

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2469450

СПОСОБ ГЕНЕРАЦИИ УЛЬТРАКОРОТКИХ СВЕТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

Патентообладатель(ли): *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики" (НИУ ИТМО) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2011109511

Приоритет изобретения 14 марта 2011 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 10 декабря 2012 г.

Срок действия патента истекает 14 марта 2031 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов





**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2011109511/28, 14.03.2011

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
14.03.2011

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 14.03.2011

(45) Опубликовано: 10.12.2012 Бюл. № 34

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: V.V.KOZLOV «SELF-INDUCED TRANSPARENCY SOLITON LASER VIA COHERENT MODE LOCKING») PHYS. REV. A, vol.56; 1997, с.1607-1612. US 2010177798 A1, 15.07.2010. US 2010303106 A1, 02.12.2010. US 7301972 B2, 27.11.2007. RU 2320979 C2, 27.03.2008.

Адрес для переписки:

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, НИУ ИТМО, ОИСиНТИ

(72) Автор(ы):

Козлов Виктор Викторович (RU),
Розанов Николай Николаевич (RU),
Вабниц Стефано (IT)

(73) Патентообладатель(и):

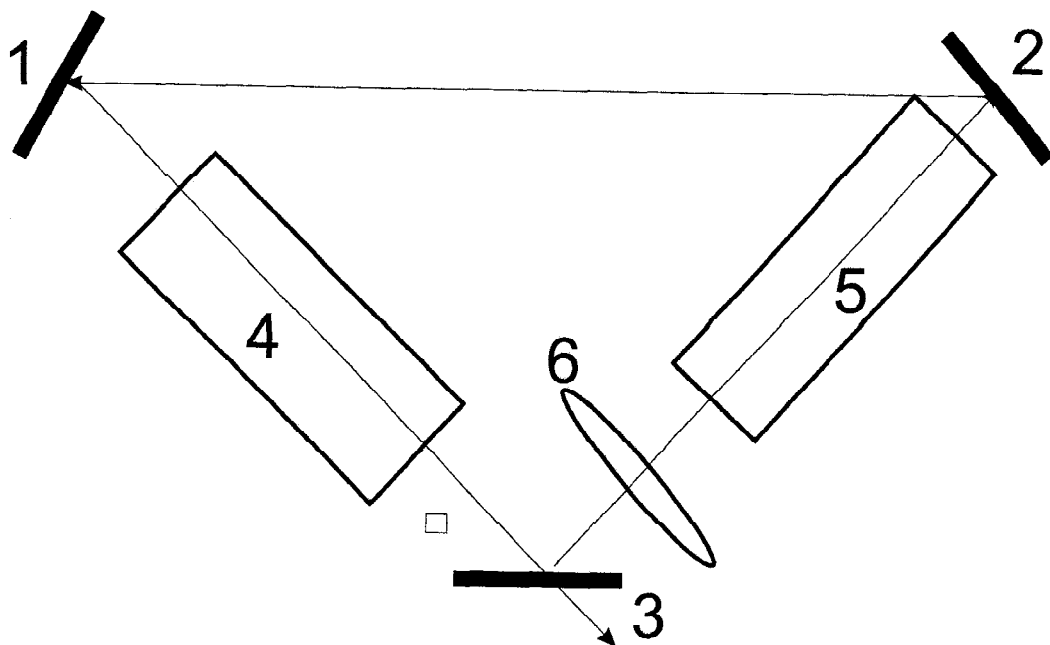
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики" (НИУ ИТМО) (RU)

(54) СПОСОБ ГЕНЕРАЦИИ УЛЬТРАКОРОТКИХ СВЕТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

(57) Реферат:

Способ генерации ультракоротких световых импульсов при пассивной синхронизации мод внутрирезонаторной поглощающей средой относится к физике лазеров и может быть использован для создания лазерных источников стабильных импульсов света фемто-аттосекундного диапазона длительности. Способ заключается в формировании световых импульсов со спектром шире спектра линии усиления, при этом полные линейные внутрирезонаторные потери поля и потери на зеркалах выбирают превышающими линейное усиление усиливающей среды, поглощающую и усиливающую среды выбирают, используя один или различные материалы, и величина дипольного момента рабочего перехода усиливающей и поглощающей сред превышает один Дебай, при этом лазер генерирует импульсы длительностью порядка одного периода волны лазерного перехода,

коэффициент усиления усиливающей среды выбирают достаточным для обеспечения пикового значения Раби частоты импульса в окрестности частоты лазерного перехода (10^{14} - 10^{15} Гц), а соотношение поперечных сечений пучков в усиливающей и поглощающей средах выбирают в широком диапазоне значений ($\pm 30\%$) вблизи значения, равного отношению дипольного момента усиливающей среды к удвоенному дипольному моменту поглощающей среды. Технический результат заключается в обеспечении возможности генерации импульсов длительностью в один оптический период путем выбора усиливающей среды с большим значением коэффициента усиления и оптического резонатора с малыми потерями на зеркалах и путем использования фокусирующей системы, позволяющей управлять шириной пучка в поглощающей среде. 1 ил.





FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.

H01S 3/098 (2006.01)*H01S 3/094* (2006.01)**(12) ABSTRACT OF INVENTION**(21)(22) Application: **2011109511/28, 14.03.2011**(24) Effective date for property rights:
14.03.2011

Priority:

(22) Date of filing: **14.03.2011**(45) Date of publication: **10.12.2012 Bull. 34**

Mail address:

**197101, Sankt-Peterburg, Kronverkskij pr., 49,
NIU ITMO, OISiNTI**

(72) Inventor(s):

**Kozlov Viktor Viktorovich (RU),
Rozanov Nikolaj Nikolaevich (RU),
Vabnits Stefano (IT)**

(73) Proprietor(s):

**federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe
obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego
professional'nogo obrazovaniya "Sankt-
Peterburgskij natsional'nyj issledovatel'skij
universitet informatsionnykh tekhnologij,
mekhaniki i optiki" (NIU ITMO) (RU)****(54) METHOD OF GENERATING ULTRA-SHORT LIGHT PULSES**

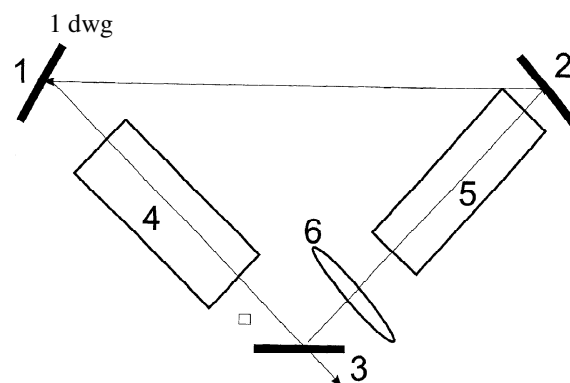
(57) Abstract:

FIELD: physics.

SUBSTANCE: method of generating ultra-short light pulses during passive mode locking by intracavity absorbing medium relates to laser physics and can be used to make laser sources of stable light pulses with femto-attosecond duration. The method involves generating light pulses with a spectrum wider than the gain line spectrum, wherein total linear intracavity field loss and mirror loss exceed linear gain of the gain medium; the absorbing and gain medium are selected using one or different materials and the value of the dipole moment of the amplifying transition of the gain and absorbing media is greater than 1 D. The laser generates pulses with duration of the order of one period of the laser transition wave. The gain of the gain medium is sufficient to provide a peak Rabi pulse frequency value in the vicinity of the laser transition (10^{14} - 10^{15} Hz), and the ratio of beam cross-sections in the gain and absorbing media is selected in a wide

range of values ($\pm 30\%$) near a value equal to the ratio of the dipole moment of the gain medium to twice the dipole moment of the absorbing medium.

EFFECT: possibility of generating pulses with duration of one optical period by selecting a gain medium with a large gain value and optical resonance with low mirror loss and using a focusing system which enables to control beam width in the absorbing medium.



Изобретение относится к физике лазеров, в частности к оптическим генераторам ультракоротких световых импульсов, и может быть использовано для создания лазерных источников стабильных импульсов света фемто-аттосекундного диапазона длительности.

Известные способы генерации последовательности оптических импульсов, основанные на помещении внутрь резонатора лазера поглощающей среды (насыщающегося поглотителя), характеризуются слабонелинейным и некогерентным откликом усиливающей среды, а именно Раби-частота генерируемого импульса (Ω_R) и ширина спектра генерируемого импульса ($\Delta\omega_p$), обе не превышают ширину спектра усиливающей среды ($\Delta\omega_g$): $\Omega_R, \Delta\omega_p < \Delta\omega_g$. Такие способы не реализуют возможности генерации импульсов длительностью порядка единиц фемтосекунд, поскольку минимально возможная длительность τ_p при этом не может быть ниже величины, равной обратной ширине линии усиления: $\tau_p > \Delta\omega_g^{-1}$. Как правило, твердотельные и полупроводниковые среды имеют ширину линии усиления порядка единиц процента частоты лазерного перехода ω_0 . Титан-сапфировый лазер характеризуется максимально широкой линией усиления, $\Delta\omega_g \sim 0.5\omega_0$. Таким образом, генерация импульсов длительностью в один оптический период невозможна в стандартных схемах синхронизации мод.

Аналогами к заявляемому способу являются способы генерации ультракоротких импульсов с использованием методов пассивной синхронизации мод с поглощающей средой (насыщающимся поглотителем) и методы самосинхронизации мод с помощью наведенной керровской линзы в полупроводниковых лазерах, описанные в патентах: [1] (Т. Shimizu, Н. Yokoyama, М. Yamaguchi, Mode-locked semiconductor laser and method of driving the same, US Patent 6,031,851, Feb. 29, 2000 г.), [2] (S.T.Sanders, Multi-wavelength mode-locked laser, US Patent 7,613,214 B2, Nov. 3, 2009 г.), [3] (W.Yang, L.Zhang, Self-mode-locked semiconductor laser, US Patent 2007/0098031 A1, May 3, 2007 г.), [4] (J.L.Chilla, B.Resan, R.R.Austin, Mode-locked external-cavity surface-emitting semiconductor laser, US Patent 2009/0290606 A1, Nov. 26, 2009 г.). Эти полупроводниковые лазеры способны генерировать импульсы пикосекундной длительности, тогда как в заявленном способе получаемые длительности импульсов на три порядка величины короче.

Другим аналогом заявляемого способа является способ генерации сверхкоротких оптических импульсов с использованием рамановского резонатора [5] (патент РФ №2237957, МПК H01S 3/30, дата приоритета 01.02.2000 г., дата публикации 10.10.2004 г.). Для реализации этого способа необходимо использование одного или двух лазеров, возбуждающих рамановские вращательные линии в водороде, которые затем синхронизируются по фазе, образуя сверхкороткий импульс. В предлагаемом способе в применении лазера нет необходимости, кроме как для генерации затравки, после чего лазер, предлагаемый нами, будет работать в автономном режиме. Предполагается также возможным, что затравку можно получить иным способом, модулируя параметры схемы, и таким образом обойтись вообще без использования лазеров.

Наиболее близким по физической сущности и достигаемому техническому эффекту является выбранный в качестве прототипа способ генерации ультракоротких импульсов при синхронизации мод с внутриврезонаторной поглощающей средой [6] (Kozlov V.V. Self-induced transparency soliton laser via coherent mode locking.// Phys. Rev. A - 1997. - Vol.56, P.1607-1612). Этот способ позволяет генерировать импульсы, спектр которых удовлетворяет соотношению $\Delta\omega_p > \Delta\omega_a, \Delta\omega_g$, и, в частности, таких, что $\Delta\omega_p \sim \omega_0$, то есть длительностью в один оптический период. Способ позволяет использовать один и тот же материал для поглощающей и усиливающей сред, что

является важным практическим преимуществом, но обладает тем недостатком, что ширина поперечного сечения пучка в поглощающей среде должна быть в точности равна половине ширины сечения пучка в усиливающей среде, что затрудняет практическую реализацию способа. Возможно также использование различных материалов для усиливающей и поглощающей сред, при этом также отсутствие управления шириной сечения пучка является недостатком.

Последовательность операций для реализации способа в прототипе состоит в помещении внутрь кольцевого резонатора однонаправленной волны двух сред, одна из которых служит усиливающей средой, а другая поглощающей средой (поглотителем). Предполагается, что эти среды помещены в разные плечи резонатора, сконструированного таким образом, что ширина поперечного сечения пучка в поглощающей среде оказывается в точности равна половине ширины сечения пучка в усиливающей среде (в той лазерной конфигурации, где в качестве усиливающей и поглощающей сред используется один и тот же материал). Одним из способов инициации генерации в этой лазерной системе является подача мощного импульса от стороннего лазера. Возможны и другие способы инициации.

Недостатки прототипа заключаются в следующем: неспособность генерировать импульсы с шириной спектра, равной частоте центрального оптического перехода усиливающей среды, отсутствие способа контролировать ширину пучка в поглощающей среде.

Решается задача генерации импульсов длительностью в один оптический период путем выбора усиливающей среды с большим значением коэффициента усиления и оптического резонатора с малыми потерями на зеркалах и путем использования фокусирующей системы, позволяющей управление шириной пучка в поглощающей среде.

Сущность изобретения заключается в том, что предлагается способ генерации ультракоротких импульсов при пассивной синхронизации мод лазера, осуществляемый с помощью внутрирезонаторной насыщающейся поглощающей среды (поглотителя), при котором формируются световые импульсы со спектром шире спектра линии усиления вплоть до значений, равных центральной частоте перехода усиливающей среды, для этого полные линейные внутрирезонаторные потери поля и потери на зеркалах выбирают превышающими линейное усиление усиливающей среды, поглощающую и усиливающую среды выбирают с использованием как различных материалов, так и одного и того же материала, используют усиливающую и поглощающую среды с величиной дипольного момента рабочего перехода, превышающей один Дебай, коэффициент усиления усиливающей среды выбирают достаточным для обеспечения пикового значения Раби-частоты импульса в окрестности частоты лазерного перехода (10^{14} - 10^{15} Гц), а соотношение поперечных сечений пучков в усиливающей и поглощающей средах выбирают в широком диапазоне значений ($\pm 30\%$) вблизи значения, равного двум (в той лазерной конфигурации, где в качестве усиливающей и поглощающей сред используется один и тот же материал).

Предлагаемый способ генерации импульсов состоит в реализации режима синхронизации мод, в котором и Раби-частота генерируемого импульса, и ширина спектра генерируемого импульса превышают ширину спектра усиливающей среды: $\Omega_R, \Delta\omega_p < \Delta\omega_g$. Как одно из необходимых условий достижение этого режима требует повышения уровня накачки усиливающей среды, так что интенсивность

внутрирезонаторного поля (I) удовлетворяет неравенству: $I > \frac{1}{2} c \varepsilon_0 n \hbar^2 d^{-2} \Delta \omega_g^2$, где c -

скорость света в вакууме, ε_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума, n - показатель преломления усиливающей среды, $\hbar$ - постоянная Планка, d - дипольный момент лазерного перехода усиливающей среды. В частности, генерация импульсов длительностью в один оптический период подразумевает интенсивность

$I \approx \frac{1}{2} c \varepsilon_0 n \hbar^2 d^{-2} \Delta \omega_g^2$. Поскольку твердотельные среды характеризуются малыми

дипольными моментами, этот диапазон интенсивностей превосходит значения, при которых происходит разрушение материала, поэтому предлагаемый способ генерации предельно коротких импульсов длительностью в один оптический период не может быть реализован в существующих твердотельных лазерах. Предлагаемый способ может быть реализован в газовых и полупроводниковых лазерах с дипольными моментами порядка одного Дебая и выше. Особенно перспективны квантовые точки с гигантскими дипольными моментами в десятки и сотни Дебай. В предлагаемом режиме синхронизации мод длительности генерируемых импульсов обратно пропорциональны пиковой Раби-частоте внутрирезонаторного поля, а именно

$\tau_p \approx \Omega_R^{-1}$. В свою очередь, для получения длительностей в один оптический период необходима накачка, при которой $\Omega_R \approx \omega_0$.

С целью достижения режима генерации, при котором импульсный режим предпочтительнее непрерывного режима, следует поместить внутрь резонатора насыщающуюся поглощающую среду. Концентрация центров поглощающей среды должна быть такой, чтобы полные линейные внутрирезонаторные потери поля и потери на зеркалах превышали линейное усиление усиливающей среды. В существующих способах генерации ультракоротких импульсов выбираются поглощающие среды, такие, что ширина спектра поглощения поглотителя $\Delta \omega_a$ превышает ширину спектра генерируемого импульса $\Delta \omega_p \approx \tau_p^{-1}$, $\Delta \omega_a > \Delta \omega_p$. Эти способы имеют тот недостаток, что для генерации импульсов длительностью в один оптический период требуется выбирать поглощающие среды с шириной спектра поглощения, превышающей частоту лазерного перехода: $\Delta \omega_a > \Delta \omega_0$. Таких поглотителей в настоящее время не существует.

В предлагаемом способе генерации ультракоротких импульсов не требуется выбирать поглощающие среды, для которых верно неравенство $\Delta \omega_a > \Delta \omega_p$. Наоборот, выбираются поглощающие среды с обратным соотношением ширин: $\Delta \omega_a < \Delta \omega_p$.

Способ генерации импульсов в лазере с такими внутрирезонаторными поглотителями был предложен в [7] (Комаров К.П., Угожаев В.Д. Стационарные 2π -импульсы при пассивной синхронизации лазерных мод. // Квант, электрон. - 1984. - Т.11, №6. - С.1167-1173). Однако соотношение между ширинами спектра усиливающей среды и спектра импульса было таковым: $\Delta \omega_g > \Delta \omega_p$, так что генерация импульсов длительностью в один оптический период в этой схеме недостижима.

Способ генерации ультракоротких импульсов при выполнении соотношения $\Delta \omega_g < \Delta \omega_p$ между ширинами спектра усиливающей среды и спектра импульса без использования внутрирезонаторного поглотителя и с использованием схемы активной синхронизации мод, предложенный в [8] (Harvey J.D., Leonhardt R., Drummond P.D., Carter S.J. Superfluorescent generation of mode-locked (pulses // Phys. Rev. A - 1989. - Vol.40, №8. - P.4789-4792), обладает тем недостатком, что внутрирезонаторный модулятор потерь управляется электрическими импульсами, скорость переключения которых не

превышает 1 ГГц. При этом спектральная ширина генерируемых импульсов не превышает нескольких десятых процента от лазерной частоты перехода, то есть генерация импульсов длительностью в один оптический период недостижима.

Указанный недостаток устраняется в предлагаемом способе, в котором возможны вариации соотношений ширин поперечных сечений пучков в пределах 30% вблизи половинного значения в той лазерной конфигурации, где в качестве усиливающей и поглощающей сред используется один и тот же материал.. При соотношении ширин, равном 0.7, при прочих равных условиях удается достичь порога генерации лазера при половинных значениях накачки, что важно для практических приложений.

Осуществление управления соотношением поперечных пучков требует помещения внутрь резонатора фокусирующего устройства. Именно использование в лазере устройства управления поперечным сечением пучка отличает данный способ от прототипа [6] (Kozlov V.V. Self-induced transparency soliton laser via coherent mode locking. // Phys. Rev. A - 1997. - Vol.56, P.1607-1612). Другим отличием является использование больших мощностей накачки, что позволяет получать более короткие по длительности импульсы. Сущность предлагаемого изобретения заключается в том, что интенсивный импульс лазерного излучения уширяет линию лазерного перехода посредством эффекта полевого уширения. Чем интенсивнее импульс, тем шире линия и тем меньшую длительность имеет этот импульс. Условием оптимальной реализации режима является возможность управления поперечным сечением пучка в поглощающей или усиливающей среде внутрирезонаторной фокусирующим устройством. Это позволяет понизить порог генерации по мощности накачки до половинного значения по сравнению со схемой, предложенной в [6] (Kozlov V.V. Self-induced transparency soliton laser via coherent mode locking. // Phys. Rev. A - 1997. - Vol.56, P.1607-1612). Техническая задача, которую решает предлагаемое изобретение, достигается тем, что по способу генерации ультракоротких лазерных импульсов при пассивной синхронизации мод, осуществляемой с помощью внутрирезонаторной поглощающей среды, согласно заявляемому изобретению управление реализуют путем обеспечения высокого коэффициента усиления в высокодобротном резонаторе полупроводникового лазера с внутрирезонаторной линзой или призмами.

Заявляемый способ иллюстрируется чертежом, на котором представлена схема устройства, реализующего способ генерации ультракоротких световых импульсов. Устройство содержит: кольцевой резонатор, состоящий из трех зеркал 1, 2, 3, усиливающую среду 4, поглощающую среду 5, линзу, или систему линз, или призму 6 (здесь и далее фокусирующая система).

Устройство работает следующим образом. Импульс, циркулирующий в кольцевом резонаторе, испытывает усиление в усиливающей среде 4. Затем он испытывает выходные потери на частично-прозрачном зеркале 3, после чего проходит через фокусирующую систему 6, которая обеспечивает подходящий радиус пучка в поглощающей среде 5 и проходит через поглощающую среду 5, формообразующую проходящий импульс и одновременно вносящую потери, затем цикл замыкается. Стационарный режим реализуется, когда полные потери импульса в точности компенсируются усилением в усиливающей среде 4.

Таким образом, предлагаемый способ позволяет обеспечить генерацию световых импульсов со спектром шире спектра линии усиления и при обеспечении достаточной внутрирезонаторной мощности с ультракороткими длительностями вплоть до одного-двух периодов световой волны на частоте лазерного перехода.

Источники информации:

[1] T.Shimizu, H. Yokoyama, M.Yamaguchi, Mode-locked semiconductor laser and method of driving the same, US Patent 6,031,851, Feb. 29, 2000 г.

[2] S. T. Sanders, Multi-wavelength mode-locked laser, US Patent 7,613,214 B2, Nov.3, 2009 г.

[3] W.Yang, L. Zhang, Self-mode-locked semiconductor laser, US Patent 2007/0098031 A1, May 3, 2007 г.

[4] J.L.Chilla, B.Resan, R.R.Austin, Mode-locked external-cavity surface-emitting semiconductor laser, US Patent 2009/0290606 A1, Nov. 26, 2009 г.

[5] Патент РФ №2237957, МПК H01S 3/30, дата приоритета 01.02.2000 г., дата публикации 10.10.2004 г.

[6] Kozlov V.V. Self-induced transparency soliton laser via coherent mode locking. // Phys. Rev. A - 1997. - Vol.56, P.1607-1612.

[7] Комаров К.П., Угожаев В.Д. Стационарные 2π -импульсы при пассивной синхронизации лазерных мод. // Квант, электрон. - 1984. - Т.11, №6. - С.1167-1173.

[8] Harvey J.D., Leonhardt R., Drummond P.D., Carter S.J. Superfluorescent generation of mode-locked (pulses // Phys. Rev. A -1989. - Vol.40, №8. - P. 4789-4792.

Формула изобретения

Способ генерации ультракоротких световых импульсов при пассивной синхронизации мод внутрирезонаторной поглощающей средой, заключающийся в формировании световых импульсов со спектром шире спектра линии усиления, при этом полные линейные внутрирезонаторные потери поля и потери на зеркалах выбирают превышающими линейное усиление усиливающей среды, поглощающую и усиливающую среды выбирают, используя один или различные материалы, и величина дипольного момента рабочего перехода усиливающей и поглощающей сред превышает один Дебай, отличающийся тем, что лазер генерирует импульсы длительностью порядка одного периода волны лазерного перехода, коэффициент усиления усиливающей среды выбирают достаточным для обеспечения пикового значения Раби частоты импульса в окрестности частоты лазерного перехода (10^{14} - 10^{15} Гц), а соотношение поперечных сечений пучков в усиливающей и поглощающей средах выбирают в широком диапазоне значений ($\pm 30\%$) вблизи значения, равного отношению дипольного момента усиливающей среды к удвоенному дипольному моменту поглощающей среды.