



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2012127195/28, 29.06.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
29.06.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 29.06.2012

(45) Опубликовано: 27.07.2013 Бюл. № 21

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2435182 C2, 27.11.2011. RU 2411598
C2, 10.02.2011. US 6806967 B2, 19.10.2004. RU
2149435 C1, 20.05.2000. WO 1988004820 A1,
30.06.1988.

Адрес для переписки:

105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр.1,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЦЗИС, П.А.
Носову (РЛ-2)

(72) Автор(ы):

Пахомов Иван Иванович (RU),
Григорьянц Александр Григорьевич (RU),
Носов Павел Анатольевич (RU),
Ширанков Александр Фёдорович (RU),
Хорохоров Алексей Михайлович (RU),
Павлов Виктор Юрьевич (RU),
Третьяков Роман Сергеевич (RU),
Ставертий Антон Яковлевич (RU),
Голубенко Юрий Владимирович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана" (МГТУ
им. Н.Э. Баумана) (RU)(54) СПОСОБ ИЗМЕНЕНИЯ ДИАМЕТРА ПЕРЕТЯЖКИ ВЫХОДНОГО ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА
НА ФИКСИРОВАННОМ РАССТОЯНИИ ОТ ЛАЗЕРА

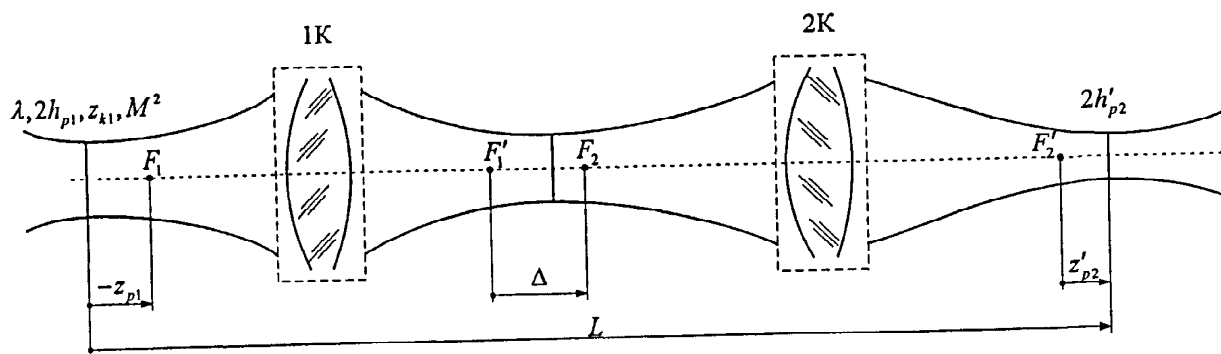
(57) Реферат:

Изобретение относится к лазерной технике. Способ изменения диаметра перетяжки выходного лазерного пучка на фиксированном расстоянии от лазера реализуется устройством, включающим лазер, излучающий пучок с диаметром перетяжки $2h_{p1}$ и параметром конфокальности z_{k1} , двухкомпонентную оптическую систему, формирующую в исходном положении компонентов выходную перетяжку диаметром $2h'_{p20}$ на расстоянии L_0 от лазера, каждый компонент оптической системы имеет возможность перемещения вдоль оптической оси. Согласованное перемещение компонентов осуществляют вдоль оптической оси по закону $s_2(s_1)=a \cdot y(s_1)-\Delta_0+s_1$, где s_1 и s_2 - перемещения первого и второго компонентов оптической системы; $a = f_1'^2 / z_{k1}$; Δ_0 - расстояние между задним фокусом F_1' первого компонента и передним

фокусом F_2 второго компонента в исходном положении. Параметр y определяют из решения кубического уравнения $a^2(x^2+1)y^3 + a[2ax - b(x^2+1)]y^2 + [a(a-2bx) + f_2'^2(x^2+1)]y + xf_2'^2 - ab = 0$,

где $x = \frac{z_{p10} - s_1}{z_{k1}}$; $b = z_{p20}' + \Delta_0 - s_1$;

z_{p10} - положение перетяжки входного пучка относительно переднего фокуса F_1 первого компонента в исходном положении; z_{p20}' - положение выходной перетяжки относительно заднего фокуса F_2' второго компонента в исходном положении; f_1' и f_2' - задние фокусные расстояния компонентов. Технический результат заключается в обеспечении возможности формирования лазерного пучка с изменяемым диаметром перетяжки на фиксированном расстоянии от лазера. 4 ил.



Фиг. 1

RU 2488861 C1

RU 2488861 C1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.

G02B 27/09 (2006.01)**H01S 3/10** (2006.01)**(12) ABSTRACT OF INVENTION**(21)(22) Application: **2012127195/28, 29.06.2012**(24) Effective date for property rights:
29.06.2012

Priority:

(22) Date of filing: **29.06.2012**(45) Date of publication: **27.07.2013 Bull. 21**

Mail address:

**105005, Moskva, ul. 2-ja Baumanskaja, 5, str.1,
MGТУ im. N.Eh. Baumana, TsZIS, P.A. Nosovu
(RL-2)**

(72) Inventor(s):

**Pakhomov Ivan Ivanovich (RU),
Grigor'jants Aleksandr Grigor'evich (RU),
Nosov Pavel Anatol'evich (RU),
Shirankov Aleksandr Fedorovich (RU),
Khorokhorov Aleksej Mikhajlovich (RU),
Pavlov Viktor Jur'evich (RU),
Tret'jakov Roman Sergeevich (RU),
Stavertij Anton Jakovlevich (RU),
Golubenko Jurij Vladimirovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe
obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego
professional'nogo obrazovaniya "Moskovskij
gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet imeni
N.Eh. Baumana" (MGТУ im. N.Eh. Baumana)
(RU)**

(54) METHOD OF VARYING NECK DIAMETER OF OUTPUT LASER BEAM AT FIXED DISTANCE FROM LASER

(57) Abstract:

FIELD: physics.

SUBSTANCE: method of varying neck diameter of an output laser beam at a fixed distance from the laser is realised by a device having a laser which emits a beam with neck diameter $2h_{p1}$ and a confocality parameter z_{k1} , a two-component optical system which forms, in the initial position of components, an output neck with diameter

$2h'_{p20}$ at a distance L_0 from the laser, each component of the optical system being capable of moving along an optical axis. Matched displacement of components is carried out along the optical axis according to the law $s_2(s_1) = a \cdot y(s_1) - \Delta_0 + s_1$, where: s_1 and s_2 are displacements of the first and second components of the optical system; $a = f_1'^2 / z_{k1}$;

Δ_0 is the distance between the rear focus F_2 of the first component and the front focus F_2' of the second component in the initial position. Parameter y is determined by solving the cubic equation

$$a^2(x^2 + 1)y^3 + a[2ax - b(x^2 + 1)]y^2 + [a(a - 2bx) + f_2'^2(x^2 + 1)]y + xf_2'^2 - ab = 0,$$

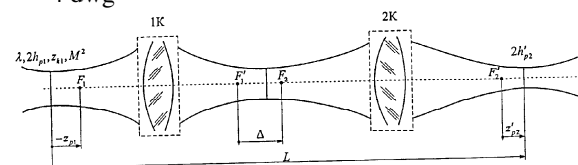
where

$$x = \frac{z_{p10} - s_1}{z_{k1}}, \quad b = z_{p20}' + \Delta_0 - s_1;$$

z_{p10} is the position of the neck of the input beam relative the front focus F_1 of the first component in the initial position; z_{p20}' is the position of the output neck relative the rear focus F_2' of the second component in the initial position; f_1' and f_2' are the back focal distances of the components.

EFFECT: enabling formation of a laser beam with a variable neck diameter at a fixed distance from the laser.

4 dwg



Фиг. 1

Изобретение относится к лазерной технике, к области оптических систем, преобразующих лазерное излучение, и может быть использовано в машиностроении, медицине, приборостроении, оптической связи и других областях науки и техники, в частности там, где необходимо формировать перетяжку пучка с изменяющимся

5
Уровень техники

Существуют различные способы формирования лазерного пучка с изменяемыми параметрами.

10 Известен способ изменения положения перетяжки лазерного пучка, заключающийся в продольном перемещении фокусирующей линзы с помощью набора пьезоэлектрических элементов, который реализован в устройстве [1]. Применение устройства позволяет в ограниченном диапазоне изменять только положение перетяжки пучка постоянного диаметра. Его недостатком является отсутствие

15 возможности изменять диаметр перетяжки выходного пучка. Это обусловлено тем, что в устройстве используется частный случай преобразования лазерного пучка фокусирующей линзой, когда на ее входе квазипараллельный пучок с весьма удаленной перетяжкой. В этом случае существует весьма слабая зависимость диаметра

20 выходной перетяжки от положения фокусирующей линзы, что позволяет считать диаметр перетяжки практически постоянным.

Также известен способ перемещения перетяжки выходного лазерного пучка постоянного диаметра $2h'_{p2} = 2h_{p1}\sqrt{\alpha}$ ($\alpha = \text{const}$), реализуемый в устройстве [2],

25 содержащем лазер, излучающий пучок с перетяжкой диаметром $2h_{p1}$, и два подвижных оптических компонента.

Недостатком способа является отсутствие возможности изменять диаметр перетяжки выходного пучка.

30 Наиболее близким по технической сущности и достигаемому результату является способ обеспечения постоянства положения и диаметра выходной перетяжки при небольших вариациях диаметра входной перетяжки. Данный способ реализован в согласующей лазерной оптической системе, включающей последовательно установленные лазер, излучающий пучок с диаметром перетяжки $2h_{p1}$ и параметром

35 конфокальности z_{k1} , двухкомпонентную оптическую систему, каждый компонент которой (представляющий собой линзу или набор линз) может перемещаться вдоль оптической оси [3].

Однако данный способ не позволяет изменять диаметр перетяжки выходного пучка, что ограничивает область ее применения.

40 Раскрытие изобретения

Задачей заявляемого изобретения является разработка способа, обеспечивающего изменение диаметра выходной перетяжки на фиксированном удалении от лазера.

45 Задача решается за счет того, что в способе изменения диаметра перетяжки выходного лазерного пучка на фиксированном расстоянии от лазера, реализуемом устройством, включающим последовательно установленные лазер, излучающий пучок с диаметром перетяжки $2h_{p1}$ и параметром конфокальности z_{k1} , двухкомпонентную оптическую систему, формирующую в исходном положении компонентов выходную перетяжку диаметром $2h'_{p20}$ на расстоянии L_0 от лазера, каждый компонент

50 оптической системы имеет возможность перемещения вдоль оптической оси, осуществляют согласованное перемещение компонентов вдоль оптической оси по закону $s_2(s_1) = a \cdot y(s_1) - \Delta_0 + s_1$, где s_1 и s_2 - перемещения первого и второго компонентов

оптической системы соответственно, где $a = f_1'^2 / z_{k1}$; Δ_0 - расстояние между задним фокусом F_1' первого компонента и передним фокусом F_2 второго компонента в исходном положении компонентов оптической системы; параметр y определяют из

$$a^2 (x^2 + 1) y^3 + a [2ax - b(x^2 + 1)] y^2 + [a(a - 2bx) + f_2'^2 (x^2 + 1)] y + x f_2'^2 - ab = 0,$$

в котором $x = \frac{z_{p10} - s_1}{z_{k1}}$; $b = z_{p20}' + \Delta_0 - s_1$; z_{p10} - положение перетяжки входного

пучка относительно переднего фокуса F_1 , первого компонентов в исходном положении компонентов; z_{p20}' - положение выходной перетяжки относительно заднего фокуса F_2' второго компонента в исходном положении компонентов оптической системы.

Краткое описание чертежей

На фиг.1 представлена схема двухкомпонентной лазерно-оптической системы; на фиг.2 представлена двухкомпонентная лазерно-оптическая система для изменения диаметра перетяжки лазерного пучка на фиксированном расстоянии от лазера;

на фиг.3 представлен закон перемещения компонентов лазерно-оптической системы; на фиг.4 представлен закон изменения диаметра выходной перетяжки от величины перемещения первого компонента двухкомпонентной лазерно-оптической системы.

Осуществление изобретения

Сущность изобретения заключается в использовании двухкомпонентной лазерно-оптической системы, компоненты которой перемещают по нелинейному закону, при котором обеспечивается постоянство расстояния от исходной перетяжки лазера до выходной перетяжки и изменение диаметра выходной перетяжки. Закон перемещения компонентов учитывает отличительные свойства лазерного излучения от классического излучения и зависимости преобразования лазерного излучения оптическими элементами и системами.

С учетом свойств лазерных пучков и строгой математической связи между параметрами пучка на входе и выходе двухкомпонентной ЛОС и ее конструктивными параметрами, соотношения для диаметра $2h_{p2}'$, положения (дефокусировки) z_{p2}'

перетяжки выходного пучка относительно заднего фокуса второго компонента и длины L ЛОС (расстояние от входной до выходной перетяжки) имеют вид фиг.1 [4]:

$$2h_{p2}' = 2h_{p1} \sqrt{\alpha},$$

$$z_{p2}' = \left(z_{p1} + \Delta \frac{z_{p1}^2 + z_{k1}^2}{f_1'^2} \right) \alpha, \quad (1)$$

$$L = -z_{p1}(1 - \alpha) + \Delta \left(1 + \alpha \frac{z_{p1}^2 + z_{k1}^2}{f_1'^2} \right) - s_{F_1} + t_1 + s_{F_1}' - s_{F_2} + t_2 + s_{F_2}'.$$

Здесь $\alpha = \frac{(f_1' f_2')^2}{(f_1'^2 + z_{p1} \Delta)^2 + (z_{k1} \Delta)^2}$ - продольное увеличение двухкомпонентной ЛОС;

$2h_{p1}$ и z_{k1} - диаметр перетяжки и параметр конфокальности пучка на входе двухкомпонентной системы; z_{p1} - положение (дефокусировка) перетяжки входного

пучка относительно переднего фокуса F_1 первого компонента; z'_{p2} - положение

(дефокусировка) перетяжки выходного пучка относительно заднего фокуса F'_2

второго компонента; Δ - расстояние между фокусами F'_1 и F_2 компонентов; f'_1 и f'_2 -

5 задние фокусные расстояния компонентов; s_{F_1} и s_{F_2} - передние фокальные отрезки

первого и второго компонента, соответственно; $s'_{F'_1}$ и $s'_{F'_2}$ - задние фокальные отрезки

первого и второго компонента, соответственно; t_1 и t_2 - толщины компонентов

10 оптической системы.

Конструктивными параметрами ЛОС являются f'_1 , f'_2 , z_{p1} и Δ . Формально

свободными параметрами являются z_{k1} и $2h_{p1}$. Однако для лазерных источников света они однозначно связаны инвариантом лазерного излучения [4] $J_{\text{лаз}} = h_{p1}^2 / z_{k1} = M^2 \lambda / \pi$,

15 который однозначно определяется длиной волны λ и параметром качества M^2 лазерного пучка. Оба эти параметра являются заданными, т.к. перед разработкой оптической системы характеристики лазерного излучения на входе ЛОС известны.

Оптическое устройство для непрерывного изменения диаметра перетяжки лазерного пучка включает последовательно и соосно расположенные лазерный источник, двухкомпонентную ЛОС, закон перемещения которых учитывает параметры лазерного пучка и ЛОС и определяется с учетом соотношений (1). При определении параметров ЛОС, обеспечивающей требуемые величины $2h'_{p2}$, z'_{p2} и L ,

25 число ее свободных конструктивных параметров равно 4. Поэтому всегда можно выбрать такие конструктивные параметры ЛОС, при которых формируется выходной пучок с требуемыми указанными параметрами, обеспечивая при этом необходимый диаметр перетяжки и плотность мощности излучения в ее сечении. Причем, имеющаяся свобода при выборе закона перемещения компонентов используется для постоянства расстояния L между лазером и выходной перетяжкой. В таком устройстве нет необходимости проводить трудоемкую смену конфигурации ЛОС и юстировку ее узлов. При этом осуществление продольного перемещения компонентов оптической системы не представляет сложности.

35 Поскольку при прохождении через ЛОС инвариант лазерного пучка сохраняется $J_{\text{лаз}} = h_{p1}^2 / z_{k1} = h_{p2}^2 / z_{k2}$, то для размера перетяжки и параметра конфокальности выходного пучка справедливо соотношение $h_{p2}^2 / z_{k2} = M^2 \lambda / \pi$. Поэтому при изменении диаметра перетяжки $2h'_{p2}$ выходного пучка изменяется и его параметр конфокальности z'_{k2} , который определяет общую длину перетяжки $2z'_{k2}$ выходного пучка.

Устройство включает лазер 1, пучок излучения которого характеризуется длиной волны λ , перетяжкой 2 диаметра $2h_{p1}$, находящейся на расстоянии d_0 от выходного торца лазера, параметром конфокальности z_{k1} , параметром M^2 , ЛОС, состоящую из первого 3 и второго 4 перемещающихся компонентов, которая формирует перетяжку 5 лазерного пучка диаметром $2h'_{p2}$ (см. фиг.2). Длина системы L (расстояние от исходной до выходной перетяжки) является постоянной.

50 Непрерывное изменение диаметра выходной перетяжки лазерного пучка с фиксированным положением сечения выходной перетяжки за счет продольного перемещения компонентов ЛОС становится возможным лишь при определенных условиях. Эти условия устанавливают вполне определенную связь конструктивных

параметров ЛОС и параметров пучка лазерного источника. Она в свою очередь определяет закон перемещения компонентов ЛОС. Поэтому для выбранного лазерного источника с известными параметрами излучения решить указанную задачу позволяет оптическая система с вполне определенными конструктивными

параметрами, компоненты которой перемещаются по согласованному закону. Особенностью изобретения заключается в использовании законов преобразования лазерного пучка оптическими элементами и системами, аналитической связи между параметрами лазерного пучка и преобразующей его двухкомпонентной оптической системой и получении условия обеспечения неподвижности выходной перетяжки с переменным продольным увеличением ЛОС. Полученная связь позволяет изменять диаметр перетяжки выходного пучка на фиксированном расстоянии от перетяжки входного пучка.

В исходном («нулевом») положении конструктивные параметры ЛОС: задние фокусные расстояния первого f_1' и второго f_2' компонента, положение сечения перетяжки пучка лазера относительно переднего фокуса F_1 первого компонента z_{p10} и расстояние Δ_0 между задним фокусом F_1' первого компонента и передним фокусом F_2' второго компонента - выбираются так, чтобы обеспечить:

- 1) значение продольного увеличения $\alpha_0 = (2h_{p20}' / 2h_{p1}')^2$, где $2h_{p20}'$ - диаметр перетяжки выходного пучка в исходном положении компонентов ЛОС,
- 2) заданную длину системы

$$L_0 = -z_{p10}(1 - \alpha_0) + \Delta_0 \left(1 + \alpha_0 \frac{z_{p10}^2 + z_{k1}^2}{f_1'^2} \right) - s_{F_1} + t_1 + s_{F_1}' - s_{F_2} + t_2 + s_{F_2}'.$$

При выполнении этих условий необходимо также обеспечить физическую реализуемость ЛОС, когда в исходном положении компонентов все продольные расстояния положительные: от входной перетяжки до первой поверхности первого компонента $d_{10} = -z_{p10} - s_{F_1}$, от последней поверхности первого компонента до первой поверхности второго компонента $d_{20} = s_{F_1}' + \Delta_0 - s_{F_2}$, от последней поверхности второго компонента до выходной перетяжки $d_{30} = s_{F_2}' + z_{p20}'$. В последнем соотношении z_{p20}' - положение выходной перетяжки относительно заднего фокуса F_2' второго компонента в исходном положении компонентов.

Конструктивные параметры ЛОС в исходном положении компонентов являются исходными данными для определения закона перемещения компонентов, при котором изменяется диаметр перетяжки выходного пучка на фиксированном расстоянии от перетяжки входного пучка. Для этого компоненты необходимо перемещать по нелинейному закону $s_2(s_1)$:

$$s_2(s_1) = ay(s_1) - \Delta_0 + s_1,$$

где величина y находится из решения кубического уравнения

$$a^2(x^2 + 1)y^3 + a[2ax - b(x^2 + 1)]y^2 + [a(a - 2bx) + f_2'^2(x^2 + 1)]y + xf_2'^2 - ab = 0;$$

$$a = \frac{f_1'^2}{z_{k1}}; \quad x = \frac{z_{p10} - s_1}{z_{k1}}; \quad s_1, s_2 - \text{величина перемещения первого и второго компонентов}$$

$$\text{ЛОС}; \quad b = xz_{k1} + z_{p20}' + \Delta_0 - z_{p10}.$$

Для текущего положения компонентов ЛОС оптический интервал $\Delta(s_1) = \Delta_0 - s_1 + s_2$, а

$$d_1(s_1) = -z_{p10} + s_1 - s_{F1}, \quad d_2(s_1) = s'_{F1} + \Delta - s_{F2}, \quad d_3(s_1) = s'_{F2} + z_{p2}.$$

Перемещение второго компонента s_2 находится из решения приведенного уравнения для заданного перемещения первого компонента s_1 . При этом кубическое уравнение может иметь один или три действительных корня. В случае трех корней выбирается такой корень y , который соответствует меньшему перемещению второго компонента.

В промежуточном положении компонентов продольное увеличение ЛОС и диаметр выходной перетяжки определяются выражениями:

$$\alpha(s_1) = \frac{(f'_2 / f'_1)^2}{(1 + xy)^2 + y^2}, \quad 2h'_{p2}(s_1) = 2h_{p1} \sqrt{\alpha(s_1)}.$$

Перепад линейного увеличения ЛОС равен: $M = (2h'_{p2\max} / 2h'_{p2\min})^2$, где $2h'_{p2\max}$ и $2h'_{p2\min}$ - максимальный и минимальный диаметр выходной перетяжки на всем диапазоне перемещения компонентов.

Осуществляют способ следующим образом (фиг.2). Излучение лазера 1 с перетяжкой 2 диаметром $2h_{p1}$ последовательно преобразуется компонентами 3 и 4 оптической системы, на выходе которой формируется перетяжка 5 диаметром $2h'_{p2}$. За счет продольного перемещения компонентов оптической системы по закону $s_2(s_1)$ обеспечивается неизменность расстояния между перетяжкой 1 входного и перетяжкой 5 выходного пучка на всем диапазоне перемещения компонентов и изменение диаметра пучка выходной перетяжки.

Предпочтительный вариант (пример) изобретения для изменения диаметра перетяжки пучка с 0,32 мм до 0,08 мм на фиксированном расстоянии $L=452,75$ мм от лазера при использовании лазера на АИГ: Nd^{3+} ($\lambda=1,06$ мкм, $M^2=1,05$, $2h_{p1}=0,3$ мм) приведен ниже.

Конструктивные параметры двухкомпонентной ЛОС в исходном положении компонентов имеют значения, представленные в таблице.

Радиусы кривизны преломляющих поверхностей компонентов, мм		Воздушные промежутки и толщины линз, мм	Показатель преломления среды на длине волны λ
1К	56,32	82,47	1 (воздух)
	-100,15	3,40	1,7277 (ТФ5)
	56,87	185,54	1 (воздух)
2К	56,87	4,04	1,5062 (К8)
	-137,37	177,30	1 (воздух)
$\alpha_0=1,17, L_0=452,75$ мм			

На фиг.3 представлен график зависимости перемещения компонентов рассчитанной ЛОС, а на фиг.4 - график зависимости изменения диаметра выходной перетяжки от перемещения первого компонента.

Источники информации

Патент РФ 2413265, МПК G02B 27/16, опубликовано: 27.02.2011.

Патент РФ 2411598, МПК G11B 7/125, G02F 1/29, H01S 3/10, опубликовано: 10.02.2011.

Патент РФ 2435182, МПК G02B 27/09, опубликовано: 27.11.2011.

Пахомов И.И., Цибуля А.Б. Расчет оптических систем лазерных приборов. М.: Радио и связь, 1986. 152 с.

Формула изобретения

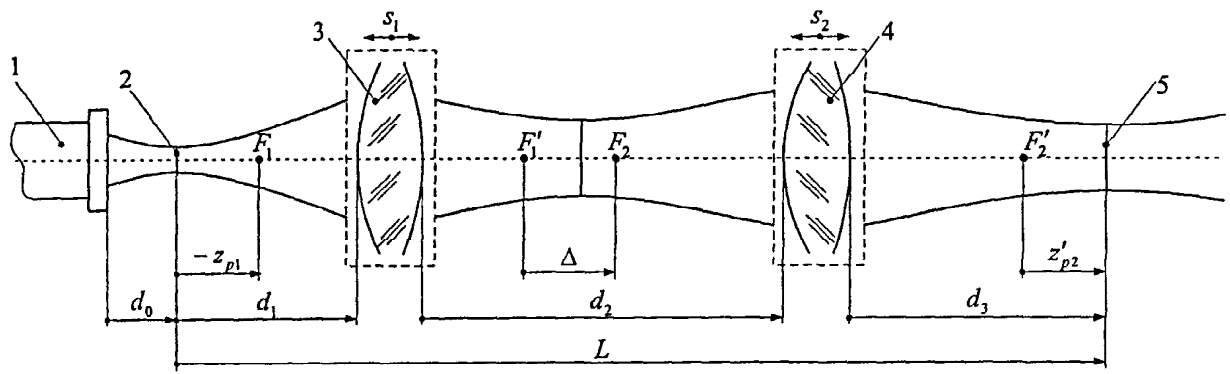
Способ изменения диаметра перетяжки выходного лазерного пучка на фиксированном расстоянии от лазера, реализуемый устройством, включающим последовательно установленные лазер, излучающий пучок с диаметром перетяжки $2h_{p1}$ и параметром конфокальности z_{k1} , двухкомпонентную оптическую систему, формирующую в исходном положении компонентов выходную перетяжку диаметром $2h'_{p20}$ на расстоянии L_0 от лазера, каждый компонент оптической системы имеет возможность перемещения вдоль оптической оси, отличающийся тем, что осуществляют согласованное перемещение компонентов вдоль оптической оси по закону $s_2(s_1) = a \cdot y(s_1) - \Delta_0 + s_1$, где s_1 и s_2 - перемещения первого и второго компонентов оптической системы соответственно, где $a = f_1'^2 / z_{k1}$; Δ_0 - расстояние между задним фокусом F_1' первого компонента и передним фокусом F_2 второго компонента в

исходном положении компонентов оптической системы; параметр y определяют из решения кубического уравнения

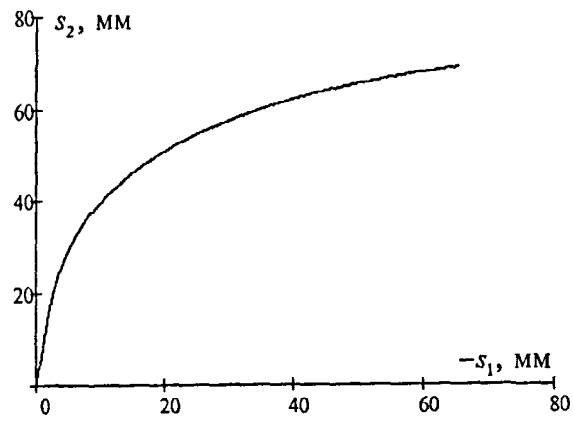
$$a^2(x^2 + 1)y^3 + a[2ax - b(x^2 + 1)]y^2 + [a(a - 2bx) + f_2'^2(x^2 + 1)]y + xf_2'^2 - ab = 0,$$

в котором $x = \frac{z_{p10} - s_1}{z_{k1}}$; $b = z'_{p20} + \Delta_0 - s_1$; z_{p10} - положение перетяжки входного пучка

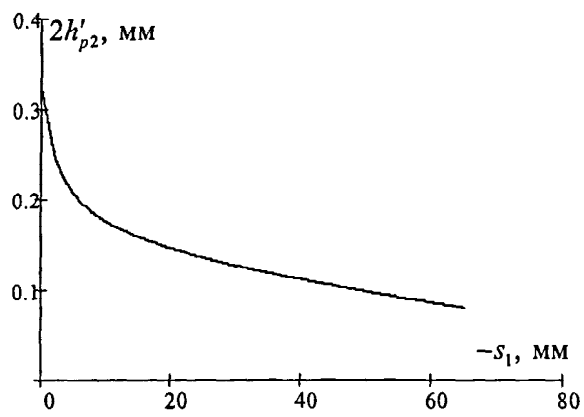
относительно переднего фокуса F_1 первого компонента в исходном положении компонентов; z'_{p20} - положение выходной перетяжки относительно заднего фокуса F_2' второго компонента в исходном положении компонентов оптической системы, f_1' и f_2' - задние фокусные расстояния компонентов.



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4