РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 686 871** (13) **C2**

(51) МПК
H01S 3/10 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
H01S 3/10007 (2019.02)

(21) (22) Заявка: **2015135377, 24.02.2011**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
24.02.2011

Дата регистрации:
06.05.2019

Приоритет(ы):
(30) Конвенционный приоритет:
24.02.2010 US 12/712,067
Номер и дата приоритета первоначальной заявки, из которой данная заявка выделена:
2012140428 24.02.2010

(43) Дата публикации заявки: **25.12.2018** Бюл. № **36**

(45) Опубликовано: **06.05.2019** Бюл. № **13**

Адрес для переписки:
129090, Москва, ул. Б. Спасская, 25, стр. 3, ООО "Юридическая фирма Городисский и Партнеры"

(72) Автор(ы):
КАРАВИТИС Майкл (US)

(73) Патентообладатель(и):
АЛЬКОН ЛЕНСКС, ИНК. (US)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **WO 2005088783 A1, 22.09.2005. US 20020097761 A1, 25.07.2002. US 20050047702 A1, 03.03.2005. RU 2328064 C2, 27.06.2008.**

(54) ФЕМТОСЕКУНДНЫЙ ЛАЗЕР ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ С ЧАСТОТОЙ ПОВТОРЕНИЯ, РЕГУЛИРУЕМОЙ СОГЛАСНО СКОРОСТИ СКАНИРОВАНИЯ

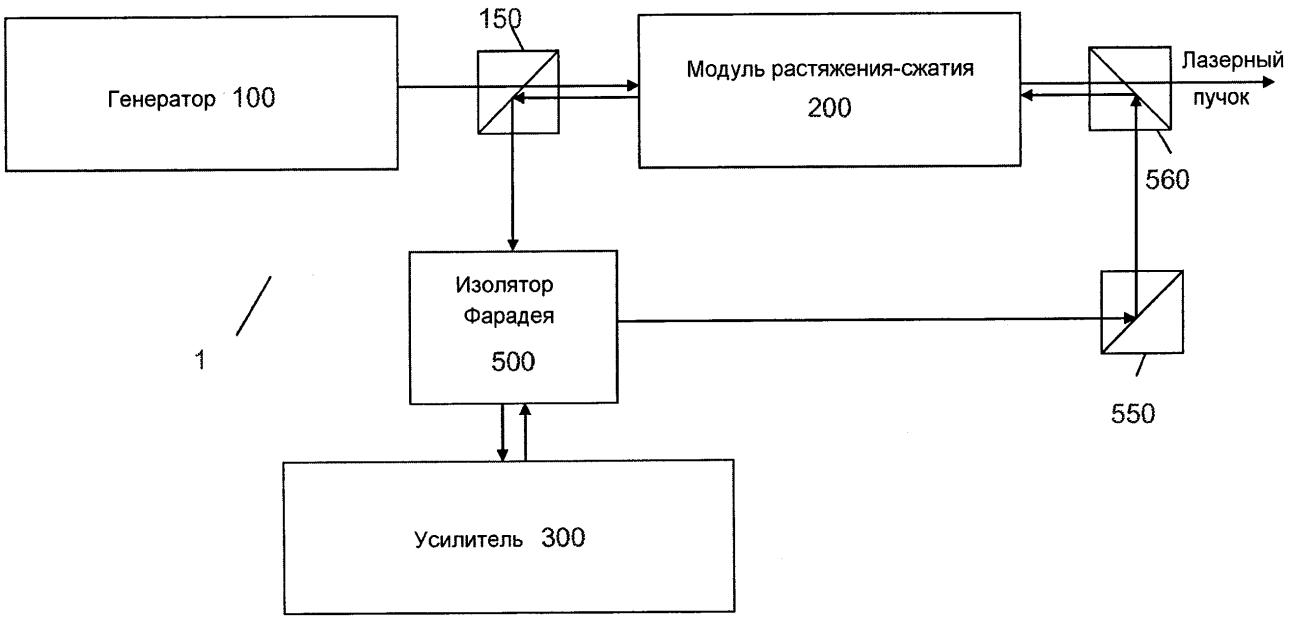
(57) Реферат:

Изобретение относится к области лазерной техники. Способ сканирования с помощью лазерной системы содержит этапы, на которых: генерируют фемтосекундные затравочные импульсы с помощью генератора, увеличивают длительность затравочных импульсов с помощью модуля растяжения, усиливают растянутые затравочные импульсы с образованием лазерных импульсов с помощью усилителя, компенсируют дисперсию групповой задержки лазерных импульсов в диапазоне 5,000-20,000 фс² с помощью компенсатора дисперсии между торцевыми зеркалами усилителя. Выводят лазерные импульсы из усилителя с помощью оптического переключателя при первой частоте повторения, уменьшают длительность лазерных импульсов в диапазоне 1-1,000 фс с помощью модуля сжатия, фокусируют лазерные импульсы в фокальное пятно в первой области мишени с помощью системы доставки сканирующего лазерного пучка. При этом осуществляют сканирование фокальным пятном с первой частотой повторения в первой области мишени с помощью системы доставки сканирующего лазерного пучка, изменяют первую частоту повторения на вторую частоту повторения с помощью модуля управления частотой повторения, и осуществляют сканирование фокальным пятном со второй частотой повторения во второй области мишени с помощью системы доставки сканирующего лазерного пучка. Технический результат

RU 2686871 C2

RU 2686871 C2

заключается в обеспечении возможности уменьшения размера устройства и в упрощении изменения частоты повторения импульсов. 10 з.п. ф-лы, 8 ил.



ФИГ.2

RU 2686871 C2

RU 2686871 C2

RUSSIAN FEDERATION

FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(19) **RU** (11) **2 686 871** (13) **C2**

(51) Int. Cl.
H01S 3/10 (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
H01S 3/10007 (2019.02)

(21) (22) Application: **2015135377, 24.02.2011**

(24) Effective date for property rights:
24.02.2011

Registration date:
06.05.2019

Priority:
(30) Convention priority:
24.02.2010 US 12/712,067
Number and date of priority of the initial application, from which the given application is allocated:
2012140428 24.02.2010

(43) Application published: **25.12.2018** Bull. № **36**

(45) Date of publication: **06.05.2019** Bull. № **13**

Mail address:
129090, Moskva, ul. B. Spasskaya, 25, str. 3, OOO "Yuridicheskaya firma Gorodisskij i Partnery"

(72) Inventor(s):
KARAVITIS Majkl (US)

(73) Proprietor(s):
ALKON LENSKS, INK. (US)

RU 2686871 C2

(54) HIGH-POWER FEMTOSECOND LASER WITH REPETITION RATE CONTROLLED ACCORDING TO SCANNING SPEED

(57) Abstract:

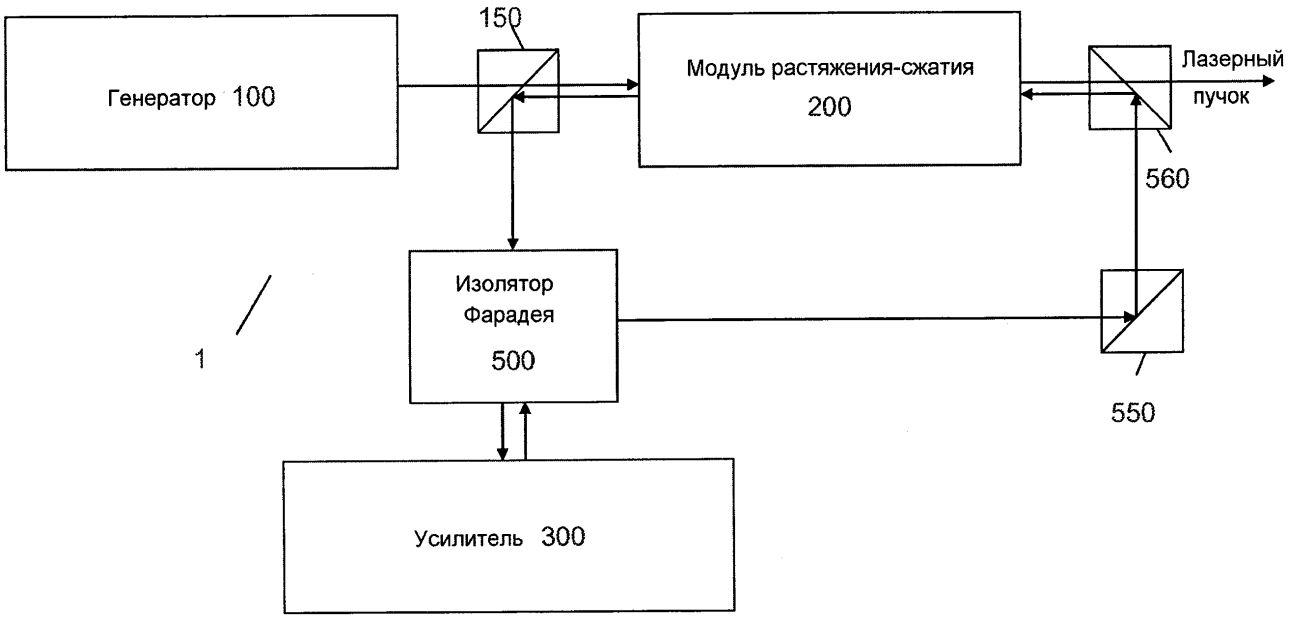
FIELD: physics.

SUBSTANCE: invention relates to laser engineering. Method of scanning using a laser system comprises steps of: generating femtosecond focusing pulses by means of a generator, increasing the duration of inoculating pulses using a stretching module, amplified stretched inoculating pulses with formation of laser pulses with the help of amplifier, compensate dispersion of group delay of laser pulses in range of 5,000–20,000 fs^2 by means of dispersion compensator between end mirrors of amplifier. Laser pulses are output from amplifier by means of optical switch at first repetition frequency, duration of laser pulses in range of 1–1,000 fs is reduced by means of compression module, laser pulses are focused into a focal spot in the first target region using a scanning laser beam delivery system. At that, focal spot is scanned with the first repetition frequency in the first target area using the scanning laser beam delivery system, changing the first repetition frequency to the second repetition frequency using the repetition rate control module, and scanning the focal spot with a second repetition frequency in the second target area using a scanning laser beam delivery system.

EFFECT: technical result consists in providing possibility of reducing the size of device and simplification of pulse repetition frequency change.

11 cl, 8 dwg

RU 2686871 C2



ФИГ.2

RU 2686871 C2

RU 2686871 C2

Область техники, к которой относится изобретение

[0001] Данный патентный документ относится к фемтосекундным лазерам, включая фемтосекундные лазеры высокой мощности с регулируемой частотой повторения.

Уровень техники

[0002] Во многих современных все более перспективных применениях лазеров существует постоянная потребность в более коротких импульсах, которые обладают высокими энергиями в расчете на импульс. Эти признаки обеспечивают лучшее управление и повышенное быстродействие для применений лазеров. Важным этапом развития данной области техники является возникновение и развитие лазерных систем, выводящих фемтосекундные лазерные импульсы. Эти фемтосекундные лазеры можно использовать для самых разнообразных применений, включая несколько различных типов офтальмологических операций, где эти сверхкороткие импульсы могут обеспечивать хорошо управляемую модификацию ткани.

Раскрытие изобретения

[0003] В этом документе представлены конструкции и методы для построения и эксплуатации фемтосекундных импульсных лазеров, в том числе приведены примеры и реализации лазерных систем с усилением чирпированных импульсов, некоторые из которых имеют малое количество оптических элементов, некоторые имеют низкую частоту отказов, другие имеют достаточно малую физическую протяженность, и еще другие могут допускать изменение частот повторения без существенных повторных регулировок системы, и некоторые имеют пониженную чувствительность к тепловой фокусировке.

[0004] Например, некоторые примеры лазерного двигателя включают в себя генератор, который генерирует и выводит пучок фемтосекундных затравочных импульсов, модуль растяжения-сжатия, который увеличивает длительность затравочных импульсов, и усилитель, который принимает растянутые затравочные импульсы от модуля растяжения-сжатия, усиливает амплитуду выбранных растянутых затравочных импульсов для создания усиленных растянутых импульсов, и выводит лазерный пучок усиленных растянутых импульсов, причем модуль растяжения-сжатия принимает лазерный пучок усиленных растянутых импульсов, уменьшает длительность усиленных растянутых импульсов и выводит лазерный пучок фемтосекундных импульсов с длительностью импульса менее 1,000 фемтосекунд, и усилитель включает в себя компенсатор дисперсии, который снижает дисперсию усиленных растянутых импульсов.

[0005] В некоторых примерах генератор представляет собой оптоволоконный генератор с диодной накачкой и выводит ограниченные преобразованием затравочные импульсы.

[0006] В некоторых примерах генератор генерирует пучок с длительностью затравочного импульса менее 1,000 фемтосекунд.

[0007] В некоторых реализациях генератор выводит пучок с частотой повторения затравочных импульсов в одном из диапазонов 10-100 МГц и 20-50 МГц.

[0008] В некоторых реализациях модуль растяжения-сжатия включает в себя чирпированную объемную брэгговскую решетку.

[0009] В некоторых реализациях модуль растяжения-сжатия включает в себя фототепловое преломляющее стекло.

[0010] В некоторых реализациях модуль растяжения-сжатия увеличивает длительность фемтосекундных затравочных импульсов с коэффициентом более 10.

[0011] В некоторых реализациях модуль растяжения-сжатия увеличивает длительность фемтосекундных затравочных импульсов до увеличенной длительности 1,000-200,000

фемтосекунд.

[0012] В некоторых реализациях лазерный двигатель не содержит настраиваемого модуля растяжения-сжатия.

[0013] В некоторых реализациях лазерный двигатель включает в себя поляризатор и четвертьволновую пластинку между генератором и модулем растяжения-сжатия, которая перенаправляет пучок растянутых затравочных импульсов к усилителю.

[0014] В некоторых реализациях лазерный двигатель включает в себя изолятор Фарадея, который принимает пучок растянутых затравочных импульсов от модуля растяжения-сжатия, выводит пучок растянутых затравочных импульсов на усилитель, принимает лазерный пучок усиленных растянутых импульсов от усилителя, выводит лазерный пучок усиленных растянутых импульсов на порт сжатия модуля растяжения-сжатия, и изолирует генератор от лазерного пучка усиленных растянутых импульсов.

[0015] В некоторых реализациях усилитель включает в себя оптические элементы, и компенсатор дисперсии вносит дисперсию, противоположную по знаку дисперсии, вносимой оптическим элементом усилителя.

[0016] В некоторых реализациях дисперсия, вносимая компенсатором дисперсии, по существу, равна по величине и противоположна по знаку дисперсии, вносимой при одном двустороннем прохождении оптическими элементами усилителя, отличными от компенсатора дисперсии.

[0017] В некоторых реализациях компенсатор дисперсии включает в себя, по меньшей мере, одно из чирпированного зеркала, чирпированного волокна, чирпированной решетки, призмы и чирпированного пропускающего оптического элемента.

[0018] В некоторых реализациях усилитель включает в себя усиливающий материал, который усиливает амплитуду выбранных растянутых затравочных импульсов, два торцевых зеркала, которые образуют резонатор, и два изламывающих зеркала, которые изламывают резонансный оптический путь внутри усилителя, причем, по меньшей мере, одно из двух торцевых зеркал и двух изламывающих зеркал является чирпированным зеркалом.

[0019] В некоторых реализациях чирпированное зеркало вносит отрицательную дисперсию в усиленные растянутые импульсы.

[0020] В некоторых реализациях лазерный двигатель сконфигурирован так, чтобы выводить лазерный пучок с первой частотой повторения, и затем с другой, второй частотой повторения с, по существу, одной и той же конструкцией всех оптических элементов лазерного двигателя.

[0021] В некоторых реализациях первая частота повторения и вторая частота повторения оказываются в одном из диапазонов 10 кГц-2 МГц, 50 кГц-1 МГц или 100 кГц-500 кГц.

[0022] В некоторых реализациях лазерный двигатель можно модифицировать для вывода лазерного пучка со второй частотой повторения с, по существу, одной и той же конструкцией всех оптических элементов, что и для первой частоты повторения, когда немодифицированный лазерный двигатель использовал разные конструкции оптических элементов для первой и второй частот повторения.

[0023] В некоторых реализациях усилитель сконфигурирован так, чтобы количество двусторонних прохождений усиленных растянутых импульсов в усилителе изменялось с изменением частоты повторения при сохранении неизменной оптической конструкции усилителя.

[0024] В некоторых реализациях усилитель имеет изломанный оптический путь между торцевыми зеркалами менее 1 метра.

[0025] В некоторых реализациях усилитель является регенеративным усилителем в режиме открытия резонатора, усилителем чирпированных импульсов или усилителем с модулируемой добротностью.

[0026] В некоторых реализациях усилитель включает в себя переключаемый поляризатор на оптическом пути между торцевыми зеркалами, который может выбирать растянутые импульсы, осуществляя переключение между состоянием регулировки поляризации, в котором переключаемый поляризатор регулирует поляризацию усиленных растянутых импульсов, и состоянием без регулировки поляризации, в котором переключаемый поляризатор, по существу, не регулирует поляризацию усиленных растянутых импульсов.

[0027] В некоторых реализациях лазерный двигатель может включать в себя высоковольтный силовой переключатель, который управляет переключаемым поляризатором для осуществления переключения из состояния без регулировки поляризации в состояние регулировки поляризации с временем нарастания менее 5 наносекунд, 4 наносекунд или 3 наносекунд.

[0028] В некоторых реализациях лазерный двигатель изменяет первую частоту повторения лазерного пучка фемтосекундных импульсов на вторую частоту повторения в пределах одного из диапазонов 1-120 секунд, 10-60 секунд и 20-50 секунд.

[0029] В некоторых реализациях лазерный двигатель изменяет первую частоту повторения лазерного пучка фемтосекундных импульсов ну вторую частоту повторения в течение времени изменения в пределах 1 мкс-1 с.

[0030] В некоторых реализациях усилитель включает в себя, по меньшей мере, одно фокусирующее зеркало и лазерный кристалл, расположенный в непосредственной близости от фокальной точки фокусирующего зеркала.

[0031] В некоторых реализациях лазерный двигатель сконфигурирован так, что при изменении частоты повторения лазерного двигателя с первого значения на второе значение причем оба значения находятся в пределах 10 кГц-2 МГц - диаметр выводимого лазерного пучка изменяется менее чем на 10% или 20%, или центр выводимого лазерного пучка перемещается менее чем на 20% или 40% диаметра пучка.

[0032] В некоторых реализациях фемтосекундные импульсы лазерного пучка имеют энергию в одном из диапазонов 1-100 мкДж/импульс, 10-50 мкДж/импульс и 20-30 мкДж/импульс.

[0033] В некоторых реализациях лазерный двигатель выводит лазерный пучок мощностью свыше 0,1 Вт, 1 Вт или 10 Вт.

[0034] В некоторых реализациях лазерный двигатель входит в состав офтальмологической хирургической системы.

[0035] В некоторых реализациях способ генерации лазерного пучка с помощью лазерного двигателя включает в себя этапы, на которых: генерируют пучок затравочных импульсов длительностью менее 1000 фемтосекунд с помощью генератора; уменьшают длительность затравочных импульсов с помощью модуля растяжения импульсов; усиливают амплитуду выбранных растянутых затравочных импульсов с помощью усилителя для генерации усиленных растянутых импульсов; уменьшают длительность усиленных растянутых импульсов до менее 1,000 фемтосекунд с помощью модуля сжатия импульсов; выводят лазерный пучок фемтосекундных импульсов с первой частотой повторения в пределах 10 кГц-2 МГц и с длительностью импульса менее 1,000 фемтосекунд; изменяют частоту повторения с первой частоты повторения на вторую частоту повторения в пределах 10 кГц-2 МГц без существенного изменения оптической конструкции лазерного двигателя; и выводят лазерный пучок фемтосекундных

импульсов со второй частотой повторения и с длительностью импульса менее 1,000 фемтосекунд.

[0036] В некоторых реализациях этап усиления включает в себя использование компенсатора дисперсии в усилителе для снижения дисперсии усиленных растянутых импульсов, вызванной оптическим компонентом усилителя.

[0037] В некоторых реализациях этап снижения дисперсии включает в себя введение компенсирующей дисперсии с помощью, по меньшей мере, одного чирпированного зеркала в усилителе, причем компенсирующая дисперсия, по существу, равна по величине и противоположна по знаку дисперсии, вносимой всеми оптическими элементами усилителя, отличными от компенсатора дисперсии, при каждом двустороннем прохождении.

[0038] В некоторых реализациях этап изменения частоты повторения включает в себя изменение количества двусторонних прохождений в усилителе при сохранении оптической конструкции усилителя, по существу, неизменной.

[0039] В некоторых реализациях этап растяжения и этап сжатия выполняются одним и тем же модулем растяжения-сжатия.

[0040] В некоторых реализациях выводят лазерный пучок со второй частотой повторения в одном из диапазонов 1-120 секунд, 10-60 секунд и 20-50 секунд по завершении вывода лазерного пучка с первой частотой повторения.

[0041] В некоторых реализациях изменяют частоту повторения с первой частоты повторения на вторую частоту повторения в течение времени изменения в пределах 1 мкс-1 с.

[0042] В некоторых реализациях лазерный двигатель включает в себя генератор, который генерирует импульсный световой пучок с длительностью импульса менее 1000 фемтосекунд; модуль растяжения-сжатия, который увеличивает длительность импульсов светового пучка; и усилитель, который усиливает амплитуду растянутых световых импульсов для генерации усиленных растянутых импульсов, причем модуль растяжения-сжатия уменьшает длительность усиленных растянутых импульсов и выводит пучок лазерных импульсов; и лазерный двигатель выполнен с возможностью выводить пучок лазерных импульсов с первой частотой повторения в диапазоне 10 кГц-2 МГц и затем со второй частотой повторения в диапазоне 10 кГц-2 МГц с использованием, по существу, одной и той же конструкции всех оптических элементов лазерного двигателя, причем длительность лазерных импульсов составляет менее 1000 фемтосекунд для первой и второй частот повторения.

[0043] В некоторых реализациях усилитель включает в себя компенсатор дисперсии, который, по меньшей мере, частично компенсирует дисперсию, вносимую оптическими элементами усилителя.

[0044] В некоторых реализациях усилитель включает в себя переключаемый поляризатор между торцевыми зеркалами усилителя, который переключается между состоянием, в котором переключаемый поляризатор регулирует поляризацию усиленных растянутых импульсов; и состоянием, в котором переключаемый поляризатор не регулирует поляризацию усиленных растянутых импульсов с временем нарастания менее 5 наносекунд, 4 наносекунд или 3 наносекунд.

[0045] В некоторых реализациях усилитель включает в себя, по меньшей мере, одно фокусирующее зеркало; и усилительный кристалл, расположенный вблизи фокальной точки фокусирующего зеркала.

[0046] В некоторых реализациях лазерный двигатель переключается между первой частотой повторения и второй частотой повторения в течение времени менее 60 секунд,

1 секунды или 10 мкс.

[0047] В некоторых реализациях лазерный двигатель включает в себя генератор, который выводит фемтосекундные затравочные импульсы; модуль растяжения, который увеличивает длительность затравочных импульсов; усилитель, который усиливает растянутые затравочные импульсы с образованием усиленных растянутых импульсов, и включает в себя компенсатор дисперсии для компенсации дисперсии усиленных растянутых импульсов, вносимой оптическими элементами усилителя; и модуль сжатия, который принимает усиленные растянутые импульсы, уменьшает длительность усиленных растянутых импульсов, и выводит лазерный пучок фемтосекундных импульсов.

[0048] В некоторых реализациях лазерный двигатель с переменной частотой повторения включает в себя регенеративный усилитель с модулируемой добротностью в режиме открытия резонатора; усилитель, включающий в себя два торцевых зеркала, причем лазерный двигатель выводит фемтосекундные лазерные импульсы; и длина оптического пути между торцевыми зеркалами меньше 2 метров.

[0049] В некоторых реализациях длина оптического пути между торцевыми зеркалами меньше 1 метра.

[0050] В некоторых реализациях лазерный двигатель включает в себя генератор, который генерирует затравочные импульсы, которые поступают на усилитель, причем полная длина оптического пути в свободном пространстве от точки, где фотоны затравочных импульсов генерируются в генераторе, до точки, где лазерный двигатель выводит лазерные импульсы, меньше 500 метров, 300 метров или 150 метров.

[0051] В некоторых реализациях все габаритные размеры резонатора усилителя меньше 1 метра или 0,5 метра, причем резонатор усилителя заключает в себе все оптические элементы усилителя.

[0052] В некоторых реализациях площадь основания усилителя меньше 1 $м^2$ или 0,5 $м^2$.

[0053] В некоторых реализациях лазерный двигатель включает в себя модуль растяжения-сжатия, который включает в себя чирпированную объемную брэгговскую решетку.

[0054] В некоторых реализациях усилитель включает в себя компенсатор дисперсии, который компенсирует дисперсию, вносимую оптическими элементами усилителя.

[0055] В некоторых реализациях усилитель включает в себя лазерный кристалл, который усиливает амплитуду импульсов лазерной генерации; и два изламывающих зеркала, которые изламывают резонансный оптический путь внутри усилителя, причем, по меньшей мере, одно из двух торцевых зеркал и двух изламывающих зеркал является чирпированным зеркалом.

[0056] В некоторых реализациях лазерный двигатель сконфигурирован так, чтобы выводить лазерный пучок с первой частотой повторения в диапазоне частоты повторения; и затем со второй частотой повторения в диапазоне частоты повторения с, по существу, одной и той же конструкцией всех оптических элементов лазерного двигателя.

[0057] В некоторых реализациях первая и вторая частоты повторения находятся в одном из диапазонов 10 кГц-2 МГц, 50 кГц-1 МГц или 100 кГц-500 кГц.

[0058] В некоторых реализациях лазерный двигатель сконфигурирован с возможностью перехода от первой частоты повторения ко второй частоте повторения в течение времени менее 60 секунд, 1 секунды или 1 мкс.

[0059] В некоторых реализациях усилитель включает в себя переключаемый

поляризатор между торцевыми зеркалами, который переключается за менее чем 5 нс, 4 нс или 3 нс между состоянием, в котором переключаемый поляризатор регулирует поляризацию усиленных импульсов, и состоянием, в котором переключаемый поляризатор, по существу, не регулирует поляризацию усиленных импульсов.

[0060] В некоторых реализациях усилитель включает в себя, по меньшей мере, одно фокусирующее торцевое зеркало и лазерный кристалл, находящийся в непосредственной близости от фокальной точки фокусирующего торцевого зеркала.

[0061] В некоторых реализациях лазерный двигатель включает в себя генератор, который генерирует и выводит пучок фемтосекундных затравочных импульсов; модуль растяжения-сжатия, который увеличивает длительность затравочных импульсов; и усилитель, который принимает растянутые затравочные импульсы от модуля растяжения-сжатия, усиливает амплитуду выбранных растянутых затравочных импульсов для создания усиленных растянутых импульсов, и выводит лазерный пучок усиленных растянутых импульсов; причем модуль растяжения-сжатия принимает лазерный пучок усиленных растянутых импульсов, уменьшает длительность усиленных растянутых импульсов, и выводит лазерный пучок фемтосекундных импульсов с длительностью импульса менее 1,000 фемтосекунд; причем длина оптического пути от точки, где фотоны затравочных импульсов генерируются в генераторе, до точки, где лазерный двигатель выводит лазерные импульсы, меньше 500 метров.

[0062] В некоторых реализациях длина оптического пути меньше 300 метров.

[0063] В некоторых реализациях лазерный двигатель с переменной частотой повторения включает в себя генератор, который генерирует и выводит пучок фемтосекундных затравочных импульсов; модуль растяжения-сжатия, который увеличивает длительность затравочных импульсов; усилитель чирпированных импульсов, который усиливает амплитуду выбранных растянутых затравочных импульсов для создания усиленных растянутых импульсов; причем усилитель включает в себя переключаемый поляризатор со временем переключения менее 5 нс; модуль растяжения-сжатия уменьшает длительность усиленных растянутых импульсов до фемтосекундных значений; и лазерный двигатель занимает площадь менее 1 $м^2$.

[0064] В некоторых реализациях лазерный двигатель входит в состав хирургической лазерной системы, причем хирургическая лазерная система имеет лазерный двигатель и систему формирования изображения в верхнем ярусе хирургической лазерной системы.

[0065] В некоторых реализациях лазерный двигатель с переменной частотой повторения включает в себя генератор, который генерирует и выводит пучок фемтосекундных затравочных импульсов; интегрированный модуль растяжения-сжатия, который увеличивает длительность затравочных импульсов; и регенеративный усилитель с модулируемой добротностью в режиме открытия резонатора, который усиливает амплитуду выбранных растянутых затравочных импульсов для создания усиленных растянутых импульсов; причем модуль растяжения-сжатия уменьшает длительность усиленных растянутых импульсов для вывода фемтосекундных лазерных импульсов, и количество оптических элементов лазерного двигателя составляет менее 75.

[0066] В некоторых реализациях количество оптических элементов лазерного двигателя составляет менее 50.

[0067] В некоторых реализациях количество оптических элементов лазерного двигателя в модулях, отличных от генератора, составляет менее 50.

[0068] В некоторых реализациях количество оптических элементов лазерного двигателя в модулях, отличных от генератора, составляет менее 35.

[0069] В некоторых реализациях оптический элемент представляет собой одно из:

зеркала, линзы, параллельной пластинки, поляризатора, изолятора, любого переключаемого оптического элемента, преломляющего элемента, пропускающего элемента и отражающего элемента.

[0070] В некоторых реализациях свет приходит в оптический элемент из воздуха и выходит из оптического элемента в воздух.

[0071] В некоторых реализациях интегрированный модуль растяжения-сжатия включает в себя чирпированную объемную брэгговскую решетку.

[0072] В некоторых реализациях усилитель включает в себя компенсатор дисперсии, который компенсирует дисперсию, вносимую оптическими элементами усилителя.

[0073] В некоторых реализациях усилитель включает в себя два торцевых зеркала, образующие резонатор; и два изламывающих зеркала, которые изламывают резонансный оптический путь внутри усилителя, причем, по меньшей мере, одно из двух торцевых зеркал и двух изламывающих зеркал является чирпированным зеркалом.

[0074] В некоторых реализациях лазерный двигатель сконфигурирован так, чтобы выводить лазерный пучок с первой частотой повторения в диапазоне частоты повторения и затем со второй частотой повторения в диапазоне частоты повторения с, по существу, одной и той же конструкцией всех оптических элементов лазерного двигателя, причем первая и вторая частоты повторения находятся в одном из диапазонов 10 кГц-2 МГц, 50 кГц-1 МГц и 100 кГц-500 кГц.

[0075] В некоторых реализациях лазерный двигатель сконфигурирован с возможностью перехода от первой частоты повторения ко второй частоте повторения со временем изменения менее 1 секунды.

[0076] В некоторых реализациях усилитель включает в себя переключаемый поляризатор между торцевыми зеркалами, который может переключаться в течение времени менее 5 нс, 4 нс или 3 нс между состоянием, в котором переключаемый поляризатор регулирует поляризацию усиленных растянутых импульсов, и состоянием, в котором переключаемый поляризатор, по существу, не регулирует поляризацию усиленных растянутых импульсов.

[0077] В некоторых реализациях усилитель включает в себя, по меньшей мере, одно фокусирующее зеркало и лазерный кристалл, находящийся в непосредственной близости от фокальной точки фокусирующего зеркала.

[0078] В некоторых реализациях лазерный двигатель включает в себя генератор, который генерирует и выводит пучок фемтосекундных затравочных импульсов; модуль растяжения-сжатия, который увеличивает длительность затравочных импульсов; и усилитель, который принимает растянутые затравочные импульсы от модуля растяжения-сжатия, усиливает амплитуду выбранных растянутых затравочных импульсов для создания усиленных растянутых импульсов, и выводит усиленные растянутые импульсы; причем модуль растяжения-сжатия принимает усиленные растянутые импульсы, уменьшает длительность усиленных растянутых импульсов, и выводит лазерный пучок фемтосекундных импульсов с длительностью импульса менее 1,000 фемтосекунд; причем количество оптических элементов лазерного двигателя в модулях, отличных от генератора, составляет менее 50.

[0079] В некоторых реализациях количество оптических элементов лазерного двигателя составляет менее 75.

[0080] В некоторых реализациях способ сканирования с помощью лазерной системы включает в себя этапы: генерации лазерных импульсов, имеющих переменную частоту повторения, с помощью лазерного двигателя; фокусировки лазерных импульсов в фокальное пятно в области мишени с помощью системы доставки сканирующего

лазерного пучка; сканирования фокальным пятном с некоторой скоростью сканирования в области мишени с помощью системы доставки сканирующего лазерного пучка; изменения скорости сканирования; и регулировки частоты повторения согласно измененной скорости сканирования с помощью модуля управления частотой повторения.

[0081] В некоторых реализациях этап генерации включает в себя: генерирование фемтосекундных затравочных импульсов с помощью генератора; растяжение затравочных импульсов с помощью модуля растяжения-сжатия; усиление выбранных растянутых затравочных импульсов с образованием усиленных растянутых импульсов с помощью усилителя; и сжатие усиленных растянутых импульсов с образованием фемтосекундных лазерных импульсов с помощью модуля растяжения-сжатия.

[0082] В некоторых реализациях способ включает в себя регулировку частоты повторения для поддержания плотности пузырьков, создаваемых лазером, в области мишени приблизительно в пределах выбранного значения.

[0083] В некоторых реализациях плотность пузырьков представляет собой одну из линейной плотности, поверхностной плотности и объемной плотности.

[0084] В некоторых реализациях этап регулировки частоты повторения состоит в регулировке частоты повторения пропорционально скорости сканирования.

[0085] В некоторых реализациях этап регулировки частоты повторения состоит в изменении частоты повторения с первого значения на второе значение за время в пределах 1 мкс-1 с.

[0086] В некоторых реализациях этап осуществления сканирования фокальным пятном состоит в осуществлении сканирования фокальным пятном вдоль пути минимального ускорения.

[0087] В некоторых реализациях способ включает в себя: сканирование фокальным пятном в плоскости XY по извилистому пути; и снижение частоты повторения при приближении к участку изгиба пути.

[0088] В некоторых реализациях способ включает в себя: сканирование лазерным пучком по спирали; и снижение частоты повторения при приближении сканирования к центру спирали.

[0089] В некоторых реализациях регулировка частоты повторения включает в себя: прием модулем управления частотой повторения информации об измененной скорости сканирования посредством считывания изменения скорости сканирования или получения электронной информации об изменении скорости сканирования от процессора или устройства памяти; и регулировку частоты повторения согласно принятой информации об измененной скорости сканирования.

[0090] В некоторых реализациях система лазерного сканирования с переменной частотой повторения включает в себя генератор, который генерирует и выводит пучок фемтосекундных затравочных импульсов; модуль растяжения-сжатия, который увеличивает длительность затравочных импульсов, принимает усиленные растянутые импульсы от усилителя, уменьшает длительность усиленных растянутых импульсов, и выводит лазерный пучок фемтосекундных импульсов с некоторой частотой повторения; усилитель, который принимает растянутые затравочные импульсы от модуля растяжения-сжатия, усиливает амплитуду выбранных растянутых затравочных импульсов для создания усиленных растянутых импульсов и выводит усиленные растянутые импульсы на модуль растяжения-сжатия; и сканирующее оптическое средство, которое осуществляет сканирование фокальным пятном лазерного пучка в области мишени с переменной скоростью сканирования для генерации пятен фоторазрушения; причем система лазерного сканирования изменяет частоту повторения

для создания пятен фоторазрушения с заранее определенным профилем плотности.

[0091] в некоторых реализациях усилитель включает в себя компенсатор дисперсии, который снижает дисперсию усиленных растянутых импульсов.

[0092] В некоторых реализациях усилитель включает в себя переключаемый поляризатор, который вращает плоскость поляризации растянутых импульсов в усилителе, причем время нарастания переключаемого поляризатора меньше 5 нс, 4 нс или 3 нс.

[0093] В некоторых реализациях система лазерного сканирования включает в себя электронное средство управления, которое подает на переключаемый поляризатор сигналы управления, побуждающие переключаемый поляризатор осуществлять переключение с временем нарастания менее 5 нс, 4 нс или 3 нс.

[0094] В некоторых реализациях способ сканирования с помощью лазерного двигателя включает в себя этапы: генерации фемтосекундных лазерных импульсов с некоторой частотой повторения; фокусировки лазерных импульсов в фокальное пятно в области мишени для генерации пятен фоторазрушения; сканирование фокальным пятном в области мишени с некоторой скоростью сканирования; и регулировку частоты повторения в ходе сканирования для создания пятен фоторазрушения с некоторым профилем плотности.

[0095] В некоторых реализациях этап регулировки включает в себя создание пятен фоторазрушения, причем одну из линейной плотности пятен, поверхностной плотности пятен и объемной плотности пятен поддерживают, по существу, однородной в области мишени.

[0096] В некоторых реализациях этап регулировки состоит в регулировке частоты повторения согласно изменению скорости сканирования.

[0097] В некоторых реализациях этап регулировки состоит в регулировке частоты повторения пропорционально скорости сканирования.

[0098] В некоторых реализациях этап регулировки частоты повторения состоит в изменении частоты повторения с первого значения на второе значение за время в пределах 1 мкс-1 с.

[0099] В некоторых реализациях этап генерации включает в себя: генерирование фемтосекундных затравочных импульсов с помощью генератора; растяжение затравочных импульсов с помощью модуля растяжения-сжатия; усиление выбранных растянутых затравочных импульсов с образованием усиленных растянутых импульсов с помощью усилителя; и сжатие усиленных растянутых импульсов с образованием фемтосекундных лазерных импульсов с помощью модуля растяжения-сжатия.

[00100] В некоторых реализациях этап осуществления сканирования фокальным пятном состоит в осуществлении сканирования фокальным пятном вдоль пути минимального ускорения.

[00101] В некоторых реализациях способ включает в себя: сканирование фокальным пятном по извилистому пути; и снижение частоты повторения при приближении к участку изгиба пути.

[00102] В некоторых реализациях способ включает в себя: сканирование лазерным пучком по спирали; и снижение частоты повторения по мере приближения сканирования к центру спирали.

[00103] В некоторых реализациях способ включает в себя: сканирование лазерным пучком вдоль конца линии или излома линии; и снижение частоты повторения по мере приближения сканирования к концу линии или излому линии.

[00104] В некоторых реализациях способ включает в себя: прием сохраненной или

считанной информации о скорости сканирования, и регулировку частоты повторения согласно принятой информации, касающейся скорости сканирования.

[00105] В некоторых реализациях способ включает в себя: прием считанной или отображенной информации об области мишени, и регулировку частоты повторения согласно принятой информации, касающейся области мишени.

[00106] В некоторых реализациях, лазерный двигатель может включать в себя генератор, который выводит фемтосекундные затравочные оптические импульсы, и усилитель, который усиливает затравочные оптические импульсы для формирования усиленных оптических импульсов. Этот усилитель включает в себя оптический резонатор, который подключен для приема и циркуляции затравочных оптических импульсов, и оптическое переключающее устройство, подключенное к оптическому резонатору для управления подачей света принятых затравочных оптических импульсов в оптический резонатор и для управления выводом света из оптического резонатора в качестве выходного света усилителя. Оптическое переключающее устройство сконфигурировано для управления и регулировки количества двусторонних прохождений света, соединенных внутри оптического резонатора для управления и регулировки частоты повторения импульсов для усиленных оптических импульсов, сформированных усилителем. Усилитель также включает в себя оптическую усиливающую среду внутри оптического резонатора для усиления затравочных оптических импульсов с образованием усиленных оптических импульсов, и компенсатор дисперсии внутри оптического резонатора для компенсации дисперсии усиленных оптических импульсов, индуцированной усилителем. Лазерный двигатель включает в себя один или более оптических элементов вне усилителя для увеличения длительности затравочных оптических импульсов до ввода каждого затравочного оптического импульса в усилитель и для уменьшения длительности усиленных оптических импульсов, выводимых усилителем, для формирования усиленных оптических импульсов. Лазерный двигатель может быть сконфигурирован без устройства компенсации дисперсии вне усилителя, которое предусмотрено для компенсации дисперсии усиленных оптических импульсов, индуцированной усилителем.

[00107] В других реализациях способ эксплуатации лазерного двигателя для формирования фемтосекундных оптических импульсов может включать в себя растяжение фемтосекундных затравочных оптических импульсов для формирования растянутых затравочных оптических импульсов с пониженной оптической мощностью в каждом импульсе; и ввод растянутых затравочных оптических импульсов в оптический резонатор оптического усилителя для усиления оптической мощности каждого растянутого затравочного оптического импульса для формирования усиленных растянутых оптических импульсов. Внутри оптического усилителя оптический компенсатор используется для обеспечения компенсации дисперсии каждого оптического импульса, причем оптический компенсатор структурирован для внесения дисперсии, противоположной по знаку и, по существу, равной по величине дисперсии, индуцированной усилителем при одном двустороннем прохождении света, внутри оптического резонатора усилителя, за исключением дисперсии, обусловленной компенсатором дисперсии. Этот способ включает в себя: эксплуатацию оптического переключающего устройства, подключенного к оптическому резонатору для управления подачей света растянутых затравочных оптических импульсов в оптический резонатор и вывода света усиленных растянутых оптических импульсов из оптического резонатора; уменьшение длительности импульса усиленных растянутых оптических импульсов из оптического резонатора для формирования сжатых усиленных оптических импульсов

на выходе лазерного двигателя; и эксплуатацию оптического переключающего устройства для управления и регулировки количества двусторонних прохождений света внутри оптического резонатора для управления и регулировки частоты повторения импульсов для сжатых усиленных оптических импульсов, не используя устройство компенсации дисперсии, которое находится вне усилителя для компенсации дисперсии, индуцированной усилителем.

Краткое описание чертежей

[00108] Фиг. 1A-B иллюстрируют два варианта осуществления фемтосекундного лазерного двигателя 1 высокой мощности.

[00109] Фиг. 2 более подробно иллюстрирует вариант осуществления фемтосекундного лазерного двигателя 1 высокой мощности.

[00110] Фиг. 3A иллюстрирует идею чирпирования лазерного импульса.

[00111] Фиг. 3B иллюстрирует пример модуля 200' растяжения и модуля 400 сжатия.

[00112] Фиг. 3C иллюстрирует реализацию интегрированного модуля 200 растяжения-сжатия.

[00113] Фиг. 4 иллюстрирует вариант осуществления усилителя 300.

[00114] Фиг. 5A-B иллюстрируют цикл накачки-усиления-выпуска лазерного резонатора.

[00115] Фиг. 6A-D иллюстрируют хирургические шаблоны сканирования с постоянными и переменными частотами повторения.

[00116] Фиг. 7A-B иллюстрируют проблемы конструкции, относящиеся к тепловой фокусировке при двух разных температурах лазерного кристалла 310 в усилителе 300.

[00117] Фиг. 7C-D иллюстрируют две реализации усилителя 300 с ослабленной тепловой фокусировкой.

[00118] Фиг. 8 иллюстрирует зависимость оптической мощности пучка от рабочей температуры.

Осуществление изобретения

[00119] В ранних фемтосекундных лазерах чрезвычайно малая длина импульса обеспечивает чрезвычайно высокую мощность в этих импульсах. Однако эта высокая мощность, грозит повреждением усиливающей среды лазеров. Решение состоит в усилении чирпированных импульсов (CPA). Согласно этой технологии, генерируются фемтосекундные затравочные импульсы, затем длина затравочных импульсов растягивается с коэффициентом 10-1000 до пикосекундного диапазона, таким образом, значительно снижая мощность в импульсе. Эти растянутые импульсы можно безопасно усиливать с помощью усиливающей среды, не вызывая повреждения. Усиление сменяется сжатием, в результате чего, длина усиленных импульсов опять сжимается до фемтосекунд. Этот подход CPA находит в настоящее время многочисленные применения.

[00120] Однако, лазеры на основе CPA обладают и недостатками. Обычно, эти лазеры имеют большое количество оптических элементов и, соответственно, весьма сложны. Эти факторы сильно повышают частоту отказа и снижают число раз, сколько лазеры можно надежно включать и выключать. Также, чрезвычайно большой размер лазеров на основе CPA сильно затрудняют их интеграцию в медицинские устройства, поскольку они обычно используются в ограниченном пространстве хирургических кабинетов или операционных. Кроме того, если различные процедуры требуют изменения частоты повторения импульсов, это изменение требует осуществления занимающих много времени повторных регулировок большого количества оптических элементов. Кроме того, тепловая фокусировка влияет на оптические характеристики большинства лазеров на основе CPA, по существу, делая их весьма чувствительными к рабочей мощности

лазера. Эта чувствительность создает дополнительное препятствие изменениям частоты повторения.

[00121] Конструкции лазеров и методы построения и эксплуатации фемтосекундных импульсных лазеров, описанные в этом документе можно реализовать для решения различных технических проблем и в других фемтосекундных импульсных лазерах.

[00122] Фиг. 1A иллюстрирует лазерный двигатель 1 на основе усиления чирпированных импульсов (CPA) или регенеративного усилителя в режиме открытия резонатора (CDRA), который включает в себя генератор 100, модуль 200 растяжения-сжатия и оптический усилитель 300.

[00123] Генератор 100 может генерировать и выводить пучок фемтосекундных затравочных импульсов. Модуль 200 растяжения-сжатия может увеличивать длительность этих затравочных импульсов. Усилитель 300 может принимать растянутые затравочные импульсы от модуля 200 растяжения-сжатия, усиливать амплитуду растянутых импульсов и выводить лазерный пучок усиленных растянутых импульсов. Эти усиленные растянутые импульсы можно оптически возвращать в модуль 200 растяжения-сжатия, который может уменьшать длительность усиленных растянутых импульсов и выводить лазерный пучок фемтосекундных импульсов.

[00124] Фиг. 1B иллюстрирует пример другого лазерного двигателя 1' на основе CPA, где оптический усилитель 300', установленный после оптического генератора 100' и модуля 200' растяжения оптических импульсов, может оптически вводить усиленные растянутые импульсы в отдельный модуль 400 сжатия, который может сжимать усиленные растянутые импульсы и выводить лазерный пучок фемтосекундных импульсов.

[00125] Описание лазерных двигателей 1 и 1' содержит большое количество функций управления и этапов способа. Эти функции и этапы могут осуществляться под управлением одного или более контроллеров, процессоров и других компьютеров-контроллеров. Эти контроллеры, процессоры и компьютеры-контроллеры могут использовать развитое программное обеспечение, взаимодействуя друг с другом. Для пояснения представления, эти процессоры, контроллеры и их соответствующее программное обеспечение опущены на фигурах этого патентного документа, но в некоторых реализациях подразумеваются как часть описания лазерных двигателей 1 и 1'.

[00126] Хотя несколько примеров в этой заявке будет описано применительно к офтальмологическим применениям, например, хирургии катаракты, капсулотомическим или корнеальным процедурам, реализации лазерного двигателя 1 можно использовать в весьма широком диапазоне применений, которые включают в себя самые разнообразные офтальмологические процедуры, например, ретинальную и корнеальную хирургию, а также дерматологические и дентальные применения, различные хирургические применения и различные применения механической обработки материалов, которые придают форму куску материал с помощью лазерного фоторазрушения или какой-либо другой лазерный процесс.

[00127] Как описано выше, существует ряд недостатков некоторых лазерных двигателей на основе усиления чирпированных импульсов CPA/CDRA. Варианты осуществления лазерного двигателя 1 можно конфигурировать для предложения решений этих проблем с использованием некоторых или всех из следующих конструктивных принципов, а также других конструкционных соображений:

[00128] (1) Многие лазеры имеют большое количество оптических элементов, например, сотню или более, что усложняет и удорожает их конструкцию. В этом

контексте, варианты осуществления лазерного двигателя 1 могут иметь, в целом, лишь 50 оптических элементов, и более 35 оптических элементов вне генератора 100.

[00129] (2) Лазеры с большим количеством оптических элементов и соответствующей сложностью могут иметь высокую частоту отказов. В некоторых лазерах CPA/CDRA вероятность отказа может сильно увеличиться после "циклирования" лазера, т.е. включения и выключения 30-40 раз. Такие системы могут требовать профилактического обслуживания после 30-40 циклов переключения или чаще для предотвращения возникновения фактического отказа в ходе регулярной работы лазера.

[00130] В этом контексте, вследствие значительного сокращения количества оптических элементов и новых решений управления дисперсией, варианты осуществления лазерного двигателя 1 допускают циклирование 100, 120 или более раз в ожидании правильной работы, таким образом, значительно снижая частоту необходимого обслуживания и повышая общую надежность.

[00131] (3) Большая физическая протяженность и соответствующая большая длительность двусторонних прохождений одних и тех же лазеров CPA/CDRA приводит к большим временам перезарядки, как описано ниже, таким образом, ограничивая их частоты повторения, а также их пригодность для использования в пространственно ограниченных хирургических устройствах.

[00132] В этом контексте, варианты осуществления лазерного двигателя 1 могут иметь компактный резонатор, который может иметь оптический путь между торцевыми зеркалами менее одного метра в некоторых вариантах осуществления и двух метров в других. Компактность также является фактором, способствующим высоким частотам повторения лазерного двигателя 1, которые могут достигать 300, 500 или даже 1,000 кГц.

[00133] Вышеупомянутая компактность может приводить к тому, что полный оптический путь, измеренный от точки генерации фотона до точки выхода и включающий в себя все двусторонние прохождения в резонаторе, составляет не более 150 метров несмотря на высокую частоту повторения этих лазеров.

[00134] (4) Некоторые лазеры CPA/CDRA точно настраиваются на работу на конкретной частоте повторения. Эта настройка может предусматривать компенсацию дисперсии модуля 200 растяжения и усилитель 300 на конкретной частоте повторения модулем 200/400 сжатия. Однако, если применение требует изменения частоты повторения, модуль растяжения и усилитель обуславливают другую дисперсию на этой новой частоте повторения, нарушая точно настроенную компенсацию дисперсии лазера CPA/CDRA. Для компенсации этой измененной дисперсии, обычно оптические элементы модуля 200 растяжения и модуля 200/400 сжатия необходимо повторно регулировать в процедуре, занимающей много времени. Эта повторная регулировка технически усложняет изменение частоты повторения этих лазеров CPA/CDRA во временных масштабах офтальмологических хирургических процедур. Таким образом, большинство коммерческих офтальмологических лазеров на основе CPA не обеспечивают функциональность изменяемой частоты повторения, и ни одно не обеспечивает изменяемую частоту повторения в ходе хирургических процедур.

[00135] В этом контексте, варианты осуществления лазерного двигателя 1 может включать в себя регулятор дисперсии или компенсатор дисперсии, который может снижать и даже минимизировать дисперсию лазерного пучка, обусловленную усилителем 300. Эта минимизация дисперсии позволяет изменять частоту повторения без занимающей много времени повторной регулировки оптических элементов лазерного двигателя 1. Таким образом, включение регулятора дисперсии позволяет изменять

частоту повторения в ходе хирургических процедур, чувствительных к времени. Примером является использование первой частоты повторения для хирургии катаракты и второй частоты повторения для капсулотомической или корнеальной процедуры. Как известно, в этих операциях фактор времени очень важен.

[00136] (5) В ряде случаев, в хирургической процедуре шаблоны разреза можно использовать для размещения лазерных пятен с неравномерной плотностью, когда лазерный пучок имеет фиксированные частоты повторения. Примеры включают в себя снижение скорости сканирования вокруг поворотной точки растра или шаблона сканирования, или в суживающейся или расширяющейся спирали.

[00137] В этом контексте, варианты осуществления лазерного двигателя 1 можно конфигурировать для обеспечения, по существу, непрерывно регулируемой частоты повторения и для регулировки частоты повторения почти синхронно с изменением скорости сканирования для компенсации изменений скорости сканирования, что позволяет формировать лазерные пятна с почти постоянной плотностью или с заранее определенным профилем плотности.

[00138] (6) Кроме того, тепловая фокусировка негативно влияет на оптические характеристики некоторых лазеров CPA/CDRA и делает их нежелательно чувствительными к изменениям мощности и частоты повторения лазерного пучка. В этом контексте, варианты осуществления лазерного двигателя 1 могут использовать методы компенсации тепловой фокусировки, благодаря чему, эти варианты осуществления становятся совершенно нечувствительными к изменениям мощности и частоты повторения подаваемого лазерного пучка.

[00139] Фиг. 2 подробно иллюстрирует конкретную реализацию лазерного двигателя 1. Генератором 100 могут быть самые разнообразные источники света, которые могут генерировать и выводить затравочные импульсы для лазерного двигателя 1. Примеры включают в себя оптоволоконные генераторы с диодной накачкой. Генератор может включать в себя единичный диод, например диод на основе GaAs, работающий на длине волны 8 08 нм, или разнообразные другие диоды.

[00140] Оптоволоконные генераторы гораздо компактнее генераторов, основанных на распространении пучка в свободном пространстве. В хирургических применениях, где теснота операционной является обременительным ограничением, снижение пространственной протяженности лазерного двигателя является очень ценным конструкционным признаком.

[00141] В некоторых примерах, генератор выводит высококачественные затравочные импульсы. Высокому качеству импульса может способствовать ряд факторов, подробнее описанных ниже.

[00142] (i) В некоторых вариантах осуществления диод может включать в себя частотно-стабилизирующую полоску, например объемную брэгговскую решетку внутри диода. Такие решетки могут обеспечивать импульсы с низким шумом и высокой стабильностью от импульса к импульсу. Волокно может быть выполнено из стекла, легированного Nd или Yb.

[00143] (ii) Генератор 100 может включать в себя полупроводниковое зеркало с насыщаемыми поглотителями, или SESAM. Использование одного или более SESAM повышает когерентность мод в генерируемых импульсах, что позволяет работать, по существу, в режиме синхронизации мод.

[00144] Генераторы на основе вышеописанных конструкционных принципов могут выводить, по существу, ограниченные преобразованием затравочные импульсы, например, с гауссовым распределением. В некоторых примерах, также могут

генерироваться импульсы с плоской вершиной. Длительность импульса может составлять менее 1,000 фемтосекунд (фс). В некоторых реализациях, длительность импульса может находиться в диапазоне 50-1,000 фемтосекунд, в некоторых других вариантах осуществления в диапазоне 100-500 фемтосекунд. Частота затравочных импульсов, или частота повторения может находиться в диапазоне 10-100 МГц, в других вариантах осуществления в диапазоне 20-50 МГц. Тем не менее, снижение частоты затравочных импульсов ниже 10 или 20 МГц создает ряд проблем конструкции. По этой причине, большинство генераторов работают на частотах свыше 20 МГц.

[00145] Мощность пучка затравочных импульсов может находиться в диапазоне 10-1000 мВт, в других вариантах осуществления в диапазоне 100-200 мВт.

[00146] По ряду соображений хронирования, генератор 100 можно использовать в качестве главного тактового генератора.

[00147] Модуль 200 растяжения-сжатия может растягивать затравочные импульсы, внося разные задержки по времени в разные частотные компоненты импульса. Короче говоря, модуль растяжения-сжатия может вносить дисперсию или чирп.

[00148] Фиг. 3A подробно иллюстрирует этот чирп. Модуль 200 растяжения-сжатия может принимать короткий импульс, частотный состав или спектр которого, является приблизительно однородным или "белым" на протяжении большей части длительности импульса. Другими словами, амплитуда разных частотных компонентов в начале импульса приблизительно одинакова и остается таковой в течение длительности импульса. Модуль 200 растяжения-сжатия может увеличивать длину импульса, внося разные задержки по времени в красные, зеленые и синие компоненты таких "белых" импульсов. Таким образом, частотный состав или спектр импульса, выводимого модулем 200 растяжения-сжатия, может становиться зависящим от времени. Согласно типичному соглашению, говорят, что импульсы, на переднем фронте которых преобладают частоты красного цвета, тогда как на заднем фронте преобладают частоты синего цвета, имеют положительную дисперсию или положительный чирп.

[00149] Настоящее описание относится к чирпу во временой области, т.е. к относительной задержке высоко- и низкочастотных компонентов. Пространственный чирп, т.е. пространственное разделение высоко- и низкочастотных компонентов в пучке, создает различные дополнительные проблемы конструкции и не входит в число желательных функциональных возможностей модуля 200' растяжения или модуля 200 растяжения-сжатия.

[00150] Модуль 200 растяжения-сжатия или модуль 200' растяжения может вносить положительный чирп в первоначально белые затравочные импульсы за счет увеличения содержания красного на переднем фронте импульса и увеличения содержания синего на заднем фронте импульса. Аналогично, небелые импульсы также можно чирпировать с помощью модуля 200 растяжения-сжатия или модуля 200' растяжения.

[00151] Модуль 200 растяжения-сжатия может увеличивать длительность фемтосекундных затравочных импульсов от диапазона 50 - 1,000 фемтосекунд до увеличенной длительности 1,000-200,000 фемтосекунд, или 1-200 пикосекунд или даже до 500 пс. Модуль 200 растяжения-сжатия может увеличивать длительность фемтосекундных затравочных импульсов с коэффициентом более 10. В ряде случаев, коэффициент растяжения может превышать 10^2, 10^3, 10^4 или 10^5. Каждый из этих коэффициентов растяжения обеспечивает различные конструкционные критерии для усилителя 300.

[00152] На Фиг. 3B показано, что лазерные двигатели 1' наподобие изображенных на Фиг. 1B, могут использовать модуль 200' растяжения и отдельный модуль 400 сжатия.

Модуль 200' растяжения может включать в себя первую решетку 201, линзу 202, вторую решетку 203 и зеркало 204. Когда короткий импульс 211 поступает в модуль 200' растяжения, первая решетка 201 может преломлять разные частотные компоненты в разных направлениях. Выйдя из первой решетки 201, расходящиеся лучи могут распространяться к линзе 202 и перенаправляются ко второй решетке 203. Некоторые варианты осуществления могут использовать две линзы вместо линзы 202. Поскольку вторая решетка 203 расположена под углом к первой решетке 201, и лучи другой частоты распространяются в расходящихся направлениях, разные частотные компоненты распространяются на разные расстояния, для чего требуется разное время.

[00153] Например, в модуле 200' растяжения, показанном на Фиг. 3B, компоненты с частотами в синей области спектра распространяются на большее расстояние, чем компоненты в красной области, приобретая задержку относительно красного компонента поступающего короткого импульса. Здесь и далее, термины "синий" и "красный" используются в иллюстративном и относительном смысле. Они относятся к компонентам спектра, импульса с меньшими или большими длинами волны, соответственно. В конкретных реализациях, средняя длина волны лазера может находиться в диапазоне 1000-1100 нм, и ширина полосы импульса может находиться в диапазоне 2-50 нм, в ряде случаев в диапазоне 5-20 нм. В этом примере весь спектр импульса находится в инфракрасной области. В этом примере, термины "синий" и "красный" относятся к участкам инфракрасного спектра, которые имеют меньшие и большие длины волны в пределах ширины полосы импульса, соответственно.

[00154] Функции второй решетки 203 включают в себя частичное управление чирпом, т.е. задержкой синего компонента относительно красного компонента, а также восстановление пучка до, по существу, параллельного пучка, чтобы сделать его пригодным для отражения зеркалом 204. Зеркало 204 отражает частотно разделенные параллельные лучи, которые затем следуют своему оптическому пути через вторую решетку 203, линзу 202 и первую решетку 201. Когда импульс выходит из первой решетки 201, синий компонент импульса распространяется на значительно большее расстояние и, таким образом, отстает от красного компонента.

[00155] Эта задержка оказывает, по меньшей мере, три воздействия на выводимый импульс: (i) длина импульса значительно увеличивается, (ii) амплитуды разных частотных компонентов сдвигаются относительно друг друга во времени, смещая красные компоненты к переднему фронту импульса и синие компоненты к заднему фронту, или наоборот, (iii) полная энергия импульса распределяется по большей длине импульса, снижая оптическую мощность выводимого импульса. В ряде случаев, длительность импульса может увеличиваться с коэффициентом 100, 1000 или более, мощность, соответственно, может снижаться с коэффициентом 100, 1000 или более. В сумме, модуль 200 растяжения-сжатия или модуль 200' растяжения может растягивать импульс, вносить положительный чирп и, таким образом, по существу, снижать мощность импульса.

[00156] Как описано выше, снижение пиковой мощности импульса является полезным аспектом лазеров CPA/CDRA, поскольку резонаторное оптическое средство последующего усилителя 300 не подвергается действию импульсов чрезмерно высокой мощности, что позволяет предотвратить ее повреждение пучком.

[00157] Фиг. 3B также иллюстрирует пример модуля 400 сжатия, который может включать в себя третью решетку 205, четвертую решетку 207 и зеркало 208. В некоторых примерах линза между этими решетками отсутствует, тогда как в других может присутствовать одна или две линзы. Третья решетка 205 снова направляет разные

компоненты спектра импульса в разных направлениях по аналогии с первой решеткой 201 модуля 200' растяжения. Четвертая решетка 207 снова частично управляет относительными задержками синих и красных компонентов в соответствии с ее ориентацией, по аналогии со второй решеткой 203. Однако, поскольку четвертая решетка 207 теперь ориентирована напротив второй решетки 203, оптический путь синих компонентов теперь короче, обуславливая отрицательный чирп. Эта отрицательная дисперсия позволяет красным компонентам догонять синие компоненты растянутого импульса, уменьшая общую длительность усиленных растянутых импульсов от сотен пикосекунд до сотен фемтосекунд. Конструкции с раздельными модулем 200' растяжения и модулем 400 сжатия являются вариантами осуществления лазерного двигателя 1', показанными на Фиг. 1B.

[00158] Фиг. 3B также иллюстрирует два существенных аспекта конструкций, показанных на Фиг. 1B, имеющих отдельные модуль 200' растяжения и модуль 400 сжатия.

[00159] (i) Во-первых, модуль 200' растяжения, усилитель 300 и модуль 400 сжатия нуждаются в точном согласовании друг с другом, чтобы модуль 400 сжатия мог ликвидировать растяжение, вызванное модулем 200' растяжения и последующую дисперсию, обусловленную усилителем 300, с высокой точностью. Таким образом, установление положения линзы 202 и ориентации решеток 201-207 с первого по четвертую могут требовать особенно высокой точности для компенсации дисперсии усиленных растянутых импульсов и сжатия их обратно к фемтосекундным импульсам. И, конечно, высокоточные регулировки весьма чувствительны к возмущениям: малые изменения температуры, количества двусторонних прохождений и механического напряжения могут снижать точность регулировки, требуя обслуживания и повторной калибровки лазерного двигателя 1' с архитектурой, показанной на Фиг. 1B.

[00160] (ii) В некоторых сложных или многоэтапных процедурах, может требоваться изменение частоты повторения. Однако такое изменение частоты повторения обычно сопровождается изменением количества двусторонних прохождений для оптимизации выводимых импульсов. В свою очередь, изменение количества двусторонних прохождений часто приводит к изменению тепловой фокусировки, а также составной дисперсии, обусловленной усилителем 300. Таким образом, изменение частоты повторения и количества двусторонних прохождений может нарушать тщательно калиброванный баланс растяжения, дисперсии и сжатия.

[00161] Для преодоления этих изменений, как показано стрелками на Фиг. 3B, некоторые реализации лазерного двигателя 1' можно перекалибровать, изменяя положение линзы 202, позицию или ориентацию некоторых из решеток 201, 203, 205 и 207, положение зеркал 204 и 208 или положение, где пучок попадает в линзу 202, путем перемещения одного или более зеркал. Разумеется, эти изменения обычно требуют предосторожности и, зачастую, неоднократных механических регулировок и точной калибровки, что требует длительного времени.

[00162] Медленность повторной калибровки может создавать проблему в приложениях, где желательно регулярно изменять частоты повторения импульсов. Это может быть особенно запретительно в приложениях, где время является критическим фактором, например, в ходе офтальмологических хирургических применений, где способность пациента управлять движениями глаз может не превышать 90 секунд. По всем вышеуказанным причинам, большинство лазерных двигателей не обеспечивают функциональность изменяемой частоты повторения.

[00163] Кроме того, поскольку в лазерном двигателе 1' модуль 200' растяжения

отделен от модуля 400 сжатия, и оба они включают в себя множественные решетки и линзы, пространственная протяженность модуля растяжения и модуля сжатия лазерного двигателя 1' наподобие показанного на Фиг. 1B, обычно больше.

[00164] Для уменьшения пространственной площади основания модуля 200' растяжения и модуля 400 сжатия, а также для уменьшения кратности калибровки, в некоторых реализациях лазерного двигателя 1', модуль 200' растяжения и модуль 400 сжатия могут совместно использовать один или более оптических элементов. В ряде случаев, они могут совместно использовать решетку, например, первая решетка 201 и третья решетка 205 может быть одним и тем же объектом.

[00165] В некоторых примерах многократного излома две решетки модуля 200' растяжения могут быть одной и той же физической решеткой, причем линзы и зеркала направляют пучок на одну и ту же решетку с разных направлений при разных проходах. В некоторых примерах многократного излома, все функции двух решеток модуля 200 растяжения и двух решеток модуля 400 сжатия могут осуществляться единой совместно используемой решеткой.

[00166] Фиг. 3C иллюстрирует пример модуля 200 растяжения-сжатия варианта осуществления, показанного на Фиг. 1A, который предлагает устойчивое решение этих проблем. Модуль 200 растяжения-сжатия, показанный на Фиг. 3C, объединяет в себе функциональные возможности растяжения и сжатия, и, таким образом, допускает применение в варианте осуществления лазерного двигателя 1, показанном на Фиг. 1A. Этот модуль 200 растяжения-сжатия, реализованный в примере на Фиг. 3C, является чирпированной объемной брэгговской решеткой (CVBG). Эта CVBG может представлять собой стопку слоев, например, в стекле фототеплового преломления (PTR), причем слои имеют подходящие показатели преломления и период решетки, который изменяется в соответствии с позицией слоев. В такой конструкции условие брэгговского резонанса возникает в разных позициях для разных спектральных компонентов импульса. Таким образом, разные спектральные компоненты отражаются в разных местах, приобретая разные задержки по времени в импульсе.

[00167] Как показано в примере на Фиг. 3C, когда короткий "белый" импульс 211 поступает в модуль 200 растяжения-сжатия, красные частотные компоненты преломляются в ближних областях с увеличенными расстояниями между слоями или периодами решетки, поскольку их длина волны больше и удовлетворяет условиям брэгговского отражения в этих ближних областях. Напротив, синие частотные компоненты, имеющие меньшие длины волны, возвращаются из более удаленных областей решетки. Поскольку синие компоненты проходят более длинный оптический путь, они приобретают задержку относительно красных компонентов. Таким образом, введенный короткий белый импульс 211 растягивается этим модулем 200 растяжения-сжатия на основе CVBG в более длинный растянутый импульс 212. В конкретном примере, растянутый импульс 212 демонстрирует положительный чирп, поскольку синие компоненты задерживаются относительно красных компонентов. Другие реализации могут иметь CVBG, создающую отрицательный чирп, задерживающий красные спектральные компоненты относительно синих.

[00168] Этот модуль 200 растяжения-сжатия на основе CVBG также может сжимать усиленные растянутые импульсы 213 с высокой точностью без какой-либо трудоемкой тонкой настройки, поскольку растянутые импульсы, после усиления усилителем 300, поступают в тот же самый модуль 200 растяжения-сжатия на основе CVBG с противоположного конца, или через порт сжатия. Когда растянутый импульс входит в модуль 200 растяжения-сжатия на основе CVBG с противоположного конца, его

красные компоненты испытывают некоторую задержку, поскольку его синие компоненты испытали задержку на этапе растяжения, что позволяет восстановить первоначальную малую длину импульса. Таким образом, этот модуль 200 растяжения-сжатия может очень эффективно компенсировать дисперсию, вносимую при растяжении и выводить правильно сжатый усиленный импульс 214.

[00169] По сравнению с конкретными аспектами лазерных двигателей 1' с раздельными модулем 200' растяжения и модулем 400 сжатия, (i) лазерный двигатель 1 не обладает высокой чувствительностью к точному выравниванию движущихся оптических элементов, поскольку они отсутствуют, и, таким образом, демонстрирует высокую устойчивость к механическим возмущениям или изменениям рабочей температуры, и (ii) поскольку новая конструкция усилителя 300 не вносит дополнительной дисперсии в связи с количеством двусторонних прохождений, как будет объяснено ниже в связи с уравнением (1)-(2) и Фиг. 5A-B, лазерный двигатель 1 не требует чувствительной повторной калибровки и повторного выравнивания своих оптических элементов и настройки при изменении частоты повторения. Эти атрибуты позволяют использовать лазерный двигатель 1 в приложениях, где важно быстро или регулярно изменять частоту повторения.

[00170] В других конструкциях, отличных от описанных выше, усилитель 300 может вносить дополнительную дисперсию. В этих конструкциях интегрированная архитектура модуля 200 растяжения-сжатия может дополняться функциональной возможностью повторной регулировки, поскольку модуль сжатия должен сжимать не только дисперсию модуля растяжения, но и дополнительную дисперсию усилителя 300. Эта дополнительная задача может требовать реализации настраиваемого блока в связи с функциональной возможностью модуль сжатия.

[00171] Согласно Фиг. 2, лазерный двигатель 1 может дополнительно включать в себя эффективный поляризационный делитель 150 пучка. Делитель 150 пучка может включать в себя поляризатор и четвертьволновую пластину между генератором 100 и модулем 200 растяжения-сжатия. В других вариантах осуществления, делитель 150 пучка может представлять собой тонкопленочный поляризатор. Эта комбинация 150 может пропускать затравочные импульсы от генератора 100 к модулю 200 растяжения-сжатия, но перенаправлять растянутые импульсы, возвращающиеся от модуля 200 растяжения-сжатия, к усилителю 300, поскольку четвертьволновая пластина вращает плоскость поляризации пучка импульсов на 90 градусов после двойного прохождения. Поляризатор, будучи пропускающим для направления поляризации затравочных импульсов, является отражающим для повернутой на 90 градусов плоскости поляризации растянутых импульсов, после второго пересечения четвертьволновой пластины.

[00172] В некоторых вариантах осуществления, лазерный двигатель 1 может включать в себя изолятор 500 Фарадея на оптическом пути между делителем 150 пучка и усилителем 300. Функции изолятора 500 Фарадея могут включать в себя изоляцию генератора 100 от усиленного пучка во избежание повреждения генератора 100 высокой мощностью лазерного пучка. Такой изолятор 500 Фарадея может принимать растянутые затравочные импульсы от делителя 150 пучка, передавать растянутые затравочные импульсы на усилитель 300, принимать лазерный пучок усиленных растянутых импульсов от усилителя 300 и выводить лазерный пучок усиленных растянутых импульсов на модуль 200 растяжения-сжатия через поляризаторы 550 и 560.

[00173] Изоляторы 500 Фарадея могут быть полезны в вариантах осуществления, где усилитель 300 выводит усиленные импульсы через тот же оптический путь, по которому он принял их, поскольку простое перенаправляющее оптическое средство

может совершенно не подходить для функции изоляции, поскольку усиленные импульсы часто имеют мощность или интенсивность, в сотни или даже тысячи раз больше, чем у затравочных импульсов. Даже если простое перенаправляющее оптическое средство пропускает только часть этих усиленных импульсов, прошедшие импульсы все же могут быть достаточно интенсивными, чтобы повредить генератор 100.

[00174] В некоторых вариантах осуществления, изолятор 500 Фарадея можно конфигурировать для пропускания менее 1/10,000 лазерного пучка от усилителя 300 к генератору 100. Ту же самую функцию изоляции можно обеспечивать в отношении ослабления: изолятор Фарадея может ослаблять усиленный лазерный пучок, например, на 40 дБ или, в некоторых реализациях, на 50 дБ.

[00175] Изолятор Фарадея, или изолятор, зависящий от поляризации, может включать в себя три части: входной поляризатор, поляризованный вертикально, вращатель Фарадея и выходной поляризатор или анализатор, поляризованный под углом 45 градусов.

[00176] Свет, распространяющийся в прямом направлении, поляризуется, например, вертикально, входным поляризатором, если он ранее не был поляризован в этом направлении. (Здесь, плоскостью поляризации называется плоскость, в которой лежат векторы электрического поля. Кроме того, "вертикальная" означает только согласованную или опорную плоскость. В различных вариантах осуществления фактическая плоскость поляризации может быть ориентирована в других конкретных направлениях.) Вращатель Фарадея вращает плоскость поляризации пучка примерно на 45 градусов, выравнивая ее с плоскостью поляризации анализатора, который затем пропускает свет без дополнительного вращения плоскости поляризации.

[00177] Свет, распространяющийся в обратном направлении, например, усиленные импульсы, возвращающиеся от усилителя 300, поляризуется под углом 45 градусов относительно опорной вертикальной плоскости на выходе анализатора. Вращатель Фарадея снова вращает плоскость поляризации примерно на 45 градусов. Таким образом, свет, выводимый вращателем Фарадея к входному поляризатору, поляризуется горизонтально. Поскольку входной поляризатор поляризован вертикально, входной поляризатор будет почти полностью отражать горизонтально поляризованный свет, вместо того, чтобы пропускать его к генератору 100. Таким образом, изолятор 500 Фарадея может защищать генератор 100 от усиленных лазерных импульсов высокой энергии с высокой эффективностью.

[00178] Обычно вращатель Фарадея выполняет свою функцию, генерируя магнитное поле, ориентированное в направлении оптической оси. Некоторые вращатели Фарадея включают в себя постоянные магниты для "осуществления этой функциональной возможности.

[00179] Оптические материалы, используемые во вращателях Фарадея, обычно имеют высокую постоянную Вердета, низкий коэффициент поглощения, низкий нелинейный показатель преломления и высокий порог повреждения. Также, во избежание автофокусировки и других эффектов, связанных с нагревом, оптический путь обычно является коротким. Двумя наиболее широко используемыми материалами для диапазона 700-1100 нанометров являются боросиликатное стекло, легированное тербием, и кристалл тербий-галлиевого граната (TGG).

[00180] Варианты осуществления лазерного двигателя 1 или 1', где усилитель 300 не выводит усиленные импульсы через тот же оптический путь, по которому он принял их, может не нуждаться в использовании изолятора 500 Фарадея.

[00181] Фиг. 2 и 4 иллюстрируют, что свет, распространяющийся от изолятора 500

Фарадея, может поступать в усилитель. 300. Усилитель 300 может включать в себя лазерный кристалл или усиливающую среду 310 для усиления растянутых затравочных импульсов, которые совершают двусторонние прохождения между торцевыми зеркалами 321 и 322. Некоторые усилители 300 может включать в себя изломанный оптический путь (или "z-резонатор"), перенаправляющий лазерный пучок с помощью изламывающих зеркал для уменьшения пространственной протяженности резонатора. Усилитель 300, показанный на Фиг. 4, имеет четыре зеркала: два торцевых зеркала 321 и 322, образующие резонатор, и два изламывающих зеркала 323 и 324. В некоторых примерах, оптический путь может изламываться даже через самого себя, приобретая вид пересекающегося шаблона. Хотя использование большего количества изламывающих зеркал может еще больше уменьшать размер усилителя 300 за счет изламывания оптического пути в более компактное пространство, дополнительные зеркала повышают возможность рассогласования и цену.

[00182] Помимо лазерного кристалла 310 и зеркал 321-324, усилитель 300 может включать в себя переключаемый поляризатор 330, который регулирует добротность Q и, таким образом, функцию усиления усилителя 300, а также тонкопленочный поляризатор 340, который служит портом ввода/вывода для импульсов в резонаторе. Тонкопленочный поляризатор 340 является конкретным примером поляризационно-избирательного устройства, которое отражает свет с первой заранее определенной поляризацией, при этом пропуская свет со второй поляризацией, которая ортогональна первой заранее определенной поляризации. Переключаемым поляризатором 330 может поляризационное устройство, которое переключается между первым режимом работы, в котором поляризация света, проходящего через него, не вращается, и вторым режимом работы, в котором поляризация света вращается в соответствии с поступающим на него сигналом управления. Комбинация тонкопленочного поляризатора 340 и переключаемого поляризатора 330 можно использовать для управления, когда импульсы, приходящие от вращателя Фарадея 500, поступают в усилитель 300, и когда импульсы, усиленные внутри усилителя 300, выводятся из усилителя, как объяснено ниже.

[00183] Эта комбинация тонкопленочного поляризатора 340 и переключаемого поляризатора 330, показанная на Фиг. 4, является примером оптического переключателя для резонатора усилителя 300. Для этого оптического переключателя можно использовать и другие конструкции.

[00184] Принцип действия и структура усилителя 300 более подробно описаны ниже. В частности, будет показано, что изменение частоты повторения часто сопровождается изменением количества двусторонних прохождений, совершаемых усиленным импульсом между торцевыми зеркалами 321 и 322. Функция вышеописанного оптического переключателя состоит в регулировке количества этих двусторонних прохождений путем управления вводом и выводом импульсов в резонатор и из него.

[00185] Оптические элементы в усилителе 300 могут вносить определенную величину дисперсии в течение каждого из этих двусторонних прохождений. Таким образом, изменение количества двусторонних прохождений в усилителе 300 в связи с изменением частоты повторения изменяет совокупную дисперсию усиленных импульсов, выводимых усилителем 300. Даже если модуль 400 сжатия регулируется для компенсации дисперсии для конкретного количества двусторонних прохождений, изменение дисперсии вследствие изменения количества двусторонних прохождений нарушает важный баланс растяжения, дисперсионного усиления и сжатия модуля 200' растяжения, усилителя 300 и модуля 400 сжатия лазерного двигателя 1', показанного на Фиг. 1B, восстановление

которого требует длительной повторной калибровки. Даже более новаторская архитектура лазерного двигателя 1 с интегрированным модулем 200 растяжения-сжатия, показанная на Фиг. 1A, может требовать использования компенсирующего элемента, подлежащего регулировке при изменении количества двусторонних прохождений. Этот аспект ограничивает область применения этих лазерных двигателей.

[00186] Для расширения их области применения, некоторые лазерные двигатели могут включать в себя регулятор или компенсатор дисперсии в составе усилителя 300. Функция регулятора дисперсии предусматривает внесение дисперсии, противоположной и, по существу, равной дисперсии, вносимой оптическими элементами усилителя 300 в ходе двустороннего прохождения. В результате этой компенсации или регулировки дисперсии, импульсы приобретают небольшую или вовсе не приобретают дисперсию в ходе двусторонних прохождений в резонаторе усилителя 300. Таким образом, изменение количества двусторонних прохождении изменяет дисперсию усиленных импульсов лишь в небольшой степени или вовсе не изменяет ее.

[00187] Таким образом, частоту повторения лазерных импульсов можно изменять, по существу, без регулировки, повторного выравнивания или калибровки оптической структуры модуля 400 сжатия или модуля 200 растяжения-сжатия, поскольку дисперсия, подлежащая компенсации, не накапливается в ходе двусторонних прохождений. Соответственно, усилитель 300 с управляемой дисперсией можно реализовать в лазерном двигателе 1', показанном на Фиг. 1B, для освобождения модуля 4 00 сжатия от задачи повторных выравниваний, занимающих много времени, после изменения частот повторения. Кроме того, этот усилитель 300 с управляемой дисперсией позволяет использовать интегрированный модуль 200 растяжения-сжатия в лазерном двигателе 1, показанном на Фиг. 1A, без функциональных возможностей регулируемой компенсации.

[00188] Например, если лазерный кристалл 310 вносит положительную дисперсию в ходе двустороннего прохождения импульса лазерной генерации внутри резонатора, регулятор дисперсии может вносить отрицательную дисперсию той же величины в усиленные растянутые импульсы для подавления, минимизации или устранения дисперсии импульса лазерной генерации.

[0018 9] Полезной величиной, выражающей дисперсию, является "дисперсия групповой задержки", или GDD, часто определяемая как:

$$GDD = \frac{\lambda^3}{c^2}\frac{d^2 n(\lambda)}{d\lambda^2} L \quad (1),$$

где λ - длина волны света, c - скорость света, n(λ) - показатель преломления, зависящий от длины волны и L - длина оптического пути в резонаторе. GDD оптических элементов 310, 330 и 340, зеркал 321-324 и любого другого оптического элемента, который может присутствовать в усилителе 300, можно определять, например, путем измерения или выводить из конструкции. Зная GDD, регулятор дисперсии можно реализовать в резонаторе с GDD, значение которой приблизительно равно и противоположно по знаку определенной GDD оптических элементов усилителя 300. Резонатор подобной конструкции создает небольшую или вообще не создает дисперсию в ходе двусторонних прохождений импульсов, устраняя описанные проблемы и расширяя сферу применения лазерных двигателей 1 или 1'.

[00190] В иллюстративном примере, в типичном лазерном двигателе 1' на основе CPA, 500 фемтосекундный затравочный импульс может растягиваться на 200 пикосекунд с образованием растянутого импульса длиной 200,5 пс модулем 200' растяжения. Соответствующий модуль 400 сжатия можно регулировать и калибровать для

повторного сжатия растянутого импульса на 200 пс, получая сжатую длину импульса, в идеале, около 500 фс. С учетом дефектов, в реалистических случаях сжатая длина импульса может находиться в пределах 500-800 фс.

[00191] Однако, в ходе двусторонних прохождений растянутых импульсов в резонаторе усилителя 300, длина растянутых импульсов может увеличиваться за счет дисперсии различных оптических элементов усилителя 300, представленной GDD резонатора. Типичные значения GDD могут варьироваться от сотен фс^2 до сотен тысяч фс^2. В ряде случаев GDD может находиться в диапазоне 5,000 фс^2-20,000 фс^2. Поскольку обычно модуль 200 растяжения и компенсатор 4 00 взаимно нейтрализуют свое влияние на длину импульса, длина Δt(out) импульса, выводимого лазерным двигателем 1, связана с длиной Δt(seed) затравочного импульса, генерируемого генератором 100, и GDD следующим соотношением:

$$\Delta t(out) = \frac{\sqrt{\Delta t(seed)^4 + (4\ln 2N \times GDD)^2}}{\Delta t(seed)} = \Delta t(seed)\sqrt{1 + 7.69N^2 \times \left(\frac{GDD}{\Delta t(seed)^2}\right)^2} \quad (2)$$

где N - количество двусторонних прохождений в резонаторе.

[00192] Таким образом, например, длина Δt(seed)=200 фс затравочного импульса может увеличиваться всего лишь на 22 фс до Δt(out)=222 фс в ходе единичного двустороннего прохождения оптическими элементами усилителя с GDD 7,000 фс^2. Однако эта на первый взгляд небольшая дисперсия умножается в ходе повторных двусторонних прохождений. После N=10 двусторонних прохождений, длина выводимого импульса возрастает на около 790 фс до Δt(out)=990 фс, после N=30 двусторонних прохождений - на около 2,700 фс=2,7 пс до Δt(out)=2, 920 фс=2,9 пс, и после N=100 двусторонних прохождений - на около 9,5 пс до Δt(out)=9,7 пс. Очевидно, в отсутствие усилителя 300 с управляемой дисперсией это существенное ухудшение длины импульса с коэффициентом до около 50 превращает лазер из фемтосекундного лазера в пикосекундный лазер.

[00193] Кроме того, даже если модуль 200 или 400 сжатия калибруется для компенсации дополнительной дисперсии, обусловленной конкретным количеством двусторонних прохождений, например, дисперсии 9,5 пс, соответствующей N=100 двусторонних прохождений, когда применение требует изменения количества двусторонних прохождений от N=100 до, например, N=110, усилитель 300 индуцирует дополнительную дисперсию 1 пс, в результате чего, опять же, получается сжатая длина импульса порядка пикосекунд вместо фемтосекунд.

[00194] Напротив, варианты осуществления лазерного двигателя 1 или 1' могут иметь регулятор дисперсии внутри усилителя 300 для компенсации GDD, обусловленой оптическими элементами резонатора. Этот регулятор дисперсии может компенсировать несколько фс дисперсии при каждом двустороннем прохождении, вносимые оптическими элементами в усилителе. Таким образом, усилитель 300 может принимать растянутые импульсы с длиной импульса 200 пс и выдавать усиленные импульсы с, по существу, такой же длиной импульса 200 пс, приблизительно независимо от количества двусторонних прохождений, на котором работает усилитель, будь то 50, 100, 200 или 500. Таким образом, модуль 200 растяжения-сжатия лазерного двигателя 1, или модуль 400 сжатия лазерного двигателя 1', может сжимать длину импульса обратно в фемтосекундный диапазон для широкого диапазона количества двусторонних прохождений N и, следовательно, для широкого диапазона частот повторения без

необходимости в занимающих много времени повторной регулировке и калибровке других лазерных систем, где отсутствует настоящая регулировка или компенсация дисперсии внутри усилителя 300. Регулятор дисперсии внутри усилителя 300 располагается на внутреннем оптическом пути усилителя 300 и, таким образом, автоматически компенсирует GDD/дисперсию без необходимости в повторной регулировке оптических элементов вне оптического усилителя 300. Надлежащая конструкция регулятора дисперсии внутри усилителя 300 позволяет исключить необходимость наличия элементов регулируемой дисперсии вне оптического усилителя, например решеток компенсации дисперсии, показанных на Фиг. 3B, подлежащих повторной регулировке для изменения частоты повторения импульсов.

[00195] Исходя из вышеуказанных конструкционных соображений, лазерные двигатели 1 или 1' могут создавать лазерный пучок с длительностью импульса менее 1000 фемтосекунд с частотами повторения в диапазоне 10 кГц-2 МГц с, по существу, одной и той же конструкцией всех оптических элементов лазерного двигателя, отличных от оптических элементов генератора 100. Другие варианты осуществления могут работать с частотой повторения в пределах 50 кГц-1 МГц, а прочие - в пределах 100 кГц-500 кГц.

[00196] Таким образом, в этих лазерных двигателях, частоту повторения можно изменять от первого значения ко второму значению без изменения конструкции оптических элементов лазерного двигателя, отличных от оптических элементов генератора 100.

[00197] Могут существовать лазерные двигатели, где изменение частот повторения от их первого значения до второго значения сопровождается изменением конструкции оптических элементов. Однако некоторые из этих лазерных двигателей могут допускать модификацию на основе компенсации или регулировки дисперсии внутри своего усилителя, что позволяет модифицированным лазерным двигателям выводить лазерный пучок со второй частотой повторения также без модификации конструкции.

[00198] В различных реализациях лазерного двигателя 1 частоту повторения можно изменять от первого значения ко второму значению, где вторая частота повторения отличается от первой частоты повторения, по меньшей мере, на 10%, 50%, 100% или 200%.

[00199] в некоторых конструкциях, где в резонаторе применяются оптические волокна, регулировка частоты повторения также возможна без перенастройки и регулировки последующего модуля 400 сжатия. Однако, эти оптоволоконные лазеры (i) имеют серьезные ограничения по энергии импульсов, и (ii) часто не имеют модулей регулировки дисперсии. Они обычно вырабатывают импульсы с энергией ниже 10 микроджоулей (мкДж) в расчете на импульс во избежание опасности повреждения оптоволоконного резонатора. Как описано ниже, для многих офтальмологических и хирургических применений этой энергии в расчете на импульс может быть недостаточно, поскольку эти применения могут требовать 20 или более мкДж/импульс на мишени, что соответствует 30 или более мкДж/импульс на выходе лазера с учетом различных потерь.

[00200] Другое отличие состоит в том, что в оптоволоконных лазерах расхождение пучка неизбежно изменяется при изменении частоты повторения лазера вследствие изменения тепловой нагрузки.

[00201] Напротив, усилитель 300 обычно содержит регулятор или компенсатор дисперсии, и свет распространяется в свободном пространстве, что позволяет лазерному двигателю 1 или 1' в некоторых примерах выводить лазерный пучок с энергией в пределах 1-100 мкДж/импульс, в других примерах - с энергией в пределах 10-50 мкДж/

импульс, и в прочих примерах - с энергией в пределах 20-30 мкДж/импульс.

[00202] Некоторые лазерные, двигатели 1 или 1' могут быть сконфигурированы так, чтобы изменение частоты повторения сопровождалось регулировкой оптического элемента лазерного двигателя 1. Однако, вследствие присутствия регулятора дисперсии, даже в этих вариантах осуществления лазерный двигатель 1 или 1' может допускать модификацию, предусматривающую использование, по существу, одной и той же конструкции оптических элементов при изменении частоты повторения.

[00203] Вышеописанные примеры можно реализовать весьма разнообразно. В некоторых вариантах осуществления регулятор или компенсатор дисперсии внутри оптического усилителя может включать в себя одно или более чирпированных зеркал, чирпированные волокна, различные чирпированные решетки, чирпированные пропускающие оптические элементы, призмы и другие оптические элементы, способные изменять дисперсию падающего света.

[00204] В целом, чирпированные оптические элементы могут иметь ряд слоев с модулируемыми оптическими свойствами. В примерах, толщину слоев и изменение их показателя преломления можно приспособить для того, чтобы по-разному управлять светом с разными длинами волны. В порядке примера, чирпированная объемная брэгговская решетка (CVBG) описана выше в связи с модулем 200 растяжения-сжатия. Другие примеры, в частности, чирпированные зеркала могут включать в себя слои диэлектрических материалов, где каждый отдельный диэлектрический слой, или короткая стопка слоев, может отражать в малой окрестности конкретной длины волны. Чирпированное зеркало может быть построено путем формирования первой стопки из 5-10 диэлектрических слоев с толщиной, пригодной для отражения света с длиной волны вблизи первой длины волны. Затем можно формировать вторую стопку из 5-10 диэлектрических слоев поверх первой стопки, отличающихся толщиной и/или показателем преломления для отражения света с длиной волны вблизи второй длины волны и т.д. Будучи сформировано с достаточным количеством слоев в пригодном количестве стопок, чирпированное зеркало может отражать свет с компонентами длины волны в выбранном диапазоне длин волны, при этом пропуская свет с другими длинами волны.

[00205] Функция регулировки дисперсии в усилителе может осуществляться за счет выполнения одного или более зеркал 321-324 чирпированными. Согласно Фиг. 4, все четыре зеркала являются чирпированными. В других конструкциях чирпированными могут быть только одно или два зеркала. В прочих можно использовать один или более чирпированных оптических элементов. В качестве возможных реализаций регулятора дисперсии, эти одно или более чирпированных зеркал могут регулировать, компенсировать, минимизировать или даже устранять дисперсию, вносимую оптическими элементами 310, 330 и 340 и зеркалами 321-324 в ходе двустороннего прохождения усиленных растянутых лазерных импульсов внутри резонатора усилителя 300.

[00206] Лазерный кристалл 310 может быть выполнен на основе Nd или Yb. Примеры включают в себя кристаллы Nd:YAG и Yb:YAG. Другие реализации может использовать стекло, легированное Nd или Yb. Прочие - Yb:вольфраматы в форме $Yb:X(WO_4)_2$ или Yb: полуторные оксиды в форме $Yb:X_2O_3$. В этих случаях, X может обозначать Y, Lu, Gd или другие пригодные элементы. Уровень легирования Nd или Yb может находиться в диапазоне 0,1-100%.

[00207] Пространственный профиль легирования лазерного кристалла можно выбирать так, чтобы гарантировать выход высококачественных одномодовых лазерных

импульсов. Некоторые профили легирования могут быть совместимы с источником света накачки с ограниченной фокусируемостью, что выражается чрезвычайно большим коэффициентом M^2 света накачки. Источник накачки может иметь конфигурацию боковой накачки или торцевой накачки. Источник света накачки может содержать множественные диоды с выходом в волокно, например, 2-10 диодов, мощность излучения каждого из которых составляет 1-10 Вт. Диоды накачки могут работать в режиме, по существу, непрерывной волны (CW) или в аналогичном высокочастотном импульсном режиме. Они могут быть организованы в виде различных пространственных массивов, полос или в других формах. Свет из диодов может канализироваться через совместно используемую решетку, которая может возвращать к диодам очень малый процент света, таким образом, обеспечивая фазовую синхронизацию их света.

[00208] Фиг. 5A-B, совместно с Фиг. 4, иллюстрируют работу регенеративного усилителя 300 в режиме открытия резонатора CDRA. Принцип работы часто именуется "модуляцией добротности", что означает переключение добротности Q резонатора.

[00209] На фазе "перезарядки" или "накачки", тонкопленочный поляризатор 340 отражает входящий свет через переключаемый поляризатор 330. Переключаемый поляризатор 330 может представлять собой затвор, диск прерывателя, вращающуюся призму или зеркало, акустооптическое устройство, электрооптическое устройство, например, ячейку Поккельса или ячейку Керра, или переключаемую четвертьволновую пластину. В состоянии отсутствия смещения или низкого напряжения переключаемый поляризатор 330 может вращать плоскость поляризации на 90 градусов, когда импульсы проходят через него дважды, к торцевому зеркалу 322 и от него.

[00210] В течение периода перезарядки или накачки изолятор 500 Фарадея пропускает импульсы на тонкопленочный поляризатор 340, который перенаправляет их через переключаемый поляризатор 330. Возвращаясь от торцевого зеркала 322, импульсы второй раз пересекают переключаемый поляризатор 330. Они могут осуществлять одно двустороннее прохождение в резонаторе, проходя через переключаемый поляризатор 330 еще два раза на своем пути к торцевому зеркалу 322 и от него. После одного двустороннего прохождения эти четыре прохода через переключаемый поляризатор 330 вращают плоскость поляризации импульсов на 180 градусов. Таким образом, они отражаются из резонатора тонкопленочным поляризатором 340, по существу, без усиления.

[00211] В этот самый период перезарядки или накачки усилитель 300 также подавляет действие лазерной генерации света, генерируемого диодами накачки внутри резонатора, поскольку вращение плоскости поляризации переключаемым поляризатором 330 на 90 градусов при двойном проходе снижает добротность Q резонатора, делая резонатор непригодным для действия лазерной генерации.

[00212] Фиг. 5A иллюстрирует, что на этой фазе перезарядки/накачки лазерный кристалл 310 поглощает свет от вышеописанных диодов накачки или лазерных диодов накачки, в конфигурации боковой или торцевой накачки. Накачка повышает заселенность возбужденного энергетического уровня атомов или комплексов, участвующих в лазерной генерации, для создания инверсной заселенности, в сущности, поглощая и сохраняя энергию накачки или "усиления".

[00213] Фиг. 5B иллюстрирует, что на этой фазе перезарядки/накачки усиленные лазерные импульсы не генерируются и не испускаются усилителем 300. Отвергнутые неусиленные импульсы, конечно, испускаются усилителем 300.

[00214] Фиг. 5A-B иллюстрируют, что фаза накачки/перезарядки может заканчиваться, либо согласно заранее определенной операции хронирования, либо по команде

считывающей электроники, которая отслеживает хранение энергии в лазерном кристалле 310. В любом случае, спустя время t(recharge) управляющая и возбуждающая электроника может подавать высокое напряжение на переключаемый поляризатор 330 для остановки вращения плоскости поляризации на 90 градусов. Другие типы переключаемого поляризатора 330 могут переключаться разными средствами. Это изменение переключает добротность Q резонатора на достаточно высокое значение, чтобы сделать резонатор пригодным для действия лазерной генерации.

[00215] Варианты осуществления усилителя 300 одиночных импульсов могут переключать переключаемый поляризатор 300, тогда как одиночный импульс осуществляет свое двустороннее прохождение внутри резонатора. Когда на конце своего двустороннего прохождения одиночный импульс возвращается на переключаемый поляризатор 300 после его переключения, плоскость поляризации импульса больше не вращается, и, таким образом, импульс не отражается из резонатора тонкопленочным поляризатором 340. Вместо того чтобы отражаться, как в ходе фазы накачки, импульс может захватываться в резонаторе в течение нескольких дополнительных двусторонних прохождений в течение периода усиления длиной t(gain). На Фиг. 5B временная протяженность t(gain) для наглядности увеличена.

[00216] Фиг. 5A-B иллюстрируют, что в течение периода усиления энергия (или усиление), накачиваемая и сохраняемая в резонаторе, передается от лазерного кристалла 310 импульсу, совершающему двусторонние прохождения, посредством процесса, именуемого вынужденным излучением, начиная действие лазерной генерации. Соответственно, энергия в резонаторе снижается, как показано на Фиг. 5A, тогда как энергия в импульсе лазерной генерации растет в процессе усиления, как показано на Фиг. 5B. На Фиг. 5B пики в интервале t(gain) представляют энергию импульса лазерной генерации, когда он проходит конкретную точку в резонаторе, тогда как сплошная нарастающая кривая является огибающей, представляющей усиление энергии, усредненное по скользящему периоду двустороннего прохождения.

[00217] Заметим, что реализации, предусматривающие захват единичного входящего импульса в резонаторе, способны переносить почти всю энергию, хранящуюся в лазерном кристалле 310, в одиночный импульс лазерной генерации в ходе его двусторонних прохождений. Напротив, некоторые реализации допускают ввод множественных импульсов в резонатор. Однако в этих примерах результирующий лазерный пучок может иметь более низкую энергию в расчете на импульс, таким образом, снижая энергию в расчете на импульс ниже уровней, которые являются обычными и полезными для соответствующего типа фоторазрушения.

[00218] После того, как энергия, накачиваемая в резонатор, переносится в импульс лазерной генерации с высокой эффективностью в течение достаточного количества двусторонних прохождений, управляющая/возбуждающая электроника может прекращать подавать высокое напряжение на переключаемый поляризатор 330, заставляя его возобновлять вращение плоскости поляризации импульса лазерной генерации. Вследствие возобновления вращения поляризации, усиленный лазерный импульс затем отражается из резонатора тонкопленочным поляризатором 340 на конце следующего двустороннего прохождения, во время, обозначенное t(dump).

[00219] Управление выводом усиленных лазерных импульсов может осуществляться по-разному. В ряде случаев можно опираться на расчеты конструкции и компьютерные методы для задания количества двусторонних прохождений, после которого осуществляется вывод. В других случаях, для задания количества двусторонних прохождений" можно использовать предварительную калибровку. В прочих случаях,

на оптическом пути резонатора можно устанавливать разнообразные датчики. Этот датчик или датчики может/могут воспринимать, когда энергия усиленных импульсов лазерной генерации достигает заранее определенного значения, и подавать сигнал управления на контроллер, чтобы, соответственно, открывать резонатор.

[00220] Отражение усиленного лазерного импульса из резонатора и его передача на модуль 400 сжатия завершает цикл накачки-усиления-выпуска. По завершении вывода импульса, резонатор возвращается в состояние с низкой Q, возобновляя цикл накачки-усиления-выпуска. В некоторых конструкциях, порт ввода импульсов и порт вывода импульсов могут отличаться. Согласно Фиг. 4, оба эти порта реализованы в тонкопленочном поляризаторе 340.

[00221] В некоторых реализациях импульсы лазерной генерации совершают 50-500 двусторонних прохождений, в других примерах 100-200 двусторонних прохождений внутри резонатора для обеспечения переноса энергии из лазерного кристалла 310 в накачанном состоянии в импульс лазерной генерации. Как рассмотрено выше, генератор 100 может создавать цепочку затравочных импульсов с частотой в пределах 10-200 МГц, в ряде случаев в пределах 20-50 МГц. В некоторых реализациях, лазерный двигатель 1 или 1' выводит цепочку лазерных импульсов с частотой повторения в диапазонах 10 кГц-2 МГц, 50 кГц-1 МГц или 100 кГц-500 кГц. Таким образом, переключаемый поляризатор 330 прореживает входящую цепочку затравочных импульсов, захватывая только каждый 5-й - 20,000-й затравочный импульс для усиления. Управление хронированием этих последовательностей захвата может осуществляться с использованием генератора 100 в качестве главного тактового генератора.

[00222] Частота повторения является основной характеристикой лазерного двигателя. Более обширного разнообразия функциональных возможностей можно добиться, если (1) частоту повторения можно изменять в диапазоне частот, и (2) верхняя часть диапазона высока. Например, процедуру удаления катаракты можно оптимально осуществлять на первой частоте повторения, тогда как вторая частота повторения может лучше подходить для корнеальной процедуры. Единый лазерный двигатель можно использовать для обеих этих функциональных возможностей, если лазерный двигатель можно регулировать для работы, как на первой, так и на второй частоте повторения. Таким образом, ниже будут рассмотрены различные конструкционные соображения, исходя из которых, частота повторения должна быть переменной и верхний предел диапазона - высоким в лазерных двигателях 1 и 1'.

[00223] Как описано в связи с Фиг. 3B-C и Фиг. 4, использование регулятора дисперсии в усилителе 300, например, чирпированного зеркала для любого из зеркал 321-324, может компенсировать дисперсию импульса лазерной генерации, обусловленную оптическими элементами усилителя в ходе двустороннего прохождения в резонаторе. Этот конструкционный признак позволяет изменять частоту повторения лазерного двигателя 1 или 1' без изменения калибровки, выравнивания или конструкции оптических элементов модуля 200 растяжения и модуля 200/400 сжатия, например, решеток 201, 203, 205 и 207, линзы 202 и зеркал 204 и 208.

[00224] Вместо модификации оптической структуры, изменения частоты повторения можно добиться, подавая электрические сигналы управления для изменения хронирования и режима работы лазерного двигателя 1. Например, частоту повторения можно увеличивать подавая сигналы управления для уменьшения периода повторения t(rep) = t(recharge/pump) + t(gain).

[00225] Обычно, уменьшение t(rep) достигается уменьшением обеих величин t(pump) и t(gain). Время накачки t(pump) можно сократить, например, увеличив интенсивность

накачки

диодов/лазеров накачки. Время усиления t(gain) можно сократить, например, уменьшив количество двусторонних прохождений импульса лазерной генерации.

[00226] Энергию лазерного импульса можно сохранять, несмотря на уменьшение количества двусторонних прохождений, например, повышая усиление энергии при каждом двустороннем прохождении. Фиг. 5B иллюстрирует увеличение энергии импульса лазерной генерации в течение периода усиления, когда он проходит выбранную точку отсчета в резонаторе при каждом двустороннем прохождении. Отношение энергий в последующих прохождениях часто характеризуется коэффициентом усиления g ("малого сигнала"). Коэффициент усиления g чувствителен к полной энергии, хранящейся на возбужденном или накачанном уровне лазерного кристалла 310. Чем больше сохраненная энергия, тем выше коэффициент g. Таким образом, благодаря подаче сигналов управления для увеличения энергии, хранящейся на накачанном уровне усиливающей среды 310, импульс лазерной генерации может достигать той же энергии при меньшем количестве двусторонних прохождений, что позволяет увеличить частоту повторения.

[00227] Верхний предел диапазона частоты повторения можно также увеличивать различными способами. В вариантах осуществления с более высоким коэффициентом усиления g необходимо меньше двусторонних прохождений для получения того же усиления. Таким образом, некоторые реализации достигают высокого верхнего предела частоты повторения за счет использования лазерного кристалла 310, который имеет более высокий коэффициент усиления д.

[00228] Также, поскольку коэффициент усиления g чувствителен к полной энергии, хранящейся на возбужденном или накачанном уровне лазерного кристалла 310, накачка возбужденного уровня большей энергией является еще одним способом достижения более короткого t(gain) и, таким образом, более высокой частоты повторения.

[00229] Еще одним фактором, определяющим частоту повторения, является время, необходимое для одного двустороннего прохождения. Импульс лазерной генерации проходит точку отсчета с интервалами времени 2L/c, где L - длина оптического пути в резонаторе, и c - скорость света. Таким образом, в некоторых вариантах осуществления длину L оптического пути можно уменьшать для уменьшения времени двустороннего прохождения. В этих реализациях одно и то же количество двусторонних прохождений и, таким образом, перенос одной и той же энергии занимает меньшее время t(gain), что является еще одним способом повышения частоты повторения.

[00230] Благодаря реализации одного или более рассмотренных выше конструкционных принципов, варианты осуществления лазерного двигателя 1 или 1' могут действовать с частотой повторения до 500 кГц, 1 МГц или, в ряде случаев, 2 МГц.

[00231] Дополнительно, в этих реализациях сокращение t(gain) позволяет использовать более значительную часть полного периода повторения t(rep) для поддержки более благоприятного коэффициента заполнения цикла накачки и выпуска.

[00232] Коэффициент заполнения часто определяется как длина периода низкого Q, деленная на длину полного периода. Согласно этому определению, в реализации, например, с частотой повторения400 кГц, сокращение t(gain) от 1 мкс до 0,5 мкс приводит к увеличению коэффициента заполнения от 0,6 до 0,75, существенное увеличение 25%.

[00233] Возвращаясь к конструкционному принципу сокращения длины L оптического пути, заметим, что L определяется, помимо прочего, тем, насколько быстро переключаемый поляризатор 330 может переключаться для захвата импульса в резонаторе. В резонаторе с оптическим путем 1 метр время двустороннего прохождения

равно 2L/c=6,6 нс. Также с учетом конечной пространственной протяженности импульса, реализации одиночного импульса, таким образом, имеют переключаемый поляризатор 330 с временем переключения менее 5 нс, другие - менее 4 нс, или даже менее 3 нс.

[00234] В некоторых усилителях переключаемый поляризатор 330 может быть ячейкой Поккельса. Ячейки Поккельса часто прилагают сильное электрическое поле для вращения поляризации падающих световых пучков. Вращение поляризации пропорционально первой мощности электрического поля и, таким образом, может быть весьма сильным. Эффект Поккельса имеет место в кристаллах, не обладающих симметрией инверсии, например, ниобата лития или арсенида галлия и других не центросимметрических материалах.

[00235] Иногда подавая киловольты напряжения, ячейки Поккельса можно переключать из состояния вращения поляризации в состояние без вращения поляризации с очень коротким временем нарастания. Одной мерой времени нарастания является "время 5-95", время, необходимое для увеличения вращения плоскости поляризации от 5% до 95% максимального/насыщающего значения. В некоторых реализациях время нарастания может составлять менее 5 нс, в других - менее 4 нс, в прочих - менее 3 нс. Фактически, в некоторых реализациях, время нарастания ограничивается не динамикой самой ячейки Поккельса, а скорее динамикой переключающей электроники. Некоторые реализации могут использовать инновационную схему управления и возбуждения для обеспечения этого процесса быстрого переключения мощности.

[00236] Как описано выше, сокращение времени переключения ячейки Поккельса является эффективным способом сокращения t(gain), обеспечивающим повышенную частоту повторения. Кроме того, эти более быстродействующие ячейки Поккельса также позволяют уменьшить длину оптического пути и, таким образом, размер резонатора.

[00237] Кроме того, реализации лазерного двигателя 1 допускают наличие меньшего количества оптических элементов, чем в некоторых существующих лазерах. Это отчасти объясняется применением регулятора или компенсатор дисперсии, избавляющим от необходимости в регулируемых оптических элементах в модуле сжатия, а также интегрированной архитектурой 200 модуля растяжения-сжатия.

[00238] Хотя некоторые лазеры могут содержать сто или более оптических элементов, в некоторых реализациях лазерного двигателя 1 количество оптических элементов может быть меньше 75. В других - менее 50.

[00239] В некоторых реализациях количество оптических элементов в модулях, отличных от генератора, может составлять менее 50. В других - менее 35.

[00240] Здесь термин "оптический элемент" означает любой элемент, который влияет на оптическое свойство светового пучка. Примеры включают в себя: зеркало, линзу, параллельную пластину, поляризатор, изолятор, любой переключаемый оптический элемент, преломляющий элемент, пропускающий элемент и отражающий элемент.

[00241] Оптические элементы задаются поверхностями, где свет входит из воздуха и выходит в воздух. Таким образом, функциональный блок, например, объектив, не является одним "оптическим элементом", если содержит несколько линз, даже если линзы перемещаются строго совместно при движении объектива. Дело в том, что между линзами объектива свет распространяется в воздухе, каким бы малым ни было разделение. Даже если две линзы касаются друг друга без воздушного зазора в их центре, нецентральные пучки все же выходят из одной линзы в воздух, прежде чем войти в другую, и, таким образом, считаются двумя оптическими элементами. Заметим, что в схематических описаниях лазеров часто показано меньше оптических элементов,

чем необходимо для фактического функционирования лазера. Обычно, когда показана единичная линза, ее функциональные возможности не могут осуществляться фактической единичной линзой, а только тщательно спроектированной компоновкой линз. Таким образом, такие схематические описания обычно носят лишь иллюстративный характер и будут неработоспособны при точной реализации.

[00242] Реализации лазерного двигателя 1 с быстродействующими ячейками Поккельса, быстродействующей переключающей электроникой и малым количеством оптических элементов могут иметь оптический путь внутри резонатора короче 2 метров, другие - короче 1 метра. Соответственно, полный оптический путь лазерного двигателя от генерации фотонов в генераторе 100 и включающий в себя все двусторонние прохождения внутри резонатора усилителя 300, может составлять менее 500 метров, или 300 метров, или даже 150 метров.

[00243] Существующие фемтосекундные лазеры имеют полный оптический путь 500 метров или более и расстояние между торцевыми зеркалами резонатора 3-4 метра или более ввиду невозможности сократить оптический путь ниже этих значений без описанных здесь инновационных решений.

[00244] Список инновационных подсистем и признаков, которые могут способствовать уменьшению размера лазерного двигателя 1 включает в себя: (i) оптоволоконный генератор 100 вместо генератора со свободным пространством; (ii) интегрированный модуль 200 растяжения-сжатия, возможно, на основе единичной чирпированной объемной брэгговской решетки, не имеющий оптических элементов, подлежащих регулировке при изменении частоты повторения; (iii) усилитель 300 с компенсацией дисперсии, устраняющий необходимость в регулируемых оптических элементах в модуле 200 растяжения-сжатия при изменении частоты повторения; (iv) ячейку Поккельса с возможностью чрезвычайно быстрого переключения; (v) чрезвычайно быстродействующее электронное средство управления, способное работать с короткими временами нарастания при высоких напряжениях ячейки Поккельса включая киловольтный диапазон; и (vi) малое количество оптических элементов, для размещения которых требуется меньше места.

[00245] Лазерные двигатели, реализующие комбинацию всех этих признаков, могут поддерживать полную длину оптического пути в свободном пространстве менее 500 метров, в некоторых реализациях - менее 300 метров и в некоторых - менее 150 метров.

[00246] Также, усилитель 300 с некоторыми или всеми вышеупомянутыми соответствующими признаками может иметь оптический путь между торцевыми зеркалами длина менее 2 метров, в ряде случаев, менее 1 метра.

[00247] Во многих реализациях оптический путь многократно изломан, таким образом, физическая протяженность резонатора может быть значительно меньше длины пути. Короткие и изломанные оптические пути могут приводить к уменьшению общих размеров усилителя 300. В ряде случаев, ни один из габаритных размеров усилителя 300 не превышает 1 метр, в других случаях, 0,5 метра.

[00248] Соответственно, площадь основания всего лазерного двигателя 1, т.е. площадь, занимаемая им на ярусе лазерной системы, может составлять менее 1 $м^2$, в других случаях - 0,5 $м^2$, в прочих - 0,25 $м^2$ и, возможно, менее 0,1 $м^2$. Каждая из этих площадей или площадей основания может обеспечивать совершенно новые преимущества.

[00249] Усилитель 300 и лазерный двигатель 1 могут иметь эту чрезвычайно малую пространственную протяженность благодаря использованию одного или более из вышеописанных конструкционных принципов и компонентов. Таким образом,

пространственная протяженность может законно отличать усилитель 300 и лазерный двигатель 1 от других лазеров, где эти конструкционные принципы и компоненты не используются.

[00250] Также заслуживает упоминания другое соображение: существенно проще обслуживать подсистемы, находящиеся на верхнем ярусе лазерной системы и, таким образом, доступные путем простого удаления крышки, но без перемещения блоков система в и из корпуса лазерной системы. Такое перемещение может подвергать опасности чувствительные выравнивания блоков системы в заказном окружении (например, больнице), где обычно отсутствует точное оборудование для восстановления выравнивания. Таким образом, хотя установка различных компонентов хирургической лазерной системы один на другой может казаться еще одной возможностью уменьшения ее площадь основания, это серьезно затрудняет обслуживание лазерной системы.

[00251] Таким образом, уменьшение размера лазерного двигателя 1 позволяет размещать на верхнем ярусе лазерной системы другие подсистемы, которые также требуют доступа для обслуживания. Такие дополнительные подсистемы могут обеспечивать качественно новые функциональные возможности, таким образом, кардинально расширяя сферу применения лазерной системы в целом. Такие дополнительные подсистемы могут включать в себя систему формирования изображения для помощи в офтальмологической хирургии.

[00252] В итоге, вышеозначенные признаки, по отдельности или в комбинации, можно реализовать для построения физически компактных лазерных систем. Такая малая пространственная протяженность может быть ценным свойством, по меньшей мере, по следующим причинам: (i) офтальмологические хирургические лазерные системы часто устанавливаются в очень ценных операционных, где пространство и доступ в большом дефиците, в результате чего, предпочтение отдается лазерным системам с малой площадью основания; (ii) обслуживаемость лазерного двигателя качественно выше, если большинство или все его оптические компоненты помещаются на верхнем ярусе корпуса лазерной системы; и (iii) малые лазерные двигатели позволяют устанавливать на верхнем ярусе дополнительные системы, что добавляет лазерной системе в целом принципиально новые функциональные возможности, например, системы формирования изображения для помощи в офтальмологической хирургии.

[00253] Возвращаясь к отслеживанию пути усиленных растянутых лазерных импульсов, Фиг. 2 иллюстрирует, что, выйдя из усилителя 300, усиленный импульс может направляться обратно в изолятор 500 Фарадея. Одной из функций изолятора 500 Фарадея может быть перенаправление усиленных импульсов от генератора с эффективностью, близкой к 100%, что позволяет предотвращать повреждение генератора 100 усиленным импульсом.

[00254] В ряде случаев усиленные импульсы направляются на порт сжатия модуля 200 растяжения-сжатия через поляризаторы 550 и 560. Как описано выше, модуль 200 растяжения-сжатия может повторно сжимать усиленные импульсы и выдавать импульсный лазерный пучок с фемтосекундными импульсами.

[00255] Реализации лазерного двигателя 1 с использованием различных вышеописанных решений могут выводить лазерный пучок с длительностью импульса в пределах 1-1000 фемтосекунд (фс), в ряде случаев - 50-500 фс, и в прочих случаях - 100-300 фс. Эти фемтосекундные импульсы могут достигать чрезвычайно высоких энергий, например энергий в пределах 1-100 мкДж/импульс, в других случаях - 10-50 мкДж/импульс, и в прочих случаях - 20-30 мкДж/импульс.

[00256] Эти энергии импульсов могут обеспечивать полезные применения, не

доступные для лазеров, энергия импульса которых меньше 1, 10 или 20 мкДж/импульс, поскольку в глазу существует несколько разных взаимодействий между лазерным излучением и тканью, которые демонстрируют пороговое поведение. Существуют хирургические процедуры, в которых лазерные импульсы с энергиями ниже 1 мкДж/импульс не вызывают необходимой для хирургии модификации ткани. В других хирургических процедурах этот порог может составлять 10 или 20 мкДж/импульс.

[00257] Например, для хирургии катаракты требуется направлять лазерный пучок глубоко в ткань-мишень, например, на глубину 10 мм. Это требование ограничивает числовую апертуру, поэтому для обеспечения фоторазрушения необходимы более высокие значения энергии в расчете на импульс. В ряде случаев достаточно энергии 10-15 мкДж/импульс. Во избежание работы на максимальных значениях энергии, желательно применять устройства с 20 мкДж/импульс. Поскольку эти числа выражают энергии на мишени, с учетом потерь на оптическом пути, лазерная система может включать в себя лазеры с выходом 25-30 мкДж/импульс.

[00258] Например, в применении хирургии катаракты, для иссечения катаракт 1, 2, 3 или 4 степени могут требоваться энергии лазерного импульса выше соответствующих порогов. Например, в определенных обстоятельствах лазеры с энергиями импульсов выше 10-15 мкДж/импульс могут резать катаракты 1 степени, с энергиями импульсов выше 10-20 мкДж/импульс могут резать катаракты 2 степени, с энергиями импульсов выше 20 мкДж/импульс могут резать катаракты 3 степени и с энергиями импульсов выше 30-50 мкДж/импульс могут резать катаракты 4 степени. Эти пороговые энергии могут определяться несколькими факторами, включая длину импульса, частоту повторения, положение лазерного пятна во всей области мишени, и возраст пациента.

[00259] Воздействие лазерных импульсов является сильно нелинейной функцией их параметров в обширных классах тканей-мишеней. Таким образом, лазеры с одинаковой энергией импульса, но с разными длительностями импульса могут достигать разных результатов в хирургических мишенях. Например, пикосекундные импульсы с конкретным значением энергии импульса могут генерировать в офтальмологической ткани неуправляемо расширяющиеся пузырьки, тогда как фемтосекундные импульсы с аналогичной энергией импульса могут создавать пузырьки, которые остаются контролируемыми. Соответственно, вышеописанные значения энергии импульса могут генерироваться лазерными двигателями, испускающими фемтосекундные импульсы, т.е. импульсы длиной менее пикосекунды.

[002 60] Интенсивность лазерного пучка также можно выжать через его мощность. Например, лазер 20 мкДж/импульс с частотой повторения 50 кГц несет мощность 1 Вт. Выраженные через мощность, вышеописанные пороговые значения могут соответствовать пороговым мощностям 0,1 Вт, 1 Вт и 10 Вт при соответствующих частотах повторения. Таким образом, лазерные двигатели, способные испускать лазерные пучки, мощность которых превышает эти пороги, обеспечивают другие функциональные возможности.

[00261] Например, Администрация по контролю за продуктами питания и лекарствами FDA классифицирует медицинские лазеры по мощности. Класс лазеров 3B часто используется для офтальмологических процедур, поскольку воздействие таких лазеров досконально изучено. К классу 3B относятся лазеры с мощностью выходного пучка менее 0,5 Вт. Таким образом, лазеры мощностью менее 0,5 Вт обеспечивают существенно другие применения, чем лазеры с более высокой мощностью.

[00262] Фиг. 6A-D иллюстрируют функциональную возможность лазерного двигателя 1, связанную с его способностью к изменению частоты повторения с высокой скоростью.

В различных применениях хирургический лазерный пучок вызывает фоторазрушение в фокальной точке, где разрушаемая область со временем расширяется с образованием пузырька. При осуществлении сканирования фокальным пятном с помощью сканирующего оптического средства лазерной системы со скоростью сканирования, генерируется цепочка пузырьков. Эти цепочки пузырьков могут образовывать линии или поверхности с возможностью управления. Большое количество пузырьков снижает механическую целостность ткани-мишени вдоль этих линий или поверхностей, что позволяет легко разделять ткань-мишень вдоль линий или поверхностей. В сущности, сканирующий лазерный пучок "режет" ткань-мишень вдоль этих линий или поверхностей.

[00263] В некоторых репрезентативных случаях пузырьки могут составлять несколько микрон (мкм) в диаметре, будучи отделены друг от друга расстояниями порядка 10-50 мкм или более. Хирургическая лазерная система обычно создает пузырек один раз за каждый период повторения, обратную величину частоты повторения. Таким образом, пузырьки разнесены, по существу, равномерно при условии постоянной скорости сканирования лазерной системы.

[00264] Пузырьки, созданные лазерным импульсом, расширяются. В различных обстоятельствах это расширение может стать неуправляемым. Такое неуправляемое расширение пузырьков может приводить к сильному рассеянию последующие лазерные импульсы в области мишени, что сильно вредит точности и управляемости офтальмологической хирургии. Формирование пузырьков слишком близко друг к другу является одним из триггеров такого неуправляемого расширения, поскольку это может приводить к слиянию пузырьков. Другие возможные процессы, предусматривающие расширение пузырька, могут препятствовать дальнейшему формированию пузырьков, обуславливая взаимное влияние между ними, что опять-таки приводит к неуправляемому расширению пузырьков. Таким образом, поддержание заранее определенного разделения пузырьков в ходе сканирования может быть очень полезно для сохранения управляемости расширения пузырьков для офтальмологических хирургических лазерных систем.

[00265] Однако, сканирование фокальным пятном обычно осуществляется с помощью подвижных деталей, например, зеркал и гальво. С учетом чрезвычайно коротких периодов повторения, даже малейшая инерция и механическая задержка этих подвижных деталей может оказывать влияние на плотности пузырьков. Например, при сканировании вдоль некоторых хирургических шаблонов, скорость сканирования может снижаться в поворотных точках и углах, что может приводить к увеличению плотности лазерных пятен и пузырьков. В других случаях, сама геометрия хирургического шаблона приводит к повышению поверхностной плотности пузырьков, даже если линейная плотность пузырьков остается постоянной.

[00266] На Фиг. 6А показан пример, когда лазер с фиксированной частотой повторения осуществляет сканирование по извивающемуся хирургическому шаблону сканирования для создания разделительного листа в ткани-мишени. Однако, при приближении к точкам разворота или изгиба, сканирование замедляется, в то время как частота повторения остается постоянной, и, таким образом, создает повышенную линейной, а значит и поверхностную плотность пузырьков, ак показано. Такая повышенная плотность пузырьков может приводить к серьезным проблемам управления, как описано выше.

[00267] Эта техническая проблема решается в некоторых существующих лазерных системах включением дополнительных элементов, например, блокиратора пучка, который прерывает лазерный пучок при достижении таких поворотных точек во

избежание формирования областей с высокой плотностью пузырьков. Однако включение таких блокираторов пучка означает добавление в лазерную систему дополнительных элементов, работа которых должна выполняться в соответствии и синхронизироваться с самим сканированием. Все эти добавления сопряжены с дополнительными трудностями и повышением сложности.

[00268] Аналогичные проблемы возникают даже когда сканирование просто доходит до конца линии в шаблоне сканирования, что опять же приводит к снижению скорости сканирования и увеличению линейной плотности пузырьков.

[00269] На Фиг. 6B показано, что таких точек резкого разворота можно избежать, следуя шаблонам сканирования "с минимизацией ускорения". Примером шаблона с минимизацией ускорения является спираль, которая не имеет резких изгибов. Однако даже спиральный шаблон лишь снижает ускорение, но не исключает его. Таким образом, скорость сканирования все же изменяется в этих системах и, таким образом, фиксированный частота повторения все же следует выбирать так, чтобы плотность пузырьков не увеличивалась свыше порогового значения даже в секциях наименьшей скорости шаблона. Однако этот конструкционный принцип означает, что на протяжении большей части шаблона скорость сканирования ниже, чем может поддерживать система для достижения плотности пузырьков, необходимой для обеспечения функции резания или разделения. Эквивалентно, при использовании более высокой скорости сканирования, разделение пузырьков может уменьшаться, приводя к помехе или взаимному влиянию между формирующимися пузырьками. Все эти эффекты повышают опасность неуправляемого или недетерминистического расширения пузырьков.

[00270] Реализации лазерного двигателя 1 можно приспособить для обеспечения полезной функциональной возможности в этом контексте. Уникальная конструкция, в целом, и регулятор дисперсии усилителя 300, в частности, позволяет изменять частоту повторения, по существу, синхронно с изменением скорости сканирования. В некоторых лазерных двигателях частота повторения может изменяться по времени изменения в пределах 10 мкс-1 с, в некоторых особых случаях, в пределах 1 мкс-1 с. Таким образом, некоторые реализации могут включать в себя электронное средство управления для снижения частоты повторения лазерного двигателя 1 согласно расчетному или измеренному снижению скорости сканирования вдоль хирургического шаблона для поддержания почти постоянной плотности пузырьков в области мишени. Такой приблизительно постоянная плотность пузырьков можно добиться, например, изменяя частоту повторения пропорционально изменяющейся скорости сканирования. Благодаря этой функциональной возможности, лазерные двигатели 1 или 1' получают возможность формировать пузырьки с почти однородной линейной или поверхностной плотностью или разделением пузырьков и, таким образом, препятствовать или противодействовать неуправляемому расширению пузырьков.

[00271] На Фиг. 6C иллюстрирует хирургический шаблон сканирования с такими же изгибами, как на фиг Фиг. 6A, где частота повторения снижается по мере перемещения сканирующего пучка вокруг изгиба, создавая разрез с, по существу, равномерным линейным разделением между пузырьками.

[00272] Фиг. 6D иллюстрирует спиральный хирургический шаблон, в котором частота повторения снижается по мере схождения спирали к центру, причем в отсутствие этого снижения пузырьки располагались бы слишком близко друг к другу. Таким образом, этот вариант осуществления, опять же, позволяет создавать, по существу, однородную поверхностную плотность пузырьков.

[00273] Конечно, высокая изменчивость частоты повторения также позволяет

создавать пузырьки не только с постоянной плотностью, но и с заранее определенным профилем плотности. Например, твердость ядра глаза увеличивается по направлению к центру. Таким образом, в некоторых реализациях, плотность пузырьков может увеличиваться при прохождении сканирующего пучка через центр ядра, и уменьшаться по мере удаления от центра. Большое количество разных профилей плотность могут иметь различные медицинские преимущества и достоинства. Профиль плотности также можно регулировать не на заранее определенной основе, но в соответствии с формированием изображения или считывания области мишени.

[00274] Фиг. 7A-D иллюстрируют еще один конструкционный признак, помогающий лазерным двигателям изменять частоту повторения, по существу, синхронно со сканированием или, по меньшей мере, во временных рамках офтальмологической хирургии, например, в течение 60-120 секунд.

[00275] Фиг. 7A-B иллюстрируют явление, именуемое тепловой фокусировкой, и его влияние на конструкцию лазера. Когда лазерный кристалл 310 накачивается диодами накачки и затем переносит свою энергию за счет усиления лазерного импульса, его температура T растет. Температура T часто растет неравномерно: обычно температура максимальна в накачанной центральной области, возможно, достигая пика на оптической оси или вблизи нее, и снижается с увеличением радиального расстояния.

[00276] Этот неравномерный рост температуры приводит к, по меньшей мере, двум результатам: (i) поскольку показатель преломления n растет с температурой: n=n(T), он достигает максимума в центральной области лазерного кристалла 310; и (ii) в результате повышения температуры центральная область лазерного кристалла 310 подвергается большему тепловому расширению, чем окружающая ее область, и, таким образом, вспучивается, удерживаясь более холодной внешней областью. Оба эти результата приводят к фокусировке падающих параллельных лучей. Это явление называется тепловой фокусировкой. Эта тепловая фокусировка символически представлена лазерным кристаллом с линзой 310'. Тепловая линза может обеспечивать преломление в несколько диоптрий и, таким образом, также может вносить существенные изменения в характеристики лазерного двигателя.

[00277] Фиг. 7A иллюстрирует, что конструкция лазерного двигателя обычно предусматривает определение преломляющих эффектов тепловой фокусировки лазерным кристаллом при рабочей температуре $T=T_{op}$, которая определяется рабочей частотой повторения и мощностью пучка, и внесение преломляющей компенсации тепловой фокусировки через другие оптические элементы лазерного двигателя. Например, можно обеспечить дополнительную линзу 312, которая может восстанавливать параллельный пучок из сходящегося пучка после фокусировки тепловой линзой 310'.

[00278] Фиг. 7B иллюстрирует, что такая преломляющая компенсация пригодна для конкретной рабочей температуры $T=T_{op}$ и, таким образом, только для конкретной частоты повторения и мощности пучка. Действительно, если применение требует изменения частоты повторения или мощности, измененная частота повторения и/или измененная мощность изменяет температуру T лазерного кристалла 310 от $T=T_{op}$ до $T=T_{op}'$. Это изменение температуры изменяет фокусировку, осуществляемую тепловой линзой (от сходящегося пучка, представленного, пунктирными линиями до пучка, представленного сплошными линиями), преобразуя пучок, который был параллельным при $T=T_{op}$, в расходящийся при $T=T_{op}'$, таким образом, имеющий надлежащие свойства схождения.

[00279] Фиг. 7B также иллюстрирует, что свойства схождения можно восстанавливать,

регулируя преломляющую компенсацию. Изменение преломляющей компенсации обычно требует регулировки одного или более оптических элементов лазерного двигателя, например, перемещения линзы, вращения решетки или перемещения пучка относительно оптической оси. На Фиг. 7B показана регулировка компенсирующей линзы 312 вдоль оптической оси, как указано стрелкой. Аналогично ранее описанной компенсации дисперсии, эта преломляющая компенсация путем механических регулировок также осуществляется медленно и требует тонкой настройки и калибровки. Таким образом, в большинстве лазеров полностью обходят эту проблему и не допускают изменения частоты повторения. И даже в тех лазерах, которые позволяют изменять частоту повторения, частота не может изменяться почти синхронно со сканированием лазерных двигателей, даже во временных рамках офтальмологической хирургии ввиду медленности регулировки компенсирующих оптических элементов.

[00280] Фиг. 7C-D иллюстрируют реализации лазерного двигателя 1, где применяются различные конструкционные принципы для минимизации влияния тепловой фокусировки. Преломление тепловой линзой 310' может в значительной степени снижаться, если большинство или все лучи распространяются через центр тепловой линзы 310' или очень близко к нему, поскольку лучи, пересекающие линзу в ее центре, не преломляются на уровне аппроксимации геометрической оптики. На уровне волновой оптики и при включении конечной протяженности линзы, эти центральные лучи преломляются, но только в минимальной степени.

[00281] Фиг. 7C иллюстрирует, что лучи могут сходиться для попадания в центр линзы, например (i) используя вариант осуществления торцевого зеркала 322, которое имеет фокусирующее действие; (ii) располагая лазерный кристалл 310/310' тепловой фокусировки очень близко к фокальной точке фокусирующего торцевого зеркала 322, благодаря чему, большинство лучей от фокусирующего торцевого зеркала 322 попадают в центр лазерного кристалла 310/310' тепловой фокусировки; и (iii) располагая другое торцевое зеркало 321 также очень близко к фокальной точке фокусирующего торцевого зеркала 322 и, таким образом, к фокусирующему кристаллу 310, чтобы гарантировать, что пучок отражается обратно в него, вместо того, чтобы расходиться. В таких конструкциях, когда частота повторения или мощность пучка изменяется, таким образом, изменяя температуру лазерного кристалла 310 от $T=T_{op}$ до $T=T_{op}'$, не существует насущной необходимости в повторной регулировке какого-либо механического или оптического элемента лазерного двигателя 1, поскольку преломляющее действие лазерного кристалла 310 минимизировано. Таким образом, частота повторения или мощность пучка может изменяться без какой-либо соответствующей регулировки преломляющего компенсатора.

[00282] Согласно Фиг. 4, в различных вариантах осуществления любое одно или более из торцевых зеркал и изламывающих зеркал 321-324 могут иметь описанное фокусирующее действие.

[00283] Конструкционные параметры этого варианта осуществления, включающие в себя d1, расстояние между торцевым зеркалом 321 и фокусирующим кристаллом 310, d2, расстояние между фокусирующим кристаллом 310 и фокусирующим торцевым зеркалом 322, и другие параметры, например, апертуры, толщина фокусирующего кристалла 310, и радиусы фокусирующего торцевого зеркала 322, можно оптимизировать для дальнейшей минимизации уже сниженной тепловой фокусировки.

[00284] Фиг. 7D иллюстрирует соответствующую конструкцию. В этом варианте осуществления оба торцевых зеркала 321 и 322 относятся к фокусирующему типу. Этот пример дополнительно снижает тепловую фокусировку, поскольку лазерный кристалл

310 можно поместить в совместную фокальную точку двух торцевых зеркал с более высокой точностью. Опять же, другие параметры могут подвергаться дополнительной конструкционной оптимизации.

[00285] Фиг. 8 иллюстрирует количественное описание подавления тепловой фокусировки в лазерном двигателе 1. По горизонтальной оси отложено отношение рабочей температуры центра кристалла $T_{operating}=T_{op}$ К температуре окружающей среды $T_{ambient}$. По вертикальной оси отложена оптическая мощность лазерного пучка, испускаемого лазерным двигателем 1. График показывает, что, даже если операция лазерной генерации нагревает лазерный двигатель 10-50% выше температуры окружающей среды, оптическая мощность изменяется лишь на несколько %, достигая около 10% при $T_{operating}/T_{ambient}=150\%$. Оптическая мощность лазерного кристалла 310 изменяется так мало в таком широком диапазоне рабочих температур, поскольку преломляющее действие тепловой фокусировки лазерного кристалла 310 эффективно минимизируется конструкциями, показанными на Фиг. 7C и Фиг. 7D.

[00286] Вышеприведенное подробное описание обеспечивает конструкционные принципы и примеры, которые можно использовать для достижения функциональной возможности изменения частоты повторения без необходимости производства регулировок оптических элементов вне генератора 100, включающих в себя (i) использование компенсации дисперсии внутри усилителя 300; (ii) использование интегрированного модуля 200 растяжения-сжатия; и (iii) использование архитектур резонатора, которые минимизируют тепловую фокусировку, а также другие вышеописанные конструкционные соображения. Лазерные двигатели, использующие один или более из вышеописанных конструкционных признаков или аналоги, могут обеспечивать изменение частоты повторения в диапазонах частоты повторения во временах изменения, вызывая лишь ограниченную модификацию лазерного пучка.

[00287] Здесь диапазон частоты повторения может составлять 10 кГц-2 МГц или 50 кГц-1 МГц или 100 кГц-500 кГц, причем каждый из этих диапазонов обеспечивает конкретные функциональные возможности.

[00288] Временем изменения может быть временная протяженность многоэтапной офтальмологической хирургии, например, в пределах 1-120 секунд или 10-60 секунд или 20-50 секунд, в зависимости от типа хирургии. Лазерные двигатели, время изменения которых находится в этих диапазонах, могут поддерживать изменение частоты повторения для переключения от частоты, необходимой для первой хирургической процедуры до частоты, необходимой для второй хирургической процедуры.

[00289] В других случаях, например, в вариантах осуществления, описанных в связи с Фиг. 6A-D, временем изменения может быть временная протяженность, заданная скоростью сканирования лазерной системы, например, кратная периоду повторения, где кратность может находиться в диапазоне 1-10,000, или 100-1,000. Поскольку период повторения составляет около 100 микросекунд (100 мкс) при 10 кГц и 1 мкс при 1 МГц, эти "времена изменения хронирования" или "времена изменения, синхронные со сканированием" могут находиться в диапазоне 1 мкс-1 с.

[00290] Линейная плотность пузырьков сохраняется в некоторых реализациях за счет изменения частоты повторения в соответствии с изменением скорости сканирования, благодаря чему, отношение скорости сканирования и частоты повторения остается, по существу, постоянной.

[00291] Лазерный пучок можно модифицировать в ограниченной степени путем изменения частоты повторения. Эту модификацию можно обеспечивать различными

способами, в том числе: (i) диаметр пучка изменяется менее чем на 10% или 20%; или (ii) центр пучка перемещается менее чем на 20% или 4 0% диаметра пучка. Здесь диаметр пучка можно определять по-разному, например, как диаметр, где интенсивность пучка составляет 50% интенсивности в центре пучка. Можно использовать и другие определения.

[00292] Примером является лазерный двигатель 1, который может испускать лазерный пучок с частотой повторения 100 кГц и диаметром пучка в фокальном пятне 3 микрона, где частота повторения лазерного пучка может изменяться до 150 кГц путем регулировки только генератора 100 с временем изменения 15 секунд, и несмотря на это значительное изменение, пучок изменяется только в ограниченной степени: диаметр фокального пятна изменяется только на 15% до 3,45 микрона, и его центр перемещается относительно оптической оси только на 30% диаметра пучка, т.е. на 0,9 микрона. Такой лазерный двигатель можно использовать для осуществления хирургии катаракты с частотой повторения 100 кГц, при том, что его частота повторения изменяется до 150 кГц за 15 секунд и снова используется для осуществления последующей корнеальной процедуры с частотой повторения 150 кГц, при этом вся процедура занимает не более 100 или 120 секунд, при поддержании очень высокого качества пучка.

[00293] В другом примере лазерный двигатель 1 может испускать лазерный пучок с частотой повторения 100 кГц и диаметром пучка 4 микрона. Когда сканирование приближается к резкому изгибу хирургического шаблона, где скорость сканирования снижается до половины обычной скорости сканирования, частота повторения может, соответственно, постепенно снижаться до половины своего значения, т.е. от 100 кГц до 50 кГц для поддержания почти постоянной линейной плотности генерируемых пузырьков или пятен. Если это замедление осуществляется, например, за 10 периодов повторения при частоте повторения 100 кГц, то полное время изменения частоты повторения составляет около 100 мкс.

[00294] Частота повторения может изменяться в несколько этапов или постепенно, в конечном итоге, частота повторения изменяется почти синхронно с изменением временной протяженности сканирования лазерного пучка, от 100 кГц до 50 кГц в течение около 100 мкс. Конструкция лазерного двигателя 1 позволяет изменять частоту повторения за это весьма короткое время при поддержании высокого качества лазерного пучка. В примере, лазерный пучок может иметь диаметр 4 микрон при 100 кГц, который изменяется только на 10% до 3,6 микрона, когда частота повторения снижается до 50 кГц, и центр лазерного пучка перемещается от оптической оси только на 20% диаметра пучка, т.е. на 0,8 микрона.

[00295] Еще один способ выражения способности лазерного двигателя 1 поддерживать высокое качество пучка при изменении частоты повторения основан на общеизвестной плоскости устойчивости g1-g2. Реализации лазерного двигателя 1 могут сохранять параметры g1 и g2 пучка в гиперболической области устойчивости в широком диапазоне частот повторения, например, в диапазоне 10 кГц-2 МГц или 10 кГц-500 кГц или 50 кГц-200 кГц.

[00296] Малое количество оптических элементов может быть критической и отличительной характеристикой реализаций лазерного двигателя 1 с еще одной точки зрения. Фемтосекундные лазеры, в целом, являются устройствами с режущей кромкой, очень чувствительными и легко разрегулируемыми под действием окружающей среды, вследствие нарушений инструкций по эксплуатации и даже непосредственного износа, например, эффектов самонагрева. Таким образом, оптические элементы фемтосекундных лазеров могут требовать тонкой настройки, повторной регулировки и регулярного

обслуживания с короткими интервалами времени. Типичные фемтосекундные лазеры могут содержать сто или более оптических элементов, и отказ любого из этих оптических элементов могут приводить к отказу всего лазера.

[00297] Некоторые типичный лазеры могут испытывать отказ после 30-60 циклов, т.е. включения и выключения питания лазерного двигателя. Для предотвращения отказов в ходе эксплуатации, операторы некоторых лазерных систем должны планировать регулярные и дорогостоящие сеансы обслуживания, со всеми сопутствующими затратами и периодами простоя, но не могут исключить опасность отказа на месте с разрушительными последствиями.

[00298] Напротив, варианты осуществления лазерного двигателя 1 допускают циклирование более 120 раз путем включения и выключения питания без необходимости в повторной регулировке какого-либо оптического элементп лазерного двигателя 1. Для некоторых вариантов осуществления число циклов может быть больше 180 или даже 240.

[00299] В хирургических операциях, для минимизации проблем, связанных с нагреванием и охлаждением лазерного кристалла 310, лазер часто включается утром и отключается только вечером, т.е. хирургические лазеры часто циклируются раз в день. В простой оценке, если лазеры используются пять раз в неделю, таким образом, приблизительно 20 раз в месяц, то 30-кратное циклирование может означать высокую вероятность отказа спустя 1,5 месяца, и 60-кратное циклирование - 3 месяца.

[00300] Напротив, некоторые реализации лазерного двигателя 1 допускают циклирование более 120 раз, что означает 6 месяцев низкой вероятности отказа. Другие реализации допускают циклирование 180 или 240 раз, что означает 9 месяцев или целый год низкой вероятности отказа. Таким образом, варианты осуществления лазерного двигателя 1 допускают эксплуатацию с расписанием профилактического обслуживания, которое значительно снижает нагрузку на пользователя, а также поставщика услуг. Также, такое расписание с низкой частотой обслуживания допускает различные типы обслуживания, например, замену целых секций лазерной системы. В ряде случаев можно просто заменить на месте весь лазерный двигатель 1 только что обслуженным, и обслуживание лазерного двигателя 1 может осуществляться в высокотехнологичном окружении базы поставщика услуг, а не низкотехнологичном окружении хирурга.

[00301] Хотя этот документ содержит много конкретных сведений, их не следует рассматривать как ограничения объема изобретения или формулы изобретения, но как описания признаков, специфических для конкретных вариантов осуществления изобретения. Определенные признаки, которые описаны в этом документе применительно к отдельным вариантам осуществления, также можно совместно реализовать в едином варианте осуществления. Напротив, различные признаки, которые описаны применительно к единому варианту осуществления, также можно реализовать по отдельности во множественных вариантах осуществления или в любой пригодной подкомбинации. Кроме того, хотя признаки могли быть описаны выше как действующие в определенных комбинациях и даже первоначально заявлены таким образом, один или более признаков из заявленной комбинации можно в ряде случаев исключать из комбинации, и заявленную комбинацию можно направлять в подкомбинацию или изменение подкомбинации.

[00302] Раскрыт ряд реализаций методов, устройства и систем лазерной хирургии с возможностью формирования изображения. Однако на основе вышеприведенного описания можно предложить изменения и усовершенствования описанных реализаций, и другие реализации.

(57) Формула изобретения

1. Способ сканирования с помощью лазерной системы, причем способ содержит этапы, на которых:

генерируют фемтосекундные затравочные импульсы с помощью генератора,

увеличивают длительность затравочных импульсов с помощью модуля растяжения,

усиливают растянутые затравочные импульсы с образованием лазерных импульсов с помощью усилителя,

компенсируют дисперсию групповой задержки лазерных импульсов в диапазоне 5,000-20,000 $фс^2$ с помощью компенсатора дисперсии между торцевыми зеркалами усилителя,

выводят лазерные импульсы из усилителя с помощью оптического переключателя при первой частоте повторения,

уменьшают длительность лазерных импульсов в диапазоне 1-1,000 фс с помощью модуля сжатия,

фокусируют лазерные импульсы в фокальное пятно в первой области мишени с помощью системы доставки сканирующего лазерного пучка,

осуществляют сканирование фокальным пятном с первой частотой повторения в первой области мишени с помощью системы доставки сканирующего лазерного пучка,

изменяют первую частоту повторения на вторую частоту повторения с помощью модуля управления частотой повторения, и

осуществляют сканирование фокальным пятном со второй частотой повторения во второй области мишени с помощью системы доставки сканирующего лазерного пучка.

2. Способ по п. 1, содержащий этапы, на которых:

осуществляют сканирование фокальным пятном в первой области мишени с первой скоростью сканирования,

изменяют первую скорость сканирования на вторую скорость сканирования с помощью процессора системы, доставки сканирующего лазерного пучка, и

осуществляют сканирование фокальным пятном во второй области мишени со второй скоростью сканирования.

3. Способ по п. 1, в котором:

первая область мишени является по меньшей мере одной из области линзы и области катаракты, и

вторая область мишени является роговичной областью.

4. Способ по п. 1, в котором:

первая область мишени является роговичной областью, и

вторая область мишени является по меньшей мере одной из области линзы и области катаракты.

5. Способ по п. 1, в котором:

первая частота повторения меньше или равна 100 кГц, и

вторая частота повторения больше 100 кГц.

6. Способ по п. 5, в котором:

вторая частота повторения составляет 150 кГц.

7. Способ по п. 1, в котором:

модуль сжатия и модуль растяжения объединены в модуль растяжения-сжатия.

8. Способ по п. 1, в котором:

оптический переключатель включает в себя переключаемый поляризатор, выполненный с возможностью вращения плоскостью поляризации растянутых

импульсов в усилителе, причем переключаемый поляризатор имеет время нарастания менее 5 нс.

9. Способ по п. 8, в котором система доставки сканирующего лазерного пучка содержит:

электронное средство управления, выполненное с возможностью подачи сигналов управления переключаемому поляризатору для обеспечения переключения переключаемого поляризатора с временем нарастания менее 5 нс.

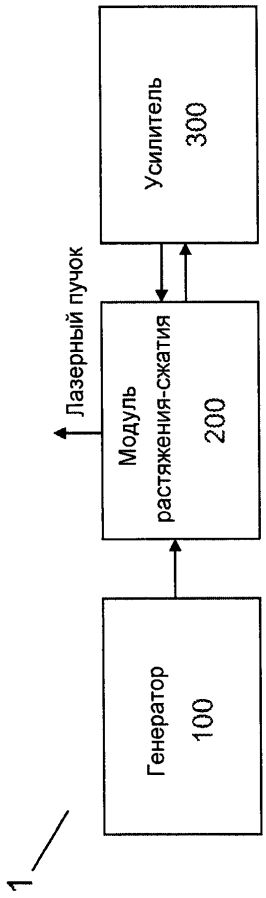
10. Способ по п. 1, в котором этап изменения первой частоты повторения на вторую частоту повторения содержит этап, на котором:

изменяют количество двусторонних прохождений лазерных импульсов перед этапом вывода лазерных импульсов из усилителя с помощью оптического переключателя.

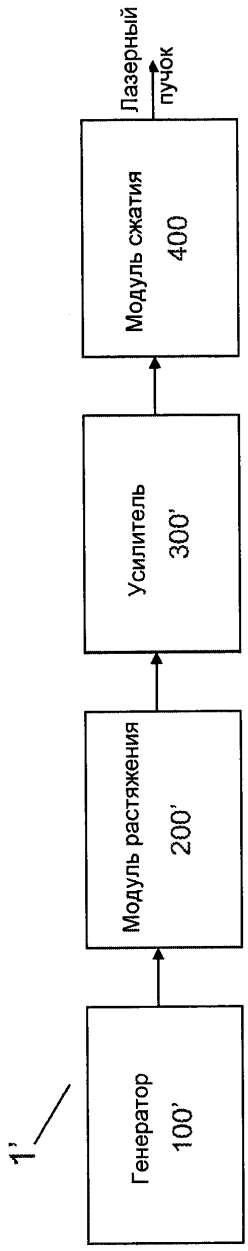
11. Способ по п. 1, в котором этап изменения первой частоты повторения на вторую частоту повторения содержит этап, на котором:

изменяют первую частоту повторения на вторую частоту повторения в момент времени в диапазоне 1 мкс - 1 с.

1

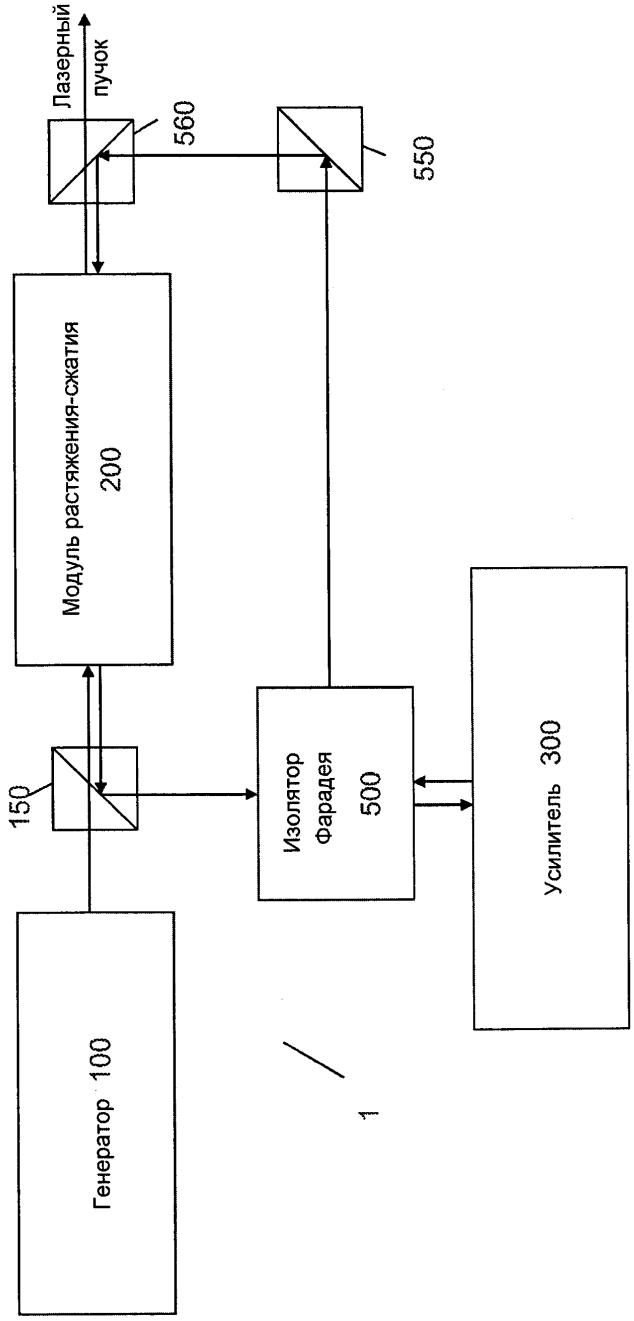


ФИГ.1А



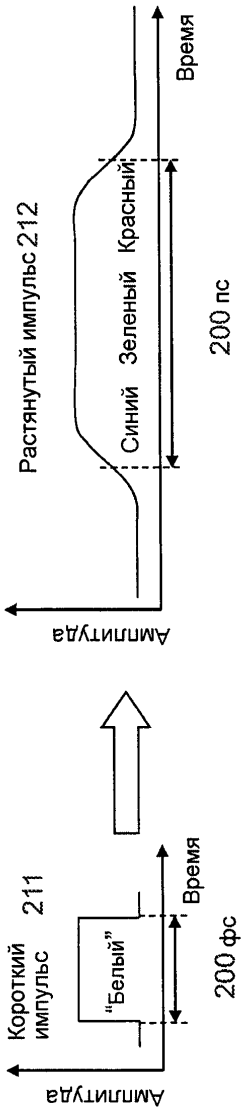
ФИГ.1В

2


Лазерный пучок
560
550
Модуль растяжения-сжатия 200
150
Изолятор Фарадея 500
Усилитель 300
Генератор 100
1

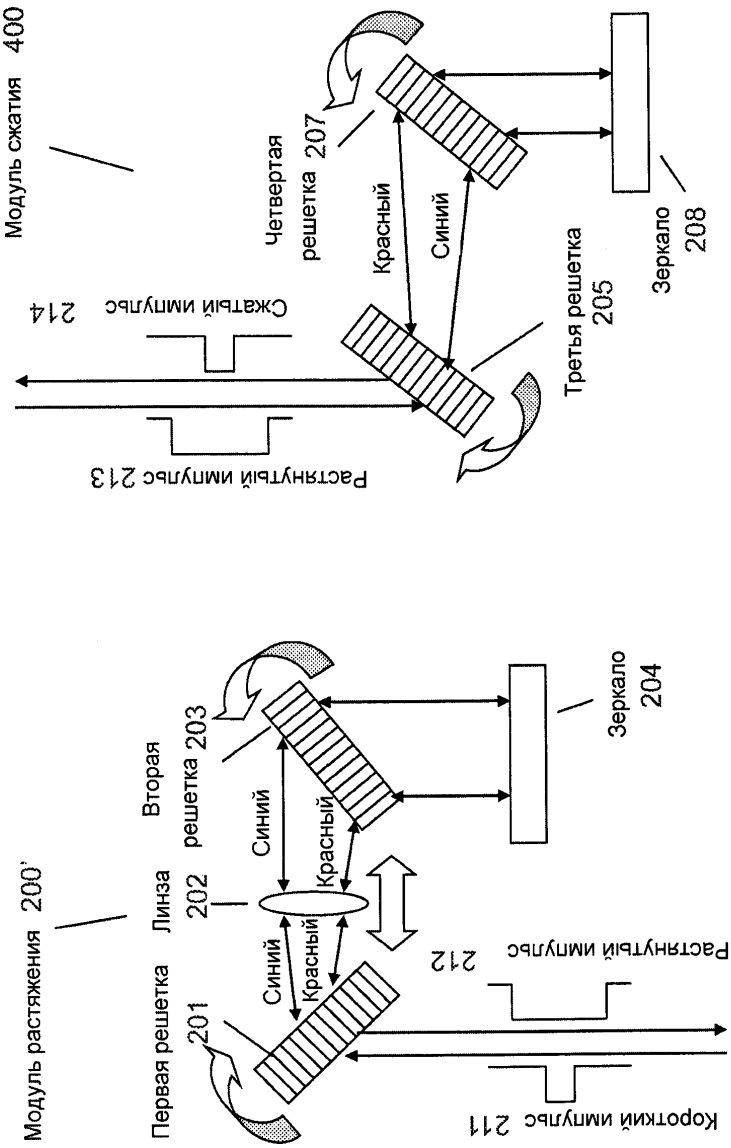
ФИГ.2

3

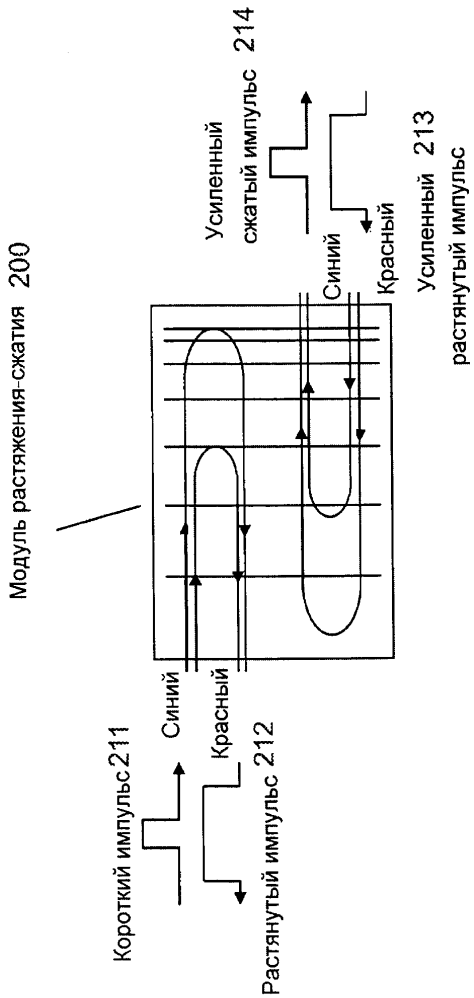

Амплитуда
Время
Короткий импульс 211
"Белый"
200 фс
Амплитуда
Время
Растянутый импульс 212
Синий
Зеленый
Красный
200 пс

ФИГ.3А

4

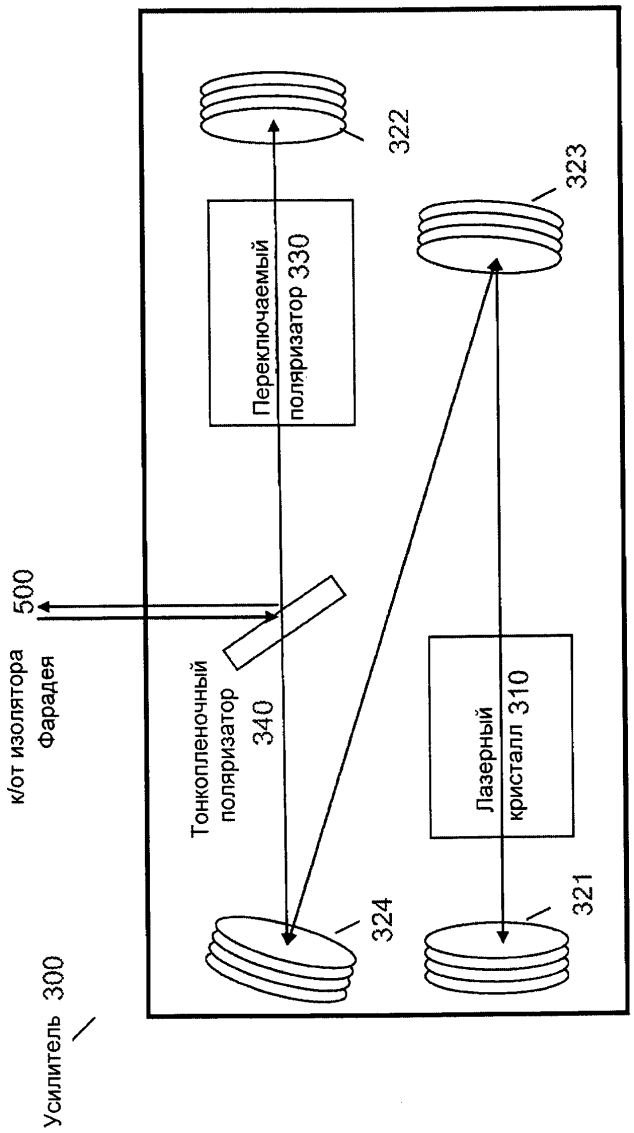

Модуль растяжения 200'
Первая решетка 201
Линза 202
Вторая решетка 203
Зеркало 204
Третья решетка 205
Четвертая решетка 207
Зеркало 208
Модуль сжатия 400
Синий
Красный
Синий
Красный
Растянутый импульс 212
Короткий импульс 211
Растянутый импульс 213
Сжатый импульс 214

ФИГ.3В


Модуль растяжения-сжатия 200
Короткий импульс 211
Синий
Красный
Растянутый импульс 212
Усиленный сжатый импульс 214
Синий
Красный
Усиленный растянутый импульс 213

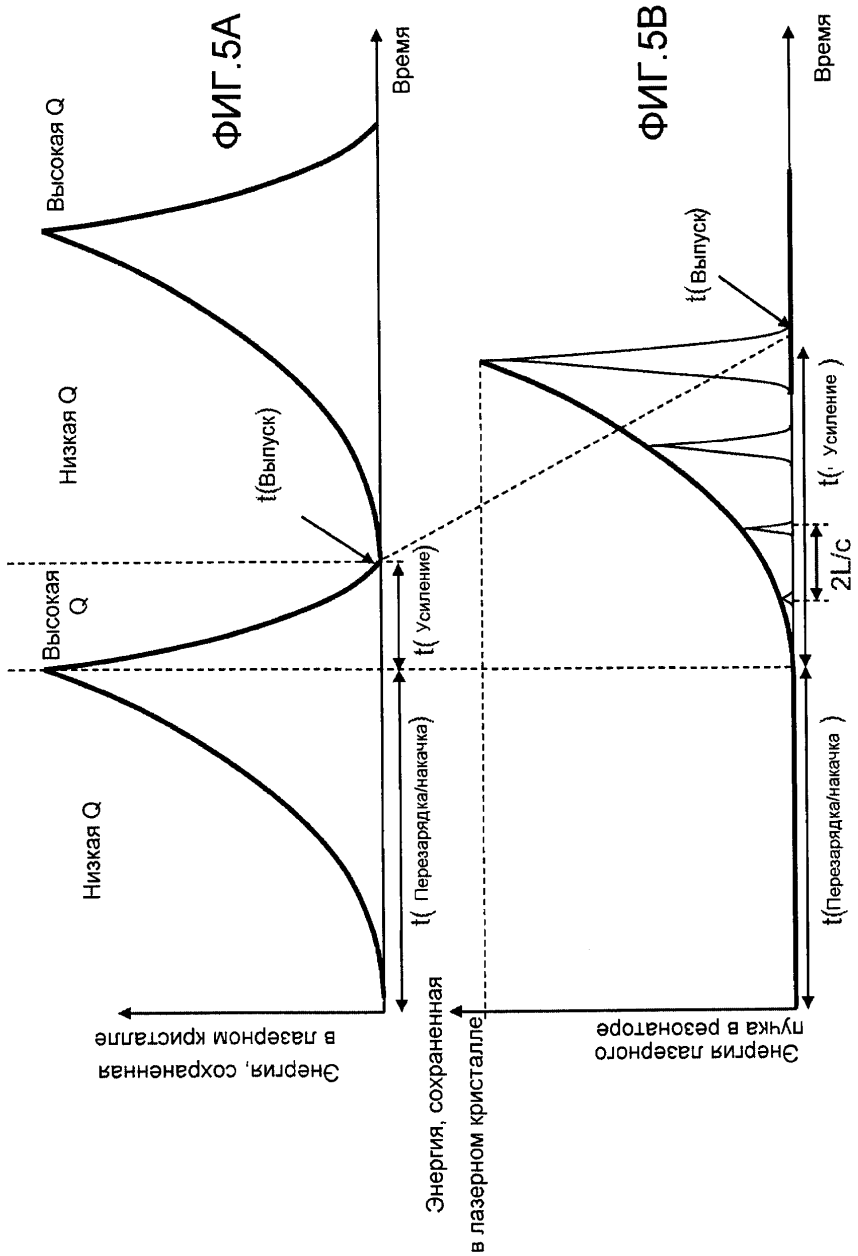
ФИГ.3С

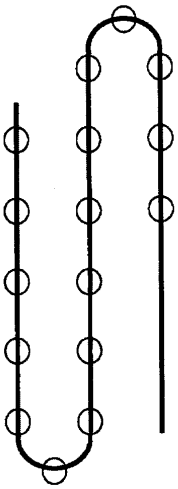
6


Усилитель 300
к/от изолятора Фарадея
500
Тонкопленочный поляризатор 340
Переключаемый поляризатор 330
Лазерный кристалл 310
321
322
323
324

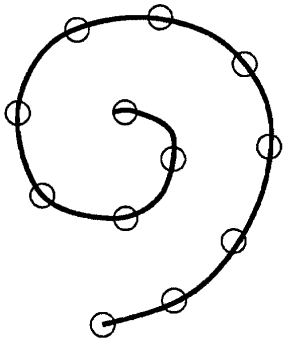
ФИГ.4

7

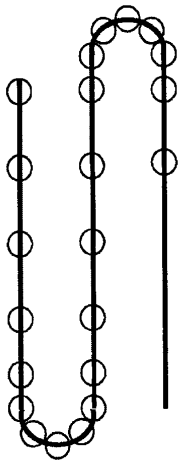

ФИГ.5А
Время
Высокая Q
Низкая Q
t(Выпуск)
Высокая Q
Низкая Q
t(Усиление)
t(Перезарядка/накачка)
Энергия, сохраненная в лазерном кристалле
Энергия, сохраненная в лазерном кристалле
ФИГ.5В
Время
t(Выпуск)
t(Усиление)
2L/c
t(Перезарядка/накачка)
Энергия лазерного пучка в резонаторе



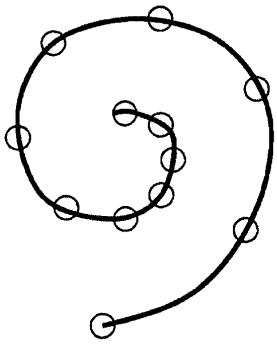
ФИГ.6С



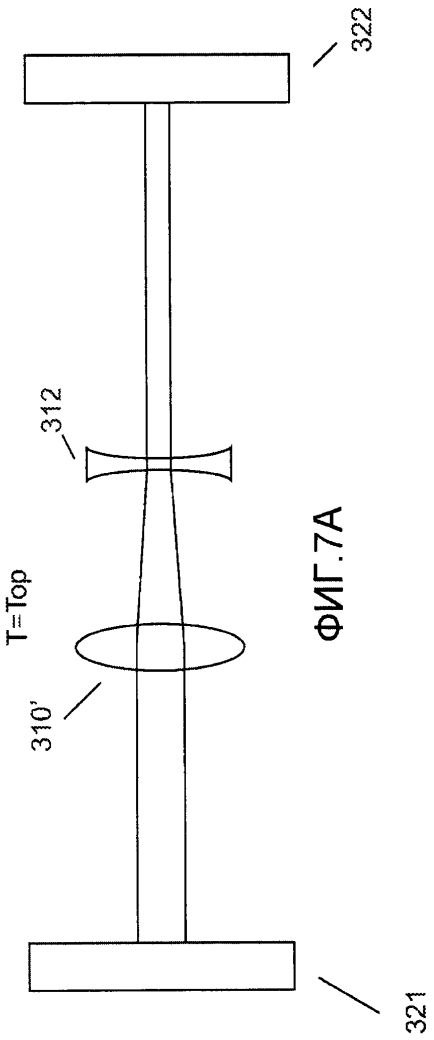
ФИГ.6D



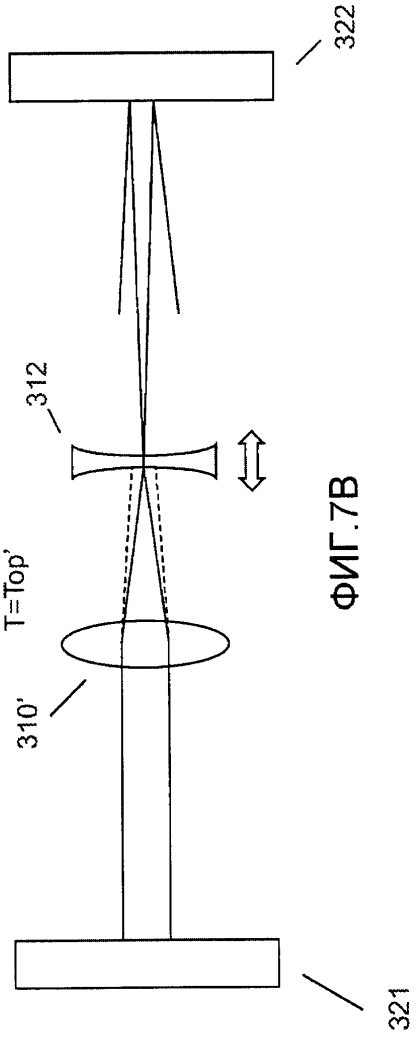
ФИГ.6А



ФИГ.6В

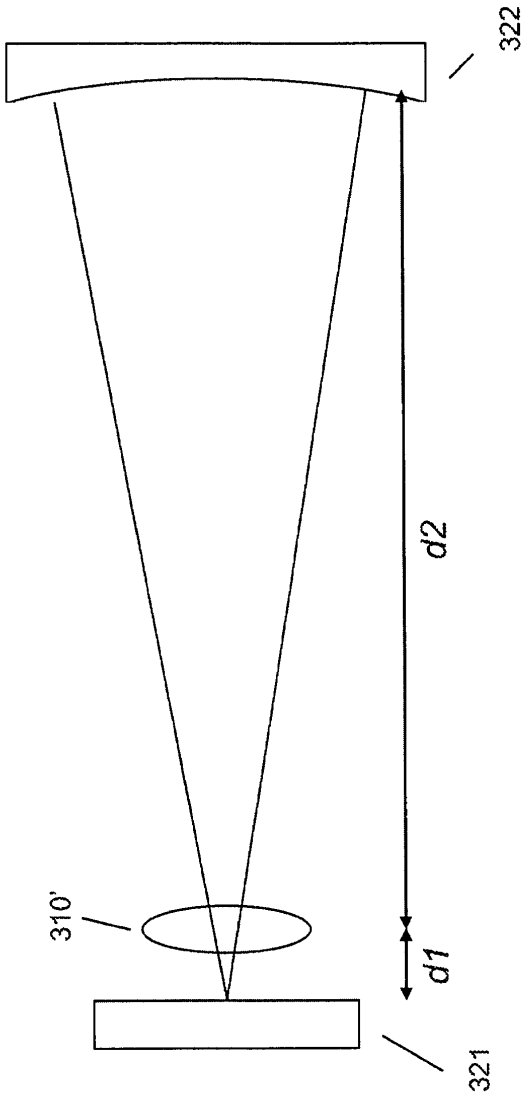


ФИГ.7А

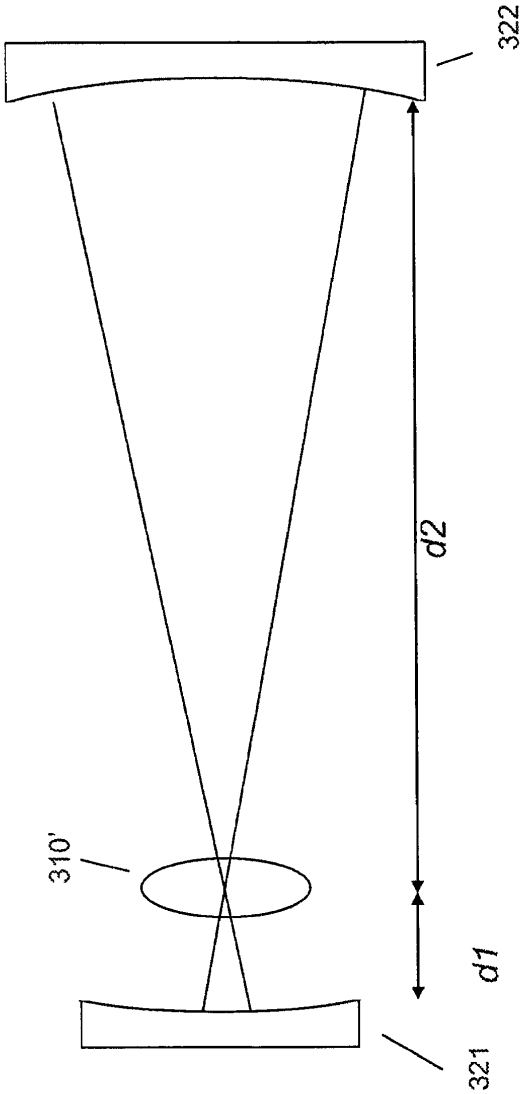


ФИГ.7В

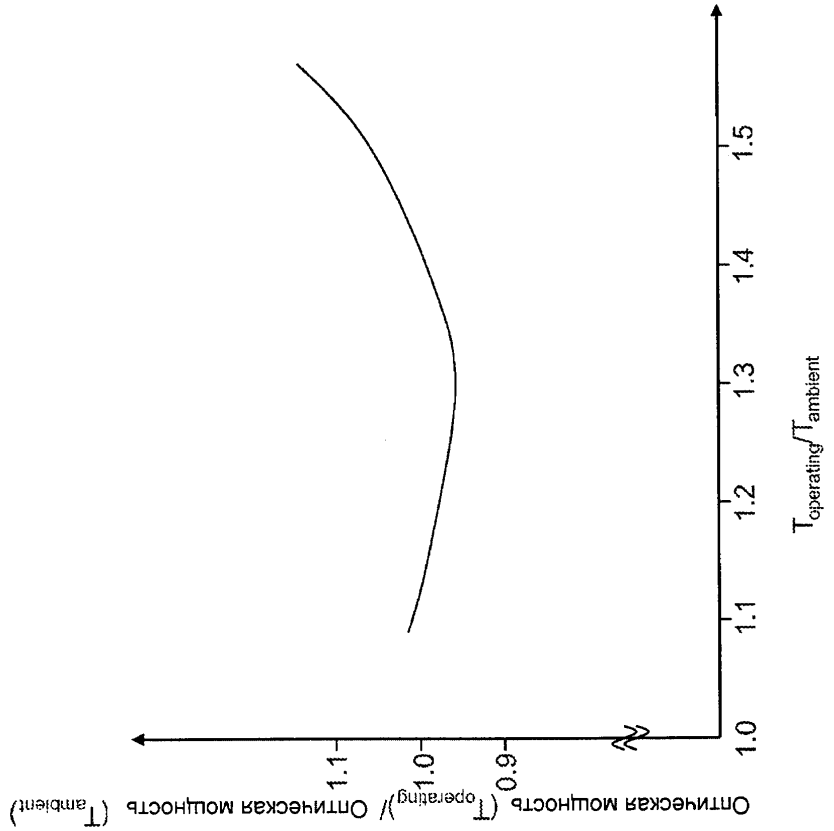
10



ФИГ.7С



ФИГ.7D


Оптическая мощность ($T_{operating}$)/ Оптическая мощность ($T_{ambient}$)
0.9
1.0
1.1
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
$T_{operating}/T_{ambient}$

ФИГ.8