



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

G02B 27/0977 (2019.08); G02B 17/0621 (2019.08); G01S 7/4814 (2019.08)

(21)(22) Заявка: 2019110924, 11.04.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
11.04.2019Дата регистрации:
25.02.2020

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 11.04.2019

(45) Опубликовано: 25.02.2020 Бюл. № 6

Адрес для переписки:

141070, Московская обл, г. Королев, ул.
Ленина, 4а, ПАО "РКК "Энергия", отдел
защиты интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):

Корнилов Владимир Александрович (RU),
Тугаенко Вячеслав Юрьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Публичное акционерное общество
"Ракетно-космическая корпорация "Энергия"
имени С.П. Королева" (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2663121 C1, 07.08.2018. CN
108680060 A, 19.10.2018. US 6590685 B1,
08.07.2003. US 9971159 B2, 15.05.2018.

(54) Оптическая система формирования и наведения лазерного пучка

(57) Реферат:

Изобретение относится к области оптико-электронного приборостроения и касается оптической системы формирования и наведения лазерного пучка. Система включает в себя устройство сканирования, передающий лазерный модуль с оптоволоконным выводом, внеосевое параболическое зеркало, конструктивно связанное с устройством наведения, блок фокусировки, включающий механизм перемещения торца сердцевины вдоль ее оптической оси и плоское вторичное зеркало, на которое направлен лазерный пучок, который, отражаясь, падает на главное зеркало. Для фокального радиуса-вектора точки полной

параболы, являющейся центром главного зеркала, касательная плоскость к главному зеркалу в этой точке параллельна плоскости вторичного зеркала. Вторичное зеркало конструктивно связано с устройством сканирования и отражает идущий от торца сердцевины оптоволоконного вывода лазерный пучок в виде расходящегося пучка лучей на главное зеркало, отражающее в свою очередь на плоскость изображения малорасходящийся лазерный пучок. Технический результат заключается в повышении направленности лазерного пучка, уменьшении aberrаций и снижении массогабаритных характеристик системы. 2 ил.

RU 2 715 083 C1

RU 2 715 083 C1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.
G02B 27/09 (2006.01)
G02B 17/06 (2006.01)
G01S 7/481 (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
G02B 27/0977 (2019.08); *G02B 17/0621* (2019.08); *G01S 7/4814* (2019.08)

(21)(22) Application: **2019110924, 11.04.2019**

(24) Effective date for property rights:
11.04.2019

Registration date:
25.02.2020

Priority:
(22) Date of filing: **11.04.2019**

(45) Date of publication: **25.02.2020** Bull. № 6

Mail address:
**141070, Moskovskaya obl., g. Korolev, ul. Lenina,
4a, PAO "RKK "Energiya", otdel zashchity
intelektualnoj sobstvennosti**

(72) Inventor(s):
**Kornilov Vladimir Aleksandrovich (RU),
Tugaenko Vyacheslav Yurevich (RU)**

(73) Proprietor(s):
**Publichnoe aktsionernoe obshchestvo
"Raketno-kosmicheskaya korporatsiya
"Energiya" imeni S.P. Koroleva" (RU)**

(54) **LASER BEAM FORMATION AND GUIDANCE OPTICAL SYSTEM**

(57) Abstract:

FIELD: instrument engineering.

SUBSTANCE: invention relates to the field of optoelectronic instrument making and concerns an optical system for forming and guiding a laser beam. System includes a scanning device, a transmitting laser module with a fiber-optic output, an off-axis parabolic mirror structurally connected to the guidance device, a focusing unit which includes a mechanism for moving the end of the core along its optical axis and a flat secondary mirror, on which a laser beam is directed, which, when reflected, falls on the main mirror. For the focal radius-vector of the point of the complete parabola, which is the center of the main mirror, the

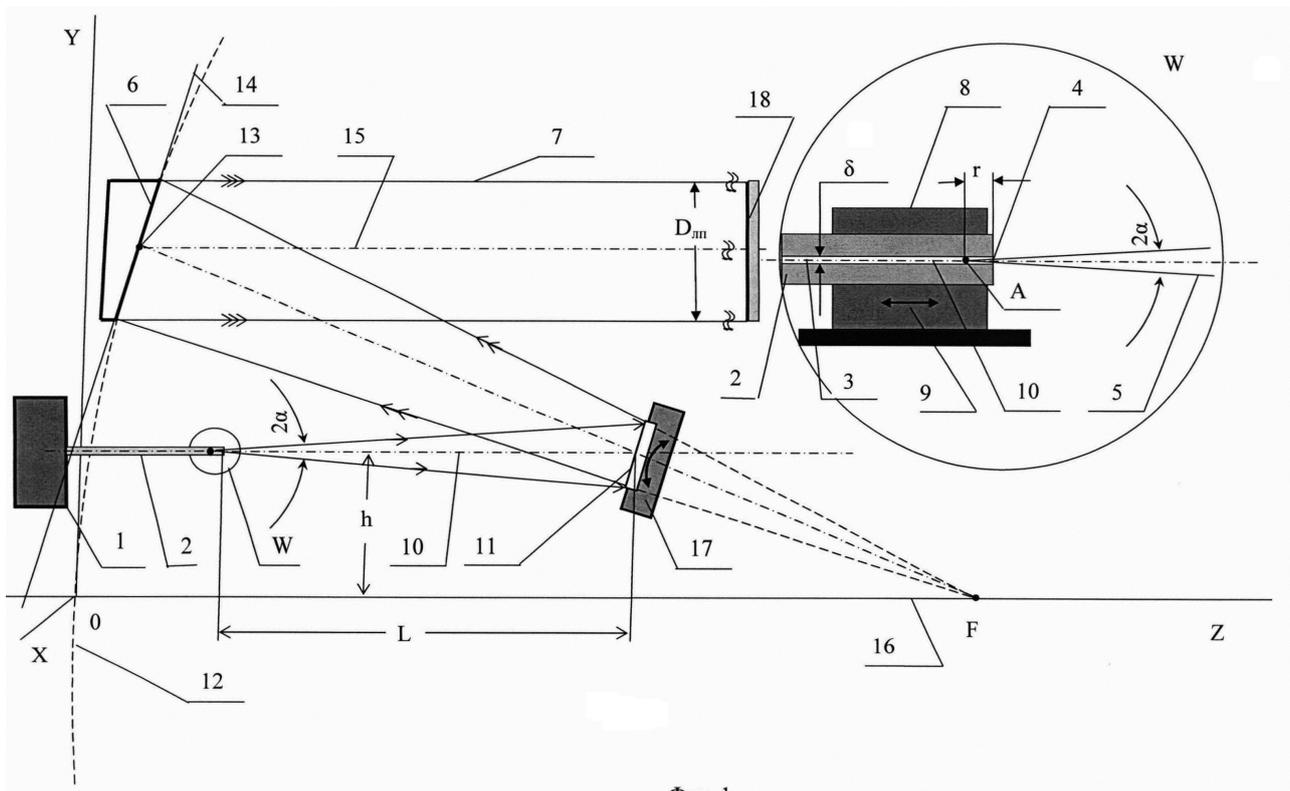
tangent plane to the main mirror at this point is parallel to the plane of the secondary mirror. Secondary mirror is structurally connected to the scanning device and reflects a laser beam passing from the end of the fiber-optic output core in the form of a divergent beam of beams to the main mirror, which in its turn reflects the low-divergent laser beam onto the image plane.

EFFECT: technical result consists in improvement of the laser beam direction, reduction of aberrations and reduction of weight and size characteristics of the system.

1 cl, 2 dwg

RU 2 715 083 C1

RU 2 715 083 C1



Фиг. 1

Изобретение относится к области создания систем передачи мощного излучения на воздушные и космические объекты и лазерных локационных систем наведения с высокой точностью лазерного канала передачи энергии на приемник-преобразователь на основе полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) для преобразования электромагнитной энергии лазерного излучения высокой плотности. Области применения такого преобразования - беспроводные системы дистанционного энергопитания воздушных или космических объектов [В.А. Грилихес, П.П. Орлов, Л.Б. Попов. Солнечная энергия и космические полеты. М.: Наука, 1984, с. 198-199].

В космической технике определился ряд новых направлений, основанных на использовании лазерного излучения. Среди них весьма перспективным направлением следует считать передачу энергии космическим аппаратам (КА) с помощью лазерных систем передачи энергии (ЛСПЭ) [В.И. Кишко, В.Ф. Матюхин. Принципы построения адаптивных ретрансляторов для стратосферных систем передачи энергии // Автометрия. 2012. Т. 48, №2. с. 59-66.] с последующим преобразованием в электроэнергию в приемниках-преобразователях. Например, передача энергии с помощью лазера между орбитальной космической станцией, на которой установлена оптико-механическая система формирования и наведения лазерного пучка (СФИНЛП), и космическим аппаратом, на котором установлено фотоприемное устройство оптико-электронного преобразователя. В настоящее время каждый КА оснащен собственной системой генерирования электрической энергии. Однако существует альтернативный способ энергоснабжения, предусматривающий использование централизованных электростанций и передачу энергии космическим аппаратам-потребителям при помощи электромагнитного излучения (ЭМИ). При этом можно реализовать схему централизованного энергоснабжения, как отдельных КА, так и их группировок, что расширяет их функциональные возможности и увеличивает их ресурс.

По сравнению с другими источниками излучения лазеры обладают самой высокой степенью когерентности. Это свойство лазеров используется в оптических системах для передачи и приема информации и в других случаях. Применение лазеров как источников излучения требует разработки оптических систем, служащих для преобразования лазерного излучения. С помощью таких систем могут решаться следующие задачи: концентрация лазерного излучения в пятно малых размеров (фокусировка); преобразование лазерного пучка в пучок с малым углом расходимости (коллимация); формирование лазерного пучка в пучок с необходимыми параметрами для согласования с последующей оптической системой (согласование) [Н.П. Заказнов, С.И. Кирюшин, В.Н. Кузичев. Теория оптических систем. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1992. с. 318-319]. Для успешной реализации передачи лазерного излучения на объект-потребитель необходимо создать оптическую систему, эффективно формирующую малорасходящийся пучок и точного наведения его на протяженных трассах.

Известны лазерно-оптические системы для формирования мощных лазерных пучков на протяженных трассах с заданными характеристиками.

Так в изобретении, предложенном в [Патент RU 2117322. Оpubл. 10.08.1998. G02B 27/48 (2006.01).] приведено устройство для формирования световых пучков. Устройство содержит источник когерентного оптического излучения и вогнутое главное зеркало, устройство обращения волнового фронта со светоделителем на входе и две вспомогательные оптические системы, обеспечивающие самопроецирование главного зеркала самого на себя. Главное зеркало и элементы обеих вспомогательных систем расположены соосно. Светоделитель выполнен в виде полупрозрачного зеркала, нанесенного на поверхность линзового элемента одной из вспомогательных систем.

Первая вспомогательная система может быть выполнена в виде вогнутого зеркала, линзового компонента и мениска, обращенного выпуклой поверхностью к главному зеркалу. Следует отметить, что вспомогательные оптические системы должны иметь высокое оптическое качество. При использовании предложенной оптической системы в качестве коллиматора существенным недостатком является то, что вспомогательные системы содержат большое количество оптических поверхностей, погрешности которых сказываются на точности формируемого волнового фронта.

Так же известна оптическая система формирования и наведения лазерного излучения в публикации [В.И. Кишко, В.Ф. Матюхин. Принципы построения адаптивных ретрансляторов для стратосферных систем передачи энергии // Автометрия. 2012. Т. 48, №2. с. 59-66], включающая передающий лазерный комплекс из n -лазерных модулей, на основе волоконных лазеров каждый с выходом через высокоэффективный световод, торец сердцевин которого является источником излучения, создающего единичный лазерный пучок. Причем на выходе отдельные световоды объединены в жгут и расположены по его периметру, так что середина жгута остается свободной. Излучение торца волоконного жгута через светоделительный элемент поступает на вход телескопической системы формирования выходного лазерного пучка. Одним из элементов оптической системы является трехкоординатный элемент сканирования, выполненный в виде подвижной линзы, что позволяет осуществлять точную фокусировку и сканирование лазерного пучка в двух поперечных направлениях. На выходе оптической системы суммарный лазерный пучок падает на плоское зеркало, конструктивно связанное с устройством "грубого" наведения, что позволяет наводить систему в широком диапазоне углов, и отражается в виде малорасходящегося пучка лучей. Лазерный пучок на выходе из оптической системы имеет форму, близкую к кольцу, где центральная часть используется оптико-электронной системой наведения излучения.

Нужно отметить, что предложенная компоновка оптической системы не позволяет сформировать на выходе пучок дифракционного качества даже при использовании одномодовых волоконных лазеров. Так же, выходной пучок имеет неоднородное меняющееся на различных расстояниях от ЛСПЭ распределение плотности мощности по сечению пучка. Кроме того, очевидна сложность замены отдельных лазерных модулей при выходе их из строя или падении их мощности.

Наиболее близкой к изобретению по технической сущности является оптическая система формирования и наведения лазерного излучения, предложенная в [Патент RU 2663121, опубликован 07.08.2018, бюл. №.22, МПК: G01S 17/88 (2006.01), F41G 3/22 (2006.01)] и включающая передающий лазерный комплекс из n -лазерных модулей, каждый из которых содержит оптоволоконный вывод с сердцевинной, торец сердцевин которого является источником излучения, создающего единичный лазерный пучок; светоделительный элемент; трехкоординатный элемент сканирования, выполненный в виде подвижной линзы. На выходе оптической системы суммарный лазерный пучок лучей падает на вогнутое параболическое зеркало, конструктивно связанное с устройством "грубого" наведения, и отражается в виде малорасходящегося пучка лучей. В оптическую систему введены n коллиматоров, сумматор единичных лазерных пучков и трехкоординатный блок сканирования, причем каждый i -й лазерный модуль, где $i = 1, 2, \dots, n$, снабжен оптоволоконным выводом с числовой апертурой NA_i и диаметром d_i сердцевин, с торца сердцевин которого дивергентный луч лазера поступает в упомянутый i -ый коллиматор на содержащуюся в нем асферическую линзу с передним

и задним фокусными расстояниями f_a и f_a^* соответственно. Причем главная оптическая ось асферической линзы перпендикулярна плоскости торца сердцевины соответствующего оптоволоконного вывода и проходит через его центр, размещенный в переднем фокусе f_a . Сумматор единичных лазерных пучков состоит из п
 5 светоделительных элементов, выполненных в виде дихроичных пластин, через геометрический центр каждой из которых проходит под углом 45° главная оптическая ось соответствующей асферической линзы коллиматора. Главные оптические оси асферических линз параллельны и лежат в одной плоскости, а упомянутые дихроичные
 10 пластины установлены параллельно между собой так, что через их геометрические центры под углом 45° проходит главная оптическая ось подвижной линзы перпендикулярная главным оптическим осям асферических линз. При этом подвижная линза установлена на микропозиционере трехкоординатного блока сканирования и выполнена асферической, с передним и задним фокусными расстояниями f_c и f_c^* ,
 15 соответственно. Главная оптическая ось подвижной линзы проходит через фокус F зеркала через его геометрический центр, через который проходит оптическая ось параболического зеркала, параллельная или совпадающая с оптической осью его полной параболы. При этом упомянутый фокус F совпадает с задним фокусом f_c^*
 20 подвижной линзы.

Одним из основных недостатков данной ЛСПЭ, ограничивающим ее потенциал, является способ формирования результирующего лазерного пучка. Способ основан на пространственном некогерентном сложении отдельных излучателей и не позволяет
 25 получать на выходе пучки дифракционного качества с постоянным однородным и неизменным распределением плотности мощности по сечению пучка на протяженных трассах. Другим недостатком, затрудняющим эксплуатацию ЛСПЭ, является то, что оптическая система содержит большое количество оптических поверхностей, погрешности которых сказываются на точности формируемого волнового фронта.

Задачей изобретения является:

- 30 - повышение надежности СФИНЛП;
- облегчение сервисного обслуживания и ремонта СФИНЛП;
- снижение себестоимости СФИНЛП.

Техническим результатом изобретения является:

- 35 - создание компактной оптической системы, эффективно формирующей малорасходящийся пучок лучей;
- повышение направленности формируемого лазерного пучка лучей за счет повышения точности юстировки;
- снижение массогабаритных характеристик, простота конструкций, меньшее значение вносимых аберраций по сравнению с призмами и линзами.

Технический результат достигается тем, что оптическая система формирования и наведения лазерного пучка, включающая устройство сканирования, передающий
 40 лазерный модуль с оптоволоконным выводом, с числовой апертурой NA, с сердцевиной диаметром δ , через торец которой выходит лазерный пучок, а на выходе из оптической системы лазерный пучок падает на главное зеркало, выполненное вогнутым внеосевым параболическим с фокусом F, конструктивно связанное с устройством "грубого"
 45 наведения, и отражается в виде малорасходящегося лазерного пучка лучей, при этом в нее введены блок фокусировки, включающий механизм перемещения торца сердцевины вдоль ее оптической оси, перпендикулярной торцу и проходящей через его геометрический центр, вторичное зеркало, выполненное плоским, на которое направлен

лазерный пучок, который отражаясь падает на упомянутое главное зеркало, причем для фокального радиуса-вектора точки полной параболы, являющейся центром главного зеркала, касательная плоскость к главному зеркалу в этой точке параллельна плоскости вторичного зеркала, при этом через центр главного зеркала проходит выходная
 5 оптическая ось малорасходящегося лазерного пучка, совпадающая с диаметром полной параболы, параллельная оптической оси сердцевины оптоволоконного вывода и лежащая вместе с параллельными между собой осью полной параболы и упомянутой оптической осью, в одной плоскости с ними, причем торец сердцевины оптоволоконного вывода отстоит на расстоянии L от точки пересечения оптической оси с плоскостью
 10 вторичного зеркала, образующей при пересечении угол β , отражаясь от которой в этой точке луч лазера, совпадающий с упомянутой оптической осью, падает в центр главного зеркала, при этом оптическая ось сердцевины оптоволоконного вывода отстоит от оси полной параболы на расстоянии h , удовлетворяющем неравенству:

$$15 \quad h_{\max} > h > h_{\min}, \quad (1)$$

при этом вторичное зеркало конструктивно связано с устройством сканирования и отражает идущий от торца сердцевины оптоволоконного вывода лазерный пучок в виде расходящегося пучка лучей на главное зеркало, отражающее в свою очередь на плоскость изображения малорасходящийся лазерный пучок лучей, диаметр $D_{\text{лп}}$ которого
 20 на выходе из оптической системы отвечает соотношению:

$$D_{\text{лп}} = 2F \cdot [\text{ctg}(\beta - \alpha / 2) - \text{ctg}(\beta + \alpha / 2)], \quad (2)$$

а размеры апертур главного зеркала D и вторичного зеркала d определяют по соотношениям:

$$25 \quad D = F \cdot \{4[\text{ctg}(\beta - \alpha / 2) - \text{ctg}(\beta + \alpha / 2)]^2 + [\text{ctg}^2(\beta - \alpha / 2) - \text{ctg}^2(\beta + \alpha / 2)]^2\}^{1/2}; \quad (3)$$

$$d = (L + 0.5 \delta / \text{NA}) \cdot \text{NA} \cdot [1 / \sin(\alpha + \beta) + 1 / \sin(\beta - \alpha)], \quad (4)$$

где углы α и β рассчитаны по формулам:

$$\alpha = \arcsin \text{NA}; \quad (5)$$

$$30 \quad \beta = 90^\circ - 0,5 \cdot \arcsin[h / (L + 0.5 \delta / \text{NA})], \quad (6)$$

h_{\max} и h_{\min} - максимальное и минимальное допустимые расстояния оптической оси от оси полной параболы соответственно, определяемые по соотношениям:

$$35 \quad h_{\max} = 2 \cdot F \cdot \text{ctg}(\beta + \alpha / 2) - (L + 0.5 \delta / \text{NA}) \cdot \text{NA} \cdot \sin(\beta) / \sin(\beta - \alpha); \quad (7)$$

$$h_{\min} = (L + 0.5 \delta / \text{NA}) \cdot \text{NA} \cdot \sin(\beta) / \sin(\beta + \alpha). \quad (8)$$

Суть изобретения поясняется фиг. 1 и 2.

На фиг. 1 приведена принципиальная оптическая схема формирования и наведения лазерного пучка на плоскость изображения. На фиг. 1 обозначено: F - фокус главного
 40 зеркала; L - расстояние торца сердцевины оптоволоконного вывода до точки пересечения оптической оси сердцевины с плоскостью вторичного зеркала; h - расстояние оптической оси сердцевины оптоволоконного вывода от оси полной параболы; $D_{\text{лп}}$ - диаметр малорасходящегося лазерного пучка на выходе из оптической системы; X, Y, Z - координаты положения элементов оптической системы; O - начало координат; W -
 45 выносной элемент.

На выносном элементе W , показан оптоволоконный вывод с механизмом перемещения торца сердцевины, откуда выходит дивергентный луч лазера. На выносном элементе W обозначено: α - максимальный угол, под которым луч лазера выходит через

торец сердцевины оптоволоконного вывода; δ - диаметр сердцевины оптоволоконного вывода; точка А - точечный источник лазерного излучения на оптической оси сердцевины оптоволоконного вывода; r - расстояние от точки А до торца сердцевины оптоволоконного вывода.

5 На фиг. 2 приведен схема, поясняющая вывод соотношений (2), (3), (4) и (7), (8).

На фиг. 2 обозначено: F - фокус главного зеркала; $(L+r)$ - расстояние точечного источника (точка А) до точки пересечения оптической оси сердцевины с плоскостью вторичного зеркала (точка В); h - расстояние оптической оси сердцевины оптоволоконного вывода от оси полной параболы; α - максимальный угол, под которым
10 луч лазера выходит через торец сердцевины оптоволоконного вывода; $D_{\text{лп}}$ - диаметр малорасходящегося лазерного пучка на выходе из оптической системы; М - точка пересечения в плоскости YOZ полной параболы с ее диаметром; Н и G - точки пересечения с осью Z в плоскости YOZ вертикали выходящей из точки В и прямой проходящей через точку В и лежащей в плоскости вторичного зеркала; С и D - точки
15 на вторичном зеркале, куда падают из точки А крайние лучи лазерного пучка в плоскости YOZ; β - угол в плоскости YOZ: между фокальным радиусом-вектором точки М на полной параболе и касательной к полной параболе в этой точке, между касательной к полной параболе в точке М и ее диаметром, между линией пересечения касательной плоскости к главному зеркалу в точке М с плоскостью YOZ и осью OZ,
20 между линией пересечения плоскости вторичного зеркала с плоскостью YOZ и осью OZ; a, b, c, d, e - обозначения вершин в треугольниках ΔadF , ΔbeF , Δabc ; Y_a , Y_b - координаты по оси Y точек полной параболы; Z_a , Z_b - координаты по оси Z точек полной параболы; Y, Z - координаты положения элементов оптической системы в плоскости YOZ; 0 - начало координат.

25 На фиг. 1, 2 приведено:

- 1 - передающий лазерный модуль;
- 2 - оптоволоконный вывод;
- 3 - сердцевина оптоволоконного вывода 2;
- 30 4 - торец сердцевины 3 оптоволоконного вывода 2;
- 5 - лазерный пучок (дивергентный луч);
- 6 - главное зеркало;
- 7 - лазерный пучок;
- 8 - блок фокусировки;
- 35 9 - механизм перемещения торца 4 сердцевины 3;
- 10 - оптическая ось сердцевины 3 оптоволоконного вывода 2;
- 11 - вторичное зеркало;
- 12 - полная парабола главного зеркала 6;
- 13 - центр главного зеркала 6;
- 40 14 - касательная плоскость к главному зеркалу 6 в точке - центре 13;
- 15 - выходная оптическая ось;
- 16 - ось полной параболы 12;
- 17 - устройство сканирования;
- 18 - плоскость изображения.

45 Оптическая система формирования и наведения лазерного пучка (СФИНЛП) включает передающий лазерный модуль 1 с оптоволоконным выводом 2, с числовой апертурой NA, с сердцевиной 3 диаметром δ , из торца 4 которой выходит лазерный пучок 5, а на выходе оптической системы лазерный пучок падает на главное зеркало

6 выполненное вогнутым внеосевым параболическим, конструктивно связанное с устройством "грубого" наведения (на фиг. 1, 2 не показано), и отражается в виде малорасходящегося лазерного пучка 7. Также СФИНЛП включает блок фокусировки 8 с механизмом перемещения 9 торца 4 сердцевины 3 вдоль ее оптической оси 10, перпендикулярной торцу 4 и проходящей через его геометрический центр. Кроме того, СФИНЛП содержит вторичное зеркало 11, выполненное плоским, а главное зеркало 6, выполнено внеосевым вогнутым параболическим с фокусом F, где для фокального радиуса-вектора точки M полной параболы 12 - центра 13 главного зеркала 6 - касательная плоскость 14 к главному зеркалу 6 в этой точке параллельна плоскости вторичного зеркала 11. Причем плоскость вторичного зеркала 11 перпендикулярна плоскости YOZ. Через центр 13 главного зеркала 6 проходит выходная оптическая ось 15 малорасходящегося лазерного пучка 7, совпадающая с диаметром полной параболы 12, параллельная оптической оси 10 сердцевины 3, и которая лежит, вместе с осью 16 полной параболы 12 и оптической осью 10, параллельные между собой, в одной плоскости с ними. Торец 4 сердцевины 3 оптоволоконного вывода 2 отстоит на расстоянии L от точки пересечения оптической оси 10 сердцевины 3 с плоскостью вторичного зеркала 11, образующей при пересечении угол β , отражаясь от которой в этой точке луч лазера, совпадающий с оптической осью 10, падает в центр 13 главного зеркала 6. СФИНЛП выполнена так, чтобы оптическая ось 10 сердцевины 3 оптоволоконного вывода 2 отстояла от оси 16 полной параболы 12 на расстоянии h, удовлетворяющем неравенству (1) и соотношениям (7) и (8). Вторичное зеркало 11 конструктивно связано с устройством сканирования 17 и отражает идущий из сердцевины 3 лазерный пучок 5 в виде расходящегося пучка лучей на главное зеркало 6. Главное зеркало 6 отражает лазерный пучок 5 в виде малорасходящегося лазерного пучка 7 лучей на плоскость изображения 18. Причем диаметр малорасходящегося лазерного пучка $D_{лп}$ на выходе из оптической системы отвечает соотношению (2), а размеры апертур главного зеркала 6 D и вторичного зеркала 11 d определяют по соотношениям (3) и (4).

Оптическая система формирования и наведения лазерного пучка (СФИНЛП) работает следующим образом.

По сигналу от системы питания и управления (СПУ) (на фиг. 1, 2 не показана) поступает управляющая команда на подачу электропитания передающему лазерному модулю 1, выполненному в виде генератора излучения с определенной длиной волны λ . СПУ посредством электрических сигналов и команд управляет работой СФИНЛП, а также обеспечивает электропитание и заданный тепловой режим всей системы и ее элементов. Передающий лазерный модуль 1 генерирует когерентные электромагнитные волны, передаваемые по оптоволоконному выводу 2 с числовой апертурой NA и диаметром δ сердцевины 3. Из сердцевины 3 как из точечного источника излучения (точка A на фиг. 1, 2) через торец 4, выходит дивергентный луч 5 лазера для формирования и точного наведения его в СФИНЛП на протяженных трассах в плоскости изображения 18. С началом работы передающего лазерного модуля 1 от системы диагностики состояния (на фиг. 1, 2 не показана) СФИНЛП поступает информация в СПУ о состоянии элементов оптической системы, в частности по температурным параметрам, и выдачи информационных сигналов о готовности, отказе или нештатном режиме работы оптической системы формирования и наведения лазерного пучка. Исходящий из сердцевины 3 как из точечного источника излучения (из точки A) через торец 4 дивергентный луч 5 лазера с длиной волны λ падает на плоскость вторичного зеркала 11. При этом оптоволоконный вывод 2 с сердцевиной

3 устанавливаются в механизме перемещения 9 так, чтобы ее оптическая ось 10 в блоке фокусировки 8, параллельная оси 16 полной параболы 12, была перпендикулярна плоскости торца 4 и проходила через его центр. Через центр 13 главного зеркала 6, выполненного вогнутым внеосевым параболическим с фокусом F , проходит выходная оптическая ось 15 системы формирования и точного наведения малорасходящегося лазерного пучка 7. Причем СФИНЛП выполнена так, что для фокального радиуса-вектора точки полной параболы 12, являющейся центром 13 главного зеркала 6, касательная плоскость 14 к главному зеркалу 6 в этой точке параллельна плоскости вторичного зеркала 11. При этом выходная оптическая ось 15 системы формирования и наведения малорасходящегося лазерного пучка 7, совпадающая с диаметром полной параболы 12, оптическая ось 10 сердцевинки 3, ось 16 полной параболы 12 параллельны между собой и лежат в одной плоскости. Причем конструкция СФИНЛП выполнена так, что β - угол в плоскости YOZ: между фокальным радиусом-вектором точки M на полной параболе 12 и касательной 14 к полной параболе 12 в этой точке, между касательной 14 к полной параболе 12 в точке M и ее диаметром 15, между линией пересечения касательной плоскости 14 к главному зеркалу 6 в точке M с плоскостью YOZ и осью OZ, между линией пересечения плоскости вторичного зеркала 11 с плоскостью YOZ и осью OZ.

При отмеченных выше конструктивных особенностях СФИНЛП, в рассматриваемой оптической системе расходящийся сферический волновой фронт от точечного источника (точка A), исходящий из сердцевинки 3 через торец 4, падает на плоскость вторичного зеркала 11. В результате отражения света вторичное зеркало 11 преобразует расходящийся сферический волновой фронт, исходящий из точечного источника (точки A), в расходящийся сферический фронт, распространяющийся как из точки F , являющейся мнимым изображением точки A . Причем F одновременно является фокусом параболического главного зеркала 6. Главное зеркало 6, в результате отражения расходящегося сферического волнового фронта, распространяющегося от мнимого точечного источника - фокуса F - преобразует сферическую волну в плоскую отраженную волну, т.е. лучи после отражения от параболического главного зеркала 6 идут параллельно друг другу, не пересекаются или пересекаются на бесконечности. СФИНЛП выполнен так, чтобы торец 4 сердцевинки 3 оптоволоконного вывода 2 отстоял на расстоянии L от точки пересечения оптической оси 10 с плоскостью вторичного зеркала 11, образующей при пересечении угол β , отражаясь от которой в этой точке луч лазера, совпадающий с оптической осью 10, падает в центр 13 главного зеркала 6. При этом оптическая ось 10 сердцевинки 3 оптоволоконного вывода 2 должна отстоять от оси 16 полной параболы 12 на расстоянии h , удовлетворяющем неравенству (1) и соотношениям (7) и (8). При этом упомянутые выше параметры: NA , L , h , β связаны между собой соотношением (6). Вторичное зеркало 11 конструктивно связано с устройством сканирования 17 для точного наведения малорасходящегося лазерного пучка 7 на плоскость изображения 18. Причем, диаметр $D_{лп}$ малорасходящегося лазерного пучка 7 на выходе из оптической системы отвечает соотношению (2), а характерные размеры апертур (диаметр апертуры) для главного зеркала 6 и вторичного зеркала 11 оценивают по соотношениям (3) и (4), с учетом соотношений (5) и (6).

Параболическое главное зеркало 6, через центр 13 которого проходит его выходная оптическая ось 15 параллельная с осью 16 его полной параболы 12, конструктивно связано с устройством "грубого" наведения (на фиг. 1 не показано). Обнаружение приемника-преобразователя в плоскости изображения 18 и наведение на него малорасходящегося лазерного пучка 7 осуществляют механическими устройствами

"грубого" наведения с помощью специальной системы поиска, слежения и наведения (ПСН). Механическое устройство "грубого" наведения ПСН может быть выполнено, например, в виде опорно-поворотной платформы, на которой установлена конструкция СФИН с главным зеркалом 6. Причем, наводят малорасходящийся лазерный пучок 7 так, чтобы выходная оптическая ось 15 главного зеркала 6 была направлена нормально в геометрический центр, например, фотоэлектрических панелей (на фиг. 1 не показаны) приемника-преобразователя. Для облегчения обнаружения приемника-преобразователя по командам и сигналам системы питания и управления при наведении могут быть использованы, например, уголковые отражатели (на фиг. 1 не показаны), установленные на приемнике-преобразователе.

После "грубого" наведения выполняют точное наведение малорасходящегося лазерного пучка 7, совмещая плоскость изображения 18 с плоскостью фотоэлектрических панелей приемника-преобразователя внутренним перемещением излучения в рассматриваемой оптической системе формирования и наведения лазерного пучка. Управляя отклонением луча на выходе СФИНЛП от начального (нулевого) положения осуществляют точное наведение малорасходящегося лазерного пучка 7, т.е. фокусировку и сканирование в плоскости изображения 18, по командам и управляющим сигналам от системы СПУ, поступающим соответственно в блок фокусировки 8 и устройство сканирования 17. С помощью механизма перемещения 9 торца 4 сердцевины 3 вдоль ее оптической оси 10 (по координате Z), перпендикулярной торцу 3 и проходящей через его геометрический центр, осуществляется фокусировка изображения предмета, которым является светящаяся точка А, в плоскости изображения 18. СПУ обеспечивает работу механизма перемещения 9 и контролирует положение торца 4 сердцевины 3 оптоволоконного вывода 2 с помощью встроенных в механизм перемещения 9 датчиков перемещения (на фиг. 1, 2 не показаны). С помощью устройства сканирования 17, включающего подвижную платформу с вторичным зеркалом И, осуществляются наклоны платформы по углам φ_x и φ_y , как показано на фиг. 1 и 2. Таким образом, однокоординатное перемещение (Z) торца 4 в блоке фокусировки 8 и перемещение подвижного вторичного зеркала 11 в двух поперечных направлениях (X, Y) позволяют осуществлять соответственно точную фокусировку и сканирование малорасходящегося лазерного пучка 7 в плоскости изображения 18.

Приведем расчетный пример проектирования оптической системы формирования и наведения лазерного пучка.

Нужно отметить, что в данном техническом решении рассматривается двухзеркальная оптическая система с несферическими поверхностями, а именно используется внеосевое асферическое зеркало в виде параболоида вращения - главное зеркало 6 и плоское отклоняющее вторичное зеркало 11.

Достоинством зеркал по сравнению с призмами и линзами являются: меньший вес, простота конструкций, меньшее значение вносимых aberrаций (в том числе отсутствие хроматизма у зеркал с наружным отражением), исключение требований к ряду показателей качества материала зеркал с наружным отражением, а также возможность создания зеркал больших размеров [С.М. Латыев. Конструирование точных (оптических) приборов. Глава 8, п. 8.4. ЗЕРКАЛА с. 354-364 <https://ozlib.com/813864/tehnika/zerkala>]. Применение несферических поверхностей в оптических системах позволяет эффективнее решать задачу дальнейшего улучшения качества изображения, повышения оптических характеристик и совершенствования конструкции оптических приборов, уменьшения их размеров и массы, достижения компактности. Известно, например, что параболическое зеркало образует близкое к идеальному изображение бесконечно

удаленной осевой точки [Н.П. Заказнов, С.И. Кирюшин, В.Н. Кузичев. Теория оптических систем. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1992. с. 357]. Причем, как это видно из фиг. 1 и 2 в предлагаемом техническом решении рассматривается внеосевое размещение зеркал - оптическая схема брахита [Рефлектор (телескоп). <https://ru.wikipedia.org/wiki/>], [Глава четвертая. СЛОЖНЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ. http://www.old.astronomer.ru/data/library/books/sikoruk/glava4/4_1.htm]. В такой схеме вторичное зеркало 11 вынесено за пределы пучка, падающего на главное зеркало 6. К положительным качествам брахитов можно отнести отсутствие экранирования, что положительно сказывается на четкости и контрастности изображения [Глава четвертая. СЛОЖНЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ. http://www.old.astronomer.ru/data/library/books/sikoruk/glava4/4_1.htm]. Из всех типов асферических отражателей именно внеосевые параболические зеркала лишены сферических aberrаций, поэтому проецируют точечный источник в бесконечность и могут быть эффективно применимы в устройствах расширения лазерного луча. Кроме того, использование такой оптической схемы сокращает размеры и массу оптической системы, а также позволяет использовать зеркала как клиновидной, так и равнотолщинной конфигурации [TYDEX: Внеосевые параболические зеркала http://www.tydexoptics.com/ru/products/spectroscopy/oap_mirrors/].

Для примера проектируем оптическую систему включающую передающий лазерный модуль 1 на основе лазерного модуля (ЛМ) типа иттербиевого волоконного лазера ЛК-1000, производитель IPG Photonics (Россия) [<https://www.stankoff.ru/product/11234/itterbievuyi-volonnyiy-lazer-lk-1000>]. Положим, что иттербиевый волоконный лазер генерирует инфракрасное излучение с длиной волны $\lambda=1070$ нм и выполнен с оптоволоконным выводом 2 с числовой апертурой $NA=0,06$ и диаметром оптической апертуры (сердцевины 3) оптоволокна $\delta=0,02$ мм. Выход излучения выполнен положим через оптический коннектор QВН, который установлен в блоке фокусировки 8, включающей механизм перемещения 9 торца 4 сердцевины 3 вдоль ее оптической оси 10, перпендикулярной торцу 4 и проходящей через его геометрический центр. Вторичное зеркало 11, на которое направлен лазерный пучок 5 выходящий из сердцевины 3, выполняем, например, из материала представляющего композит АКК «Скелетон» (алмаз/карбид кремния (АКК), получаемый в вакуумной печи из промышленных марок алмазных порошков, пропитанных жидким кремнием) [С.М. Латыев. Конструирование точных (оптических) приборов. Глава 8, п. 8.4. ЗЕРКАЛА с. 354-364 <https://ozlib.com/813864/tehnika/zerkalal>. Следует отметить, что в отличие от традиционных материалов как оптическое стекло, например, марки ЛК-7 [Физические величины. Справочник под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 770], АКК «Скелетон» по удельной жесткости уступает лишь монокристаллам алмаза, а высокие теплопроводность (650 Вт/(м К)), выше чем у меди, и температуропроводность (320 м²/с) обеспечивают в зеркалах однородность температурных полей и ее быструю тепловую релаксацию, что позволяет ему обладать температурной стабильностью лучших сверхмало расширяющихся материалов. Данные характеристики позволяют создавать из этого материала зеркала с качественно новыми служебными свойствами. На рабочую поверхность зеркала наносят специальные конструкционные покрытия (стеклянные, медные, никелевые, хромовые и др.), которые затем доводятся и полируются до оптического качества. Лазерный пучок 5, отражаясь от вторичного зеркала 11, падает на главное зеркало 6, которое выполнено вогнутым внеосевым параболическим с фокусом F. Положим СФИНЛП выполнена с параболическим главным зеркалом 6 с фокусом F=400 мм.

Выполняем главное зеркало 6 из материала, представляющего композит АКК

«Скелетон», аналогичного рассмотренному выше для вторичного зеркала 11 со специальным конструкционным покрытием на рабочей поверхности главного зеркала 6, аналогично как и у вторичного зеркала 11. Оптическая система выполнена так, что внеосевое параболическое главное зеркало 6, через центр 13 которого проходит его выходная оптическая ось 15, параллельная с осью 16 его полной параболы 12, конструктивно связано с устройством "грубого" наведения (на рисунке не показано), и отражает малорасходящийся пучок 7 лучей на плоскость изображения 18. Устройство "грубого" наведения выполнено, например, в виде двухкоординатного привода с системой управления для перенацеливания и с системой стабилизации наведения лазерного пучка 7 во время передачи энергии. Плоскость изображения 18 может быть выполнена в виде приемника-преобразователя, где лазерное излучение может быть эффективно преобразовано в электроэнергию с помощью фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на основе полупроводниковых гетероструктур [В.А. Грилихес, П.П. Орлов, Л.Б. Попов. Солнечная энергия и космические полеты. М.: Наука, 1984, с. 110]. Для фокусировки изображения предмета, которым является точечный источник излучения (точка А), исходящий из сердцевины 3 через торец 4 и размещенный на оптической оси 10 сердцевины 3 оптоволоконного вывода 2 на расстоянии r от торца 4, как показано на фиг. 1, в плоскости изображения 18 служит блок фокусировки 8. В состав блока фокусировки 8 входит механизм перемещения 9 торца 4 сердцевины 3 вдоль ее оптической оси 10. СПУ обеспечивает работу механизма перемещения 9 и контролирует положение торца 4 с помощью встроенных в механизм перемещения 9 датчиков перемещения (на фиг. 1 не показаны). Причем, механизм перемещения 9 может быть выполнен на основе прецизионного шагового однокоординатного пьезопозиционера, включающего программное обеспечение, позволяющее управлять и контролировать основные параметры движения пьезопозиционера [Пьезопозиционер для нанофокусировки. <http://www.eurotek-general.com>]. [Линейные пьезоплатформы. http://www.innfocus.ru/ru/catalog/photronics_c/pozicionery/physik-instrumente-pi/linejnye-pezoplatformy/].

Плоскость вторичного зеркала 11 установлена в конструкции СФИНЛП так, чтобы, как показано на фиг. 1 и 2, для фокального радиуса-вектора точки полной параболы 12, являющейся центром 13 главного зеркала 6, касательная плоскость 14 к главному зеркалу 6 в этой точке была параллельна плоскости вторичного зеркала 11. При этом через центр 13 главного зеркала 6 должна проходить выходная оптическая ось 15 системы формирования и наведения малорасходящегося лазерного пучка 7, совпадающая с диаметром полной параболы 12, параллельная оптической оси 10 сердцевины 3, и которая лежит, вместе с осью 16 полной параболы 12 и оптической осью 10, параллельные между собой, в одной плоскости с ними. Положим, что торец 4 сердцевины 3 оптоволоконного вывода 2 отстоит на расстоянии $L=160$ мм от точки пересечения оптической оси 10 с плоскостью вторичного зеркала 11, образующей при пересечении угол β отражаясь от которой в этой точке луч лазера, совпадающий с оптической осью 10, падает в центр 13 главного зеркала 6. Положим, что оптическая ось 10 сердцевины 3 оптоволоконного вывода 2 отстоит от оси 16 полной параболы 12 на расстоянии $h=60$ мм. Таким образом, считая известными h , L , δ и NA , определим угол β из выражения (6):

$$\beta = 90^\circ - 0,5 \cdot \arcsin[h/(L + 0,5 \cdot \delta/NA)] = 90^\circ - 0,5 \cdot \arcsin[60/(160 + 0,5 \cdot 0,02/0,06)] = 79^\circ.$$

Вторичное зеркало 11 конструктивно связано с устройством сканирования 17 и может быть выполнено, например, на основе моторизованного двух осевого

кинематического пьезоэлектрического нанопозиционера [Моторизированный двух осевой (XY) кинематический пьезоэлектрический нанопозиционер QNP2-100-XYA, <http://www.phcloud.ru>, производитель: Aerotech, Inc.].

Принимаем, что числовая апертура оптоволоконного вывода определяется соотношением $NA = n_1 \cdot \sin \alpha$, где $n_1 = 1$ - показатель преломления воздуха, α - максимальный угол между оптической осью 10 сердцевинки 3 оптоволоконного вывода 2 и лучом, под которым он выходит из торца 4 сердцевинки 3 оптоволоконного вывода 2 перпендикулярного к его оптической оси 10 [В.А. Дьяков, Л.В. Тарасов. Оптическое когерентное излучение. М.: Советское радио, 1974, с. 117], причем, чем больше NA, тем выше степень расходимости лазерного пучка 5, выходящего через торец 4 сердцевинки 3 оптоволоконного вывода 2.

Откуда угол α на фиг. 1, 2 определяем из соотношения (5):

$$\alpha = \arcsin NA = \arcsin 0,06 = 3,44^\circ.$$

Диаметр $D_{\text{лп}}$ малорасходящегося лазерного пучка 7 на выходе из оптической системы определим по соотношению (2):

$$D_{\text{лп}} = 2F \cdot [\text{ctg}(\beta - \alpha/2) - \text{ctg}(\beta + \alpha/2)] = 2 \cdot 400 \cdot [\text{ctg}(79^\circ - 3,44^\circ/2) - \text{ctg}(79^\circ + 3,44^\circ/2)] = 50 \text{ мм}.$$

Размеры апертур главного зеркала 6 D и вторичного зеркала 11 d определим по соотношениям (3) и (4):

$$D = F \cdot \{4[\text{ctg}(\beta - \alpha/2) - \text{ctg}(\beta + \alpha/2)]^2 + [\text{ctg}^2(\beta - \alpha/2) - \text{ctg}^2(\beta + \alpha/2)]^2\}^{1/2} = \\ = 400 \cdot \{4[\text{ctg}(79^\circ - 3,44^\circ/2) - \text{ctg}(79^\circ + 3,44^\circ/2)]^2 + [\text{ctg}^2(77,28^\circ) - \text{ctg}^2(80,72^\circ)]^2\}^{1/2} = \\ = 51 \text{ мм};$$

$$d = (L + 0,5 \delta / NA) \cdot NA \cdot [1/\sin(\alpha + \beta) + 1/\sin(\beta - \alpha)] =$$

$$= (160 + 0,5 \cdot 0,02 / 0,06) \cdot 0,06 \cdot [1/\sin(3,44^\circ + 79^\circ) + 1/\sin(79^\circ - 3,44^\circ)] = 20 \text{ мм}.$$

Покажем, что выбранный параметр h отвечает соотношению (1), при этом максимальное и минимальное допустимые расстояния оптической оси 10 от оси 16 полной параболы 12 определим по соотношениям (7), (8):

$$h_{\text{max}} = 2 \cdot F \cdot \text{ctg}(\beta + \alpha/2) - (L + 0,5 \delta / NA) \cdot NA \cdot \sin(\beta) / \sin(\beta - \alpha) =$$

$$= 2 \cdot 400 \cdot \text{ctg}(79^\circ + 3,44^\circ/2) - \\ - (160 + 0,5 \cdot 0,02 / 0,06) \cdot 0,06 \cdot \sin(79^\circ) / \sin(79^\circ - 3,44^\circ) = 121 \text{ мм};$$

$$h_{\text{min}} = (L + 0,5 \delta / NA) \cdot NA \cdot \sin(\beta) / \sin(\beta + \alpha) =$$

$$= (160 + 0,5 \cdot 0,02 / 0,06) \cdot 0,06 \cdot \sin(79^\circ) / \sin(79^\circ + 3,44^\circ) = 10 \text{ мм}.$$

Таким образом, выбранный параметр $h = 60$ мм отвечает соотношению (1). Однако необходимо отметить, что при применении выражений (7) и (8) необходимо учитывать конструктивные особенности оправ, в которых размещены главное зеркало 6 и вторичное зеркало 11 в реальной конструкции оптической системы.

Приведем вывод соотношений (2), (3) и (4) для оценки соответственно диаметра малорасходящегося лазерного пучка 7 на выходе из оптической системы, характерного размера апертур главного зеркала 6 и вторичного зеркала 11, а также соотношений (7), (8) для оценки максимального и минимального допустимых расстояний оптической оси 10 от оси 16 полной параболы 12.

При выводе соотношений (2-8) примем, что излучение исходит из сердцевинки 3 через торец 4 как из точечного источника излучения (точка А), как показано на фиг. 1, размещенного на расстоянии r от торца 4 на оптической оси 10 сердцевинки 3 оптоволоконного вывода 2.

Вывод соотношений (2-4) вытекает из определения и основных свойств полной параболы 12, образуемой при пересечении параболоида вращения с осью OZ плоскостью

YOZ [Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. Изд. переработанное. Под редакцией Г. Гроше и В. Циглера. Совместное издание. Издательство «Тойбнер» Лейпциг, Москва «Наука», Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. с. 244]. Как приведено на фиг. 1 и 2, главное зеркало 6, являющееся частью параболоида вращения полной параболы 12, выполнено вогнутым, внеосевым с фокусом F и симметричным относительно плоскости YOZ. Причем, как видно из фиг. 1 и 2, касательная плоскость 14 в центре 13 (точке M) к главному зеркалу 6 при пересечении с перпендикулярной ей плоскостью YOZ образует касательную 14 к полной параболе 12 в точке M. Касательная 14 к полной параболе 12 является биссектрисой углов между фокальным радиусом-вектором точки M полной параболы 12 и диаметром 15, проходящим через эту же точку M. А вторичное зеркало 11 установлено в СФИНЛП так, что его плоскость параллельна касательной плоскости 14 к главному зеркалу 6 в центре 13 (точке M). Рассмотрим треугольники на фиг. 2 $\triangle ABC$, $\triangle ABD$, $\triangle CBF$ и $\triangle BDF$, имея ввиду закон отражения лучей, падающих на плоскость вторичного зеркала 11. Считая известными углы α , максимальный угол, под которым луч лазера выходит через торец 4 сердцевины 3 оптоволоконного вывода 2, и β , угол полученный в плоскости YOZ при пересечении оптической оси 10 с плоскостью вторичного зеркала 11, можно показать, что углы при вершине F треугольников $\triangle CBF$ и $\triangle BDF$ равны α , а длины отрезков $AB=BF=L+r$. Определим из фиг. 2 координаты точек пересечения полной параболы 12 с крайними лучами лазерного пучка 5, отраженными от плоскости вторичного зеркала 11 в рассматриваемой плоскости YOZ - это точки a и b, используя каноническое уравнение параболы [Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. Изд. переработанное. Под редакцией Г. Гроше и В. Циглера. Совместное издание. Издательство «Тойбнер» Лейпциг, Москва «Наука», Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. с. 244]:

$$Y^2 = 2 \cdot p \cdot Z, \quad (9)$$

где p - фокальный параметр полной параболы 12 главного зеркала 6. Откуда длины лучей aF и bF отвечают соотношениям, соответственно:

$$aF = Z_a + p/2, \text{ и } bF = Z_b + p/2, \quad (10)$$

Из треугольников $\triangle adF$ и $\triangle beF$ по соотношениям (10), с учетом свойств параболы, в частности соотношения $F=(p/2; 0)$, определяем координаты по Z для точек a и b на полной параболе, т.е. Z_a и Z_b .

Из треугольника $\triangle adF$ по соотношению $\cos[180^\circ - 2\beta - \alpha] = dF/aF = (F - Z_a)/(F + Z_a)$ и тригонометрических преобразований определяем:

$$Z_a = F \cdot \operatorname{ctg}^2(\beta + \alpha/2). \quad (11)$$

Аналогично из треугольника $\triangle beF$ по соотношению $\cos[180^\circ - 2\beta + \alpha] = eF/bF = (F - Z_b)/(F + Z_b)$ и тригонометрических преобразований определяем:

$$Z_b = F \cdot \operatorname{ctg}^2(\beta - \alpha/2). \quad (12)$$

Из канонического уравнения параболы (9), с учетом (11) и (12), определяем координаты по Y для точек a и b, т.е. Y_a и Y_b :

$$Y_a = 2 \cdot F \cdot \operatorname{ctg}(\beta + \alpha/2); \quad (13)$$

$$Y_b = 2 \cdot F \cdot \operatorname{ctg}(\beta - \alpha/2). \quad (14)$$

Диаметр $D_{\text{лп}}$ малорасходящегося лазерного пучка 7 на выходе из оптической системы

определим из соотношений (13) и (14) как:

$$D_{\text{пл}} = Y_b - Y_a = 2F \cdot [\text{ctg}(\beta - \alpha/2) - \text{ctg}(\beta + \alpha/2)], \text{ т.е. приходим к соотношению (2).}$$

Из Δabc , с учетом (11-14), определяем сторону ab , принимая ее за характерный размер апертуры D главного зеркала 6, по соотношению:

$$ab = D = [(Y_b - Y_a)^2 + (Z_b - Z_a)^2]^{1/2} =$$

$= F \cdot \{4[\text{ctg}(\beta - \alpha/2) - \text{ctg}(\beta + \alpha/2)]^2 + [\text{ctg}^2(\beta - \alpha/2) - \text{ctg}^2(\beta + \alpha/2)]^2\}^{1/2}$, т.е. приходим к соотношению (3).

При этом принимаем, что числовая апертура оптоволокна определяется соотношением $NA = n_1 \cdot \sin \alpha$, где $n_1 = 1$ - показатель преломления воздуха, α - максимальный угол между оптической осью 10 сердцевин 3 оптоволоконного вывода 2 и лучом, под которым он выходит из торца 4 сердцевин 3 оптоволоконного вывода 2, перпендикулярного к его оптической оси 10 [В.А. Дьяков, Л.В. Тарасов. Оптическое когерентное излучение. М.: Советское радио, 1974, с. 117], причем, чем больше NA , тем выше степень расходимости лазерного пучка 5, выходящего через торец 4 сердцевин 3 оптоволоконного вывода 2. Откуда угол α на фиг. 1, 2 и в выражениях (10-14) определяем из соотношения (5), т.е.

$$\alpha = \arcsin NA.$$

Откуда расстояние r точечного источника излучения (точка А) от торца 4 на оптической оси 10 сердцевин 3 оптоволоконного вывода 2, как показано на фиг. 1, в первом приближении можно определить как $r = 0.5\delta / \text{tg} \alpha$. Для малых углов α можно принять:

$$r = 0.5\delta / \sin \alpha = 0.5\delta / NA. \quad (15)$$

На фиг. 2 и в выражениях (10-14) угол β для принятого конструктивного решения рассматриваемой оптической системы, можно определить, предварительно считая известными параметры h , L и r из соотношения (15), например, из треугольника $\Delta ВНF$:

$$ВН/ВF = \sin(180^\circ - 2\beta), \text{ или}$$

$$h/(L+r) = \sin(180^\circ - 2\beta), \text{ откуда определяем угол } \beta$$

$$\beta = 90^\circ - 0.5 \cdot \arcsin[h/(L+r)], \text{ т.е. приходим к соотношению (6).}$$

Оценку характерного размера апертуры вторичного зеркала 11 выполним из рассмотрения треугольников ΔABC и ΔABD , используя теорему синусов [Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. Изд. переработанное. Под редакцией Г. Гроше и В. Циглера. Совместное издание. Издательство «Тойбнер» Лейпциг, Москва «Наука», Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. с. 225]. Определяем сторону $CD = CB + BD$, принимая ее за характерный размер апертуры d вторичного зеркала.

$CD = CB + BD = (L+r)\sin(\alpha)/\sin[180^\circ - (\alpha+\beta)] + (L+r)\sin(\alpha)/\sin(\beta-\alpha)$, откуда приходим к соотношению (3):

$$d = (L + 0.5\delta/NA) \cdot NA \cdot [1/\sin(\alpha+\beta) + 1/\sin(\beta-\alpha)].$$

h_{max} и h_{min} - максимальное и минимальное допустимые расстояния оптической оси 10 от оси 16 полной параболы 12 соответственно определяем из треугольников ΔABC и ΔABD , вычисляя высоты из вершин C и D на сторону AB в этих треугольниках. При определении h_{max} также используем выражение для Y_a из (13). Откуда получаем выражения (7) и (8).

Нужно отметить, что при применении выражений (7) и (8) необходимо учитывать конструктивные особенности оправ, в которых размещены главное зеркало 6 и вторичное зеркало 11 в конструкции оптической системы.

(57) Формула изобретения

Оптическая система формирования и наведения лазерного пучка, включающая устройство сканирования, передающий лазерный модуль с оптоволоконным выводом, с числовой апертурой NA, с сердцевинной диаметром δ , через торец которой выходит лазерный пучок, а на выходе из оптической системы лазерный пучок падает на главное зеркало, выполненное вогнутым внеосевым параболическим с фокусом F, конструктивно связанное с устройством "грубого" наведения, и отражается в виде малорасходящегося лазерного пучка лучей, отличающаяся тем, что в нее введены блок фокусировки, включающий механизм перемещения торца сердцевинной вдоль ее оптической оси, перпендикулярной торцу и проходящей через его геометрический центр, вторичное зеркало, выполненное плоским, на которое направлен лазерный пучок, который, отражаясь, падает на упомянутое главное зеркало, причем для фокального радиуса-вектора точки полной параболы, являющейся центром главного зеркала, касательная плоскость к главному зеркалу в этой точке параллельна плоскости вторичного зеркала, при этом через центр главного зеркала проходит выходная оптическая ось малорасходящегося лазерного пучка, совпадающая с диаметром полной параболы, параллельная оптической оси сердцевинной оптоволоконного вывода и лежащая вместе с параллельными между собой осью полной параболы и упомянутой оптической осью, в одной плоскости с ними, причем торец сердцевинной оптоволоконного вывода отстоит на расстоянии L от точки пересечения оптической оси с плоскостью вторичного зеркала, образующей при пересечении угол β , отражаясь от которой в этой точке, луч лазера, совпадающий с упомянутой оптической осью, падает в центр главного зеркала, при этом оптическая ось сердцевинной оптоволоконного вывода отстоит от оси полной параболы на расстоянии h, удовлетворяющем неравенству:

$$h_{\max} > h > h_{\min},$$

при этом вторичное зеркало конструктивно связано с устройством сканирования и отражает идущий от торца сердцевинной оптоволоконного вывода лазерный пучок в виде расходящегося пучка лучей на главное зеркало, отражающее в свою очередь на плоскость изображения малорасходящийся лазерный пучок лучей, диаметр $D_{\text{лп}}$ которого на выходе из оптической системы отвечает соотношению:

$$D_{\text{лп}} = 2F \cdot [\text{ctg}(\beta - \alpha/2) - \text{ctg}(\beta + \alpha/2)],$$

а размеры апертур главного зеркала D и вторичного зеркала d определяют по соотношениям:

$$D = F \cdot \{4[\text{ctg}(\beta - \alpha/2) - \text{ctg}(\beta + \alpha/2)]^2 + [\text{ctg}^2(\beta - \alpha/2) - \text{ctg}^2(\beta + \alpha/2)]^2\}^{1/2};$$

$$d = (L + 0.5 \delta/NA) \cdot NA \cdot [1/\sin(\alpha + \beta) + 1/\sin(\beta - \alpha)],$$

где углы α и β рассчитаны по формулам:

$$\alpha = \arcsin NA;$$

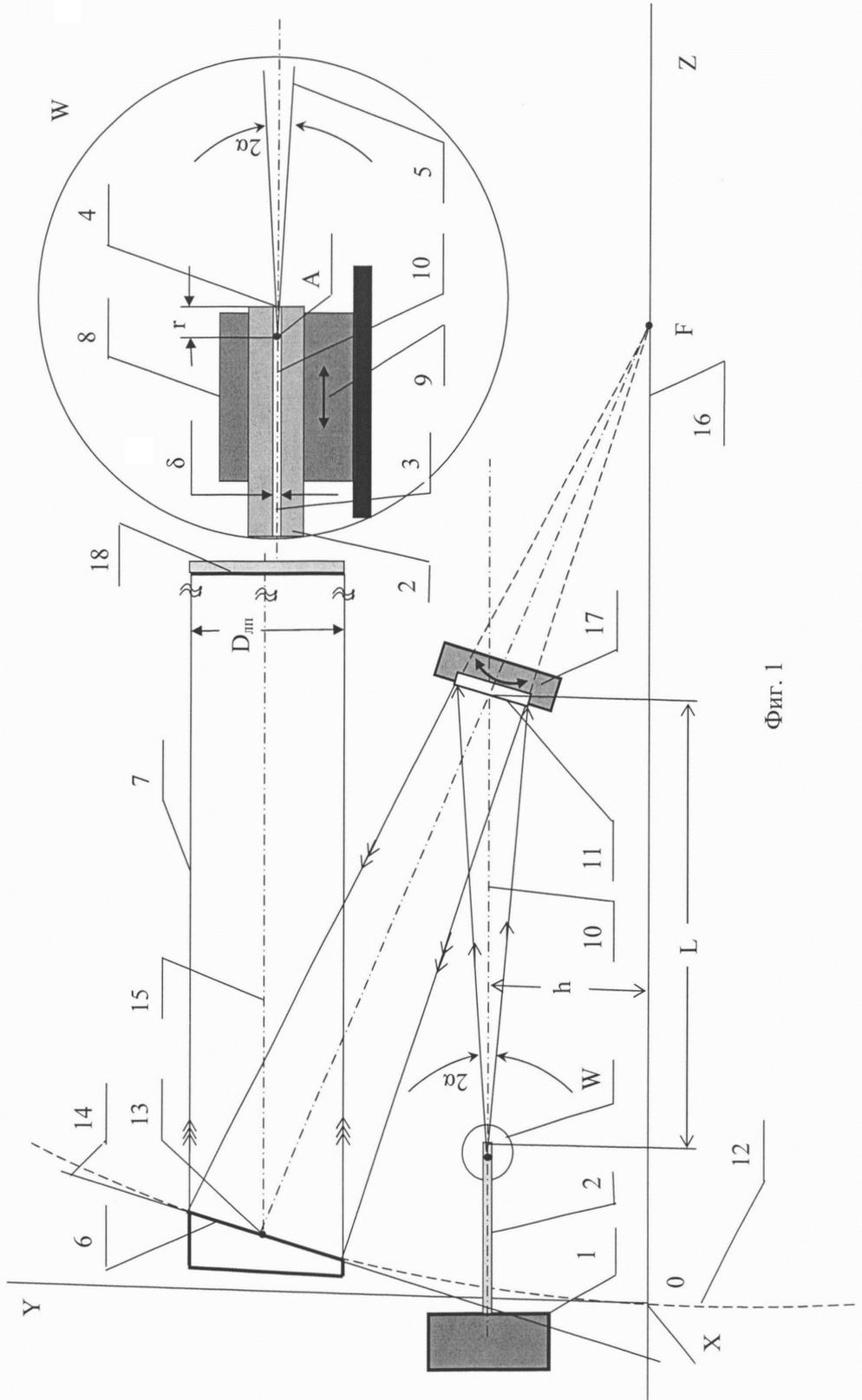
$$\beta = 90^\circ - 0.5 \cdot \arcsin[h/(L + 0.5 \delta/NA)],$$

h_{\max} и h_{\min} - максимальное и минимальное допустимые расстояния оптической оси от оси полной параболы соответственно, определяемые по соотношениям:

$$h_{\max} = 2 \cdot F \cdot \text{ctg}(\beta + \alpha/2) - (L + 0.5 \delta/NA) \cdot NA \cdot \sin(\beta) / \sin(\beta - \alpha);$$

$$h_{\min} = (L + 0.5 \delta/NA) \cdot NA \cdot \sin(\beta) / \sin(\beta + \alpha).$$

1



Фиг. 1

2

