

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБЪЕКТИВОВ С ДЕФОРМИРУЕМЫМИ ЗЕРКАЛАМИ.**1. УПРАВЛЕНИЕ ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ И ПОЛОЖЕНИЕМ ФОКАЛЬНОГО ПЯТНА**

© 2005 г. В. В. Агафонов; А. Г. Сафронов, канд. физ.-мат. наук

Московский энергетический институт (технический университет), Москва

E-mail: AgafonovVV@mpei.ru; sag_mac@g23.telcom.ru; SafronovAG@mpei.ru

Разработана математическая модель управляемого зеркально-линзового обращенного телеобъектива с деформируемыми зеркалами в параксимальном приближении. На ее основе предложены алгоритмы расчета статических параметров объектива, а также диапазонов управления фокусным расстоянием Δf и смещением фокального пятна ΔS_f в этих оптико-электронных устройствах. Проанализированы результаты компьютерного моделирования диапазонов Δf и ΔS_f в зависимости от конструктивных характеристик объектива при различном управлении его деформируемыми зеркалами. Установлены основные закономерности и особенности полученных зависимостей для управляемых объективов, характерных для лазерной техники.

Коды OCIS: 080.2740, 220.3630.

Поступила в редакцию 23 08 2004.

1. Введение

В современной адаптивной оптике деформируемые зеркала уже вышли из разряда дорогостоящих и единичных проектов. Их использование также выходит за границы чистой адаптивной оптики, т. е. только для компенсации искажений. Так, в частности, в современной оптике имеются задачи управления параметрами оптических систем и лазерных пучков. Их решают с помощью деформируемых зеркал. Эти зеркала используются, например, для управления перетяжкой лазерного пучка в технологических лазерных комплексах [1] или для внутрирезонаторной модуляции выходного излучения лазеров [2]. Современный уровень развития деформируемых зеркал позволяет разрабатывать и создавать на их основе, как из "кирпичиков", новые оптико-электронные устройства. Из оптических устройств самыми распространенными являются объективы, поэтому в качестве управляемого прибора в первую очередь целесообразно рассмотреть управляемый объектив с деформируемыми зеркалами.

В работе [3] был предложен управляемый зеркально-линзовый объектив и проведен его сравнительный анализ с эквивалентным деформируемым зеркалом. Этот анализ показал, что управляемый объектив существенно превосходит по своей эффективности эквивалентное деформируемое зеркало, а именно объектив при управлении имеет больший диапазон смещения задней фокальной плоскости, больший диапазон управления фокусным расстоянием и пр. Кроме того, в этой работе были отмечены специфические возможности управляемого объектива по управлению параметрами оптического пучка и оптической системы, недоступные эквивалентному деформируемому зеркалу, например, возможность смещения задней фокальной плоско-

сти без изменения фокусного расстояния, а значит, и без изменения размера фокального пятна управляемого объектива.

В данной статье исследуются диапазоны управления основными параметрами обращенного зеркально-линзового телеобъектива (фокусным расстоянием f' и задним фокальным отрезком S_f') в зависимости от его конструктивных характеристик, т. е. определяется влияние этих характеристик на эффективность управляемого объектива.

2. Постановка задачи и выбор конструктивных характеристик объектива

Оптическая схема управляемого зеркально-линзового объектива представлена на рис. 1. Рефлектор 1 является исходно плоским при управляющем напряжении $U = 0$. В центральном отверстии контррефлектора 2 расположена линза 3. Она оптимизирует конструктивные характеристики объектива.

В качестве деформируемых зеркал объектива удобно использовать биморфные одноканальные зеркала с управляемой кривизной отражающей поверхности [4]. При подаче на биморфное зеркало управляющего напряжения изменяется его радиус кривизны R . Например, для исходно плоского зеркала при $U < 0$ зеркало становится вогнутым, а при $U > 0$ – выпуклым. Управляемые деформации биморфных зеркал являются почти строго сферическими (точнее, параболическими), за исключением влияния краевых эффектов [5]. Из-за малости деформации с высокой точностью можно считать, что зеркало деформируется по сфере (различие стрелок прогиба составляет менее 1%, если световой диаметр зеркала меньше его радиуса кривизны). При моделировании объектива считалось, что зеркала деформируются по сфере.

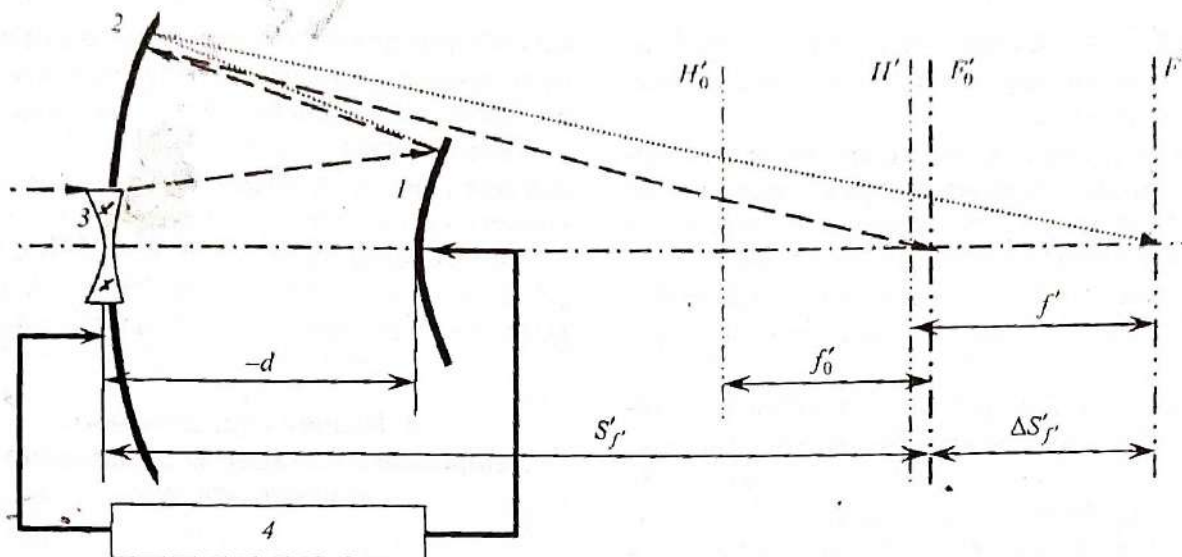


Рис. 1. Оптическая схема управляемого обращенного зеркально-линзового телеобъектива. Пунктирными стрелками показан ход апертурного луча, жирными стрелками показана подача управляющего напряжения (U) на деформируемые зеркала объектива. 1 – рефлектор, 2 – контррефлектор, 3 – линза, 4 – система управления; H'_0, F'_0 – задняя главная и фокальная плоскости при $U = 0$; H', F' – задняя главная и фокальная плоскости при $U \neq 0$, S'_f – задний фокальный отрезок, $\Delta S'_f$ – смещение задней фокальной плоскости, f'_0 – номинальное фокусное расстояние (при $U = 0$), f' – фокусное расстояние при $U \neq 0$, d – расстояние между зеркалами.

При компьютерном моделировании объектива использовались численные характеристики охлаждаемых одноканальных биморфных зеркал из работы [4]. Чувствительность неохлаждаемых биморфных зеркал больше, чем охлаждаемых, а следовательно, эффективность управляемого объектива с неохлаждаемыми зеркалами будет выше. Под эффективностью управления будем понимать диапазон смещения задней фокальной плоскости $\Delta S'_f$ или диапазон изменения фокусного расстояния Δf управляемого объектива. При этом $\Delta S'_f$ есть расстояние вдоль оптической оси между задними фокальными плоскостями объектива при предельных управляющих напряжениях (-200 и 300 В) на одном или обоих его зеркалах (рис. 1):

$$\Delta S'_f = S'_f(U = 300 \text{ В}) - S'_f(U = -200 \text{ В}). \quad (1)$$

Как было показано в [3], наибольший диапазон $\Delta S'_f$ достигается при синфазном управлении обоими зеркалами объектива. Под диапазоном управления фокусным расстоянием Δf будем понимать разность между фокусными расстояниями объектива при предельных управляющих напряжениях на одном или обоих его зеркалах (рис. 1):

$$\Delta f = f'(U = 300 \text{ В}) - f'(U = -200 \text{ В}). \quad (2)$$

Любую двухзеркальную оптическую систему можно полностью описать четырьмя независимыми параметрами, например, (R_{10}, R_{20}, d, O) или (f'_0, K_0, d, O) . В рассматриваемом управляемом объективе присутствует линза, а рефлектор в исходном состоянии является плоским, поэтому R_1 заменяется на f'_L , т. е. четверка параметров в первом случае выглядит следующим образом: (f'_L, R_{20}, d, O) , а во втором случае –

аналогично двухзеркальной оптической системе. Здесь R_{10} и R_{20} – исходные радиусы кривизны рефлектора и контррефлектора, d – расстояние между зеркалами объектива, O – относительное отверстие объектива, f'_0 – номинальное фокусное расстояние объектива, K_0 – номинальное отношение заднего фокального отрезка объектива к его фокусному расстоянию или в двухзеркальном объективе – коэффициент отношения высот, f'_L – фокусное расстояние линзы. Под номинальным фокусным расстоянием f'_0 понимается фокусное расстояние f' объектива при отсутствии управляющего напряжения на его зеркалах, аналогично для K_0 .

Среди перечисленных параметров объектива его фокусное расстояние f'_0 и относительное отверстие O являются паспортными, т. е. основными характеристиками. Кроме того, f' связано с S'_f через коэффициент K :

$$S'_f = K f', \quad (3)$$

причем K при управлении изменяется. Таким образом, учитывая (1) и (2), при анализе обеих рассматриваемых функций управляемого объектива, Δf и $\Delta S'_f$, в качестве независимых параметров удобно выбрать (f'_0, K_0, d, O) . Тем более что фокусное расстояние линзы f'_L и исходный радиус кривизны контррефлектора R_{20} характеризуют скорее отдельные элементы, чем объектив целиком. В результате выбранная четверка параметров полностью характеризует конкретный зеркально-линзовый обращенный телеобъектив (рис. 1), а именно:

K_0 определяет относительные световые диаметры компонентов и в данном случае определяет знак заднего фокусного расстояния линзы f'_L ;

f' совместно с K определяет тип оптической системы (объектив, афокальная система или система с минимальным фокусом);

d совместно с f' и K определяет положение задней фокальной плоскости объектива относительно его зеркал и, кроме того, определяет продольный размер объектива (вдоль оптической оси);

O совместно с K_0 и f'_0 определяет световые диаметры зеркал объектива, т. е. поперечный размер объектива.

Независимость выбранных параметров объектива понимается следующим образом. Допустим, требуется рассчитать (т. е. определить эффективность Δf и $\Delta S'_f$) ряд объективов с одинаковыми конструктивными параметрами f'_0 , K_0 и O , но с различными d . Варьирование d при постоянстве f'_0 , K_0 и O достигается за счет изменения других параметров объектива – f_L и R_2 (см. ниже следующие формулы (8) и (10)), назовем их внутренними. То есть f'_0 , K_0 , d и O – независимы, а именно условно независимы, за счет изменения внутренних параметров объектива.

При исследовании управляемого зеркально-линзового обращенного телеобъектива конструктивные характеристики варьировались в следующих пределах: f'_0 от 50 до 1000 мм; K_0 от 1,1 до 4,5; d от –10 до –1000 мм; O от 0,01 до 0,99. Большинство современ-

ных объективов как линзовых, так и зеркальных, используемых в оптике вообще и в лазерной технике в частности, попадает в указанные диапазоны [6, 7].

Таким образом, в окончательном виде поставленная задача формулируется следующим образом: необходимо установить, как будут изменяться исследуемые функции $\Delta S'_f$ и Δf в зависимости от конструктивных характеристик управляемого объектива f'_0 , K_0 , d и O , варьируемых в указанных пределах.

3. Расчет управляемого зеркально-линзового обращенного телеобъектива

3.1. Математическая модель

Согласно определениям (1) и (2) для решения поставленной задачи необходимо вычислить фокусное расстояние f' и задний фокальный отрезок S'_f объектива при предельных управляющих напряжениях, а затем $\Delta S'_f$ и Δf . Ниже приводятся формулы для расчета f' и S'_f , ранее полученные нами в [3] для зеркально-линзового объектива в параксиальном приближении. Фокусное расстояние объектива f' при управляющем напряжении U на его деформируемых зеркалах

$$f'(U) = \frac{R_1(U)R_2(U)f_L}{2(R_1(U) - R_2(U) - 2d)(f_L - d) - R_1(U)(R_2(U) + 2d)}, \quad (4)$$

где $f'_L = -f_L$. Далее $f'(U)$, $R_1(U)$, $R_2(U)$, $S'_f(U)$, $K(U)$ при любом U будем обозначать f' , R_1 , R_2 , S'_f , K , а при $U = 0$ – f'_0 , R_{10} , R_{20} , S'_{f0} , K_0 . При плоском рефлекторе из формулы (4) получаем

$$f' = \frac{R_2 f_L}{2f_L - R_2 - 4d}. \quad (5)$$

Задний фокальный отрезок объектива

$$S'_f = \frac{(R_1 f_L - 2d(R_1 + f_L - d))R_2}{2(R_1 - R_2 - 2d)(f_L - d) - R_1(R_2 + 2d)}, \quad (6)$$

откуда при плоском рефлекторе получаем

$$S'_f = \frac{R_2(f_L - 2d)}{2f_L - R_2 - 4d}. \quad (7)$$

Для решения поставленной задачи в выбранных переменных выразим f_L и R_2 через (f'_0 , K_0 , d , O). Фокусное расстояние линзы получаем подстановкой (5) и (7) в (3)

$$f_L = 2d/(1 - K_0). \quad (8)$$

Исходный радиус кривизны контррефлектора получаем подстановкой формулы (8) в (5):

$$R_{20} = \frac{4f'_0 d K_0}{2d + f'_0(1 - K_0)}. \quad (9)$$

Радиус кривизны R одноканального биморфного зеркала при воздействии управляющего напряжения U определяем по следующим формулам [5, 8]:

$$R(U) = \frac{(D/2)^2 + w^2(U)}{2w(U)}, \quad w(U) = w_0 + SU, \quad (10)$$

$$w_0 = R_0 - \sqrt{R_0^2 - D^2/4},$$

где D – световой диаметр биморфного зеркала, $w(U)$ – стрелка прогиба биморфного зеркала на световом диаметре D при наличии управляющего напряжения U , w_0 – стрелка прогиба биморфного зеркала на световом диаметре D в исходном состоянии (при $U = 0$), S – чувствительность биморфного зеркала, R_0 – радиус кривизны биморфного зеркала в исходном состоянии (при $U = 0$).

Далее необходимо определить световые диаметры биморфных зеркал в объективе. Из рис. 1 найдем диаметр рефлектора D_1 :

$$D_1 = D_0(1 + df/f_0) = D_0(1 + K_0)/2, \quad (11)$$

где D_0 – диаметр входного зрачка объектива, которым является линза,

$$D_0 = Of'_0. \quad (12)$$

Диаметр контррефлектора D_2 находим через K_0 , исходя из заложенного соотношения в данном объективе – световой диаметр контррефлектора в K_0 раз больше входного зрачка объектива:

$$D_2 = D_0 K_0. \quad (13)$$

За исходную чувствительность одноканального биморфного зеркала со световым диаметром 42 мм было принято значение 47 мкм/кВ, взятое из работы [4]. Пересчет чувствительности для биморфного зеркала с другим световым диаметром осуществляется по следующей формуле:

$$S_2 = S_1(D_2/D_1)^2, \quad (14)$$

где S_1 – чувствительность зеркала со световым диаметром D_1 , S_2 – искомая чувствительность зеркала со световым диаметром D_2 .

Таким образом, формулы (1)–(4), (6), (8)–(14) в совокупности полностью описывают зеркально-линзовый обращенный телеобъектив и его работу. Формулы (8), (9), (11)–(14) описывают управляемый объектив в статике, а формулы (1), (2), (4), (6), (10) – в динамике.

3.2. Алгоритм расчета диапазонов управления

На основе вышеизложенного можно конкретизировать алгоритм расчета управляемого зеркально-линзового обращенного телеобъектива и диапазонов управления его параметрами $\Delta S'_f$ и Δf .

1. Задаем конструктивные характеристики объектива (f'_0 , K_0 , d , O).

2. Вычисляем S'_f , f_L , R_{20} и D_0 по формулам (3), (8), (9) и (12) соответственно.

3. Вычисляем по формулам (11) и (13) световые диаметры зеркал объектива D_1 и D_2 и далее по формуле (14) их чувствительности.

Таким образом, статические параметры управляемого объектива рассчитаны.

4. Вычисляем по формулам (10) радиусы кривизны R_1 и R_2 деформируемых зеркал объектива при предельных управляющих напряжениях U (–200 и 300 В).

5. Подставив вычисленные радиусы кривизны в формулы (4) и (6), вычисляем новые f' и S'_f .

6. Вычисляем по формуле (1) диапазон управления положением задней фокальной плоскости $\Delta S'_f$ и по формуле (2) диапазон управления фокусным расстоянием Δf .

Таким образом, диапазоны $\Delta S'_f$ и Δf управляемого объектива рассчитаны.

4. Анализ результатов компьютерного моделирования

Ввиду того что поставленная задача является многопараметрической – обе функции, $\Delta S'_f$ и Δf , зависят от 4 переменных (f'_0 , K_0 , d , O) – для графического представления результатов компьютерного моделирования были выбраны несколько базовых объективов (см. таблицу). Эти объективы выбраны так, чтобы перекрыть как можно большую часть заданного пространства конструктивных характеристик, но при этом не рассматривать нереальные конструкции.

Естественно, что управляющие напряжения на деформируемые зеркала могут подаваться независимо друг от друга и иметь любую величину из рабочего диапазона, но для упрощения анализа полученных результатов на нижеследующих графиках приводится вариант синфазного управления зеркалами объектива ($U_1 = U_2$) при предельных управляющих напряжениях на них. К тому же, как уже отмечалось выше, в этом случае объектив имеет максимальную эффективность.

Полученные результаты представлены на рис. 2–9, на каждом из которых приведены зависимости диапазона управления Δf либо $\Delta S'_f$ от одного из выбранных конструктивных параметров объектива f'_0 , K_0 , d или O . На каждом рисунке приводятся несколько кривых, на которых показаны точки, характеризующие базовые объективы при синфазном управлении рефлектором и контррефлектором (отмечены увеличенными маркерами и цифрами в соответствии с таблицей). Для каждой кривой на всех графиках три из четырех выбранных параметра (f'_0 , K_0 , d , O) являются постоянными, а четвертый варьируется в указанных пределах за счет изменения внутренних параметров объектива f_L , R_{20} (см. формулы (8) и (9)). Например, на рис. 2 для каждой кривой постоянны f'_0 , d и O , а K_0 является переменной величиной.

На рис. 2 и 3 приведены зависимости диапазонов управления Δf и $\Delta S'_f$ управляемого объектива

Параметры базовых управляемых объективов

№	f'_0 , мм	K	d , мм	O	Δf , мм	$\Delta S'_f$, мм
1	100	1,1	–50	0,4	3,5	4,9
2	100	2,5	–100	0,2	7,1	20,1
3	100	4,5	–100	0,01	12,2	61,1
4	500	1,1	–100	0,01	107,7	130,3
5	500	2,5	–500	0,2	180,4	554,0
6	1000	1,1	–500	0,01	394,9	559,5

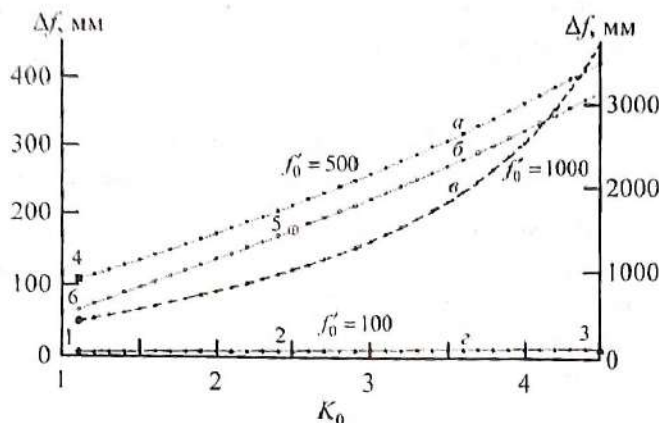


Рис. 2. Диапазон управления фокусным расстоянием Δf управляемого объектива в зависимости от K_0 . $a - d = -100$ мм, $O = 0,01$; $b - d = -500$ мм, $O = 0,2$; $в - d = -500$ мм, $O = 0,01$; $z - -100$ мм $\leq d \leq 50$ мм, $0,01 \leq O \leq 0,4$. Функциям $a, б$ и z соответствует левая ось ординат, функции $в$ – правая.

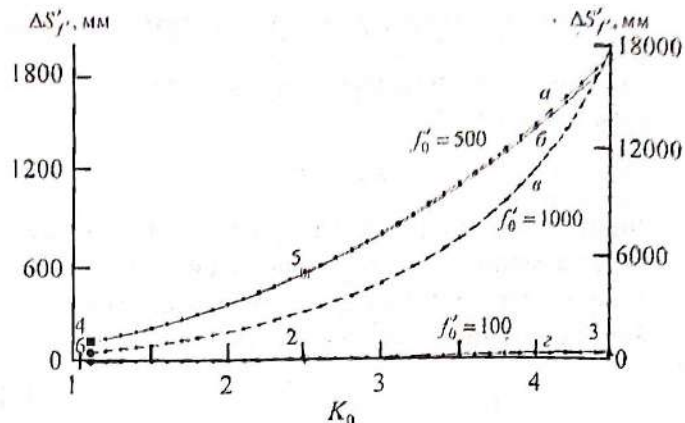


Рис. 3. Диапазон смещения задней фокальной плоскости $\Delta S_{f'}$ управляемого объектива в зависимости от K_0 . $a - d = -100$ мм, $O = 0,01$; $б - d = -500$ мм, $O = 0,2$; $в - d = -500$ мм, $O = 0,01$; $z - -100$ мм $\leq d \leq -50$ мм, $0,01 \leq O \leq 0,4$. Функциям $a, б$ и z соответствует левая ось ординат, функции $в$ – правая.

от K_0 . Как видно из рис. 2, зависимость $\Delta f(K_0)$ при $f_0' \leq 500$ мм является линейной, причем ее наклон возрастает с увеличением f_0' . Среднее квадратичное отклонение (СКО) от линейной зависимости составляет менее 2%. При дальнейшем увеличении f_0' эта зависимость становится квадратичной (СКО < 3%). Зависимость $\Delta S_{f'}(K_0)$ является квадратичной (СКО < 3%), в том числе и кривые z на рис. 3 являются квадратичными. Причем кривизна зависимости $\Delta S_{f'}(K_0)$ возрастает с увеличением f_0' , что хорошо видно на рисунке. Из сравнения абсолютных величин $\Delta S_{f'}$ и Δf на рис. 3 и 2 соответственно видно, что $\Delta S_{f'}$ при изменении K_0 меняется гораздо сильнее, чем Δf . Кроме того, с увеличением K_0 отличие графиков с различными f_0' друг от друга усиливается.

На рис. 4 и 5 приведены зависимости диапазонов управления Δf и $\Delta S_{f'}$ объектива с деформируе-

мыми зеркалами от номинального фокусного расстояния f_0' . На обоих рисунках четко видны 3 группы кривых с разными K_0 . При малых f_0' кривые сливаются, что хорошо согласуется с рис. 2 и 3, а с возрастанием f_0' отличие графиков с различными K_0 друг от друга усиливается. Зависимости $\Delta f(f_0')$ и $\Delta S_{f'}(f_0')$ являются квадратичными (СКО < 5%). При увеличении K_0 кривизна этих зависимостей возрастает, что приводит к увеличению СКО. Так, при $K_0 \leq 2,5$ СКО < 1,5%, а при $K_0 = 4,5$ СКО около 5%. Из рис. 4 видно, что изменение d при прочих равных условиях влечет за собой изменение Δf (ср. группы кривых $a, б$ и $z, д$), а для $\Delta S_{f'}$ это наблюдается только при больших f_0' (более 500) и больших K_0 (более 2,5) (см. кривые a и $б$ на рис. 3 и 5). Из сравнения рис. 4 и 5 четко видно, что d сильнее влияет на Δf , чем на $\Delta S_{f'}$ (ср. z и $д$ на рис. 4 и слившиеся

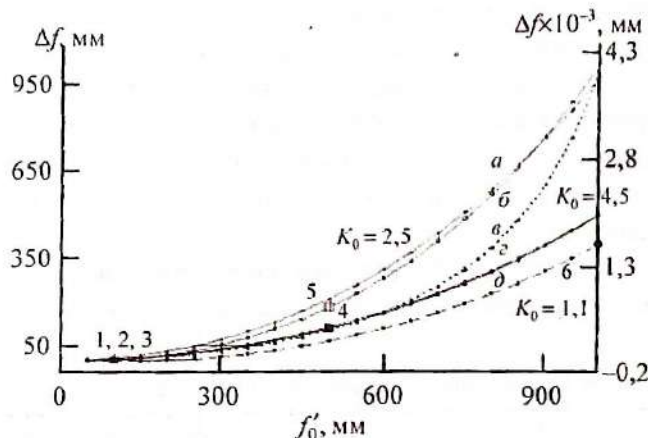


Рис. 4. Диапазон управления фокусным расстоянием Δf управляемого объектива в зависимости от номинального фокусного расстояния f_0' . $a - d = -100$ мм, $O = 0,2$; $б - d = -500$ мм, $O = 0,2$; $в - d = -100$ мм, $O = 0,01$; $г - d = -50$ мм, $O = 0,4$ и $d = -100$ мм, $O = 0,01$; $д - d = -500$ мм, $O = 0,01$. Функциям $a, б, в$ и $г$ соответствует левая ось ординат, функции $е - правая$.

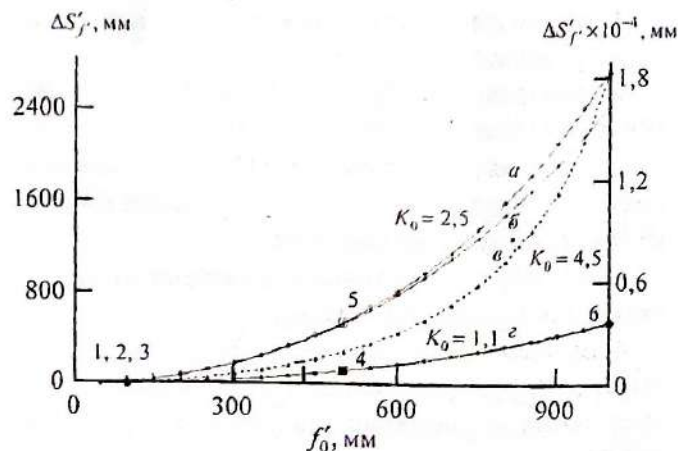


Рис. 5. Диапазон смещения задней фокальной плоскости $\Delta S_{f'}$ управляемого объектива в зависимости от номинального фокусного расстояния f_0' . $a - d = -500$ мм, $O = 0,2$; $б - d = -100$ мм, $O = 0,2$; $в - d = -100$ мм, $O = 0,01$; $г - -500$ мм $\leq d \leq -50$ мм, $0,01 \leq O \leq 0,4$. Функциям $a, б$ и $г$ соответствует левая ось ординат, функции $е - правая$.

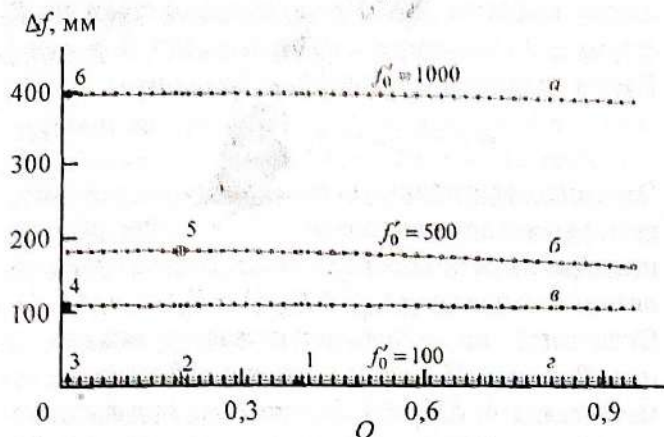


Рис. 6. Диапазон управления фокусным расстоянием Δf управляемого объектива в зависимости от относительного отверстия O . $a - d = -500$ мм, $K_0 = 1,1$; $б - d = -500$ мм, $K_0 = 2,5$; $в - d = -100$ мм, $K_0 = 1,1$; $z - -100$ мм $\leq d \leq -50$ мм, $1,1 \leq K_0 \leq 4,5$.

кривые z на рис. 5). Из сравнения кривых a и $б$ на рис. 4 и 5 это тоже просматривается, правда не так явно.

На рис. 6 и 7 представлены зависимости диапазонов управления Δf и $\Delta S'_f$ рассматриваемого объектива от относительного отверстия O , откуда видно, что Δf и $\Delta S'_f$ очень слабо зависят от этой переменной, т. е. $\Delta f(O) \approx \text{const}$ и $\Delta S'_f(O) \approx \text{const}$. Отличие от const возникает при увеличении относительного отверстия объектива, так как одновременно с этим происходит увеличение O управляемых зеркал и, как следствие, уменьшение относительного вклада их деформаций в результирующие стрелки прогиба. Другими словами, при большом относительном отверстии деформируемого зеркала $w_0 \gg SU$, т. е. $w(U) \approx w_0$ (см. формулы (10)). Это в свою очередь приводит к уменьшению Δf и $\Delta S'_f$. В предельном случае $\Delta f = \Delta S'_f = 0$. Указанное отличие от const наблюдается при больших f'_0 и K_0 и малых расстояниях между зеркалами. Так, при $K_0 = 1,1$, $f'_0 = 500$, $d = -500$ отклонение Δf и $\Delta S'_f$ от наибольшего значения составляет около 4%, а при $K_0 = 2,5$, $f'_0 = 500$, $d = -100$ — около 11%. При $K_0 = 1,1$, $f'_0 = 100$ и $d = -50$ отклонение Δf и $\Delta S'_f$ от наибольшего значения составляет около 3%, а при $K_0 = 2,5$, $f'_0 = 100$ и $d = -100$ — около 0,6%. Зависимости a и $б$ на рис. 7 почти совпадают. Это связано с тем, что $\Delta S'_f \sim K_0^2$ и $\Delta S'_f \sim f_0'^2$, что было показано выше, т. е. увеличение f_0' в два раза эквивалентно уменьшению K_0 примерно в два раза.

На рис. 8 представлены зависимости диапазона управления Δf объектива от расстояния между его зеркалами d . Из графика видно, что зависимость $\Delta f(d)$ — линейная практически во всем диапазоне, при этом, чем больше f'_0 , тем круче наклон кривой (ср. кривые a и $в$), а увеличение K_0 приводит к уменьшению наклона (ср. кривые $б$ и $в$). При увеличении

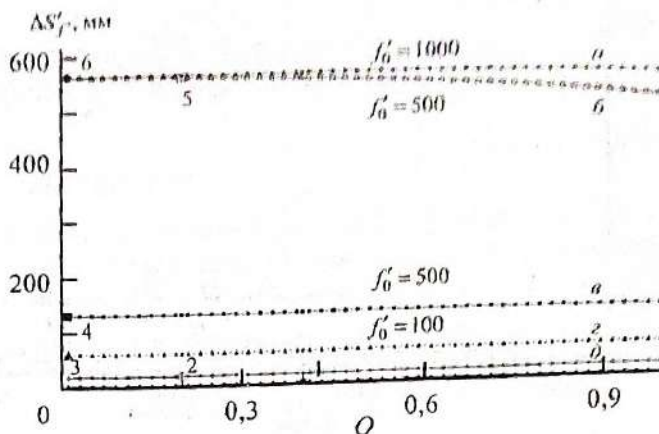


Рис. 7. Диапазон смещения задней фокальной плоскости $\Delta S'_f$ управляемого объектива в зависимости от относительного отверстия O . $a - d = -500$ мм, $K_0 = 1,1$; $б - d = -500$ мм, $K_0 = 2,5$; $в - d = -100$ мм, $K_0 = 1,1$; $z - d = -100$ мм, $K_0 = 4,5$; $д - -100$ мм $\leq d \leq -50$ мм, $1,1 \leq K_0 \leq 2,5$.

расстояния между зеркалами зависимость $\Delta f(d)$ линейно убывает, пересекает ось абсцисс и изменяет знак, т. е. $\Delta f < 0$, при этом $\Delta S'_f > 0$ (рис. 9). То есть при управлении если S'_f возрастает, то f' убывает и наоборот (см. кривые z на рис. 8 и кривые $з$ и $д$ на рис. 9). Функция $\Delta f(d)$ равна нулю в точке, где вклады от каждого зеркала в изменение фокусного расстояния объектива одинаковы по величине, но противоположны по знаку. Это возможно как при синфазном ($U_1 = U_2$) управлении зеркалами (см. кривые z на рис. 8) во всем диапазоне напряжений, так и при раздельном (т. е. напряжения на зеркалах различные). Таким образом, реализуется ситуация, когда при управлении фокусное расстояние постоянно $f'_0 \approx \text{const}$, а значит, постоянен и размер кружка рассеяния, при этом S'_f изменяется, т. е. задняя

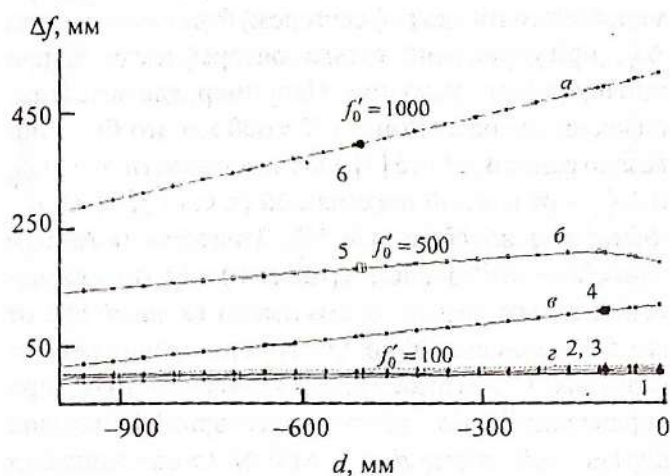


Рис. 8. Диапазон управления фокусным расстоянием $\Delta f'$ управляемого объектива в зависимости от расстояния между зеркалами d . $a - O = 0,01$, $K_0 = 1,1$; $б - O = 0,2$, $K_0 = 2,5$; $в - O = 0,01$, $K_0 = 1,1$; $z - O = 0,01$, $K_0 = 4,5$; $O = 0,2$, $K_0 = 2,5$ и $O = 0,4$, $K_0 = 1,1$.

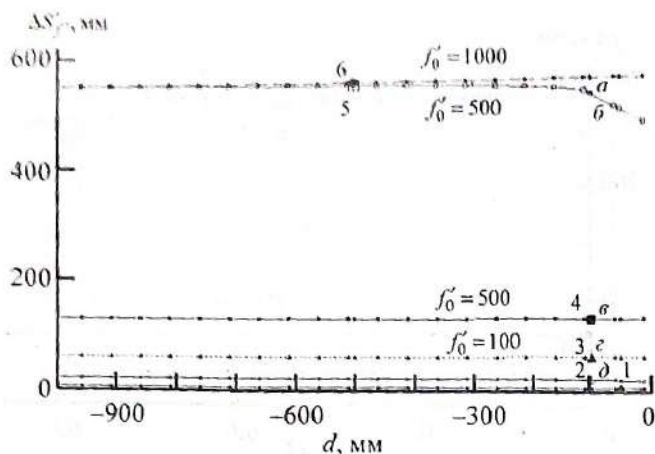


Рис. 9. Диапазон смещения задней фокальной плоскости $\Delta S_f'$ управляемого объектива в зависимости от расстояния между зеркалами d . $a - O = 0,01, K_0 = 1,1$; $b - O = 0,2, K_0 = 2,5$; $c - O = 0,01, K_0 = 1,1$; $d - O = 0,01, K_0 = 4,5$; $e - 0,2 \leq O \leq 0,4, 1,1 \leq K_0 \leq 2,5$.

фокальная плоскость смещается вдоль оптической оси объектива.

На рис. 9 представлены зависимости диапазона смещения $\Delta S_f'$ управляемого объектива от расстояния между его зеркалами d . Из рисунка видно, что функция $\Delta S_f'$ практически не зависит от d в отличие от $\Delta f(d)$. Таким образом, можно констатировать: изменяя d , можно подобрать удобные конструктивные параметры объективов с одинаковыми $\Delta S_f'$ и различными Δf . На рис. 9 кривые a и b сливаются, как и на рис. 7, что подтверждает сделанный ранее вывод: $\Delta S_f' \sim K_0^2$ и $\Delta S_f' \sim f_0'^2$.

Кроме рассмотренного синфазного управления возможны и другие варианты, например управление каким-либо одним зеркалом объектива. В этом случае смещение задней фокальной плоскости будет меньше, чем при синфазном управлении обоими зеркалами объектива. В свою очередь $\Delta S_{f_p}'$ (при управлении только рефлектором) будет меньше, чем $\Delta S_{f_s}'$ (при управлении только контррефлектором) при прочих равных условиях. Например, для объектива с фокусным расстоянием $f_0' = 600$ мм это было показано ранее в работе [3]. Обе зависимости, т. е. $\Delta S_{f_p}'$ и $\Delta S_{f_s}'$ – от каждой переменной (т. е. от f_0', d, O, K_0) имеют вид, аналогичный $\Delta S_f'$. Зависимости Δf (при синфазном управлении зеркалами) и Δf_p (при управлении только рефлектором) имеют сходный вид от каждой переменной, но $\Delta f > \Delta f_p$ при прочих равных условиях. То же самое касается зависимости Δf_s (при управлении только контррефлектором) от каждой переменной, кроме d , т. е. $\Delta f > \Delta f_s$ (о соотношении между Δf и Δf_s при различных d см. ниже). Зависимость $\Delta f_s(d)$ аналогична зависимости $\Delta S_{f_s}'(d)$, т. е. почти постоянна. Но $\Delta S_{f_s}'$ в K_0 раз больше Δf_s . Это показывается ниже при анализе формулы (16).

Отметим существенную особенность рассматриваемых объективов, возникающую при управлении

одним рефлектором. Продифференцируем по R_1 формулу (4) и приравняем производную к нулю. Путем несложных вычислений находим

$$d = -R_{20}/2 = -f_0'(1 + K_0)/2. \quad (15)$$

Это означает, что при управлении только рефлектором и выполнении условия (15) фокусное расстояние объектива постоянно во всем диапазоне управляющих напряжений, $f_0' = R_{20}/(1 + K_0)$, т. е. $\Delta f_p = 0$. Следовательно, постоянен и размер кружка рассеяния. При этом S_f' при управлении рефлектором изменяется, т. е. $\Delta S_{f_p}' \neq 0$. Кроме того, при выполнении условия (15) и синфазном управлении $\Delta f = \Delta f_s$. Если расстояние между зеркалами больше, чем определяемое этой формулой, то $\Delta f < \Delta f_s$, если меньше, то $\Delta f > \Delta f_s$.

Вообще говоря, между исследуемыми функциями управляемого объектива существует довольно простая, но не однозначная связь, прямо следующая из формулы (3). Рассматривая S_f' в (3) как функцию выбранных переменных f_0' и K_0 , легко получим, используя определение (1):

$$\begin{aligned} \Delta S_f' &= K_2 f_2' - K_1 f_1' = K_2 f_2' - K_2 f_1' + K_2 f_1' - K_1 f_1' = \\ &= K_2 \Delta f + f_1' \Delta K = K_0 \Delta f + \Delta K_2 \Delta f + f_0' \Delta K - \Delta f_1' \Delta K, \end{aligned} \quad (16)$$

где $\Delta K = K_2 - K_1$ – диапазон изменения K_0 при управлении, $K_1 = K(U = -200 \text{ В})$, $K_2 = K(U = 300 \text{ В})$, аналогично для f_1' и f_2' , $\Delta f_1' = f_0' - f_1'$, $\Delta K_2 = K_2 - K_0$.

При управлении только рефлектором и выполнении условия (15) получаем, что диапазон изменения фокусного расстояния $\Delta f_p = \Delta f_{1p} = 0$, а формула (16) преобразуется к простому виду $\Delta S_{f_p}' = f_0' \Delta K_p$. При управлении только контррефлектором $\Delta K_s = \Delta K_{2s} = 0$, формула (16) преобразуется к виду $\Delta S_{f_s}' = K_0 \Delta f_s$, т. е. диапазон смещения задней фокальной плоскости $\Delta S_{f_s}'$ в K_0 раз больше диапазона изменения фокусного расстояния Δf_s .

5. Заключение

Разработанная математическая модель позволила исследовать эффективность управляемого по $\Delta S_f'$ и Δf зеркально-линзового объектива от его конструктивных характеристик f_0', K_0, d и O . Аналогичным образом можно исследовать диапазоны управления другими параметрами управляемого объектива, такими как размер кружка рассеяния, компенсируемая расхожимость и т. д., изменение которых при управлении было показано в работе [3].

В результате компьютерного моделирования и анализа графиков выявлено, что эффективность управляемого объектива существенно зависит от его конструктивных характеристик. Показано, что Δf

зависит от d линейно, а $\Delta S_f(d) \approx \text{const}$. При управлении только рефлектором диапазон изменения фокусного расстояния Δf_p линейно убывает с увеличением расстояния между зеркалами и в точке, определяемой формулой (15), $\Delta f_p = 0$. То есть фокусное расстояние постоянно при смещении фокальной плоскости управляемого объектива. Аналогичная ситуация возникает и при совместном управлении рефлектором и контррефлектором. Таким образом, существует возможность управлять положением задней фокальной плоскости управляемого объектива как с изменением, так и без изменения фокусного расстояния.

Зависимости $\Delta S_f(f'_0)$ и $\Delta f(f'_0)$ являются квадратичными. Зависимость $\Delta S_f(K_0)$ также является квадратичной, а $\Delta f(K_0)$ – линейна при $f'_0 \leq 500$ мм и квадратичная при $f'_0 \geq 500$ мм. Зависимости $\Delta f(O) \approx \text{const}$ и $\Delta S_f(O) \approx \text{const}$. Но при большом относительном отверстии деформируемого зеркала, когда $w_0 \gg SU$, происходит заметное уменьшение Δf и ΔS_f . Это наблюдается при больших f'_0 и K_0 . В последнем случае для увеличения точности аппроксимации зависимостей $\Delta S_f(f'_0)$, $\Delta f(f'_0)$, $\Delta S_f(K_0)$, $\Delta f(K_0)$ следует увеличить степень полиномов.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

на величину ΔS_f наибольшее влияние оказывают f'_0 и K_0 , чем они больше, тем больше ΔS_f , а зависимости от d и O практически постоянные;

на величину Δf наибольшее влияние оказывают f'_0 , K_0 и d , а зависимость от O практически постоянна, причем зависимость от d линейна и пересекает ось абсцисс, т. е. в точке пересечения оси абсцисс $\Delta f = 0$.

Разработанная математическая модель позволяет синтезировать управляемые объективы с любыми наперед заданными диапазонами ΔS_f и Δf .

ЛИТЕРАТУРА

1. Bar K., Freisleben B., Kozlik C., Schmiedl R. Adaptive optics for industrial CO₂ laser systems // Lasers in Engineering, 1995. V. 4. P. 233–242.
2. Виневи́ч Б.С., Евдокимови́ч Л.Н., Сафронов А.Г., Смирнов С.Н. Применение деформируемых зеркал в технологических СО₂-лазерах. 2. Внутррезонаторное управление мощностью и импульсно-периодическая модуляция выходного излучения // Квант. электрон. 2004. Т. 34. № 4. С. 333–340.
3. Агафонов В.В., Сафронов А.Г. Управляемый объектив с деформируемыми зеркалами // Квант. электрон. 2004. Т. 34. № 3. С. 272–276.
4. Виневи́ч Б.С., Жари́ков В.М., Сафронов А.Г. Охлаждаемые и неохлаждаемые одноканальные деформируемые зеркала для промышленных лазерных комплексов // Квант. электрон. 1998. Т. 25. № 4. С. 377–380.
5. Выскубенко О.Б., Капустин П.И., Колоколов И.С., Масычев В.И., Сафронов А.Г. Применение деформируемых зеркал в технологических СО₂-лазерах. 1. Зеркало с управляемой кривизной отражающей поверхности // Квант. электрон. 2003. Т. 33. № 6. С. 547–552.
6. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 640 с.
7. Нови́чки М. Лазеры в электронной технологии и обработке материалов. М.: Машиностроение, 1981.
8. Краткий технический справочник. / Под ред. Зиновьева В.А. М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит-ры, 1952. С. 50.