

РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКИХ ВАРИОСИСТЕМ ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

П. А. Носов, А. Ф. Ширанков

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва

Описаны несколько типов лазерных вариосистем, отличительные особенности методики их проектирования, результаты разработки лазерных вариосистем для решения различных технических и технологических задач.

В настоящее время области эффективного применения лазерных оптических систем включают многие разделы науки и техники, такие как:

1. Информационные системы (интернет, вычислительная техника и т. п.).
2. Голографические системы разнообразного назначения.
3. Литография для мультипликации СБИС.
4. Лазерные системы 3D видения и 3D сканеры.
5. Медицинское оборудование.
6. Оптические головки лазерного технологического оборудования для сварки, резки, пробивки отверстий, упрочнения, снятия напряжений и др. операций.

7. Аддитивные технологии (лазерное 3D прототипирование и т. п.).

Для эффективной реализации лазерных технологий необходимо в рабочей зоне (зоне обработки материала) обеспечить требуемую плотность мощности излучения P/S , где P – мощность лазерного излучения, а S – площадь лазерного пятна. Мощность лазерного излучения определяется выбранным лазером. Поэтому требуемую в зоне обработки материала плотность мощности излучения обеспечивают за счет формирования пятна необходимого размера.

Обзор отечественной и зарубежной лазерной техники показал недостаточное понимание важной роли оптического блока в лазерных оптико-электронных приборах и системах. Повышение их производительности и характеристик зачастую сводится лишь к увеличению мощности лазера и применению различных кинематических схем. Помимо роста стоимости, при увеличении мощности лазера ухудшается качество его излучения. В результате увеличивается энергопотребление и уменьшается КПД оборудования.

Во всех лазерных технологиях (т. е. везде, где инструментом является лазерное излучение) лазерная оптическая система наряду с лазером – основной блок системы, определяющий свойства и предельные параметры данной технологии!

В зависимости от практической задачи для формирования в рабочей зоне лазерного пучка с требуемыми пространственными параметрами используют лазерные оптические системы различного типа – фокусирующие, согласующие или коллимирующие. Для дальнейшего расширения областей применения лазерных систем, формирующих заданным образом лазерный пучок, разработан новый класс оптических систем с переменными параметрами – лазерные вариосистемы. Такая панкратическая или вариооптика отличается универсальностью, заменяет набор оптических насадок и снижает стоимость лазерной системы. Лазерные вариосистемы обеспечивают плавное изменение параметров выходного пучка – формирование выходной перетяжки лазерного пучка переменного диаметра в плоскости обработки материала или перемещение в пространстве перетяжки малого размера [1, 2].

Лазерная вариосистема – основа аддитивных технологий. На ее основе строится 3D лазерный принтер для выращивания деталей с изменением материала по их высоте. Это позволяет сочетать в разных сечениях одной детали уникальные несочетаемые обычно свойства – гибкости, твердости и износостойкости.

Принципиально важно то, что при разработке лазерной оптики, обладающей высокой эффективностью, необходимо учитывать свойства лазерного источника. Кроме того, для ряда технологических задач предъявляют особые требования к разрабатываемому для их решения оборудованию.

Например, при использовании мощного лазера необходимо обеспечить лучевую стойкость элементов оптической системы.

Разработка лазерных вариосистем в зависимости от свойств резонатора лазера базируется на двух теориях – теории лазерной оптики [3–8] и классической оптики [9]. Выбор необходимой теории производится в зависимости от типа резонатора лазера (устойчивый или неустойчивый).

Для разработки оптических систем, формирующих лазерные пучки, необходимо знать параметры пучка на выходе лазера. Как известно, пространственная структура лазерного пучка, формируемого устойчивыми резонаторами, определяется четырьмя параметрами [4]: 1) длина волны излучения λ , 2) параметр M^2 или BPP , 3) известен один из параметров – диаметр перетяжки $2h_p$, параметр конфокальности пучка z_k или угловая расходимость 2θ , и 4) положение перетяжки пучка. Причем эти параметры удовлетворяют инварианту пучка [3, 4]: $J_p = h_p \theta = h_p^2 / z_k = M^2 \lambda / \pi$. Тем не менее, в паспорте на лазерный источник большинство производителей указывают неполный набор пространственных параметров пучка – наиболее часто отсутствует положение сечения перетяжки пучка. Также для указываемых в паспорте значений пространственных параметров пучка не выполняется инвариант. В этой ситуации для расчета лазерной оптики необходимо самостоятельно измерить параметры пучка лазера или же рассчитать их по известной схеме резонатора и параметрам накачки (задача анализа) [8, 10, 11].

Рассматриваемые в работе лазерные вариосистемы базируются на использовании двухкомпонентной оптической системы с двумя подвижными компонентами. Параметры гауссова пучка, образованного двухкомпонентной оптической системой, определяются следующими выражениями (рис. 1) [3, 4]:

$$2h'_{p2} = 2h_{p1} \sqrt{\alpha_{\text{ЭКВ}}}, \quad z'_{k2} = z_{k1} \alpha_{\text{ЭКВ}}, \quad 2\theta'_2 = \frac{2\theta_1}{\sqrt{\alpha_{\text{ЭКВ}}}}, \quad z'_{p2} = \left(z_{p1} + \Delta \frac{z_{p1}^2 + z_{k1}^2}{f_1'^2} \right) \alpha_{\text{ЭКВ}}. \quad (1)$$

Здесь $2h_{p1}$, z_{k1} , $2\theta_1$ и $2h'_{p2}$, z'_{k2} , $2\theta'_2$ – диаметр перетяжки, параметр конфокальности и угловая расходимость пучка на входе и выходе двухкомпонентной оптической системы; z_{p1} – положение сечения перетяжки входного пучка ($СП_1$) относительно переднего фокуса F_1 первого компонента; z'_{p2} – положение перетяжки выходного пучка ($СП'_2$) относительно заднего фокуса F'_2 второго компонента; Δ – расстояние между F'_1 и F_2 ; $\alpha_{\text{ЭКВ}}$ – коэффициент продольного увеличения двухкомпонентной лазерной оптической системы:

$$\alpha_{\text{ЭКВ}} = \frac{(f'_1 f'_2)^2}{(f_1'^2 + z_{p1} \Delta)^2 + (z_{k1} \Delta)^2}. \quad (2)$$

Соотношения (1) и (2) позволяют определить закон перемещения компонентов $s_2(s_1)$ лазерной вариосистемы, обеспечивающей решение различных практических задач.

В настоящее время детально разработаны методики проектирования и рассчитан ряд лазерных вариосистем двух типов, которые предназначены для решения важнейших технических и технологических задач:

1. Изменение диаметра выходной перетяжки лазерного пучка в фиксированной плоскости обработки материала: диаметр выходной перетяжки $2h'_{p2} - \text{var}$, длина системы $L = \text{const}$, рис. 1,а [1].
2. Перемещение вдоль оси выходной перетяжки постоянного размера: диаметр выходной перетяжки $2h'_{p2} = \text{const}$, длина системы $L - \text{var}$ [2].

Дополнив двухкомпонентную лазерную вариосистему, обеспечивающую неподвижность положения выходной перетяжки, коллимирующим объективом, получим панкратический коллимирующий объектив. Поскольку угловая расходимость лазерного пучка на выходе оптической системы

равна $2\theta'_3 = 2h_{F_3} / f'_3$ [3, 8], где $2h_{F_3}$ – диаметр пучка в передней фокальной плоскости F_3 коллимирующего объектива, для получения минимальной расходимости выходного пучка необходимо перетяжку пучка после второго компонента совместить с передним фокусом коллимирующего объектива (рис. 1,б).

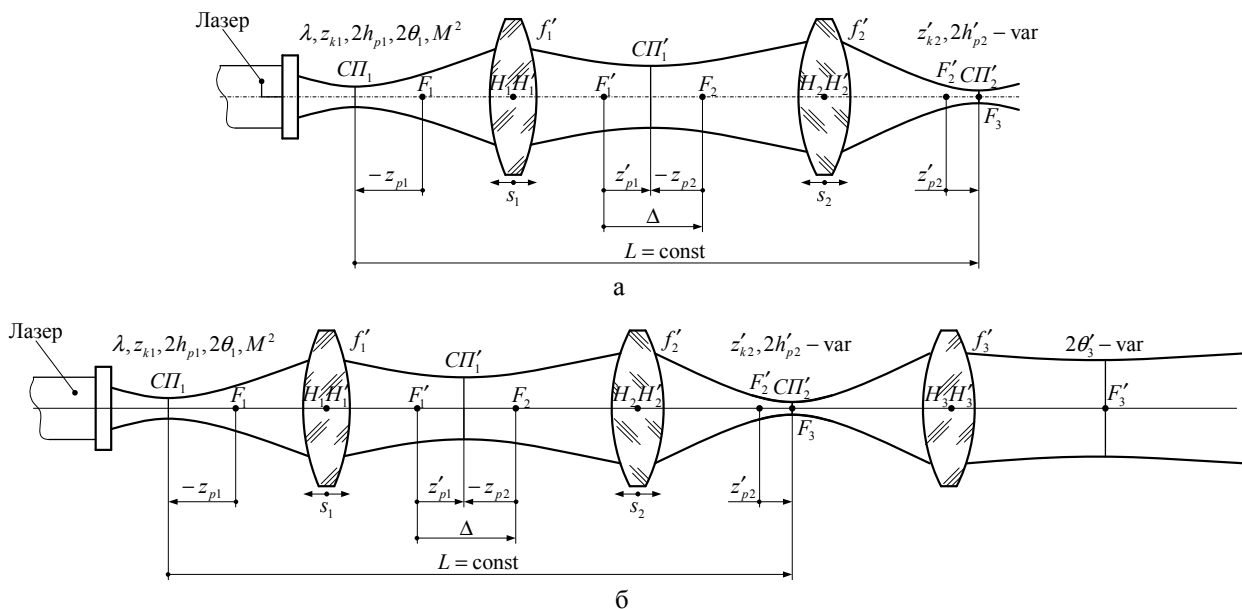


Рис. 1. Схемы лазерных вариосистем

Другим способом изменения пространственных параметров пучка является внутрирезонаторный. Для реализации этого способа необходимо особым образом изменить конфигурацию резонатора. При этом нужно учитывать особенности формирования лазерного излучения оптическим резонатором и предъявляемые к ее оптической схеме требования. В случае твердотельного лазера, во-первых, необходимо обеспечить оптимальный диаметр лазерной моды в активном элементе для эффективного энергосъема. Во-вторых, учитывать термооптические искажения активных элементов (возникновение наведенной тепловой линзы) и обеспечивать стабильность пространственных и энергетических параметров лазерного излучения по отношению к флуктуациям оптической силы тепловой линзы. В-третьих, в устойчивых резонаторах с импульсной накачкой недопустима фокусировка излучения на внутрирезонаторных элементах, что может привести к их пробою. Кроме того, разрабатываемая оптическая система резонатора лазера должна удовлетворять габаритным ограничениям (требование компактности) (см. рис. 2).

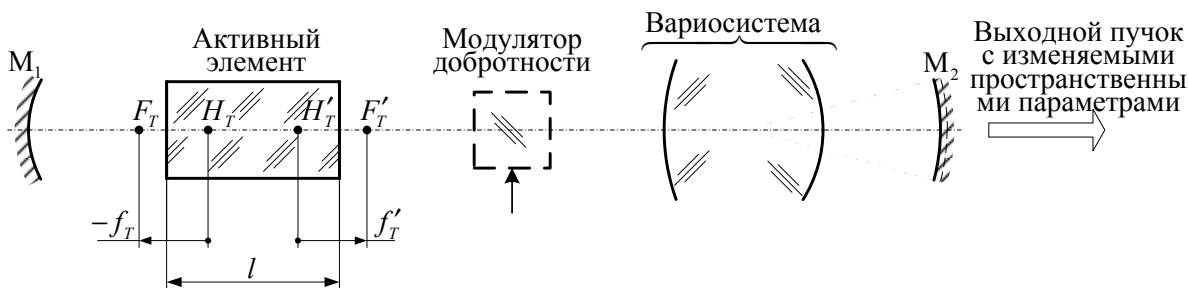


Рис. 2. Схема резонатора твердотельного лазера для изменения пространственных параметров формируемого пучка: M_1 , M_2 – зеркала резонатора; H_T , H'_T – главные точки тепловой линзы активного элемента; F_T и F'_T – передний и задний фокус тепловой линзы активного элемента соответственно; f_T и f'_T – переднее и заднее фокусное расстояние тепловой линзы активного элемента соответственно; l – длина активного элемента

Основными этапами разработки резонатора для формирования пучка с изменяемыми пространственными параметрами являются структурно-габаритный и абберационный синтез. При разработке таких резонаторов целесообразно использовать теорию зеркально-линзовых лазерных резонаторов [10, 11].

Рассматриваемые двухкомпонентные лазерные вариосистемы могут быть использованы для формирования выходной перетяжки излучения мощного многомодового волоконного лазера малого постоянного размера и ее перемещения вдоль оси на несколько сотен метров. Разработанная вариосистема такого типа имеют достаточно широкую зону изопланезии и позволяет осуществлять сканирование таким пятном перпендикулярно оси излучения на угол порядка 0,5 градуса. При этом увеличение диаметра перетяжки не превышает 50 %.

Для лазерного излучения, формируемого неустойчивыми резонаторами, разработан вариообъектив для его фокусировки в фокальное пятно достаточно малого размера и его перемещения вдоль оси на 100...150 м. На рис. 3 приведены зависимости диаметра и перемещения сфокусированного выходного лазерного пятна от расстояния между компонентами объектива.

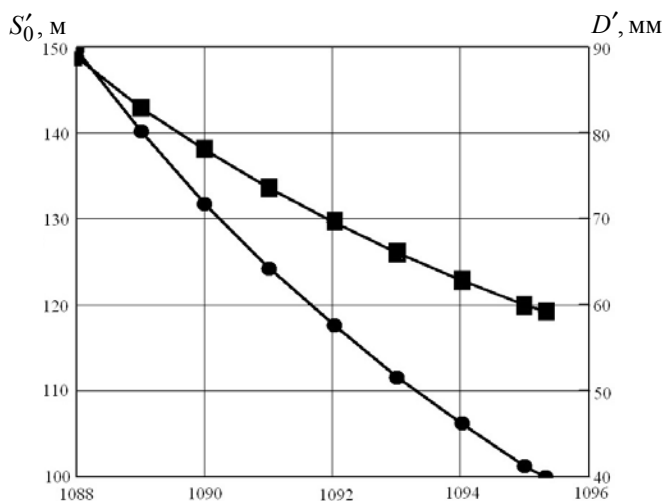


Рис. 3. Изменение положения S'_0 (кружки) и диаметра D' (квадраты) сфокусированного лазерного пятна от расстояния между компонентами вариообъектива

При угловом сканировании оси лазерного пучка в пределах $\pm 30'$ диаметр фокального пятна меняется менее чем на 2 %, т. е. остается практически постоянным. Разработка вариообъектива для фокусировки лазерного излучения велась по методике, которая базировалась на теории классической оптики, т. к. резонатор лазера является неустойчивым.

Лазерные вариосистемы также позволяют изменять диаметр выходного пучка мощного технологического волоконного лазера в заданной плоскости обработки материала с большой кратностью. Особенностью разработанной лазерной вариосистемы такого назначения является то, что изменение диаметра перетяжки обеспечивается перемещением лишь одного ее компонента. Кроме того обеспечена достаточно высокая чувствительность перемещения этого компонента для формирования перетяжки требуемого диаметра. Такая вариосистема обеспечивает перепад изменения диаметра выходного лазерного пучка в фиксированной зоне обработки материала ~ 30 крат.

Разработка рассмотренных типов оптических лазерных вариосистем производилась на основе специальных методик синтеза [1–7, 11] и позволила:

1. Обеспечить в рабочей зоне требуемые параметры лазерного пучка.
2. Использовать оптическую систему с минимально возможным количеством компонентов и наиболее простым их конструктивным исполнением.
3. Разработать оптическую систему с наиболее широкими допусками, максимально удобными в эксплуатации.
4. Обеспечить минимальную себестоимость лазерной оптической системы.

В МГТУ им. Н. Э. Баумана научное направление «Разработка вариосистем» успешно работает более 40 лет. Проектирование вариосистем базируется на разработке и применении различных математических моделей, начиная от габаритного синтеза (с определением наилучшей структурной схемы), абберационного синтеза и заканчивая автоматизированным расчетом допусков на оптическую систему, включая их перебалансировку при учете технологических возможностей конкретного изготовителя оптики. Таким образом, разработанные системы отличаются достижением либо теоретически предельных, либо близких к ним параметров и характеристик.

Процесс разработок отличается комплексностью: создается не только рабочая конструкторская документация на оптику, механику и электронный контроллер с интерфейсом управления вариосистемой и изготавливается образец, но и программа и методика его контроля и испытаний.

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ (грант № МК-6960.2016.8).

Список литературы

1. Способ изменения диаметра перетяжки выходного лазерного пучка на фиксированном расстоянии от лазера: патент 2488861С1 РФ / Пахомов И. И., Григорьянц А. Г., Носов П. А., Ширанков А. Ф., Хорохоров А. М., Павлов В. Ю., Третьяков Р. С., Ставертий А. Я., Голубенко Ю. В. Заявл. 29.06.2012; опубл. 27.07.2013. Бюлл. № 21.
2. Способ и устройство для перемещения перетяжки лазерного пучка: патент 2411598С2 РФ / А. Ф. Ширанков, И. И. Пахомов, В. А. Иванов, А. Г. Аниканов, С. А. Штыков, П. А. Носов, В. Ю. Павлов. Заявл. 18.11.2008; опубл. 10.02.2011. Бюлл. № 4.
3. Пахомов И. И., Цибуля А. Б. Расчет оптических систем лазерных приборов. М.: Радио и связь, 1986. 152 с.
4. Аниканов А. Г., Пахомов И. И., Ширанков А. Ф. Структурный синтез лазерных оптических систем при ограничениях их параметров // Оптический журнал. 2010. Т. 77, № 2. С. 30–36.
5. Пахомов И. И., Ширанков А. Ф., Носов П. А. Описание, расчет и анализ искажений многомодовых лазерных пучков // Оптический журнал. 2010. Т. 77, № 2. С. 37–43.
6. Носов П. А., Павлов В. Ю., Пахомов И. И., Ширанков А. Ф. Абберационный синтез оптических систем, предназначенных для преобразования лазерных пучков // Оптический журнал. 2011. Т. 78, № 9. С. 34–44.
7. Ширанков А. Ф., Носов П. А., Григорьянц А. Г., Третьяков Р. С., Самарин П. Е. Разработка оптических систем для лазерной обработки на основе теории лазерной оптики // Научно-технические достижения в машиностроении. 2014, № 5. С. 37–48.
8. Климов Ю. М. Прикладная лазерная оптика. М.: Машиностроение, 1985. 128 с.
9. Дубовик А. П., Апенко А. С., Дурейко Г. В. и др. Прикладная оптика. М.: Машиностроение, 1992. 480 с.
10. Быков В. П., Силичев О. О. Лазерные резонаторы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 320 с.
11. Pakhomov I. I., Nosov P. A. Analysis and synthesis of laser cavities // Journal of Russian Laser Research. 2012. Vol. 33, N 5. P. 409–423.