

*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*

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ РАСШИРИТЕЛЬ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА

***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 aberrаций, 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, aberrация, обратный блик, частота генерации.*

UNIVERSAL LASER BEAM EXPANDER

Annotation: *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.*

Введение. 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 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.

Состояние вопроса. Известны расширители лазерного пучка [1, 2, 3, 4], общим недостатком которых является отсутствие возможности изменения диаметра пучка на выходе, что существенно ограничивает диапазон их применения.

Известен расширитель лазерного пучка для мощного УФ-лазера [5], состоящий из трех оптически связанных линз, расположенных на одной оси вдоль падающего пучка лазерного излучения. Первая и вторая (по ходу луча) линзы плоско-вогнутые, расположены вогнутой поверхностью в сторону лазера, третья линза плоско-выпуклая, расположена плоскостью в сторону лазера. Первая и третья линзы могут перемещаться вдоль оптической оси относительно неподвижной второй линзы для изменения увеличения. Расширитель рассчитан на диаметр входного пучка $0,5 \div 1$ мм и диапазон изменения увеличения $6 \div 12$ крат. Недостатками известного расширителя являются: ограниченный диаметр входного пучка лазерного излучения и ограниченный диапазон изменения увеличений. Так, для пучков с максимальным заявленным диаметром 1 мм оно не превышает 9 крат, а максимальное заявленное увеличение 12 крат реализуется только для диаметра входного пучка до 0,7 мм. Таким образом, максимальный диаметр выходного пучка составляет всего 9 мм. Это обстоятельство значительно ограничивает круг задач, решаемых лазерным оборудованием, оснащенным известным расширителем; возможность возникновения сфокусированного блика в результате отражения от вогнутой поверхности первой линзы, обращенной в сторону лазера, что может привести к нежелательным последствиям; большая максимальная длина оптической схемы расширителя - 212,6 мм.

Наиболее предпочтительную схему имеет расширитель лазерного пучка [6]. Расширитель состоит из четырех оптически связанных линз, расположенных на одной оси вдоль падающего пучка лазерного излучения. Вторая линза может перемещаться вдоль оптической оси относительно первой линзы, а третья и четвертая линзы могут совместно перемещаться относительно второй линзы для обеспечения изменения диаметра лазерного пучка на выходе расширителя. Первая линза – мениск, обращенный выпуклой стороной к лазеру, вторая и третья линзы двояковогнутые, четвертая линза двояковыпуклая. Все оптические поверхности линз имеют разные радиусы кривизны, за исключением второй, у которой радиусы кривизны одинаковые. Недостатками этого расширителя являются: низкая технологичность изготовления его оптических элементов из-за большой номенклатуры радиусов, для каждого из которых необходимо изготовить пробные стекла и инструмент; малый диаметр выходного пучка при максимальном увеличении – 9 мм; низкая степень коррекции aberrаций при больших увеличениях и больших диаметрах пучков на входе расширителя.

Постановка задачи. В результате анализа состояния вопроса сформулирована задача создания расширителя лазерного пучка с повышенной технологичностью изготовления его оптических элементов, меньшей себестоимостью, большим диаметром выходного пучка, уменьшенной максимальной длиной оптической схемы и повышенной степенью коррекции aberrаций.

Решение задачи. Многочисленные эксперименты показали оптимальную схему расширителя лазерного пучка, включающего три оптически связанных компонента, разделенных воздушными промежутками. Первый компонент 1 содержит положительную линзу с радиусами R_1 и R_2 , которая имеет возможность перемещаться вдоль оптической оси относительно неподвижного второго компонента 2, который состоит из одной двояковогнутой линзы с одинаковыми радиусами R_3 , R_4 . Третий компонент,

также имеет возможность перемещаться вдоль оптической оси относительно второго компонента и состоит из двух линз – отрицательной 3, с радиусами R5, R6 и двояковыпуклой 4 с радиусами R7, R8. Особенность данной схемы заключается в том, что линза первого компонента выполнена двояковыпуклой, а первая линза третьего компонента – плосковогнутой, обращенной плоской поверхностью в сторону второго компонента, причем для радиусов линз первого и третьего компонентов выполняются следующие равенства: $R1=R8$, $R2=R6$ и $R5=\infty$ (рис.1).

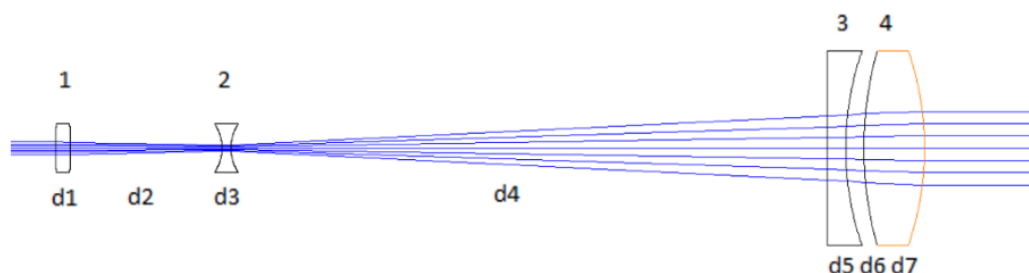


Рисунок 1. Оптическая схема расширителя лазерного пучка

На рис.1 введены следующие обозначения: d1 - толщина первой линзы, d2 - изменяемое расстояние между первым и вторым компонентами, d3 - толщина второй линзы, d4 - изменяемое расстояние между вторым и третьим компонентами, d5 - толщина третьей линзы, d6 - величина воздушного промежутка между третьей и четвертой линзами, d7 - толщина четвертой линзы.

Расширитель может работать с диаметрами входных пучков $1\div 2$ мм при увеличениях $6\div 12$ крат, а максимальный диаметр выходного пучка, при котором сохраняется дифракционное качество изображения достигает 20 мм ($2\text{ мм} \times 10^x$), при этом волновая aberrация составляет величину менее $\lambda/20$, где λ – рабочая длина волны лазера. Волновая aberrация при диаметре входного пучка 1мм и увеличении 12 крат менее $\lambda/200$.

Принцип работы расширителя. Лазерный псевдо-параллельный пучок, исходящий из лазерного излучателя, попадает на первую линзу расширителя 1, имеющую положительную оптическую силу становится

сходящимся, и на первой поверхности второй линзы 2 диаметр сечения пучка уменьшается. После прохождения второй линзы, имеющей отрицательную оптическую силу, пучок начинает расходиться и попадает сначала на первую 3, а затем и на вторую 4 линзы 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, соответственно увеличению, уменьшается расходимость лазерного излучения.

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. В соответствии с предложенным решением в качестве конкретного примера рассчитан расширитель для Nd:YAG лазера с длиной волны 1,064 мкм, обладающий следующими техническими характеристиками: рабочая длина волны 1,064 мкм; диаметр входного пучка: $1 \div 2$ мм; диапазон изменения увеличения – $6 \div 12$ крат для входного диаметра 1 мм (волновая абберация меньше $\lambda/200$), $6 \div 10$ крат для входного диаметра 2 мм (волновая абберация $\lambda/100 \div \lambda/20$); максимальная длина оптической схемы: 150,8 мм (6^x , $\varnothing 2$ мм).

Конструктивные параметры рассчитанного расширителя лазерного пучка с плавно изменяемым увеличением приведены в таблице 1, где указаны радиусы поверхностей линз, их толщины и материал.

Таблица 1.

Конструктивные характеристики рассчитываемого расширителя

	Радиус, мм		Толщина, мм	Материал
R1	49,430	d1	2,50	кварц
R2	-48,640	d2	изменяемая	воздух
R3	-7,345	d3	1,50	кварц
R4	7,345	d4	изменяемая	воздух

R5	∞	d5	3,00	кварц
R6	48,640	d6	3,00	воздух
R7	59,724	d7	10,00	кварц
R8	-49,430			воздух

Все оптические поверхности линз расширителя имеют сферическую форму. В качестве материала для линз расширителя применен плавленный кварц, который имеет хорошее пропускание в широком диапазоне от УФ до ближней ИК-области спектра и низкий коэффициент температурного расширения, что делает этот материал универсальным для решения широкого круга задач.

В таблице 2 приведены значения изменяемых расстояний d2 и d4 при увеличениях расширителя 6, 8 и 12 крат.

Таблица 2.

Изменяемые расстояния d2 и d4

Увеличение, крат	6	8	12
d2, мм	24,98	18,10	4,37
d4, мм	98,48	99,23	99,99

Результат. Расчеты показали высокое качество рассчитанного расширителя с разработанной оптической схемой его компоновки. Так, зависимость концентрации энергии в пятне от радиуса практически совпадает с теоретическим пределом. Изменение модуля передаточной функции от пространственной частоты также практически совпадает с дифракционным пределом. Волновая aberrация расширителя при диаметре входного пучка 1мм и увеличении расширителя 12 крат меньше $\lambda/200$, при 2мм и 6 крат соответственно – меньше $\lambda/20$.

Анализ aberrаций оптической схемы расширителя лазерного пучка проводился с использованием модели параксиальной (безабберационной) линзы с фокусным расстоянием 50 мм, позволяющей сфокусировать коллимированный пучок.

На данное техническое решение получен патент на изобретение [7].

Вывод. Технический результат, достигнутый при решении поставленной задачи, заключается в повышении технологичности изготовления оптических элементов расширителя за счет уменьшения количества разных радиусов линз, что ведет к уменьшению количества необходимых для контроля линз пробных стекол и сокращению номенклатуры инструмента для изготовления линз. Таким образом, уменьшается себестоимость изготовления линз расширителя. Другим результатом является увеличение максимального диаметра пучка на выходе расширителя, сокращение максимальной длины оптической схемы и повышение степени коррекции аберраций. Разработанная схема позволяет создать технологичную, компактную конструкцию расширителя с максимальным диаметром лазерного пучка на выходе 20 мм и высокой степенью коррекции аберраций, который может быть использован в составе лазерных технологических установок для решения широкого круга задач.

Список литературы:

1. US Patent 5305150A, 19.04.1994. Laser beam expander: 10x. – Текст: электронный// GooglePatents: поисковая система. – 2022. – URL: <https://patents.google.com/patent/US5305150A/en> (дата обращения: 05.11.2022).
2. US Patent 5329404A, 12.07.1994. Laser beam expander: 5x. – Текст: электронный// GooglePatents: поисковая система. – 2022. – URL: <https://patents.google.com/patent/US5329404A/en> (дата обращения: 05.11.2022).
3. SN Patent 101738730A, 16.06.2010. Laser beam expander featuring adjustable lens spacing. – Текст: электронный// GooglePatents: поисковая система. – 2022. – URL: <https://patents.google.com/patent/SN101738730A/en> (дата обращения: 05.11.2022).

4. Бабаев, Д.Д. Схема расширителя лазерного пучка с изменяемым увеличением. / Д.Д. Бабаев, В.С. Белый В.С., В.В. Неткачёв. – Текст: электронный // Международный научно-исследовательский журнал «Аллея науки»: Современная наука и ее развитие. – 2023. №10(85). – URL: https://alley-science.ru/domains_data/files/3October2023/SHEMa-RaSSHIRITELYa-LaZERNOGO-PUCHKa-S-IZMENYaEMIM-UVELICHENIEM.pdf (дата обращения: 15.10.2023).

5. SN Patent 113376844A, 10.09.2021. Continuous zoom beam expander suitable for high-power-density ultraviolet laser. – Текст: электронный// GooglePatents: поисковая система. – 2022. – URL: <https://patents.google.com/patent/SN113376844A/en> (дата обращения: 05.11.2022).

6. SN Patent 111283320A, 16.06.2020. Laser beam expander and laser processing equipment. – Текст: электронный// GooglePatents: поисковая система. – 2022. – URL: <https://patents.google.com/patent/SN111283320A/en> (дата обращения: 05.11.2022).

7. RU 2 797 961 C1, 13.06.2023. Расширитель лазерного пучка с плавно изменяемым увеличением. – Текст: электронный// ФИПС: поисковая система. – 2023. – URL:<https://fips.ru/EGD/f1b29f6d-89be-4e6d-90f8-aec573695ed5> (дата обращения: 14.11.2023).