т.е. практически все излучение проходит из активной петли 4 в пассивную петлю 3 через второй порт 5.2 сплавного волоконного четырехпортового ответвителя 5 и поглощается в волоконном изоляторе 6. При увеличении мощности излучения в активной петле 4, разность нелинейного набега фаз  $\Delta\varphi$  для встречных волн будет возрастать, что приведет к увеличению доли энергии  $T$ , прошедшей из активной петли 4 в пассивную петлю 3 через первый порт 5.1 сплавного волоконного четырехпортового ответвителя 5, которая не поглощается в волоконном изоляторе 6. Следовательно, с ростом мощности будут уменьшаться оптические потери излучения на волоконном изоляторе 6, так что рассмотренная волоконно-оптическая система будет работать как насыщающийся поглотитель, что приведет к формированию в резонаторе лазера мощных импульсов.

Для стабильной работы лазера необходимо, чтобы разность нелинейного набега фаз  $\Delta\varphi$  для встречных волн в активной петле 4 была меньше  $\pi$ , в противном случае зависимость коэффициента пропускания  $T(\Delta\varphi)$  становится немонотонной, что приводит к срыву режима генерации и/или формированию цугов со стохастическим наполнением субимпульсами (S. Kobtsev, S. Kukarin, S. Smimov, S. Turitsyn, A. Latkin. Generation of



double-scale femto/pico-second optical lumps in mode-locked fiber lasers. Optics Express, v. 17, N23, pp. 20707-20713 (2009) [7]).

Управляя мощностью накачки модулей накачки 1 и 11, можно изменять коэффициенты усиления в отрезках активного волокна 8 и 10, создавая управляемую асимметрию по  $z$  распределения мощности  $P(z)$  в активной петле 4, обеспечивая условие  $\Delta\varphi < \pi$  при любых уровнях мощности излучения, распространяющегося в нелинейном петлевом зеркале 4. В частности, при запуске режима генерации в лазере, когда мощности излучения, распространяющегося в нелинейном петлевом зеркале 4, малы, следует использовать сильно отличающиеся уровни мощности источников накачки 1 и 11, что обеспечит большую асимметрию по  $z$  распределения мощности  $P(z)$  в нелинейном петлевом зеркале 4 и запуск режима генерации при малых мощностях. Далее следует повышать и выравнивать уровни мощности источников накачки 1 и 11, что обеспечит повышение мощности излучения с одновременным уменьшением асимметрии по  $z$  распределения мощности  $P(z)$  в нелинейном петлевом зеркале 4, сохранение разности нелинейного набега фаз  $\Delta\varphi$  для встречных волн в активной петле 4 меньше  $\pi$  и устойчивый режим генерации при высоком уровне мощности.

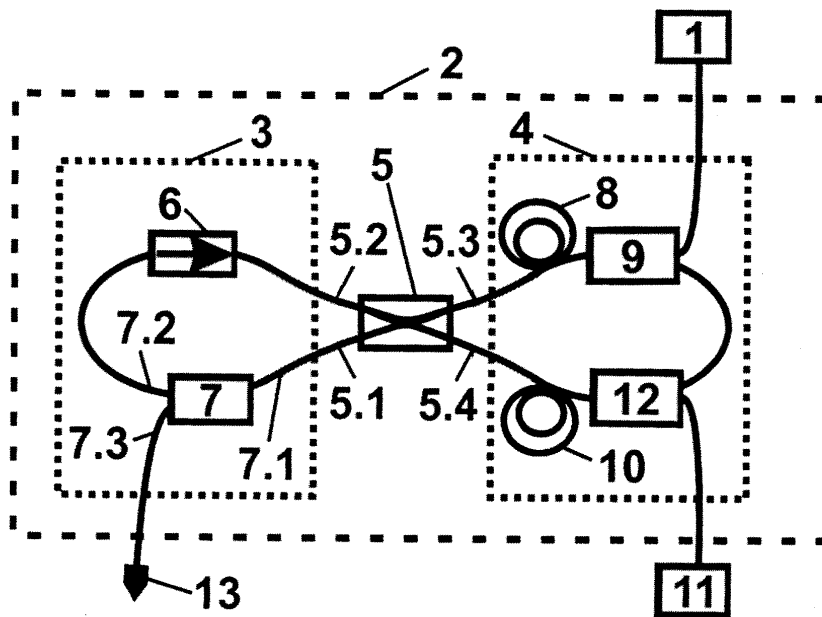
#### Источники информации

1. Electronics Letters. - 1991. - Vol. 27. - No 6. - P. 542-544.
2. Electronics Letters. - 1991. - Vol. 27. - No 6. - P. 544-545.
3. Optics Express. - 2006. - Vol. 14. - No 18. - P. 8160-8167.
4. Optics Express. - 2012. - Vol. 20. - No 10. - P. 10545-10551.
5. Optics Letters. - 1996. - Vol. 21. - No 1. - P. 57-58.
6. Optics Express. - 2014. - Vol. 22. - No 25. - P. 31379-31386.
7. Optics Express. - 2009. - Vol. 17. - No 23. - P. 20707-20713.

#### (57) Формула изобретения

Волоконный импульсный лазер с нелинейным петлевым зеркалом, содержащий источник накачки и резонатор, выполненный полностью из элементов, сохраняющих поляризацию, и состоящий из двух волоконных петель - пассивной и активной, соединяющихся посредством сплавного волоконного четырехпортового ответвителя; пассивная петля резонатора содержит выходной ответвитель, выводящий часть генерируемого лазерного излучения из резонатора через третий порт; выходной ответвитель соединен первым портом с первым портом сплавного волоконного четырехпортового ответвителя, а вторым портом - с входом волоконного изолятора, выход которого соединен со вторым портом сплавного волоконного четырехпортового ответвителя; активная петля образует нелинейное петлевое зеркало и содержит отрезок активного волокна, один конец которого соединен с третьим портом сплавного волоконного четырехпортового ответвителя, а другой конец соединен с выходным портом основного волоконного объединителя длин волн, вход накачки которого соединен с источником накачки, отличающийся тем, что в резонаторе в активную петлю введены дополнительный отрезок активного волокна, дополнительный волоконный объединитель длин волн и дополнительный источник накачки, при этом дополнительный отрезок активного волокна соединен одним концом с четвертым портом сплавного волоконного четырехпортового ответвителя, а другим концом соединен с выходным портом дополнительного волоконного объединителя длин волн, вход накачки которого соединен с дополнительным источником накачки, а сигнальный порт соединен с сигнальным портом основного волоконного объединителя длин волн.

Волоконный импульсный лазер с нелинейным петлевым зеркалом



Фиг.1