



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,  
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2005110806/28, 13.04.2005

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
13.04.2005

(45) Опубликовано: 20.01.2007 Бюл. № 2

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: US 6151337 A, 21.11.2000. GB 1210597,  
28.10.1970. WO 02084819, 24.10.2002. RU  
2012119, 30.04.1994. SU 368690, 26.01.1973.  
SU 346999, 25.08.1977.

Адрес для переписки:

220072, г. Минск, проспект Независимости, 68,  
ГНУ "Институт физики имени Б.И. Степанова  
Национальной академии наук Беларуси"

(72) Автор(ы):

Грабчиков Александр Степанович (BY),  
Лисинецкий Виктор Александрович (BY),  
Орлович Валентин Антонович (BY)

(73) Патентообладатель(и):

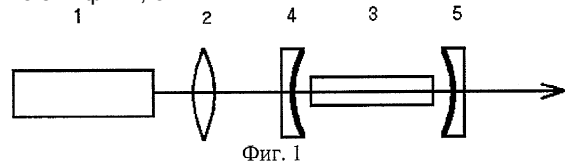
Государственное Научное Учреждение Институт  
Физики им. Б.И. Степанова Национальной  
Академии наук Беларуси (BY)

## (54) НЕПРЕРЫВНЫЙ ЛАЗЕР НА ВЫНУЖДЕННОМ КОМБИНАЦИОННОМ РАССЕЙЯНИИ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области лазерной техники и может быть применено в спектроскопии, лазерной физике, нелинейной оптике, биологии, экологии, медицине. Лазер содержит источник непрерывного излучения накачки и резонатор, образованный входным и выходным зеркалами с размещенной в нем комбинационно активной средой. Резонатор выполнен с добротностью на длине волны излучения вынужденного комбинационного рассеяния, достаточной для возбуждения последнего в комбинационно активной среде. Резонатор имеет входное зеркало. Значение пороговой мощности возбуждения обратно пропорционально первой степени

добротности резонатора на длине волны излучения вынужденного комбинационного рассеяния. Технический результат - создание относительно дешевого компактного непрерывного нерезонансного ВКР-лазера, позволяющего внесение комбинационно-активного элемента в виде кристалла, кюветы с жидкостью или газом в резонатор, обеспечение возможности преобразования излучения непрерывных лазеров. 18 з.п. ф-лы, 3 ил.





FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,  
PATENTS AND TRADEMARKS

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(21), (22) Application: **2005110806/28, 13.04.2005**(24) Effective date for property rights: **13.04.2005**(45) Date of publication: **20.01.2007 Bull. 2**

Mail address:

**220072, g.Minsk, prospekt Nezavisimosti, 68,  
GNU "Institut fiziki imeni B.I.Stepanova  
Natsional'noj akademii nauk Belarusi"**

(72) Inventor(s):

**Grabchikov Aleksandr Stepanovich (BY),  
Lisinetskij Viktor Aleksandrovich (BY),  
Orlovich Valentin Antonovich (BY)**

(73) Proprietor(s):

**Gosudarstvennoe Nauchnoe Uchrezhdenie  
Institut Fiziki im. B.I. Stepanova  
Natsional'noj Akademii nauk Belarusi (BY)**

(54) **CONTINUOUS STIMULATED-SCATTERING COMBINATION LASER**

(57) Abstract:

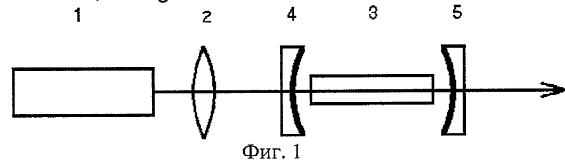
FIELD: laser engineering; spectroscopy, laser physics, nonlinear optics, biology, ecology, and medicine.

SUBSTANCE: proposed nonresonance laser has continuous pumping radiation source and resonator formed by input and output mirrors that accommodates combination-active medium. Resonator combination-active element is made in the form of chip or ditch with liquid or gas and its quality factor on combination stimulated scattering radiation wavelength is sufficient for exciting this radiation in its combination-active medium.

Resonator has output mirror. Threshold excitation power is inversely proportional to first degree of resonator quality factor on combined stimulated scattering radiation wavelength.

EFFECT: reduced cost and space requirement, ability of converting continuous laser radiation.

19 cl, 3 dwg



Изобретение относится к области лазерной техники и может быть применено в спектроскопии, лазерной физике, нелинейной оптике, биологии, экологии, медицине и т.д.

Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) является распространенным методом преобразования частоты импульсного лазерного излучения в новые спектральные диапазоны. В настоящее время с помощью импульсной ВКР-генерации возможно перекрытие перестраиваемым лазерным излучением спектрального диапазона от УФ- до ИК-области.

Создание ВКР-преобразователей непрерывного лазерного излучения является более сложной проблемой в связи с тем, что для достижения порога ВКР обычно требуются мощности лазерного излучения в киловаттной области. Хотя лазерные системы, производящие киловаттные мощности непрерывного излучения, существуют, их стоимость велика, а распространенность весьма ограничена. Между тем лазерные системы, производящие непрерывное излучение с мощностью 1-10 Вт, обладают умеренной стоимостью и получили широкое распространение. Они используются в спектроскопии, биологии, медицине, различных областях техники. Осуществление ВКР-преобразования частоты излучения таких непрерывных лазеров может значительно расширить диапазон их применения, открыв возможность их использования в не доступных ранее спектральных областях.

Известна реализация непрерывного режима ВКР-генерации, использующая эффект резонансного ВКР. Он состоит в том, что если длина волны возбуждающего лазера приближается к длине волны резонансного перехода среды, то коэффициент ВКР усиления среды существенно возрастает. Это позволяет снизить пороговую мощность возбуждения и получить ВКР-генерацию в непрерывном режиме при мощностях ваттного уровня. Примерами такого типа устройств являются непрерывные ВКР-лазеры на  $\text{NH}_3$  [1], непрерывные ВКР-лазеры на парах Na, работающие вблизи D-линий [2], двухфотонно возбуждаемые непрерывные ВКР-лазеры на парах Rb [3] и ВКР-лазеры на резонансе неона в газоразрядных трубках He-Ne лазеров [4]. Недостатком таких лазеров является необходимость их возбуждения вблизи резонанса, что налагает ограничения как на длины волн лазеров накачки, так и на области их перестройки, резко ограничивая возможность использования резонансного ВКР.

Второй тип непрерывных ВКР-лазеров основан на нерезонансном ВКР в очень высокодобротном резонаторе, обеспечивающем накопление излучения на длинах волн накачки и стоксова излучения [5]. Такое устройство состоит из маломощного непрерывного лазера накачки, ВКР-среды, резонатора с высокой добротностью обеспечивающей ВКР при возбуждении указанным непрерывным лазером. Зеркала, образующие резонатор, являются высокоотражающими на длинах волн накачки и первой стоксовой компоненты ( $R=99.995\%$ ). Использование такого высокодобротного на двух длинах волн резонатора позволяет существенно понизить мощность, необходимую для достижения порога, и получить ВКР-генерацию при накачке непрерывным лазером с мощностью несколько мВт. Порог ВКР при этом обратно пропорционален квадрату добротности резонатора. Недостатком такого устройства является необходимость использовать лазер накачки, работающий в одночастотном режиме генерации, что резко снижает его применимость, так как большинство лазеров работает в многочастотных режимах. Кроме того, устройство имеет сложную схему согласования моды излучения лазера накачки с модой ВКР-резонатора, что также затруднено в многочастотном случае. Следует отметить высокую стоимость зеркал с такими коэффициентами отражения. Важной особенностью устройства является то, что используемая газовая среда (водород) и резонаторные зеркала находятся в сосуде высокого давления. Это обеспечивает отсутствие окон в резонаторе и предельно минимизирует резонаторные потери, сводя их, по существу, к потерям на зеркалах. Отсутствие потерь внутри резонатора позволяет в полной мере использовать высокие отражения зеркал для снижения порога ВКР. Потери практически обусловлены пропусканием зеркал, так как потери в газе пренебрежимо малы. В случае же если в резонатор вносится среда в виде кристалла или кюветы с жидкостью,

потери в резонаторе будут возрастать за счет отражений на границах поглощения в самих рассеивающих средах, паразитного рассеяния на их неоднородностях. В этом случае добротность резонатора будет существенно падать, использование зеркал с очень высокими коэффициентами отражения становится бесполезным, а порог ВКР будет возрастать.

Таким образом, задача получения непрерывной генерации в дешевом компактном нерезонансном ВКР-лазере, способном работать на разных видах комбинационно активных сред и использующем для возбуждения излучение умеренной мощности (1-10 Вт) широко распространенных непрерывных серийных лазеров, генерирующих как одночастотное, так и многочастотное излучение, не решена.

Наиболее близким к заявляемому является ВКР-лазер на оптическом волокне, например устройство, описанное в [6]. Оно содержит непрерывный лазер накачки и оптическое волокно, помещенное в резонатор. Благодаря большой длине волокна (от 25 до 100 м) и его малому диаметру (до нескольких мкм) оказалось возможным снижение пороговой мощности возбуждения непрерывной ВКР-генерации до 5 Вт. Недостатками такого устройства являются: небольшой спектральный сдвиг в волокне (порядка  $440 \text{ см}^{-1}$ ), возникновение конкурирующей генерации на вынужденном рассеянии Мандельштама-Бриллюэна и относительно большая длина рассеивающей среды, препятствующая снижению габаритов такого устройства. Хотя теоретически уменьшение длины комбинационно-активной среды возможно, ее сокращение, например, от 25 м до 50 см приведет к 50-кратному возрастанию порога ВКР - до 250 Вт, что делает такой подход малоприменимым.

Задачей данного изобретения является создание относительно дешевого, компактного непрерывного нерезонансного ВКР-лазера, концепция которого позволяла бы внесение комбинационно активного элемента в виде кристалла, кюветы с жидкостью или газом в резонатор, а также обеспечивала бы возможность преобразования излучения непрерывных лазеров, работающих как в одночастотном, так и в многочастотном режимах.

Поставленная задача в непрерывном лазере на вынужденном комбинационном рассеянии, содержащем источник непрерывного излучения накачки и резонатор, образованный входным и выходным зеркалами с размещенной в нем комбинационно активной средой, причем резонатор выполнен с добротностью на длине волны излучения вынужденного комбинационного рассеяния, достаточной для возбуждения последнего в комбинационно активной среде, решена тем, что входное зеркало резонатора выполнено, по существу, прозрачным в диапазоне длин волн излучения накачки, при этом значение пороговой мощности возбуждения ВКР обратно пропорционально первой степени добротности резонатора на длине волны излучения вынужденного комбинационного рассеяния.

Предпочтительно входное зеркало резонатора может быть выполнено максимально отражающим на длине волны излучения первой стоксовой компоненты, а выходное зеркало резонатора - оптимально отражающим на длине волны излучения первой стоксовой компоненты, при этом резонатор может быть выполнен с добротностью на длине волны излучения второй стоксовой компоненты достаточно низкой, чтобы избежать генерации второй стоксовой компоненты.

Резонатор может быть выполнен с добротностью на длине волны излучения второй стоксовой компоненты, достаточной для достижения порога генерации второй стоксовой компоненты, причем входное зеркало выполнено максимально отражающим на длинах волн излучения первой и второй стоксовой компоненты, а выходное выполнено максимально отражающим на длине волны излучения первой стоксовой компоненты и оптимально отражающим на длине волны излучения второй стоксовой компоненты.

Выходное зеркало может отражать излучение накачки.

Источник непрерывного излучения накачки может излучать как одночастотное, так и многочастотное излучение, в частном случае источником излучения накачки является аргоновый лазер.

Мощность источника излучения накачки выбирают от 0.1 до 10 Вт.

Комбинационно активная (ВКР-активная) среда может быть выполнена в виде кюветы с жидкостью или газом, но предпочтительно выполнена твердотельной и может быть выбрана из группы кристаллических сред, включающей  $Ba(NO_3)_2$ ,  $KGd(WO_4)_2$ ,  $KY(WO_4)_2$ ,  $KYb(WO_4)_2$ ,  $BaWO_4$ ,  $YVO_4$ . ВКР-активная среда может также представлять собой полупроводниковый кристалл, например кристалл кремния.

Комбинационно-активная среда предпочтительно помещена в корпус, обеспечивающий теплоотвод, который может быть выполнен центрально-симметричным.

На все элементы, расположенные внутри резонатора, нанесены антиотражающие покрытия.

Т.о. задача решена путем создания резонатора, высокодобротного лишь на длине волны излучения вынужденного комбинационного рассеяния, причем порог ВКР в такой системе будет обратно пропорционален добротности резонатора. В таком случае может быть использована накачка и многочастотными лазерами. Неочевидным является то, что и при использовании относительно короткой ВКР-среды (<10 см) и резонатора, добротного лишь на длине волны излучения вынужденного комбинационного рассеяния, возможно достижение порога непрерывного ВКР до приемлемых мощностей (0.1-10 Вт) за счет увеличения добротности резонатора.

В принципе, снижение порога ВКР за счет повышения добротности в резонаторе известно. Это используется для снижения порога ВКР-лазеров с импульсной накачкой. Однако, насколько нам известно, наименьшая достигнутая в импульсном режиме пороговая мощность ВКР-генерации в высокодобротном резонаторе при использовании кристалла (нитрата бария) составила примерно 500 Вт (8 мкДж при длительности импульса 15 нс) [7], что гораздо больше мощности обычных непрерывных лазеров.

Поэтому неочевидно, что возможно дальнейшее существенное снижение порога в непрерывном режиме до приемлемого уровня мощностей за счет увеличения добротности резонатора. Тем не менее, проведенный нами анализ и эксперимент показывают, что это возможно, т.к. зависимости порога от добротности резонатора в импульсном и непрерывном режимах различны.

Предположим, что ВКР происходит в стационарном режиме (длительности всех процессов много больше как времени поперечной релаксации среды, так и времени обхода по резонатору), и будем пренебрегать истощением накачки.

Тогда для мощности первой стоксовой компоненты можно записать формулу, известную, например, из [5]:

$$\frac{dP_s}{dt} = G_s \cdot P_s \cdot P_p - L_s \cdot P_s, \quad (1)$$

где  $P_s$ ,  $P_p$  - мощности стоксовой компоненты и накачки внутри резонатора соответственно,

$t$  - время,

$G_s$  и  $L_s$  - усиление и потери на длине волны стоксовой компоненты в единицу времени.

$G_s$  и  $L_s$  выражаются как:

$$G_s = \frac{c}{L_c} \cdot \frac{L_{eff} \cdot g}{S_{eff}}, \quad (2)$$

где  $c$  - скорость света,

$L_c$  - оптическая длина резонатора,

$L_{eff}$  - длина взаимодействия,

$g$  - коэффициент усиления ВКР,

$S_{eff}$  - площадь поперечного сечения пучка накачки излучения.

$$L_s = \frac{c}{2 \cdot L_c} \cdot \ln(R_{in} \cdot R_{out} \cdot (1 - \gamma)^2) = \frac{1}{t_c}, \quad (3)$$

где  $c$  - скорость света,

$L_c$  - оптическая длина резонатора,

$R_{in}$ ,  $R_{out}$  - коэффициенты отражения входного и выходного зеркал,

$\gamma$  - потери на один проход,

$t_c$  - время жизни фотона в резонаторе.

Поскольку добротность резонатора  $Q$  можно выразить как [8]:

$$Q = \omega_0 \cdot t_c, \quad (4)$$

5 где  $\omega_0$  - циклическая частота световых колебаний,

$t_c$  - время жизни фотона в резонаторе,

то коэффициент  $L_S$  можно выразить через добротность:

$$L_S = \frac{\omega_0}{Q}, \quad (3a)$$

10 где  $\omega_0$  - циклическая частота световых колебаний,

$Q$  - добротность резонатора.

Уравнение (1) имеет следующее решение для мощности стоксовой компоненты:

$$15 P_S(t) = P_S(0) \cdot \exp\left(G_S \cdot \int_0^t P_p(t') \cdot dt' - L_S \cdot t\right), \quad (5)$$

где  $P_S(0)$  - мощность стоксовой компоненты в начальный момент времени (фактически мощность шумов, из которых развивается генерация),

$G_S$  и  $L_S$  - усиление и потери на длине волны стоксовой компоненты в единицу времени,

20  $P_S(t)$ ,  $P_p(t')$  - мощности стоксовой компоненты и накачки внутри резонатора, в моменты времени  $t$  и  $t'$  соответственно,

$t$  - время,

$t'$  - переменная интегрирования.

Будем считать [9], что порог ВКР достигается тогда, когда излучение стоксовой 25 компоненты усилится до какой-то мощности  $P_0$ . Тогда допустив, что импульс накачки является прямоугольным, можно записать выражение для пороговой интенсивности накачки:

$$P_{Pth} = \frac{L_S}{G_S} + \frac{1}{G_S \cdot t_i} \cdot \ln\left(\frac{P_0}{P_S(0)}\right), \quad (6)$$

30 где  $G_S$  и  $L_S$  - усиление и потери на длине волны стоксовой компоненты в единицу времени,

$P_{Pth}$  - пороговая мощность накачки внутри резонатора,

$t_i$  - длительность импульса накачки,

35  $P_S(0)$  - мощность стоксовой компоненты в начальный момент времени,

$P_0$  - мощность стоксовой компоненты в момент достижения порога ВКР.

Известно [9], что

$$40 \ln\left(\frac{P_0}{P_S(0)}\right) \approx 25, \quad (7)$$

где  $P_S(0)$  - мощность стоксовой компоненты в начальный момент времени,

$P_0$  - мощность стоксовой компоненты в момент достижения порога ВКР.

Для пороговой мощности накачки получаем:

$$45 P_{Pth} = \frac{L_S}{G_S} + \frac{25}{G_S \cdot t_i}, \quad (8)$$

где  $G_S$  и  $L_S$  - усиление и потери на длине волны стоксовой компоненты в единицу 45 времени,

$P_{Pth}$  - пороговая мощность накачки внутри резонатора,

$t_i$  - длительность импульса накачки.

Пороговая мощность накачки внутри резонатора равна

$$50 P_{Pth} = P_{ImpTh} \cdot (1 + R_{Pout}), \quad (9)$$

где  $P_{ImpTh}$  - пороговая мощность накачки на входе в резонатор,

$R_{Pout}$  - коэффициент отражения выходного зеркала на длине волны накачки.

Подставив значения для  $L_S$  и  $G_S$ , получаем для пороговой мощности:

$$P_{\text{InpTh}} = \frac{\omega_0}{Q} \cdot \frac{L_c}{c} \cdot \frac{S_{\text{eff}}}{L_{\text{eff}} \cdot g} \cdot \frac{1}{1 + R_{\text{POut}}} + \frac{25}{t_i} \cdot \frac{L_c}{c} \cdot \frac{S_{\text{eff}}}{L_{\text{eff}} \cdot g} \cdot \frac{1}{1 + R_{\text{POut}}}, \quad (10)$$

где  $P_{\text{InpTh}}$  - пороговая мощность накачки на входе в резонатор,

$t_i$  - длительность импульса накачки,

$\omega_0$  - циклическая частота световых колебаний,

$S_{\text{eff}}$  - площадь поперечного сечения накачки излучения,

$L_c$  - оптическая длина резонатора,

$L_{\text{eff}}$  - длина взаимодействия,

$g$  - коэффициент ВКР-усиления,

$c$  - скорость света,

$Q$  - добротность,

$R_{\text{POut}}$  - коэффициент отражения выходного зеркала на длине волны накачки.

Таким образом, зависимость пороговой мощности от добротности резонатора и длительности импульса накачки выражается зависимостью:

$$P_{\text{InpTh}} = \frac{A}{Q} + \frac{B}{t_i}, \quad (11)$$

$$\text{где } A = \frac{\omega_0 \cdot S_{\text{eff}}}{L_{\text{eff}} \cdot g} \cdot \frac{L_c}{c} \cdot \frac{1}{1 + R_{\text{POut}}}, \quad (11a)$$

$$B = \frac{25 \cdot S_{\text{eff}}}{L_{\text{eff}} \cdot g} \cdot \frac{L_c}{c} \cdot \frac{1}{1 + R_{\text{POut}}}, \quad (11b)$$

где  $\omega_0$  - циклическая частота световых колебаний,

$Q$  - добротность резонатора,

$t_i$  - длительность импульса накачки,

$S_{\text{eff}}$  - площадь поперечного сечения накачки излучения,

$L_c$  - оптическая длина резонатора,

$L_{\text{eff}}$  - длина взаимодействия,

$g$  - коэффициент ВКР-усиления,

$c$  - скорость света,

$R_{\text{POut}}$  - коэффициент отражения выходного зеркала на длине волны накачки.

При ВКР с импульсной накачкой повышение добротности  $Q$  приводит к снижению порога, но это снижение ограничено пределом  $B/t_i$ . Т.е. даже при бесконечно большой добротности порог будет равен этой величине.

Для значений коэффициента ВКР-усиления 47 см/ГВт, эффективной длины взаимодействия 7 см, площади сечения пучка накачки 0.018 мм<sup>2</sup>, длины резонатора 20 см, длительности импульса 15 нс, это предельное значение мощности составляет примерно 600 Вт при выходном зеркале, не отражающем излучение накачки, и 300 Вт при выходном зеркале, максимально отражающем излучение накачки.

При непрерывном режиме ВКР второе слагаемое в (11) обращается в ноль и зависимость мощности от добротности резонатора становится обратно пропорциональной. Особенно важно, что в этом случае пороговая мощность стремится к нулю при бесконечном увеличении добротности.

Так, если к указанному выше условию добавить, что коэффициенты отражения входного и выходного зеркал на длине волны излучения стоковой компоненты равны 99.8% (типичный коэффициент отражения для стандартных, относительно дешевых зеркал), а на длине волны накачки - 0%, потери на один проход - 0.4% (добротность примерно равна  $4 \cdot 10^8$ ), то пороговая мощность в непрерывном режиме становится равной 3 Вт, что вполне приемлемо для использования с непрерывными лазерами. Дальнейшее увеличение добротности приведет к еще меньшему значению пороговой мощности. Таким образом в непрерывном режиме увеличивая добротность, можно уменьшать пороговую мощность до приемлемого уровня. Принципиально важным является отсутствие ограничения, подобного существующему в импульсном режиме.

На фиг.1 приведена экспериментальная схема.

На фиг.2 показана зависимость выходной мощности излучения первой стоксовой компоненты от входной мощности излучения накачки.

На фиг.3 приведен спектр выходного излучения ВКР-лазера, генерирующего излучение первой и второй стоксовых компонент.

5 Заявляемое устройство (см. фиг.1) содержит источник излучения накачки, например лазер 1, фокусирующую систему 2 и ВКР-активную среду 3, помещенную между входным 4 и выходным 5 зеркалами резонатора. Лазер 1 накачки может представлять собой как источник непрерывного одночастотного излучения, так и источник непрерывного  
10 многочастотного излучения, например аргоновый лазер. Зеркало 4 имеет максимальное пропускание на длине волны излучения накачки и максимальное отражение на длине волны излучения первой стоксовой компоненты. В случае необходимости генерации других компонент рассеяния зеркало 4 обладает также максимальным отражением на соответствующих длинах волн. Для случая генерации излучения первой стоксовой  
15 компоненты зеркало 5 имеет оптимальное отражение на этой длине волны. При генерации других компонент оно имеет оптимальное отражение на длине волны генерируемой компоненты и максимальное отражение для компонент более низкого порядка. ВКР-активная среда является сплошной, оптически однородной и может представлять собой, например, кристалл нитрата бария,  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ ,  $\text{BaWO}_4$ ,  $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ ,  $\text{KYb}(\text{WO}_4)_2$ ,  $\text{VYO}_4$ . ВКР-активная среда может также представлять собой полупроводниковый кристалл, например,  
20 кристалл кремния. ВКР-активная среда может представлять собой также газ (например, водород) или жидкость (например, нитробензол), помещенный в соответствующую кювету. В силу описанных выше особенностей непрерывного ВКР-лазера тип среды не оказывает существенного влияния на работу устройства и результат.

Устройство работает следующим образом: излучение накачки с помощью фокусирующей  
25 системы 2 фокусируется в комбинационно-активную среду 3, проходя через зеркало 4. Это излучение начинает спонтанно рассеиваться в комбинационно-активной среде, создавая затравочное излучение для ВКР-генерации. Сама ВКР-генерация возникает в случае, если усиление на частоте генерируемой стоксовой компоненты, обеспечиваемое накачкой, будет превышать потери, включающие потери на просветленных внутрирезонаторных  
30 поверхностях, потери на нерезонансном поглощении в рассеивающей среде, "полезные" потери на зеркалах и т.д. Поэтому одним из путей создания условий с превышением усиления над потерями является уменьшение потерь, в том числе и полезных, т.е. выбор зеркал 4 и 5 с максимально высоким коэффициентом отражения на длине волны первой стоксовой компоненты. Если это условие выполнено, то начинается рост мощности  
35 стоксовой компоненты и развивается ВКР-генерация. Рост будет происходить до тех пор, пока по каким-нибудь причинам усиление не сравняется с потерями. Это выравнивание может происходить как за счет роста потерь, так и за счет падения усиления вследствие истощения накачки.

Рост потерь может обеспечиваться, например, появлением второй стоксовой  
40 компоненты. Если мощность излучения первой стоксовой компоненты достигнет определенного предела, при котором выполняются пороговые условия генерации второй стоксовой компоненты, то начнется развитие второй стоксовой компоненты и рост первой при этом прекратится. Этого ограничения можно избежать, создав условия, неблагоприятные для генерации второй стоксовой компоненты.

45 В то же время генерация второй, а также высших стоксовых и антистоксовых компонент может быть использована как полезный эффект, позволяющий генерировать излучение в новых диапазонах со смещением частоты излучения накачки на величину нескольких комбинационных сдвигов как в сторону длинноволновой области (стоксово смещение), так и в сторону коротковолновой области спектра (антистоксово смещение). Для этого  
50 необходимо создание достаточной добротности резонатора не только на длине волны излучения первой стоксовой компоненты, но также и на длинах волн генерации нужных компонент рассеяния. Причем для генерации, например, третьей стоксовой компоненты необходимо обеспечить генерацию компонент более низкого порядка, т.е. второй и первой

стоксовых компонент.

Поскольку в процессе комбинационного рассеяния часть энергии фотонов накачки передается рассеивающей среде, это приводит к ее нагреванию. Если в импульсном режиме этот эффект может и не приводить к существенным последствиям, то в

5 непрерывном режиме количество теплоты, накапливаемой в среде, может стать настолько существенным, что приведет, в частности, к образованию сильной термической линзы в резонаторе ВКР-лазера. Для минимизации влияния тепловых эффектов может быть использован специальный теплоотвод (на чертежах не показан), в который помещается комбинационно-активная среда. Особенно эффективным такой подход может быть в

10 случае использования твердотельных комбинационно-активных сред, обладающих повышенной теплопроводностью по сравнению с газами.

Заявляемое устройство иллюстрируют следующие конкретные неограничивающие примеры.

15 Пример 1. ВКР-лазер, генерирующий излучение только на частоте первой стоксовой компоненты (длина волны 543 нм)

В качестве сплошной, оптически однородной комбинационно-активной среды использован кристалл нитрата бария длиной 68 мм. Торцы кристалла были просветлены и имели минимальное отражение в диапазоне 490-580 нм. Кристалл помещен в резонатор, близкий к концентрическому. В качестве источника возбуждения использован аргоновый

20 лазер фирмы Spectra-Physics модель 2085, обеспечивавший в многочастотном режиме до 15 Вт выходного излучения с шириной спектра около  $0.2 \text{ см}^{-1}$  на длине волны 514.5 нм. Возбуждающее излучение фокусировали в комбинационно-активный кристалл линзой с фокусным расстоянием 15 см. Использовали входное зеркало с радиусом кривизны 7.5 см, пропусканием на длине волны 514 нм 79%, отражением на длине волны 543 нм 99.84% и

25 99.98% на длине волны 577 нм, выходное зеркало с радиусом кривизны 8 см, и отражением 99.93% на длине волны 514 нм, 99.64% на длине волны 543 нм и 28% на длине волны 577 нм. Длина резонатора составляла 17.6 см. Зависимость мощности выходного излучения первой стоксовой компоненты (543 нм) от мощности накачки приведена на фиг.2. Порог генерации составил 2 Вт при расчетном значении 1.7 Вт, в предположении, что

30 эффективная длина  $L_{\text{eff}}=5.07 \text{ см}$ , показатель преломления кристалла нитрата бария  $n=1.58$ , эффективное значение площади поперечного сечения пучка накачки  $S_{\text{eff}}=0.018 \text{ мм}^2$ ,  $M^2$  - фактор пучка накачки  $=1.7$ .

Пример 2. Во втором случае был реализован ВКР-лазер, генерирующий излучение на

35 длинах волн первой и второй стоксовых компонент (543 нм и 577 нм).

В качестве сплошной, оптически однородной комбинационно-активной среды использован кристалл нитрата бария длиной 68 мм. Торцы кристалла были просветлены и имели минимальное отражение в диапазоне 490-580 нм. Кристалл помещен в резонатор, близкий к концентрическому. В качестве источника возбуждения использован аргоновый

40 лазер фирмы Spectra-Physics модель 2085, обеспечивавший в многочастотном режиме до 15 Вт выходного излучения с шириной спектра около  $0.2 \text{ см}^{-1}$  на длине волны 514.5 нм. Возбуждающее излучение фокусировали в комбинационно-активный кристалл линзой с фокусным расстоянием 15 см. В качестве выходного зеркала использовали зеркало с радиусом кривизны 7.5 см и отражающее 38% на длине волны 514 нм, 99.87% на длине

45 волны 543 нм и 99.97% на длине волны 577 нм. Длина резонатора составляла 17.2 см. При мощности возбуждения 6.45 Вт получено 24 мВт на длине волны первой стоксовой компоненты и около 150 мкВт на длине волны второй стоксовой компоненты. Спектр выходного излучения в этом случае представлен на фиг.3.

Таким образом, настоящее изобретение позволяет реализовать компактный непрерывный нерезонансный ВКР-лазер. В этой конструкции может быть использован

50 сплошной, оптически однородный комбинационно-активный элемент в виде кристалла, кюветы с жидкостью или газом. Особенно привлекательна возможность использования для возбуждения непрерывных лазеров, работающих как в одночастотном, так и в многочастотном режимах, с выходной мощностью до 10 Вт.

Следует отметить, что эффект ВКР позволяет получать лазерное излучение в средах без инверсии, что может быть использовано для создания лазерных источников, в том числе и непрерывных, на относительно дешевых средах с хорошо изученными свойствами, для которых развиты технологии производства.

5 Источники информации:

1. R.Max, U.Huber, I.Abdul-Halim, J.Heppner, Y.Ni, G.Willenberg, and C.O.Weiss, IEEE J. Quantum Electron. QE-17, 1123 (1981).

2. M.Poelker and P.Kumar, Opt. Lett. 17, 399 (1992).

3. G.Grynberg, E.Giacobino, and F.Biraben, Opt. Commun. 36, 403 (1981).

10 4. S.N.Jabr, Opt. Lett. 12, 690 (1987).

5. Патент США №6,151,337, Н 01 S 3/30, публ. 21.11.2000.

6. Патент Канады №1,115,395, Н 03 S 3/07, 3/08, публ. 29.12.1981 (прототип).

7. Годовой отчет №2 по проекту МНТЦ В-266-99 "Полностью твердотельные компактные узкополосные миллиджоулевого уровня энергии источники лазерного излучения для

15 диапазона 187-1700 нм".

8. W.Koechner, Solid-State Laser Engineering, Second Edition, Springer-Verlag. 1988 599.

9. А.З.Грасюк. Труды ФИАН СССР, т.76, 1974, 75-116.

#### Формула изобретения

20 1. Непрерывный лазер на вынужденном комбинационном рассеянии, содержащий источник непрерывного излучения накачки и резонатор, образованный входным и выходным зеркалами с размещенной в нем комбинационно-активной средой, причем резонатор выполнен с добротностью на длине волны излучения вынужденного комбинационного рассеяния, достаточной для возбуждения последнего в комбинационно-

25 активной среде, отличающийся тем, что входное зеркало резонатора выполнено, по существу, прозрачным в диапазоне длин волн излучения накачки, при этом значение пороговой мощности возбуждения вынужденного комбинационного излучения обратно пропорционально первой степени добротности резонатора на длине волны излучения вынужденного комбинационного рассеяния.

30 2. Лазер по п.1, отличающийся тем, что входное зеркало резонатора выполнено максимально отражающим на длине волны излучения первой стоксовой компоненты.

3. Лазер по п.1, отличающийся тем, что выходное зеркало резонатора выполнено оптимально отражающим на длине волны излучения первой стоксовой компоненты.

35 4. Лазер по пп.1-3, отличающийся тем, что резонатор выполнен с добротностью на длине волны излучения второй стоксовой компоненты достаточно низкой, чтобы избежать генерации второй стоксовой компоненты.

5. Лазер по п.1, отличающийся тем, что резонатор выполнен с добротностью на длине волны излучения второй стоксовой компоненты, достаточной для достижения порога генерации второй стоксовой компоненты.

40 6. Лазер по п.5, отличающийся тем, что входное зеркало выполнено максимально отражающим на длинах волн излучения первой и второй стоксовой компоненты, а выходное выполнено максимально отражающим на длине волны излучения первой стоксовой компоненты и оптимально отражающим на длине волны излучения второй стоксовой компоненты.

45 7. Лазер по п.1, отличающийся тем, что зеркала резонатора выполнены сферическими.

8. Лазер по п.1, отличающийся тем, что выходное зеркало выполнено отражающим излучение накачки.

9. Лазер по п.1, отличающийся тем, что источник непрерывного излучения накачки выполнен в виде источника одночастотного излучения.

50 10. Лазер по п.1, отличающийся тем, что источник непрерывного излучения накачки выполнен в виде источника многочастотного излучения.

11. Лазер по п.9 или 10, отличающийся тем, что мощность источника излучения накачки выбирают от 1 до 5 Вт.

12. Лазер по п.9 или 10, отличающийся тем, что источником излучения накачки является аргоновый лазер.

13. Лазер по п.1, отличающийся тем, что комбинационно-активная среда выполнена твердотельной.

5 14. Лазер по п.13, отличающийся тем, что комбинационно-активная среда выбрана из группы кристаллических сред, включающей  $(\text{BaNO}_3)_2$ ,  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ ,  $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ ,  $\text{KYb}(\text{WO}_4)_2$ ,  $\text{BaWO}_4$ ,  $\text{YVO}_4$ .

15. Лазер по п.1, отличающийся тем, что комбинационно-активная среда выполнена в виде кюветы с жидкостью.

10 16. Лазер по п.1, отличающийся тем, что комбинационно-активная среда выполнена в виде кюветы с газом.

17. Лазер по п.1, отличающийся тем, что комбинационно-активная среда помещена в корпус, обеспечивающий теплоотвод.

15 18. Лазер по п.17, отличающийся тем, что указанный корпус выполнен так, чтобы теплоотвод осуществлялся центрально-симметрично.

19. Лазер по п.1, отличающийся тем, что на все элементы, расположенные внутри резонатора, нанесены антиотражающие покрытия.

20

25

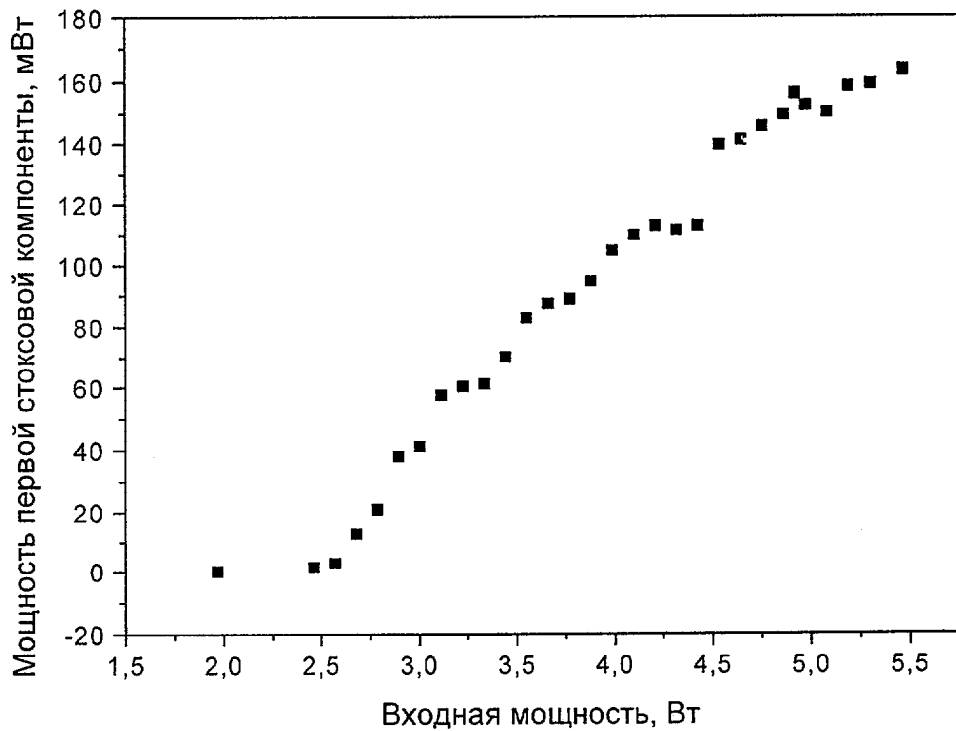
30

35

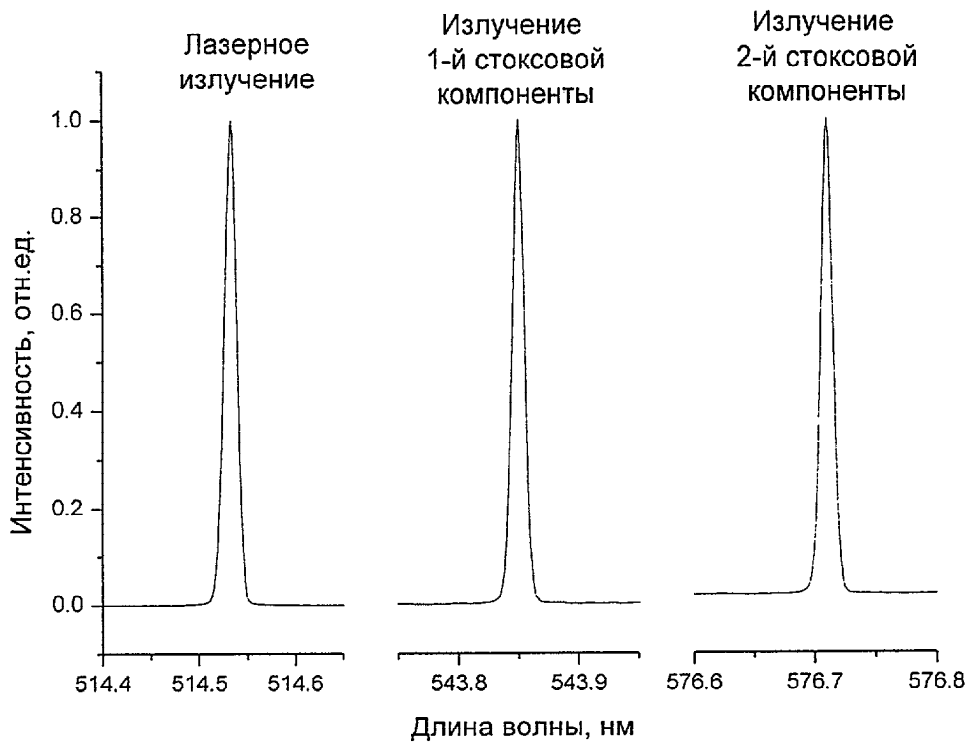
40

45

50



Фиг.2



Фиг.3