

Управляемый объектив с деформируемыми зеркалами

В.В.Агафонов, А.Г.Сафронов

Предложен новый оптический прибор – объектив с деформируемыми зеркалами, параметрами которого можно управлять в динамическом режиме. Проведено компьютерное моделирование объектива. Построены зависимости некоторых параметров объектива от управляющего напряжения. В результате моделирования выявлено, что у объектива с фокусным расстоянием 602 мм диапазон управления задним фокальным отрезком равен 1057 мм, а фокусным расстоянием – 340 мм, что существенно больше, чем при управлении эквивалентным деформируемым зеркалом.

Ключевые слова: деформируемые зеркала, управляемые объективы, управление размером и положением фокального пятна.

1. Введение

Адаптивные зеркала [1–3] прочно вошли в современную оптику. Они используются для компенсации динамических аберраций в различных оптических системах, например в телескопах [4], что позволяет получать изображение, близкое по качеству к дифракционному. Их применение возможно и для решения различных задач управления, например для управления перетяжкой лазерного пучка в технологическом лазерном комплексе [5]; они могут использоваться также в качестве концевых или поворотных зеркал резонатора лазера для модулирования его добротности, управления выходной мощностью или оптимизации его параметров [6].

Параметры деформируемых зеркал изменяются при управлении в небольшом диапазоне, которого часто недостаточно. Существуют различные задачи, для решения которых требуются большие диапазоны, например задача управления параметрами оптического пучка при его фокусировке на удалённую мишень сложной пространственной формы [7]. На основе современных деформируемых зеркал можно создавать новые оптико-электронные приборы, в частности управляемые объективы [8]. Назначение таких приборов – повысить эффективность управления по сравнению с деформируемыми зеркалами, используемыми вне объектива. Это позволит применять их вместо деформируемых зеркал, что увеличит возможности оптической системы. При управлении будут изменяться параметры как самого объектива, так и оптического пучка.

В [9] был предложен управляемый зеркально-линзовый объектив, одно из зеркал которого было деформируемым. В настоящей работе рассматривается аналогич-

ный объектив, оба зеркала которого являются деформируемыми.

2. Построение управляемого объектива

Управляемый объектив – в данном случае управляемый зеркально-линзовый обращенный телеобъектив – состоит из двух деформируемых зеркал 1, 2 и оптической линзы 3 (рис.1). Линза 3 расположена в центральном отверстии контррефлектора 1 и позволяет оптимизировать параметры объектива. При компьютерном моделировании объектива были использованы характеристики охлаждаемых одноканальных деформируемых зеркал из работы [2]. Управляемые сферические деформации этих зеркал позволяют изменять параметры объектива (фокусное расстояние, задний фокальный отрезок, размер фокального пятна и др.), а также параметры оптического

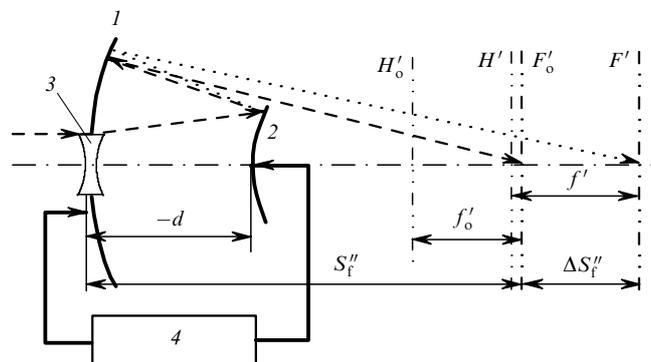


Рис.1. Управляемый обращенный зеркально-линзовый телеобъектив (пунктирными и штриховыми линиями показан ход апертурного луча, жирные стрелки обозначают управление кривизной деформируемых зеркал с помощью управляющего напряжения U : 1 – контррефлектор; 2 – рефлектор; 3 – линза; 4 – система управления;

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 главной плоскости; f'_0 – фокусное расстояние при $U = 0$; f' – фокусное расстояние при $U \neq 0$; d – расстояние между зеркалами.

В.В.Агафонов, А.Г.Сафронов. Московский энергетический институт (технический университет), Россия, 111250 Москва, Красноказарменная ул., 14; e-mail: sag.mac@g23.relcom.ru

Поступила в редакцию 12 ноября 2002 г., после доработки – 25 июня 2003 г.

пучка (например, расходимость), в том числе в реальном времени.

Чувствительность (отношение прогиба зеркала к напряжению, вызывающему эту деформацию) используемых в расчётах зеркал соответствует чувствительности охлаждаемых биморфных зеркал [2, 10]. Для биморфных зеркал она зависит от их светового диаметра. За исходную чувствительность деформируемого зеркала со световым диаметром 42 мм было взято значение 47 мкм/кВ. Его пересчёт для зеркала с другим световым диаметром осуществлялся по следующей формуле:

$$K_2 = K_1(D_2/D_1)^2, \quad (1)$$

где K_1 - исходная чувствительность зеркала со световым диаметром D_1 ; K_2 - чувствительность зеркала со световым диаметром D_2 .

В конкретном варианте был рассчитан управляемый объектив, характеристики которого приведены ниже. Аналогичный объектив, но с одним деформируемым зеркалом, был предложен при разработке автоматической системы коррекции параметров лазерного пучка [9].

Параметры управляемого объектива

Фокусное расстояние f'_o (мм)	602
Задний фокальный отрезок S''_f (мм)	1685.6
Относительное отверстие O	0.03
Расстояние между зеркалами d (мм)	-360
Фокусное расстояние линзы f'_{lin} (мм)	-400
Световой диаметр линзы D_0 (мм)	18
Исходная поверхность рефлектора	плоская
Световой диаметр рефлектора D_1 (мм)	34.2
Чувствительность рефлектора K_1 (мкм/кВ)	31.2
Исходный радиус кривизны контррефлектора R_2 (мм)	1345.8
Световой диаметр контррефлектора D_2 (мм)	50.4
Чувствительность контррефлектора K_2 (мкм/кВ)	67.7

3. Расчётная схема управляемого объектива и вывод основных соотношений

Для вывода формул расчёта основных параметров объектива (фокусного расстояния и заднего фокального отрезка) выпишем исходные соотношения. При воздействии управляющего напряжения радиус кривизны одноканального биморфного зеркала

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

$$w = w_0 + KU, \quad (3)$$

где D - световой диаметр биморфного зеркала; w - стрелка прогиба биморфного зеркала; w_0 - стрелка прогиба биморфного зеркала при отсутствии управляющего напряжения; K - чувствительность биморфного зеркала; U - управляющее напряжение.

Далее воспользуемся рис.2, на котором показан ход апертурного луча в объективе. Учитывая правила знаков в оптике [11], можно записать: $R_1 > 0$ (при $U > 0$ зеркало выпуклое), $R_1 < 0$ (при $U < 0$ зеркало вогнутое), $R_2 > 0$, $d < 0$, $S''_f > 0$, $h_0 > 0$, $h_1 > 0$, $h_2 > 0$, $f'_{lin} < 0$, $f'_o > 0$, $\alpha_1 < 0$,

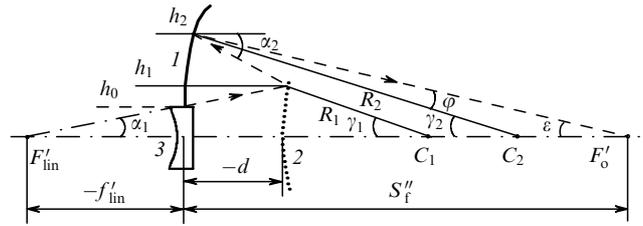


Рис.2. Расчётная схема зеркально-линзового объектива (штриховой линией показан ход апертурного луча):

1 - контррефлектор; 2 - рефлектор; 3 - линза; h_0 - высота падения апертурного луча на входной зрачок; h_1 - высота падения апертурного луча на рефлектор; h_2 - высота падения апертурного луча на контррефлектор; C_1 - центр кривизны рефлектора; C_2 - центр кривизны контррефлектора; R_1 - радиус кривизны рефлектора; R_2 - радиус кривизны контррефлектора; d - расстояние между зеркалами; f'_{lin} - заднее фокусное расстояние линзы; S''_f - задний фокальный отрезок объектива; F'_{lin} - задняя фокальная плоскость линзы; F'_o - задняя фокальная плоскость объектива.

$\alpha_2 > 0$, $\varphi > 0$, $\gamma_1 > 0$, $\gamma_2 > 0$, $\varepsilon > 0$; диаметр входного зрачка $D_0 = 2h_0$, диаметр рефлектора $D_1 = 2h_1$. Из рис.2 можно найти следующие соотношения:

$$\sin \gamma_1 = \frac{h_1}{R_1}, \quad (4)$$

$$\sin \gamma_2 = \frac{h_2}{R_2}, \quad (5)$$

$$h_2 = h_1 - d \tan(2\gamma_1 - \alpha_1), \quad (6)$$

$$h_1 = h_0 \left(1 - \frac{d}{f'_{lin}}\right), \quad (7)$$

$$\varphi = \alpha_2 - \gamma_2 = 2\gamma_1 - \alpha_1 - \gamma_2, \quad (8)$$

$$\varepsilon = \gamma_2 - \varphi = 2(\gamma_2 - \gamma_1) + \alpha_1. \quad (9)$$

После подстановки (4)–(7) в (9) получаем

$$\varepsilon = 2 \left\{ \arcsin \left[\frac{h_1 - d \tan(2 \arcsin(h_1/R_1) - \alpha_1)}{R_2} \right] - \arcsin \left(\frac{h_1}{R_1} \right) \right\} + \alpha_1. \quad (10)$$

При парааксиальном приближении $\sin x \approx \tan x \approx x$ выражение (10) можно упростить. В результате получим

$$\varepsilon = \frac{2h_1 \{R_1 - (R_2 + 2d)[1 - (R_1\alpha_1/2h_1)]\}}{R_1 R_2}. \quad (11)$$

При нормальном падении входного оптического пучка с плоским волновым фронтом

$$\alpha_1 = -\arctan \left(\frac{h_0}{f'_{lin}} \right) \approx -\frac{h_0}{f'_{lin}}. \quad (12)$$

Таким образом, фокусное расстояние зеркально-линзового объектива

$$f'_o = \frac{h_0}{\tan \varepsilon} \approx \frac{h_0 R_1 R_2}{2h_1 \{R_1 - (R_2 + 2d)[1 - (R_1\alpha_1/2h_1)]\}}. \quad (13)$$

При подстановке (7) и (12) в (13) получаем

$$f'_o = \frac{R_1 R_2 f_{lin}}{2(R_1 - R_2 - 2d)(f_{lin} - d) - R_1(R_2 + 2d)}. \quad (14)$$

Задний фокальный отрезок объектива

$$S''_f = \frac{h_2}{\tan \varepsilon}; \quad (15)$$

после подстановки (6), (7), (11) и (12) в (15) и преобразований получаем

$$S''_f = \frac{[R_1 f_{lin} - 2d(R_1 + f_{lin} - d)]R_2}{2(R_1 - R_2 - 2d)(f_{lin} - d) - R_1(R_2 + 2d)}. \quad (16)$$

Следовательно, формулы (14) и (16) в совокупности с (2) и (3) выражают зависимость фокусного расстояния f'_o и заднего фокального отрезка S''_f управляемого зеркально-линзового объектива от напряжения.

4. Графическое представление и обсуждение результатов

Для компьютерного моделирования управляемых объективов было создано программное обеспечение, с помощью которого получены приведённые ниже результаты. Рассмотрим зависимости основных параметров управляемого объектива от управляющего напряжения на деформируемых зеркалах. Для удобства анализа сравним объектив с эквивалентным деформируемым зеркалом. Под последним будем понимать одноканальное деформируемое зеркало, фокусное расстояние которого такое же, как у рассматриваемого объектива, световой диаметр равен диаметру входного зрачка объектива, а чувствительность соответствует исходной (т.е. 47 мкм/кВ при световом диаметре 42 мм). Таким образом, эквивалентное деформируемое зеркало имеет следующие параметры: фокусное расстояние 602 мм, световой диаметр 18 мм, чувствительность 8.6 мкм/кВ.

На рис.3 показана зависимость смещения задней фокальной плоскости управляемого объектива и эквивалентного деформируемого зеркала от напряжения. Эта зависимость для объектива в первом приближении имеет квадратичный характер, а для зеркала – линейный. Как видно из рис.3, управляемый объектив имеет больший по сравнению с эквивалентным зеркалом диапазон управления задним фокальным отрезком даже при управлении

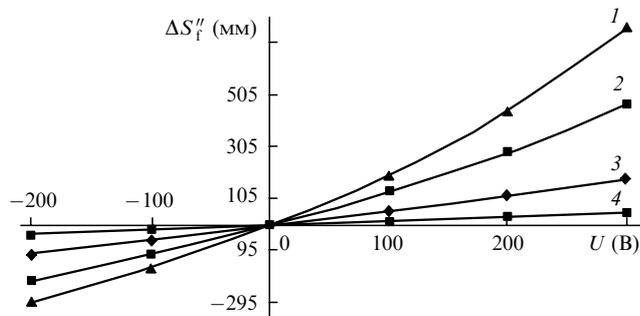


Рис.3. Зависимости смещения задней фокальной плоскости $\Delta S''_f$ от напряжения U при одновременном управлении рефлектором и контррефлектором (1), при управлении только контррефлектором (2), при управлении только рефлектором (3), а также эквивалентным деформируемым зеркалом (4).

только одним из зеркал (в 3.6 раза при управлении рефлектором и в 8.4 раза – контррефлектором). При одновременном управлении обоими зеркалами объектива диапазон существенно больше, чем у зеркала (в 13 раз). Под диапазоном управления задним фокальным отрезком подразумевается расстояние вдоль оптической оси между задними фокальными плоскостями при управляющих напряжениях –200 и 300 В.

На рис.4 показана зависимость фокусного расстояния управляемого объектива и эквивалентного деформируемого зеркала от напряжения, которая для объектива в первом приближении имеет квадратичный характер, а для зеркала – линейный. Видно, что по сравнению с эквивалентным зеркалом объектив имеет больший диапазон изменения фокусного расстояния при управлении одним контррефлектором (в 3 раза) и двумя зеркалами одновременно (в 4.3 раза). При управлении рефлектором диапазоны изменения фокусного расстояния у объектива и эквивалентного зеркала практически совпадают (70 и 79.6 мм соответственно). Под диапазоном управления фокусным расстоянием понимается разность между фокусными расстояниями при управляющих напряжениях –200 и 300 В.

Как видно из рис.3 и 4, при изменении управляющего напряжения от –200 до 300 В фокусное расстояние и задний фокальный отрезок объектива имеют разные диапазоны управления (340 мм и 1057 мм соответственно). Это связано с тем, что при управлении задняя главная и задняя фокальная плоскости объектива смещаются по-разному (см. рис.1). В отличие от объектива, в деформируемом зеркале положение задней главной плоскости при управлении не изменяется, а следовательно, фокусное расстояние и задний фокальный отрезок изменяются одинаково. По сути этим и объясняется разное увеличение диапазонов управления параметрами объектива по сравнению с эквивалентным деформируемым зеркалом.

При определённых условиях, а именно, если рефлектор находится в фокусе контррефлектора, т.е. $d = -R_2/2$, при управлении только рефлектором фокусное расстояние объектива остаётся постоянным – задняя главная и фокальная плоскости управляемого объектива (см. рис.1) смещаются в одном направлении и на одинаковое расстояние. Задний фокальный отрезок в этом случае будет изменяться. При $d \neq -R_2/2$ фокусное расстояние объектива при управлении изменяется.

Рассмотрим ещё один параметр – компенсируемую расходимость. Под ней будем понимать расходимость

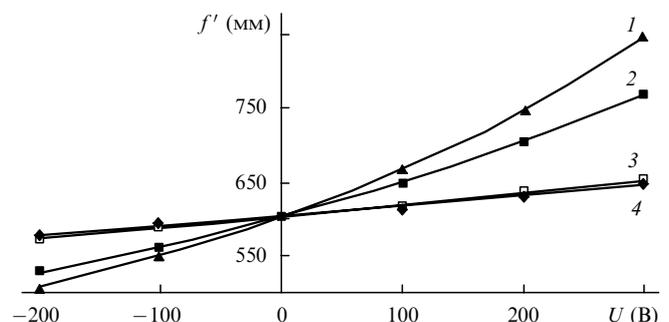


Рис.4. Зависимости фокусного расстояния f' от напряжения U при одновременном управлении рефлектором и контррефлектором объектива (1), при управлении только контррефлектором (2), эквивалентным деформируемым зеркалом (3) или только рефлектором объектива (4).

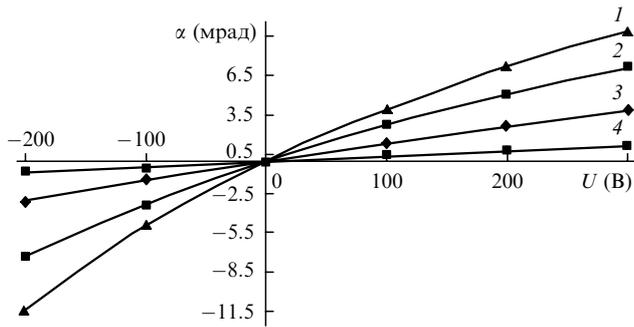


Рис.5. Зависимости компенсируемой расходимости α от напряжения U при одновременном управлении рефлектором и контррефлектором объектива (1), при управлении только контррефлектором (2) или только рефлектором (3), а также эквивалентным деформируемым зеркалом (4).

входного оптического пучка, которую управляемый объектив может компенсировать. Это означает, что при деформировании зеркала или зеркал объектива плоскость изображения при наличии расходимости входного оптического пучка совпадает с номинальной задней фокальной плоскостью. Номинальная фокальная плоскость объектива – это фокальная плоскость в отсутствие управляющего воздействия на зеркалах.

На рис.5 представлена зависимость компенсируемой расходимости управляемого объектива и эквивалентного деформируемого зеркала от напряжения. Расходимость, компенсируемая с помощью управляемого объектива, на порядок больше расходимости, компенсируемой эквивалентным деформируемым зеркалом (при одновременном управлении обоими зеркалами объектива – в 11 раз).

На рис.6 показана зависимость от напряжения размера фокального пятна с учётом сферической аберрации и дифракции (остальные аберрации малы по сравнению с ними) для управляемого объектива и эквивалентного деформируемого зеркала. У объектива фокальное пятно имеет в 4 раза больший диапазон управления (при управлении рефлектором и контррефлектором одновременно). Для расчёта дифракции использовалась длина волны, равная 633 нм. Размер фокального пятна рассчитывался по следующей формуле: $d_f = 2(r_d^2 + r_1^2)^{1/2}$, где $r_d = 1.22 \times \lambda/O$ – дифракционный радиус фокального пятна; $r_1 = \text{Sum}1/O$ – радиус фокального пятна, рассчитанный по первой сумме Зейделя Sum1 (сферическая аберрация).

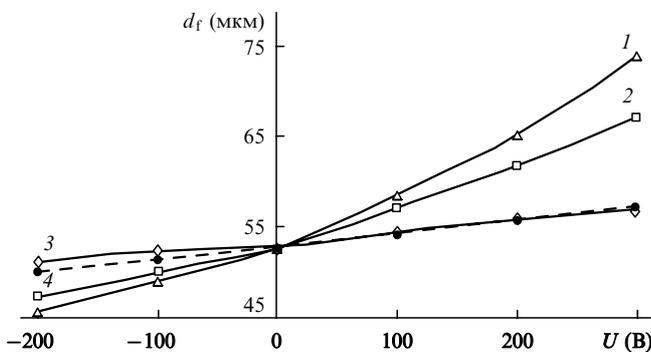


Рис.6. Зависимости размера фокального пятна d_f от напряжения U при одновременном управлении рефлектором и контррефлектором объектива (1), при управлении только контррефлектором (2) или только рефлектором (3), а также эквивалентным деформируемым зеркалом (4).

На рис.7 приведена зависимость относительного размера пятна от напряжения для управляемого объектива и эквивалентного деформируемого зеркала с учётом сферической аберрации и дифракции на длине волны 633 нм (эта зависимость верна для видимой и ИК областей оптического спектра, т. к. в данном случае в этом спектральном диапазоне дифракция преобладает над аберрациями). Относительный размер пятна – это отношение размера пятен в номинальной задней фокальной плоскости при заданном управляющем напряжении и при $U = 0$. При управлении рефлектором и контррефлектором одновременно эта величина достигает 300.

В табл.1 сведены некоторые результаты компьютерного моделирования управляемого объектива и эквивалентного деформируемого зеркала. Фокусное расстояние эквивалентного зеркала совпадает с его задним фокальным отрезком. Из табл.1 видно, что задний фокальный отрезок объектива изменяется на 17.4 % (при $U = -200$ В) и на 45.3 % (300 В), фокусное расстояние – на 15.7 % (-200 В) и 40.9 % (-300 В). Фокусное расстояние и задний фокальный отрезок эквивалентного деформируемого зеркала изменяются на 4.9 % (при $U = -200$ В) и 8.3 % (300 В), что существенно меньше, чем у управляемого объектива.

5. Заключение

В результате компьютерного моделирования исследован управляемый зеркально-линзовый объектив, который является по сути новым оптико-электронным прибором. Параметрами такого объектива можно управлять в реальном времени. Проведённые исследования показывают, что из существующих деформируемых зеркал можно строить управляемые объективы различных типов (Кассегрена, Грегори, Шварцшильда и т. д.) [11].

В результате исследований выявлено, что по эффективности управляемый объектив существенно превосходит эквивалентное деформируемое зеркало. В частности, у рассматриваемого объектива ($f'_o = 602$ мм) относительный диапазон управления задним фокальным отрезком составляет 63 %, а фокусным расстоянием – 57 %. Диапазон смещения задней фокальной плоскости объектива больше, чем у эквивалентного зеркала, в 13 раз, диапазон управления фокусным расстоянием – в 4 раза, а диапазон компенсируемой расходимости – в 11 раз. Кроме того, существует возможность управлять положением задней

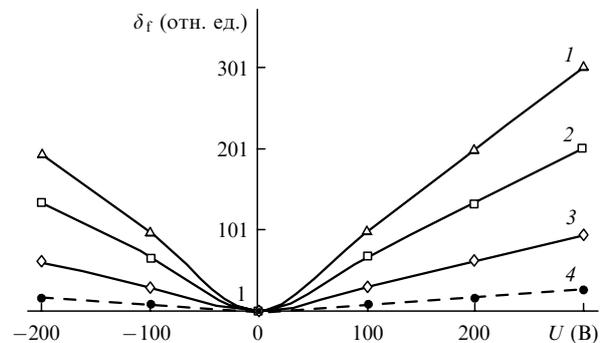


Рис.7. Зависимости относительного размера фокального пятна δ_f от напряжения U при одновременном управлении рефлектором и контррефлектором объектива (1), при управлении только контррефлектором (2) или только рефлектором (3), а также эквивалентным деформируемым зеркалом (4).

Табл.1. Изменение основных параметров объектива и эквивалентного зеркала при управлении.

Управляющее напряжение (В)	-200	300	Весь диапазон
Изменение заднего фокального отрезка объектива при управлении:			
рефлектором, $\Delta S''_{f1}$ (мм)	-106.6	179.3	285.9
контррефлектором, $\Delta S''_{f2}$ (мм)	-211.7	462.8	674.5
рефлектором и контррефлектором одновременно, $\Delta S''_{fsum}$ (мм)	-293.8	762.9	1056.7
Изменение фокусного расстояния объектива при управлении:			
рефлектором, Δf_1 (мм)	-26.1	43.9	70.0
контррефлектором, Δf_2 (мм)	-75.6	165.3	240.9
рефлектором и контррефлектором одновременно, Δf_{sum} (мм)	-94.4	246.0	340.4
Изменение фокусного расстояния и заднего фокального отрезка эквивалентного зеркала при управлении Δf ($\Delta f = \Delta S''_f$) (мм)			
	-29.4	50.2	79.6
Расходимость, компенсируемая объективом при управлении:			
рефлектором, α_1 (мрад)	-2.96	3.81	6.77
контррефлектором, α_2 (мрад)	-7.30	7.17	14.47
рефлектором и контррефлектором одновременно, α_{sum} (мрад)	-11.25	9.96	21.21
Расходимость, компенсируемая эквивалентным зеркалом при управлении, α (мрад)			
	-0.77	1.15	1.92
Размер фокального пятна объектива при управлении:			
рефлектором, d_{f1} (мкм)	51	57	-
контррефлектором, d_{f2} (мкм)	47	67	-
рефлектором и контррефлектором одновременно, d_{fsum} (мкм)	46	74	-
Размер фокального пятна эквивалентного зеркала при управлении d_f (мкм)			
	50	57	-

фокальной плоскости объектива как с изменением, так и без изменения его фокусного расстояния.

Анализ полученных результатов показывает, что в первом приближении зависимости f'_o и $\Delta S''_f$ от управляющего напряжения являются квадратичными, в то время как аналогичные зависимости для деформируемого зеркала (в том же приближении) – линейными. Очевидно, что при изменении конструктивных параметров объектива (фокусного расстояния f'_o , расстояния между зеркалами d , заднего фокального отрезка S''_f и др.) будут изменяться и диапазоны управления его параметрами.

1. Тараненко В.Г., Горохов Ю.Г., Романюк Н.С. *Зарубежная радиоэлектроника*, № 8, 19 (1982).
2. Виневич Б.С., Жариков В.М., Сафронов А.Г. *Квантовая электроника*, 25, 377 (1998).

3. Vdovin G., Kiyko V. *Opt. Lett.*, 26, 11, 798 (2001).
4. Сычѳв В.В., Печѳнов А.С. *Оптич. ж.*, 68 (8), 93 (2001).
5. Bag K., Freisleben B., Kozlik C., Schmiedl R. *Lasers Eng.*, 4, 233 (1995).
6. Сафронов А.Г. Патент РФ № 2217849 от 11.10.2000; *БИ*, № 33 (2003).
7. Гладуш Г.Г., Дробязко С.В., Родионов Н.В., Антонова Л.И., Сенаторов Ю.М. *Квантовая электроника*, 30, 1072 (2000).
8. Агафонов В.В., Сафронов А.Г. Патентная заявка РФ № 2001135271 от 27.12.2001.
9. Агафонов В.В., Сафронов А.Г. *Светотехника*, 4, 33 (2001).
10. Kokorowski S.A. *J. Opt. Soc. Am.*, 69 (1), 181 (1979).
11. Дубовик А.С., Апенко М.И., Дурейко Г.В. и др. *Прикладная оптика* (М.: Недра, 1982).