

Лекция № А-5

Оптические системы для фокусировки пучка лазерного излучения

1. Определение перетяжки и конфокального параметра.

Излучение лазера формируется в виде светового пучка. Оно отличается от плоской волны неоднородностью распределения интенсивности, кривизной фазового фронта и расширением пучка при его распространении. Для получения пучка с заданными параметрами необходимо преобразовывать выходное или принимаемое излучения лазера. При разработке оптических систем для преобразования лазерного излучения требуется учитывать основные свойства излучения лазера — его строгую монохроматичность, узкую направленность, высокую интенсивность и когерентность. Лазерный пучок, выходящий из резонатора, состоящего из двух сферических или из сферического и плоского зеркал, не является пучком гомоцентрических лучей (рис. 1).

Лучи направлены по нормальям к волновому фронту, который вблизи оси можно считать сферическим. В некотором сечении лазерный пучок имеет минимальный размер

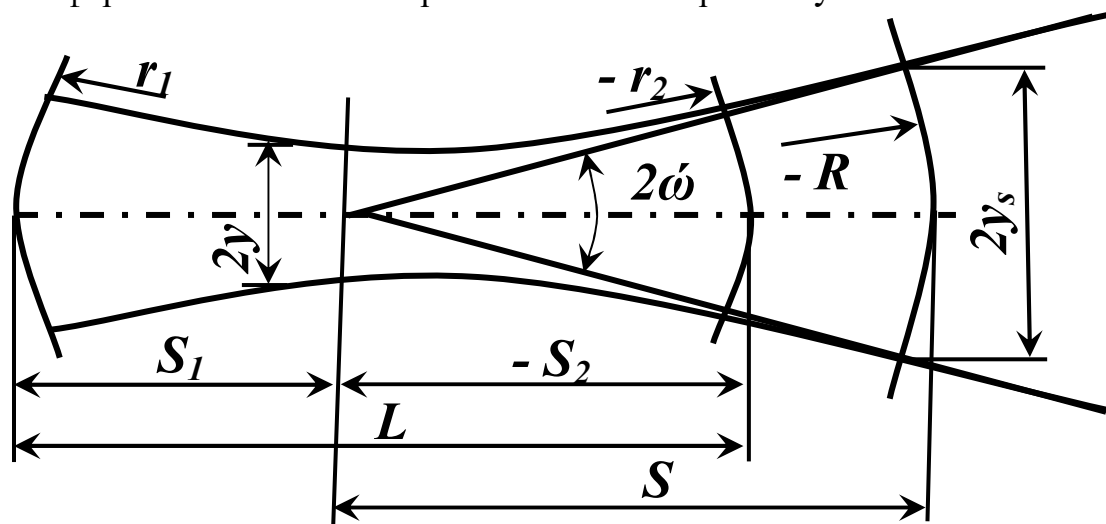


Рис 1. Структура лазерного пучка

$2y$ (перетяжку), где волновой фронт вырождается в плоскость. Положение перетяжки $2y$ относительно вершин зеркал резонатора определяют по формулам:

$$s_1 = L(r_2 + L)/(2L - r_1 + r_2); \quad (1)$$

$$s_2 = L(r_1 - L)/(2L - r_1 + r_2), \quad (2)$$

где L — расстояние между зеркалами; r_1, r_2 — радиусы кривизны зеркал.

Диаметр перетяжки $2y$ находят из выражения:

$$2y = \sqrt{2\lambda R_3 / \pi}, \quad (3)$$

где R_3 — конфокальный параметр резонатора, определяемый по формуле:

$$R_3 = \frac{2\sqrt{(r_1 - L)(r_2 + L)(L - r_1 + r_2)L}}{2L - r_1 + r_2}. \quad (4)$$

Если одно из зеркал резонатора плоское, то из (1) и (2) следует, что перетяжка

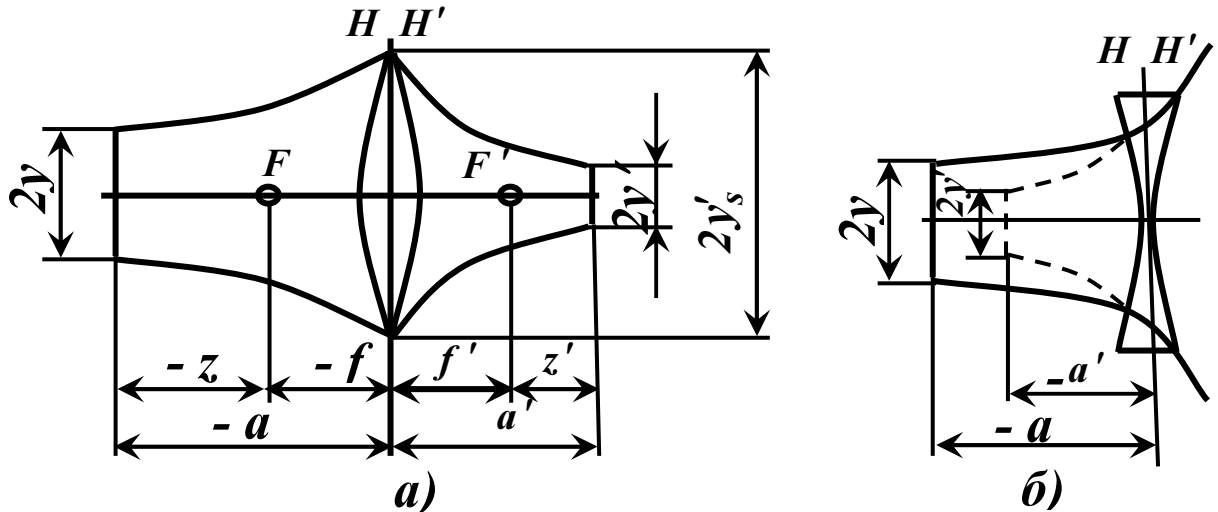


Рис. 2. Преобразование лазерного пучка тонкой линзой:

a — положительной; b — отрицательной

совпадает с этим зеркалом.

Пучок лучей, выходящих из лазера, имеет плоский волновой фронт, если оба зеркала резонатора плоские.

Радиус R волнового фронта и диаметр $2y_s$ сечения пучка в произвольном месте соответственно равны:

$$R = (1 + \xi^2)R_s / (2\xi);$$

$$2y_s = 2y\sqrt{1 + \xi^2}, \quad (5)$$

Где $\xi = 2s/R_s$ - относительная координата сечения; s - расстояние от плоскости перетяжки.

Угол расходимости 2ω лазерного пучка для основной моды

$$2\omega = 2\sqrt{2\lambda/(\pi R_s)} = 2\lambda/(\pi y). \quad (6)$$

Для получения больших значений энергетической освещенности, создаваемой лазером, поток его излучения необходимо сконцентрировать в пятно минимальных размеров. Этим пятном, очевидно, может быть перетяжка лазерного пучка, преобразованного оптической системой (рис. 2).

После прохождения лазерного пучка через отрицательную тонкую систему (рис. 2, б) угол расходимости преобразования пучка увеличивается, а перетяжка получается мнимой.

Ниже приведены расчетные формулы, позволяющие определить параметры преобразованного лазерного пучка (R'_s, R', a', z') после прохождения через тонкую оптическую систему с фокусным расстоянием f' :

$$R'_s = \frac{R_s}{(1 + a/f')^2 + [R_s/(2f')]^2}; \quad (7)$$

$$R'_s = 4R_s f'^2 / (4z^2 + R_s^2); \quad (8)$$

$$1/R' = 1/R + 1/f';$$

$$1 - a'/f' = \frac{1 + a/f'}{(1 + a/f')^2 + [R_0/(2f')]^2}; \quad (9)$$

$$z' = -4zf'^2/(4z^2 + R_0^2), \quad (10)$$

где R_0, R'_0 — конфокальные параметры, R, R' - радиусы кривизны волнового фронта, входящего и выходящего из системы a, a', z, z' - расстояния, характеризующие положение перетяжек относительно главных плоскостей и соответствующих фокальных плоскостей оптической системы.

2. Методика расчета фокусирующей системы лазерного пучка.

Диаметр перетяжки $2y'$ и угол расходимости $2\omega'$ преобразованного пучка равны соответственно:

$$2y' = \sqrt{2\lambda R'_0/\pi}; \quad (11)$$

$$2\omega' = 2\sqrt{2\lambda/(\pi R'_0)} = \frac{2\lambda}{\pi y'}. \quad (12)$$

Линейное и угловое увеличения в перетяжках:

$$\beta_{\Pi} = 2y'/2y = \sqrt{R'_0/R_0}; \quad (13)$$

$$\gamma_{\Pi} = \omega'/\omega = \sqrt{R_0/R'_0}. \quad (14)$$

Из (10) следует, что $z' = 0$, если $z = 0$, т. е. если перетяжка лазерного пучка находится в передней фокальной плоскости системы, то перетяжка преобразованного пучка будет расположена в задней фокальной плоскости. Чтобы уменьшить размер сечения перетяжки преобразованного пучка, необходимо уменьшить конфокальный параметр этого пучка, что может быть достигнуто за счет увеличения фокусного расстояния. Для полного использования потока излучения лазера диаметр входного зрачка оптической системы должен быть не меньше диаметра сечения лазерного пучка в плоскости входного зрачка. При увеличении расстояния a возрастает диаметр входного зрачка, а следовательно, и относительное отверстие системы, поэтому оптическую систему приходится размещать вблизи лазера.

Ниже приведен наиболее приемлемый порядок габаритного расчета системы, фокусирующей лазерные излучения. Расчет выполняется при условии, что тип лазера выбран и, следовательно, известны его параметры. Кроме того, по техническим условиям известен диаметр перетяжки преобразованного пучка.

Таким образом, при расчете фокусирующей системы определяют:

- диаметр перетяжки и конфокальный параметр по формулам (3) и (4);
- конфокальный параметр R'_0 преобразованного пучка из выражения (11) по заданному диаметру $2y'$ перетяжки;
- фокусное расстояние f' оптической системы из выражений (7) или (8)

- (расстояния a или z выбирают из конструктивных соображений);
- диаметр входного зрачка D (для тонкой системы $D_{T.C} = D$) по формуле (5) с учетом, что $D \geq 2y_s$;
 - положение a' или z' перетяжки преобразованного пучка по формулам (9) и (10).

При малом значении фокусного расстояния системы f' для удобства эксплуатации рекомендуется применять оптическую систему, состоящую из двухкомпонентной афокальной насадки и объектива (рис. 3). Такая система позволяет увеличить расстояние от последнего компонента до перетяжки преобразованного пучка лучей. Эквивалентное фокусное расстояние этой системы

$$f'_3 = -(f'_1 / f'_2) f'_3 = \mathcal{H}'_3,$$

где f'_1, f'_2, f'_3 — фокусные расстояния компонентов; γ — угловое увеличение насадки. Размер пятна фокусируемого излучения

$$\delta = 2f'_3 \operatorname{tg} \omega = 2f'_3 \operatorname{tg} \omega'.$$

Расчет двух-, трехкомпонентных оптических систем, используемых для фокусирования лазерного излучения, выполняется путем последовательного применения формул (7)—(11) для каждого компонента.

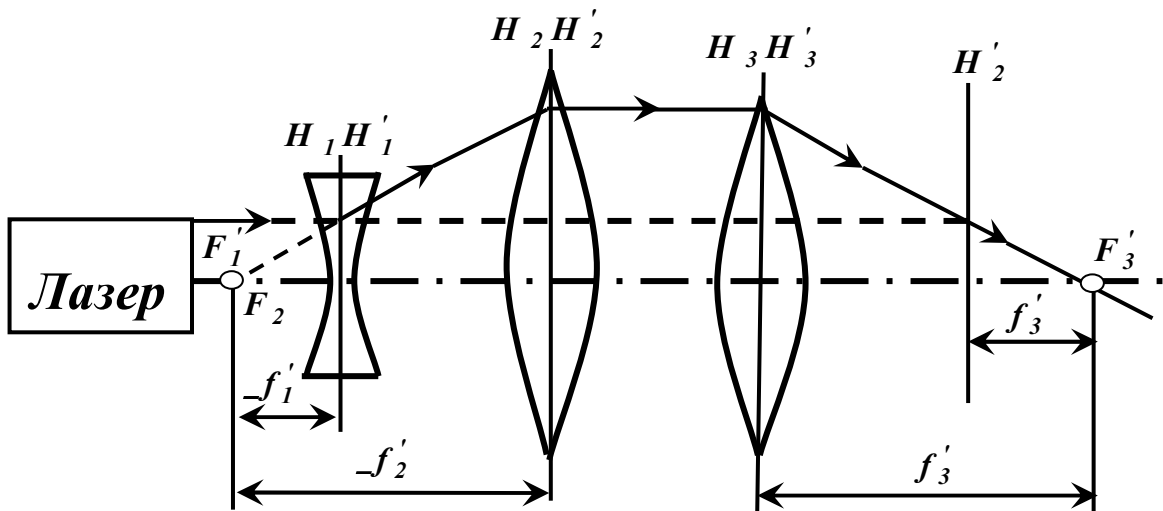


Рис. 3. Оптическая система для фокусирования лазерного излучения

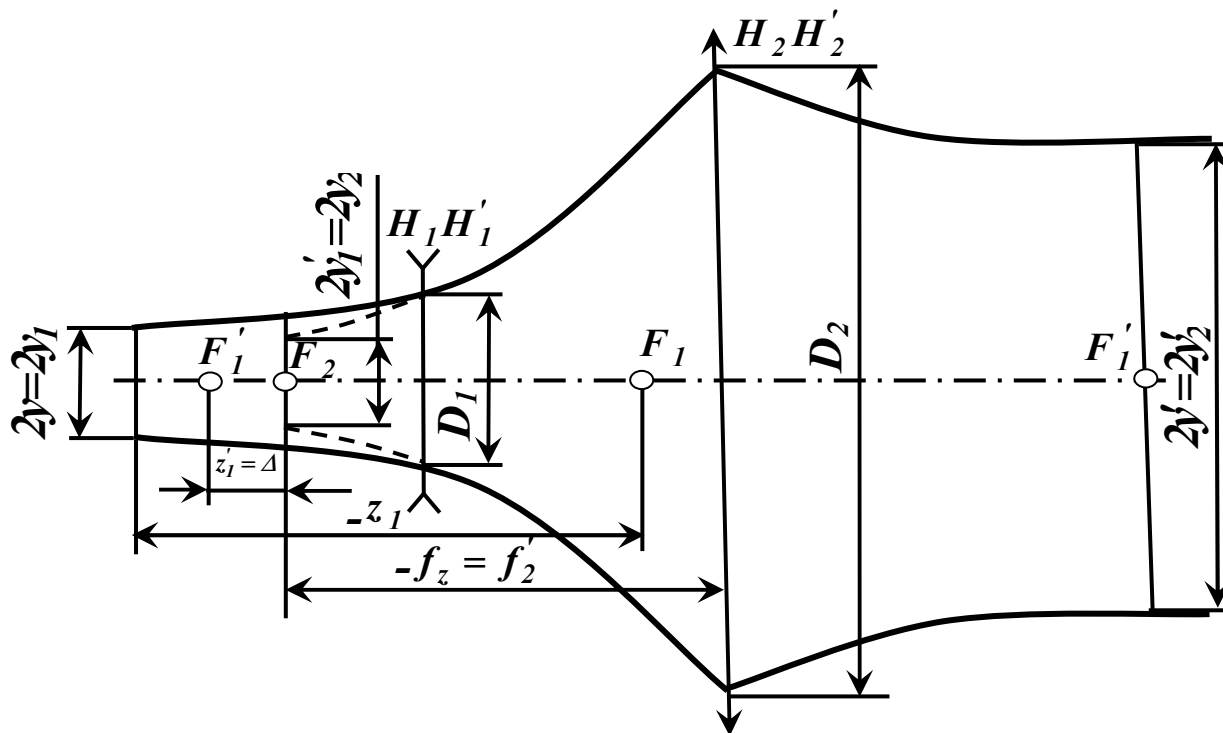


Рис. 4. Двухкомпонентная система для уменьшения расходимости лазерного пучка

Лекция № А-6

Оптические системы для уменьшения расходимости пучка лазерного излучения

1. Оптическое уменьшение расходимости лазерного пучка.

Увеличение пространственной плотности потока излучения лазера при передаче его энергии на большие расстояния обуславливает необходимость уменьшения угла расходимости. "Идеальный" лазер, имеющий плоский волновой фронт, генерирует пучок лучей, угол расходимости которого определяется дифракцией:

$$2\omega_d = 1,22\lambda / d,$$

где d — диаметр выходного торца лазера.

Применяемые на практике лазеры имеют углы расходимости, больше $2\omega_D$, и для различных типов лазеров эти углы составляют от нескольких минут до нескольких градусов. Для уменьшения угла расходимости лазерных пучков используются двухкомпонентные линзовые (рис. 4) или зеркальные насадки, состоящие из первого отрицательного и второго положительного компонентов (перевернутая телескопическая система).

Основными характеристиками афокальной насадки для лазера являются угловое увеличение γ , угловое поле $2\omega'$, диаметр входного зрачка D , положение входного зрачка a_p относительно первого компонента, длина насадки L , длина волны λ излучения лазера.

Угловое увеличение γ рассчитывают с учетом выражений (6), (12)—(14) по формуле:

$$\gamma = 2\omega' / 2\omega = 2y / 2y' = \sqrt{R_s / R'_s}, \quad (15)$$

где $2y = 2y_1$ и $2y' = 2y'_2$, $R_s = R_{s1}$ и $R'_s = R'_{s2}$ — диаметры перетяжек и конфокальные параметры лазерного и преобразованного пучков лучей.

Угловое поле $2\omega'$ определяется углом расходимости пучков лучей в пространстве изображений. Диаметр входного зрачка D равен диаметру выходного торца лазера d и диаметру $2y$ перетяжки лазера. Положение a_p входного зрачка определяется отрезком a_1 от перетяжки лазера до первого компонента. Длина насадки $L = f'_1 + f'_2$, где f'_1 и f'_2 — задние фокусные расстояния компонентов насадки.

Для обеспечения минимальной расходимости пучка после оптической системы необходимо совместить перетяжку пучка, преобразованного первым компонентом, с передней фокальной плоскостью второго компонента. Расстояние Δ (оптический интервал), определяющее смещение заднего фокуса первого компонента относительно переднего фокуса второго компонента, согласно (10)

$$\Delta = z'_1 = -\frac{z_1}{(z_1 / f'_1)^2 + (R_{s1} / 2f'_1)^2}. \quad (16)$$

Угловое увеличение γ_Δ расфокусированной системы:

$$\gamma_\Delta = \sqrt{R_{s1} / R'_{s2}} = R_{s1} f'_1 / (f'_2 \sqrt{4z_1^2 + R_{s1}^2}). \quad (17)$$

При $\Delta = 0$ угловое увеличение афокальной насадки определяется зависимостью

$$\gamma = -f'_1 / f'_2. \quad (18)$$

Из анализа формул (15), (17), (18) видно, что угол расходимости пучка после расфокусированной системы меньше, чем после афокальной насадки.

2. Методика расчета расходимости лазерного пучка.

Таким образом, при расчете рассматриваемой двухкомпонентной системы для уменьшения расходимости пучка лазера на основании формул, полученных из дифракционной теории, определяют следующие величины (при условии, что тип лазера, $\lambda, R_s, 2y, 2\omega$ — известны):

- 1) угловое увеличение γ насадки по формуле (15);
- 2) диаметр D_1 первого компонента по формуле (5), где $\xi = 2a_1/R_1$; a_1 — положение перетяжки лазера относительно главных плоскостей первого компонента (выбирается из конструктивных соображений);
- 3) фокусное расстояние первого компонента f_1' (отношение D_1/f_1' желательно иметь не выше, чем 1 : 5);
- 4) Δ — оптический интервал находят по формуле (16), где $z_1 = a_1 + f_1'$; $R_{\text{э1}} = R_1$;
- 5) конфокальный параметр $R'_{\text{э1}}$ пучка, преобразованного первым компонентом, по формуле:

$$R'_{\text{э1}} = \frac{R_{\text{э1}}}{(1 + a_1/f_1')^2 + [R_{\text{э1}}/(2f_1')]^2}; \quad (19)$$

- б) диаметр $2y_1'$ перетяжки пучка, преобразованного первым компонентом:

$$2y_1' = \sqrt{2\lambda R'_{\text{э1}}/\pi}; \quad (20)$$

- 7) фокусное расстояние второго компонента из (17):

$$f_2' = f_1' R_{\text{э1}} / (\gamma_{\Delta} \sqrt{4z_1^2 + R_{\text{э1}}^2}); \quad (21)$$

- 8) диаметр D_2 второго компонента по формуле, аналогичной (5):

$$D_2 \geq 2y_2 \sqrt{1 + \xi_2^2} = 2y_1' \sqrt{1 + \xi_2^2},$$

где $\xi_2 = 2a_2/R_2 = -2f_2'/R'_{\text{э1}}$.

Расчет насадки на основе законов геометрической оптики аналогичен расчету телескопической системы для конкретного лазера ($\lambda, D, 2\omega$ — известны). Ниже приведены расчетные формулы:

$$\begin{aligned} \gamma &= 2\omega'/2\omega; \\ D' &= D/\gamma; \\ D_1 &= D + 2a_p\omega; \\ D_2 &= D'; \\ f_1' &= D_1K; \\ f_2' &= -f_1'/\gamma; \\ L &= f_1' + f_2', \end{aligned}$$

где K — диафрагменное число, которое не должно быть больше 3 (иногда до 2).

Выше рассмотрено преобразование лазерных пучков только в гауссовом приближении. Оптическая система считается идеальной, если входящий в нее световой пучок снова преобразовывается в чисто гауссов пучок. Это возможно только при условии, что оптическая система не вносит дополнительных искажений в форму волнового фронта. При расчете оптических систем, когда необходимо знать точную структуру лазерного пучка, формируемого системой, может быть рекомендован метод скалярной теории дифракции, описанный в специальной литературе.