

УДК 535.8 621.373.826

Бабаев Д.Д.,

кандидат технических наук, доцент

доцент кафедры «Физики им. В.А. Фабриканта»

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Россия, г. Москва

Белый В.С.,

кандидат технических наук, доцент

доцент кафедры «Физики им. В.А. Фабриканта»

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Россия, г. Москва

Неткачев В.В.,

студент

4 курс, Институт радиотехники и электроники

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Россия, г. Москва

СХЕМА РАСШИРИТЕЛЯ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА С ИЗМЕНЯЕМЫМ УВЕЛИЧЕНИЕМ

Аннотация: в статье представлены анализ лазерных установок и расширителей пучка лазера, разработанная схема и результаты расчёта усовершенствованной схемы расширителя лазерного пучка с плавно изменяемым увеличением, позволяющая создать конструкцию расширителя с увеличенным рабочим спектральным диапазоном, увеличенным диаметром входного пучка, расширенным диапазоном изменения увеличений, высокой степенью коррекции аберраций, исключая возможность образования сфокусированного обратного блика от поверхности первого компонента и может быть использована в составе технологических установок с лазерными источниками излучения,

работающими в широком спектральном диапазоне, а также с лазерами с перестраиваемой частотой генерации.

***Ключевые слова:** лазерная установка, расширитель, конструкция, спектральный диапазон, абберация, обратный блик, частота генерации.*

DIAGRAM OF THE LASER BEAM EXPANDER WITH VARIABLE MAGNIFICATION

***Abstract:** the article presents an analysis of laser installations and laser beam expanders, the developed scheme and the calculation results of an improved laser beam expander scheme with a smoothly variable magnification, which allows creating an expander design with an increased operating spectral range, an increased input beam diameter, an extended magnification range, a high degree of aberration correction, eliminating the possibility of the formation of a focused back glare from the surface of the first component and can be used as part of technological installations with laser radiation sources operating in a wide spectral range, as well as with lasers with tunable generation frequency.*

***Keywords:** laser installation, expander, design, spectral range, aberration, reverse glare, generation frequency.*

Лазеры широко используется в современных оборудовании, технологиях, научных исследованиях. В том числе, лазерное излучение, благодаря таким его особенностям как монохроматичность, когерентность, малая расходимость и высокая яркость широко используется для лазерной сварки, резки, гравировки и других технологических процессов обработки материалов.

Для большинства типов лазеров, используемых в установках характерны небольшие диаметры пучков – порядка 0,5÷2,0 мм. В то же время, в зоне обработки материала, при решении ряда задач, необходимо сфокусировать

излучение в пятно с наименьшим диаметром либо для того, чтобы создать большую плотность мощности, например, при резке или сварке материала, либо чтобы повысить точность обработки, например, при гравировке материала. Минимальный диаметр пятна δ , в которое можно сфокусировать лазерное излучение теоретически дается известной формулой Рэлея:

$$\delta = 2,44\lambda f/D,$$

где λ – длина волны лазера, f – фокусное расстояние объектива, D – диаметр входного зрачка объектива.

Очевидно, что для того, чтобы сфокусировать излучение в пятно малого размера, необходимо увеличивать диаметр входного зрачка объектива D , который должен быть полностью заполнен лазерным излучением, то есть необходимо расширять лазерный пучок. С этой целью применяются расширители или трансфокаторы пучка с постоянным или переменным увеличением.

В настоящее время в лазерных технологических установках и в другом оборудовании используется широкая номенклатура источников излучения, работающих на разных длинах волн. Поэтому оптическая схема расширителя лазерного пучка должна обеспечивать необходимый диаметр коллимированного пучка на выходе расширителя не только с учетом разных диаметров пучка на входе, но и с учетом разных рабочих длин волн в зависимости от примененного типа лазера. Кроме того, широкое распространение получили лазеры с перестраиваемой рабочей длиной волны. Такие лазеры требуют для совместной работы формирующую оптику, в том числе, расширители с исправленными хроматическими аберрациями в широком спектральном диапазоне.

Анализ конструкций и характеристик существующих расширителей показал следующее.

Дифракционно-ограниченный расширяющий телескоп [1], состоящий из двух дублетов, разделенных большим воздушным промежутком,

рассчитанный на увеличение 20^{\times} в широком спектральном диапазоне (0,240 ÷ 1,100) мкм. Недостатками известного расширяющего телескопа являются: отсутствие возможности изменения увеличения; большая длина схемы (244мм).

Расширитель [2], состоящий из четырех линз, расположенных на одной оси вдоль падающего пучка лазерного излучения и разделенных воздушными промежутками, рассчитанный на рабочий спектральный диапазон 0,365 ÷ 1,300 мкм и увеличение 10^{\times} . Недостатками известного расширителя являются: отсутствие возможности изменения увеличения; применение трех разных материалов для изготовления линз.

Расширитель с изменяемым увеличением [3], состоящий из трех расклеенных дублетов, расположенных на одной оси вдоль падающего пучка лазерного излучения и разделенных воздушными промежутками; первый и второй дублеты могут перемещаться вдоль оптической оси относительно неподвижного третьего дублета для изменения увеличения расширителя в пределах 4,251 ÷ 6,790 крат; рабочий спектральный диапазон расширителя 486,1 ÷ 632,8 нм. Недостатками известного расширителя являются: небольшие по величине увеличения; небольшой диапазон изменения увеличений; узкий рабочий спектральный диапазон, что ограничивает номенклатуру лазерных источников, совместимых с данным расширителем; сложность оптической схемы.

Наиболее предпочтительным по своим характеристикам и конструкции является расширитель лазерного пучка [4]. Расширитель состоит из четырех линз, расположенных на одной оси вдоль падающего пучка лазерного излучения, разделенных воздушными промежутками. Первая и вторая линзы плосковогнутые с одинаковыми радиусами, причем вогнутая поверхность первой линзы обращена в сторону излучателя, третья линза менисковая, четвертая – двояковыпуклая с разными радиусами. Расстояния между первой и второй линзами изменяется для обеспечения вариации увеличения

расширителя в диапазоне $20\div 40$ крат при диаметре входного пучка 0,5-1,0 мм. Все линзы расширителя изготовлены из плавленого кварца. Оптическая схема рассчитана на работу с двумя длинами волн $\lambda_1=355\text{нм}$ (УФ линия излучения аргонового лазера) и $\lambda_2=532\text{нм}$ (вторая гармоника Nd: YAG-лазера). Недостатками этого технического решения являются: ограниченные возможности применения расширителя по спектральному диапазону: он рассчитан всего лишь на две рабочие длины волны; возможность возникновения сфокусированного блика в результате отражения от вогнутой поверхности первой линзы, обращенной в сторону лазера.

Научно-техническая задача направлена на создание устройства с увеличенным рабочим спектральным диапазоном, расширенным диапазоном изменения увеличений, высокой степенью коррекции аберраций при исключении возможности образования сфокусированного излучения в направлении излучателя от поверхностей первого компонента расширителя.

В результате исследований установлено, что технический результат новой схемы расширителя заключается в расширении рабочего спектрального диапазона расширителя, увеличении диаметра входного пучка, расширении диапазона увеличений и повышении степени коррекции аберраций.

Разработана схема ахроматического расширителя лазерного пучка с плавно изменяемым увеличением, которая включает три оптически связанных компонента, разделенных воздушными промежутками (рис. 1). Первый компонент содержит первую линзу 1 в виде положительного мениска, обращенного выпуклой поверхностью к излучателю, и выполнен с возможностью перемещения вдоль оптической оси относительно неподвижного второго компонента, содержащего двояковогнутую вторую линзу 2 с одинаковыми радиусами. Третий компонент, содержащий двояковогнутую третью линзу 3 и двояковыпуклую четвертую линзу 4, также выполнен с возможностью перемещаться вдоль оптической оси

относительно второго компонента. Первая 1, вторая 2 и четвертая 4 линзы выполнены из оптического стекла с $n_d = 1,439$ и $\nu_d = 94,7$, а третья линза 3 - из оптического стекла с $n_d = 1,642$ и $\nu_d = 58,4$, где n_d и ν_d – показатели преломления и числа Аббе стекол для линии d соответственно.

На рис.1 обозначены: d_1 - толщина первой линзы; d_2 - изменяемое расстояние между первым и вторым компонентами; d_3 - толщина второй линзы; d_4 - изменяемое расстояние между вторым и третьим компонентами; d_5 - толщина третьей линзы; d_6 - величина воздушного промежутка между третьей и четвертой линзами; d_7 - толщина четвертой линзы.

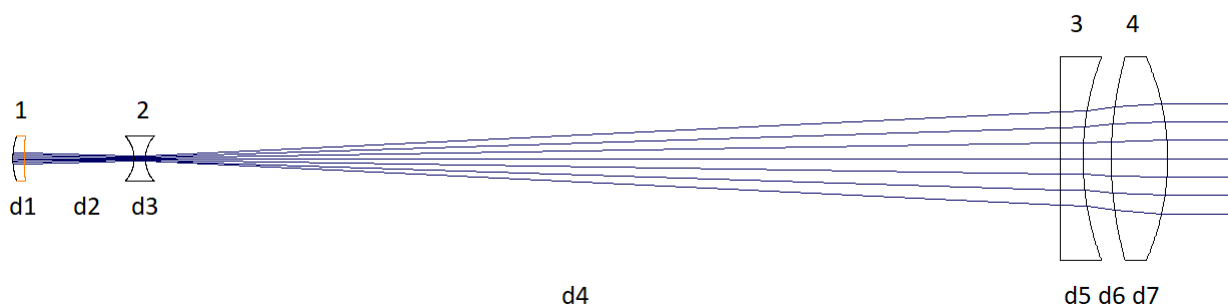


Рисунок 1. Ахроматический расширитель лазерного пучка с плавно изменяемым увеличением

Принцип действия предлагаемого расширителя: лазерный псевдо-параллельный пучок, исходящий из лазерного излучателя, попадает на менисковую первую линзу 1 первого компонента, имеющую положительную оптическую силу, после чего становится сходящимся, и на первой поверхности двояковогнутой второй линзы 2 второго компонента диаметр сечения пучка уменьшается; после прохождения двояковогнутой второй линзы 2 второго компонента, имеющей отрицательную оптическую силу, пучок начинает расходиться и попадает сначала на двояковогнутую третью линзу 3 третьего компонента, а затем и на двояковыпуклую четвертую линзу 4 третьего компонента, после чего становится параллельным и увеличенным в диаметре. Расстояние d_2 меняется для изменения диаметра сечения пучка, а расстояние d_4 меняется в

соответствии с изменением d_2 для компенсации изменившейся сходимости пучка и коллимации излучения. Таким образом осуществляется вариация диаметра пучка на выходе расширителя и, в соответствии с выбранным увеличением, уменьшается расходимость лазерного излучения.

В соответствии с предложенным решением в качестве конкретного примера рассчитан расширитель для Nd:YAG лазера, работающий в широком спектральном диапазоне и обладающий следующими техническими характеристиками: рабочий спектральный диапазон 476,5÷1064,0 нм; диаметр входного пучка: 1÷2 мм; диапазон изменения увеличения: 6÷15 крат для входного диаметра пучка до 2 мм; максимальная длина оптической схемы: 227 мм.

Следует подчеркнуть, что расширитель по предлагаемой схеме может быть рассчитан для любых лазеров с рабочей длиной волны в диапазоне от УФ до ближнего ИК-излучения.

Конструктивные параметры рассчитанного расширителя лазерного пучка приведены в таблицах 1 и 2. Для материала линз указаны его основные оптические постоянные: показатель преломления для линии d - n_d и число Аббе - ν_d соответственно. Все оптические поверхности линз расширителя имеют сферическую форму. В устройстве использовано только два типа оптического стекла.

Таблица 1.

Конструктивные параметры рассчитанного расширителя

	Радиус, мм		Толщина, мм	Материал
R1	22,728	d1	2,0	1,439 /94,7
R2	75,745	d2	изменяемая	воздух
R3	-7,817	d3	2,0	1,439 /94,7
R4	7,817	d4	изменяемая	воздух
R5	-1960,898	d5	6,3	1,642/58,4
R6	51,093	d6	8,0	воздух
R7	67,087	d7	12,0	1,439 /94,7
R8	-48,808			воздух

**Значения изменяемых расстояний d_2 и d_4 при увеличениях
расширителя 6, 8 и 15 крат**

Увеличение, крат	6	8	15
d_2 , мм	44,855	39,218	19,524
d_4 , мм	159,777	160,870	162,417

Анализ aberrаций оптической схемы расширителя лазерного пучка проводился с использованием модели параксиальной (безабберационной) линзы с фокусным расстоянием 100 мм, позволяющей сфокусировать коллимированный пучок.

Результаты расчета схемы предлагаемого расширителя представлены на рис. 1...5.

Анализ полученных результатов показал:

график практически совпадает с теоретическим пределом (Diff. Limit), два графика накладываются друг на друга (рис.2);

ошибка составляет менее $0,025\lambda$, где λ – рабочая длина волны лазера (рис.3);

волновая aberrация при диаметре входного пучка 2 мм и увеличении 15^x для длины волны 1,064мкм не превышает $\pm 0,050\lambda$, для длины волны 0,4765мкм – превышает $\pm 0,100\lambda$.

Волновая aberrация характеризует качество изображения – распределение интенсивности (мощности света) по диаметру пятна изображения. При $< 0,100\lambda$ – идеальное качество, при $< 0,250\lambda$ – очень высокого качества и т.д.

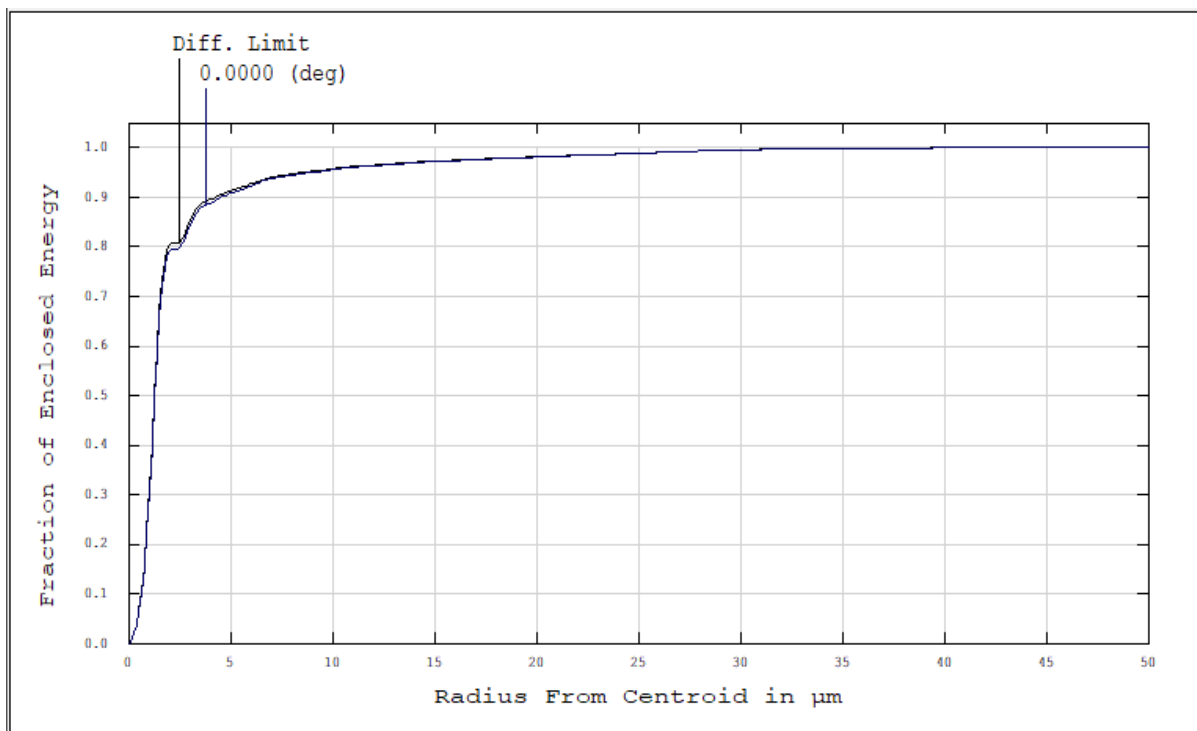


Рисунок 2. График зависимости концентрации энергии в пятне в зависимости от радиуса

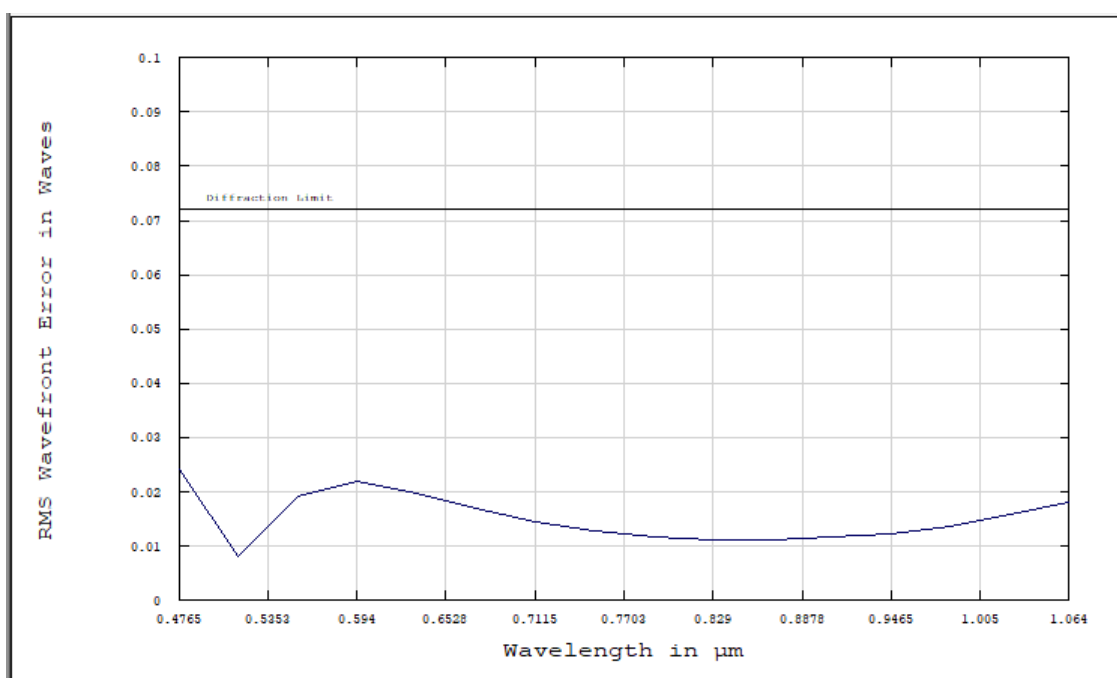


Рисунок 3. График ошибки волнового фронта для разных длин волн в сравнении с дифракционным пределом

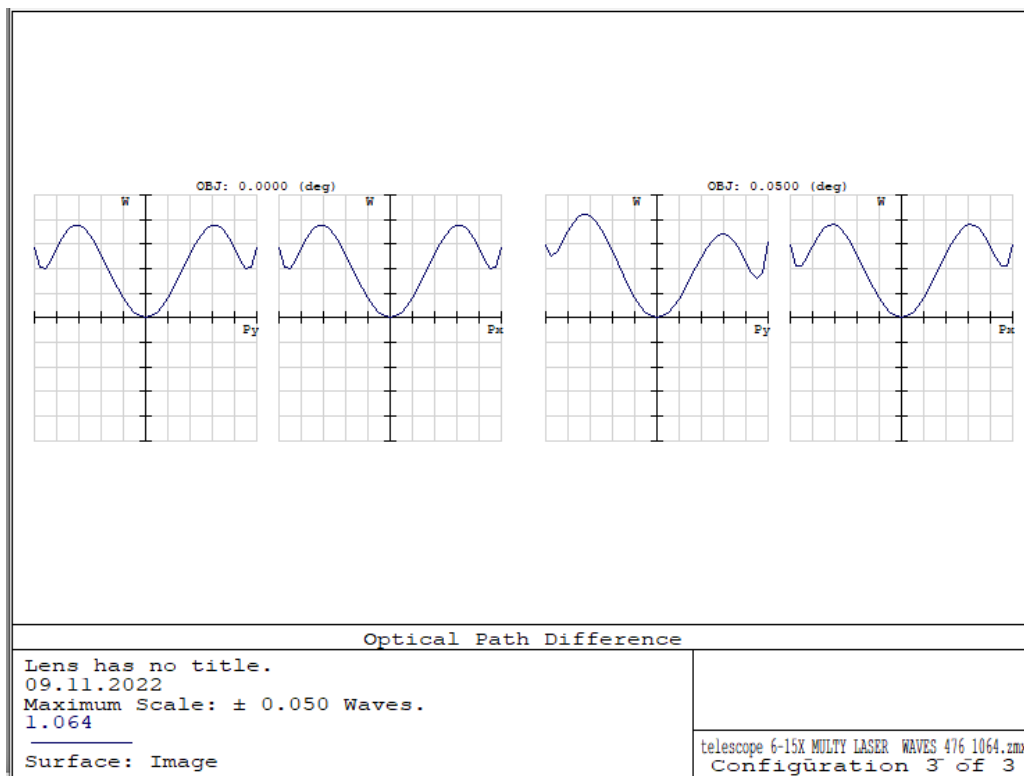


Рисунок 4. График волновых aberrаций расширителя при диаметре входного пучка 2мм и увеличении 15^x для длины волны 1,0640 мкм

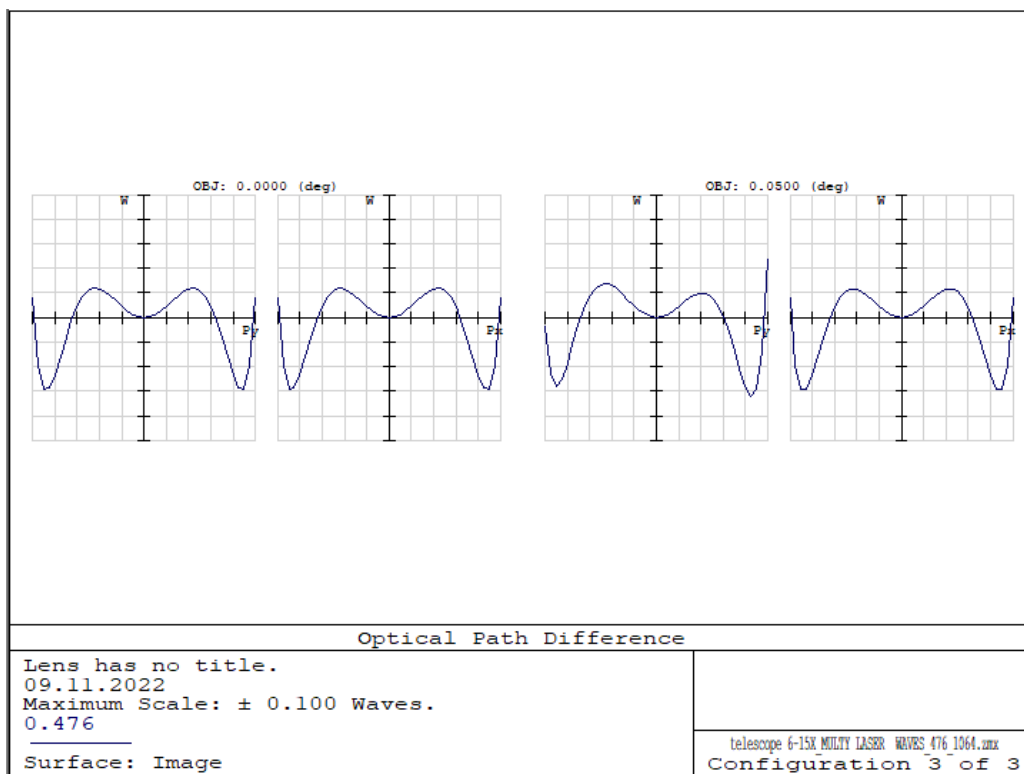


Рисунок 5. График волновых aberrаций расширителя при диаметре входного пучка 2мм и увеличении 15^x для длины волны 0,4765 мкм

Ахроматический расширитель может работать с диаметрами входных пучков $1\div 2$ мм при увеличениях $6\div 15$ крат, а максимальный диаметр выходного пучка, при котором сохраняется дифракционное качество изображения достигает 30 мм ($\varnothing 2$ мм $\times 15^x$), при этом среднеквадратическая ошибка волнового фронта не превышает $0,025\lambda$. Среднеквадратическая ошибка волнового фронта при диаметре входного пучка 1 мм и увеличении 15 крат - менее $0,007\lambda$.

Использование предлагаемой схемы расширителя пучка лазера позволяет создать конструкцию расширителя с увеличенным рабочим спектральным диапазоном, увеличенным диаметром входного пучка, расширенным диапазоном изменения увеличений, высокой степенью коррекции aberrаций, которая исключает возможность образования сфокусированного обратного блика от поверхности первого компонента и может быть использована в составе технологических установок с лазерными источниками излучения, работающими в широком спектральном диапазоне, а также с лазерами с перестраиваемой частотой генерации.

Использованные источники:

1. US Patent 4461546A, 24.07.1984. Diffraction-limited achromatic beam expanding telescope. – Текст: электронный// GooglePatents: поисковая система. – 2022. – URL: [https://patents.google.com/patent/US4461546A /en](https://patents.google.com/patent/US4461546A/en) (дата обращения: 05.11.2022).

2. US Patent 5305150A, 19.04.1994. Laser beam expander: 10x. – Текст: электронный// GooglePatents: поисковая система. – 2022. – URL: [https://patents.google.com/patent/US5305150A /en](https://patents.google.com/patent/US5305150A/en) (дата обращения: 05.11.2022).

3. EP Patent 0453822A1, 30.10.1991. Zoom beam expander. – Текст: электронный// GooglePatents: поисковая система. – 2022. – URL: <https://patents.google.com/patent/EP0453822A1/en> (дата обращения: 05.11.2022).

4. CN Patent 214795440U, 19.11.2021. Dual-wavelength large-magnification continuous zooming laser beam expander. – Текст: электронный// GooglePatents: поисковая система. – 2022. – URL: <https://patents.google.com/patent/CN214795440U/en> (дата обращения: 05.11.2022).