

С.Т. Бобров, Ю.Г. Туркевич

## ОБЪЕКТИВ С ДИФРАКЦИОННЫМ КОРРЕКТОРОМ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ПРОИГРЫВАТЕЛЯ

В связи с появлением звуковых и видеопроекторов, а также других устройств памяти со считыванием информации лазерным лучом возникла потребность в массовом выпуске высокоапертурных и легких объективов для фокусировки лазерного излучения.

Наиболее традиционный путь создания подобных объективов - на основе рефракционных линз со сферическими поверхностями - наталкивается на трудности компенсации сферической аберрации при большой апертуре. Число линз приходится доводить до трех-четырех [1], что увеличивает вес и усложняет сборку объектива. Лучшие результаты обеспечивает использование асферических поверхностей: число линз снижается до одной-двух [1], хотя при этом и возникают трудности технологического характера. В частности, массовое изготовление асферических линз является довольно сложной задачей. Альтернативный способ упрощения конструкции объектива на основе рефракционных линз заключается во введении в его состав дифракционной линзы (ДЛ), что равносильно приданию асферичности одной из поверхностей и позволяет компенсировать сферическую аберрацию независимо от числа линз и апертуры.

Напомним требования к оптической системе звукового лазерного проигрывателя, наиболее распространенного в настоящее время. Выходная апертура объектива для считывания информации с компакт-дисков должна быть порядка  $u=0,45-0,50$ , что диктуется размерами информационных питов [2]. Поскольку система автофокусировки и слежения за дорожкой основана на перемещениях самого объектива, то требования к рабочему полю в плоскости фокусировки определяются точностью сборки. Обычно считается достаточным иметь  $2u' = 0,1$  мм (при фокусном расстоянии объектива  $F'=4,5$  мм). В качестве источника света используется полупроводниковый лазер. Это означает, что ширина спектра излучения не превышает 1-2 нм, но средняя длина волны может изменяться в пределах  $\pm 30$  нм (технологический разброс). Кроме того, возможен тепловой уход средней длины волны в пределах  $\pm 5$  нм. В итоге хроматизм положения для объектива проигрывателя не имеет особого значения благодаря наличию системы автофокусировки и сравнительно узкого спектра излучения, но

зато возрастает значение сферохроматизма. Наконец, конструкция объектива должна включать как можно меньшее число компонентов и иметь приемлемые сборочные характеристики.

Поскольку требования к рабочему полю невысоки, комбинированный объектив для звукового проигрывателя рационально строить в виде сочетания оптически сильной рефракционной линзы и сравнительно слабой ДЛ в качестве корректора аберраций. При этом для уменьшения частоты структуры ДЛ рефракционную линзу необходимо изготавливать из тяжелого стекла типа СТК19, ТФ5, ТФ10 и т.д., а ДЛ придавать определенную оптическую силу, как это описано в [3]. Простейшая реализация двухкомпонентного объектива заключается в использовании плосковыпуклой рефракционной линзы, но даже в этом случае схему можно строить двояким образом [4].

Первый вариант (рис. 1а) основан на свойствах компенсированной поверхности [5]: ДЛ располагается вблизи геометрического центра сферической поверхности, что позволяет скорректировать кому и первичный астигматизм. В результате рабочее поле такого объектива значительно превышает требуемое. С другой стороны, режим работы сферической поверхности, обращенной выпуклостью к плоскости фокусировки, обуславливает большую величину ее сферической аберрации, что приводит к высокой частоте структуры корректора. Даже при максимально возможном снижении частоты ДЛ за счет ее оптической силы ширина минимальной зоны достигает 10-15 мкм, что при изготовлении рельефной структуры в восемь уровней (эффективность ~95%) означает ширину ступени порядка 1,2-1,8 мкм. Эта величина находится на пределе возможного в настоящее время, т.е. оптимизация оптической силы ДЛ с точки зрения хроматизма и допуска на соосность компонентов объектива неосуществима. Отметим, что "перевернуть" описанную конструкцию таким образом, чтобы сферическая поверхность была обращена к плоскости фокусировки вогнутостью (это снижает сферическую аберрацию), нельзя, поскольку плоская поверхность линзы в этом случае работает в высокоапертурном пучке и ее аберрации компенсировать не удастся.

Указанная ориентация сферической поверхности реализуется во втором варианте объектива (рис. 1б), кардинально отличающемся от первого расположением корректора. В этом случае удастся достичь только компенсации комы, причем не полной, а основанной на балансе аберраций третьего и пятого порядков, который при фиксированном соотношении фокусных расстояний объектива ( $F'$ ) и ДЛ ( $f'$ ) обеспечивается за счет оптимизации одного параметра: расстояния  $d$  от вершины сферической поверхности до корректора. Графики, представленные на рис. 2, показывают, что компенсация комы возможна только в ограниченном диапазоне значений отношения  $F'/f'$ . Нижняя граница этого диапазона определяется тем, что оптимальное расстояние  $d$  становится меньше нуля, т.е. физически неосуществимым, тогда как верхняя соответствует моменту, когда баланс становится недостижимым даже теоретически (об этом свидетельствует резкий перегиб на графике рис. 2б).

Из таблицы, где даны более подробные сведения о конструктивных параметрах объективов, следует, что частота структуры корректора ( $\nu_m$ ) является приемлемой для значительной части диапазона возможных значений отношения  $F'/f'$ , поэтому можно ставить задачу оптимизации оптической силы ДЛ. Прежде всего рассмотрим условия компенсации сферохроматизма в двухкомпонентном комбинированном объективе. Будем исходить из того, что система автофокусировки корректирует задний отрезок объектива таким образом, что его передний отрезок (и передний отрезок корректора) остается постоянным (в данном случае бесконечным). Хроматической зависимостью показателя преломления рефракционной линзы можно пренебречь, но

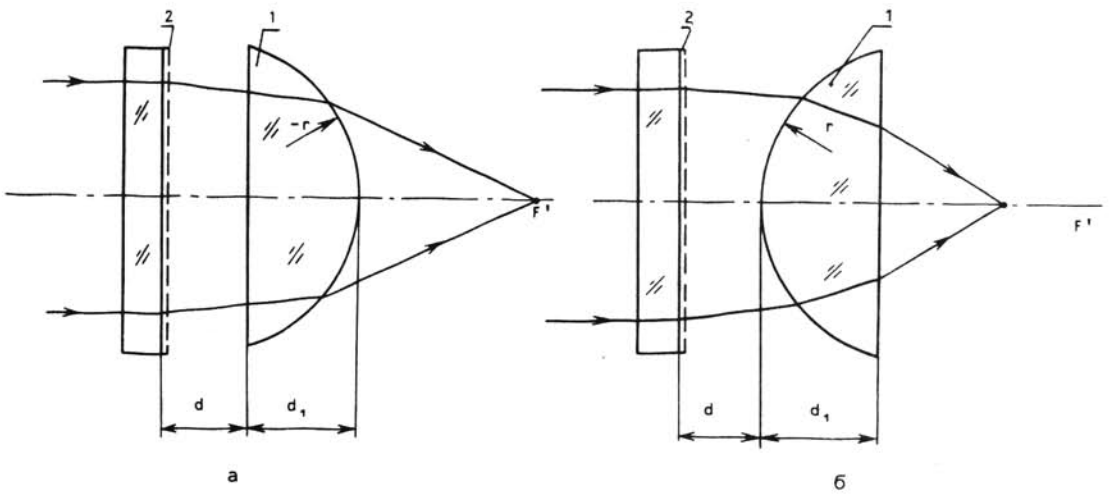


Рис. 1. Оптические схемы и ход лучей в комбинированных объективах с дифракционным корректором: а - тип 1; б - тип 2; 1 - рефракционная линза; 2 - дифракционный корректор

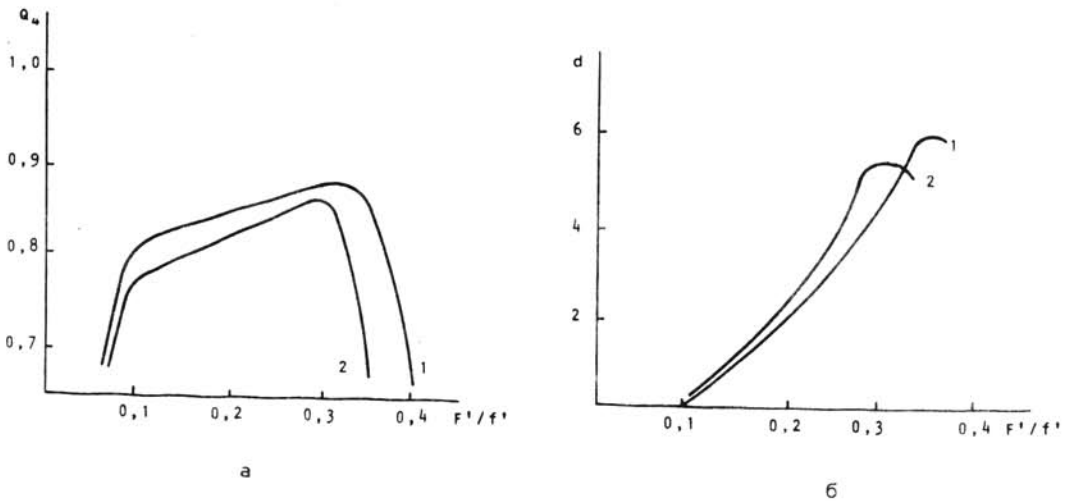


Рис. 2. Зависимость лучевого критерия  $Q_4$  [5] в точке  $y'=0,05$  мм (а) и оптимального воздушного промежутка  $d$  (б) от отношения фокусных расстояний объектива ( $F'=4,5$  мм) и корректора ( $f'$ ):

1 -  $u'=0,45$ , стекло СТК19; 2 -  $u'=0,50$ , стекло ТФ10

ее сферическая aberrация существенно зависит от отрезков, изменяемых, как уже говорилось, системой автофокусировки при отклонении длины волны от номинальной. Поэтому необходимо рассмотреть сферохроматизм объектива в целом, не ограничиваясь анализом только ДЛ, проведенным в [6].

Используя аппарат, разработанный в [5], можно получить следующее выражение для коэффициента сферической aberrации третьего порядка в плоскости корректора:

$$S_3 = \frac{\lambda}{\lambda_0} b_3 + \frac{\lambda}{\lambda_0} \frac{1}{f_1^3} - \frac{\lambda^3}{\lambda_0^3} \frac{1}{f_1^3} - \frac{n^2-1}{n^2} \left[ \frac{n-1}{r} + \left(1 - \frac{n-1}{r} d\right) \frac{\lambda}{\lambda_0 f_1} \right]^3 \times$$

$$\times \left[ \left(1 - \frac{n-1}{n} \frac{d_1}{r}\right) \left(1 - \frac{\lambda d}{\lambda_0 f_1}\right) - \frac{\lambda d_1}{n \lambda_0 f_1} \right] - \frac{n-1}{n^2} \left(1 - \frac{\lambda d}{\lambda_0 f_1}\right) \times \quad (1)$$

$$\times \left[ \frac{1}{r} - \left(1 + \frac{d}{r}\right) \frac{\lambda}{\lambda_0 f'} \right]^2 \left[ \frac{1}{r} - \left(n + 1 + \frac{d}{r}\right) \frac{\lambda}{\lambda_0 f'} \right],$$

где  $r$ ,  $d$ ,  $n$  - радиус, толщина и показатель преломления рефракционной линзы;  $b_3$  - коэффициент асферической деформации ДЛ;  $\lambda$ ,  $\lambda_0$  - рабочая и основная длины волн.

Величина коэффициента  $b_3$  должна обеспечить  $S_3=0$  на основной длине волны, но для компенсации сферохроматизма требуется также выполнение условия  $\partial S_3 / \partial \lambda = 0$  при  $\lambda = \lambda_0$ . В графе "b<sub>3</sub>" таблицы даны значения коэффициента асферической деформации, обеспечивающие отсутствие сферической аберрации на основной длине волны, а в графе "b<sub>3</sub>'" - значения, обеспечивающие компенсацию сферохроматизма. Очевидно, что приведенные величины не совпадают, имея даже противоположные знаки, и лишь постепенно приближаются друг к другу по мере увеличения оптической силы ДЛ. Одновременно выполнение двух указанных условий возможно только при такой оптической силе корректора, когда компенсация комы в объективе уже недостижима (кроме того, и частота структуры в этом случае является чрезмерно большой). Отметим, что без учета псевдохроматической (через отрезки) зависимости сферической аберрации рефракционной линзы компенсация сферохроматизма имеет место при

$$b_3 = -\frac{2}{f'^3}, \quad (2)$$

как это следует из (1) или из результатов, полученных в [6].

Таблица

Параметры объективов с дифракционным корректором  
( $F'=4,5$  мм, стекло СТК19, толщина линзы  $d_1=3$  мм)

Тип	$F'/f'$	$d$ , мм	$r$ , мм	$v_m$ , л/мм	$2y'$ , мм	$b_3 * f'^3$	$b_3' * f'^3$	$\Delta\lambda$ , нм	$\Delta C$ , мкм
1	0,36	0,63	-4,16	85,5	0,36	-	-	$\pm 3,0$	1,0
	0,05	0	3,48	48,3	0,09	6784,8	-302,0	$\pm 11,0$	4,0
	0,10	0,08	3,66	24,9	0,16	703,9	-42,7	$\pm 12,5$	6,0
	0,15	0,88	3,77	49,0	0,16	169,3	-22,8	$\pm 14,0$	7,5
	0,20	1,83	3,79	80,6	0,17	56,6	-15,0	$\pm 16,0$	10,0
2	0,25	2,95	3,68	119,0	0,17	21,9	-11,2	$\pm 18,0$	13,0
	0,30	4,26	3,38	156,3	0,18	8,56	-8,92	$\pm 20,0$	20,0
	0,35	6,0	2,71	196,1	0,18	2,26	-6,67	$\pm 24,0$	29,0
	0,40	5,63	2,75	227,3	0,09	1,11	-3,14	$\pm 30,0$	40,0

Теперь рассмотрим влияние несоосности сферической преломляющей поверхности и корректора, что удобнее всего сделать в обратном ходе лучей по сравнению с изображенным на рис. 1. При нахождении источника света в осевой точке фокальной плоскости объектива рефракционная линза формирует волновой фронт, искаженный только сферической аберрацией, которая компенсируется корректором, поэтому в плоскости ДЛ эту аберрацию можно записать следующим образом:

$$\Phi_{\text{Л}} = -\frac{1}{8} b_3 (\xi^2 + \eta^2)^2, \quad (3)$$

где  $\xi$ ,  $\eta$  - координаты в указанной плоскости.

Поскольку корректор не соосен с линзой, то прежде, чем суммировать аберрации компонентов объектива, необходимо перейти в систему координат, связанную с оптической осью ДЛ, т.е. осуществить замену переменных вида  $\xi = \xi' - \Delta\xi$ ;  $\eta = \eta' - \Delta\eta$ , где  $\Delta\xi$ ,  $\Delta\eta$  - координаты точки пересечения оси линзы с корректором (децентрировка  $\Delta C = \sqrt{\Delta\xi^2 + \Delta\eta^2}$ ). В новой системе координат волновой фронт, падающий на корректор, обладает всеми видами аберраций (штрихи опускаем)

$$\Phi_L = -\frac{1}{8} b_3 [(\xi - \Delta\xi)^2 + (\eta - \Delta\eta)^2]^2. \quad (4)$$

Промежуточное изображение, формируемое рефракционной линзой, по отношению к корректору также имеет координаты  $\Delta\xi$ ,  $\Delta\eta$ , поэтому собственные аберрации корректора равны [5]:

$$\begin{aligned} \Phi_K = & -\frac{1}{8} \frac{[(\xi - \Delta\xi)^2 + (\eta - \Delta\eta)^2]^2}{f'^3} + \frac{1}{8} \frac{(\xi^2 + \eta^2)^2}{f'^3} + \frac{1}{8} \frac{(\Delta\xi^2 + \Delta\eta^2)^2}{f'^3} - \\ & - \frac{1}{2} \frac{(\xi\Delta\xi + \eta\Delta\eta)(\Delta\xi^2 + \Delta\eta^2)}{f'^3} + \frac{1}{8} b_3 (\xi^2 + \eta^2)^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Напомним, что рассмотрение производится в обратном ходе лучей, поэтому передний отрезок ДЛ равен  $(-f')$ , а задний - бесконечен.

Складывая выражения (4) и (5) и ограничиваясь членами, содержащими  $\Delta\xi$ ,  $\Delta\eta$  в первой степени, т.е. комой децентрировки, получаем условие ее компенсации

$$b_3 = -\frac{1}{f'^3}. \quad (6)$$

Последнее соотношение означает, что децентрировка влияет в наименьшей степени, если корректор является зонной пластинкой Френеля. Известно, что этот дифракционный элемент обладает исключительными аберрационными качествами [5], поэтому полученный результат, конечно, неслучаен. Кстати, можно показать, что при выполнении условия (6) компенсируется не только кома, но и астигматизм децентрировки.

Рассмотрим таблицу, данные которой показывают, что реальные значения сферической аберрации корректора не соответствуют условию (6). Наибольшее несовпадение также отмечается при минимальной оптической силе ДЛ, тогда как по мере увеличения отношения  $F'/f'$  происходит постепенное приближение к теоретическому оптимальному.

Расчеты методом прослеживания хода лучей показывают, что как хроматические, так и сборочные характеристики объектива действительно улучшаются по мере роста оптической силы ДЛ. Об этом свидетельствуют данные таблицы, приведенные в графе "Δλ" (ширина спектра объектива) и в графе "ΔC" (максимально допустимая децентрировка корректора). Таким образом, для уменьшения сферохроматизма и упрощения сборки объектива необходимо придавать корректору максимально возможную оптическую силу, но это требование наталкивается на технологические ограничения из-за увеличения частоты структуры ДЛ. В настоящее время реально изготовление корректоров при отношении фокусных расстояний не более  $F'/f' = 0,15 - 0,20$ , что обеспечивает работу объектива в спектральном диапазоне  $\pm 10 - 15$  нм при допустимой децентрировке 7-10 мкм. Для сравнения отметим, что объектив первого типа (с расположением корректора со стороны плоской поверхности линзы) имеет спектральный диапазон  $\pm 3$  нм при децентрировке 1,0-1,5 мкм (см. таблицу).

Как следует из приведенных в начале данной работы требований, ширина спектра  $\pm 10$  нм достаточна для работы объектива в условиях теплового ухода длины волны излучения в проигрывателе, но не перекрывает технологического разброса длин волн полупроводниковых лазеров. Однако конструкция объектива (см. рис. 16) позволяет корректировать среднюю длину волны спектрального диапазона за счет изменения расстояния  $d$  между рефракционной и дифракционной линзами при неизменности самих компонентов объектива. На рис. 3 представлена зависимость оптимального расстояния  $d$  от отклонения длины волны от основной, а также достигаемое при этом качество фокусировки в центре и на краю рабочего поля (в виде лучевого критерия  $Q_4$  [5], минимально допустимое значение которого равно 0,7). Первый график (см. рис. 3а) позволяет также оценить необходимое качество сборки объектива: если принять, что заданная длина волны должна обеспечиваться с точностью до  $\pm 2$  нм, то требуется выдерживать воздушный промежуток  $d$  с точностью до  $\pm 30$  мкм. Таким образом, сборка объектива из одних и тех же компонентов в трех-пяти вариантах, отличающихся друг от друга расстоянием между линзами, позволяет обеспечить весь возможный технологический разброс длин волн полупроводниковых лазеров (конечно, при этом необходим взаимный подбор объектива и лазера).

Были изготовлены несколько дифракционных корректоров с различными оптическими силами. Использовалась технология на основе методов фотолитографии и химического травления стекла [5]. Для создания многоступенчатого профиля применялись комплекты из трех фотошаблонов, построенные по дихотомическому принципу [7]. В этом случае, как известно, синтезируется 8-уровневая рельефная структура с теоретической эффективностью 94,9%. На рис. 4 представлены первые (наиболее низкочастотные) фотошаблоны двух комплектов. Наилучшим достижением в настоящее время являются корректоры с минимальной шириной ступени 2,5 мкм (эффективность 80-85% из-за погрешностей изготовления), хотя современный уровень фотолитографии вполне может обеспечить создание структур с минимальным размером до 1,5 мкм. Наиболее трудоемкой операцией является вырезание ДЛ из стеклянной пластины и обработка края с центрировкой относительно структуры. К сожалению, это не удастся сделать методами фотолитографии с использова-

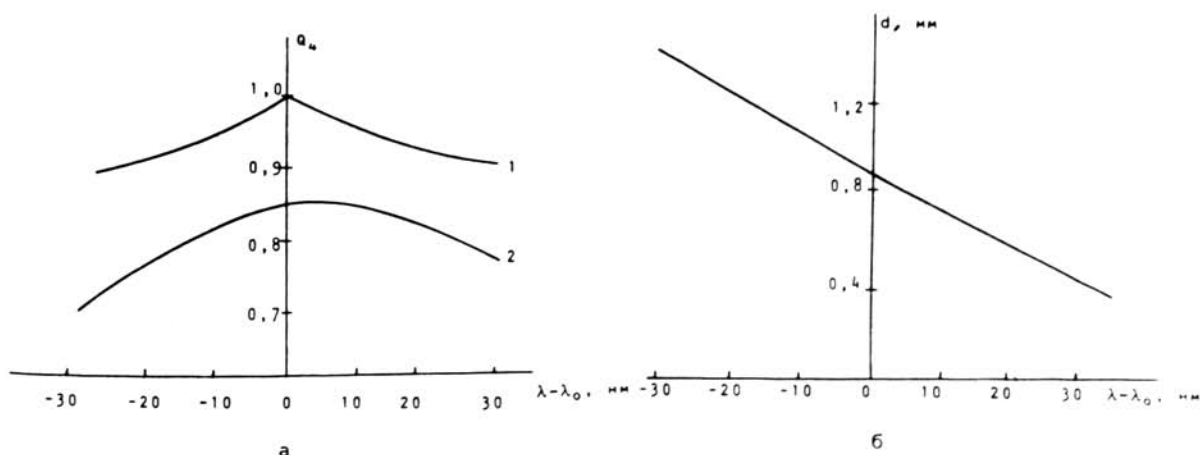


Рис. 3. Зависимость лучевого критерия  $Q_4$  (а) и оптимального воздушного промежутка  $d$  (б) от отклонения длины волны от основной ( $u'=0,45$ , стекло СТК19):  
1 -  $y'=0$ ; 2 -  $y'=0,05$  мм

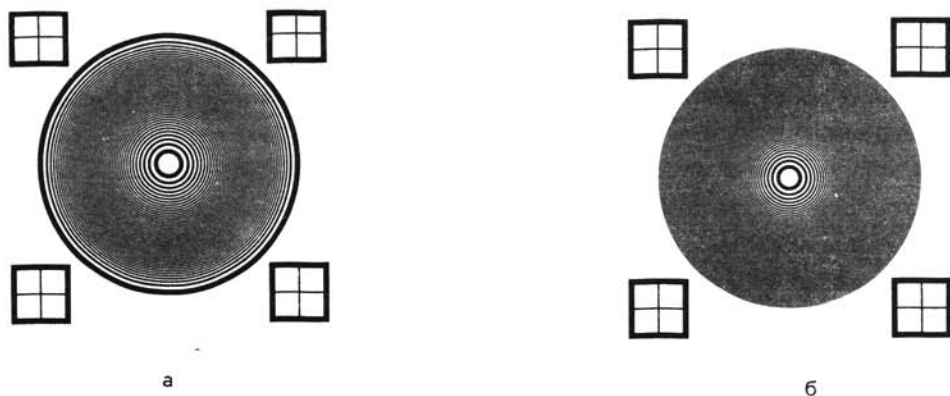


Рис. 4. Фотошаблоны для изготовления дифракционных корректоров с фокусными расстояниями  $f'=40,9$  мм (а) и  $f'=31,0$  мм (б)

нием жестких травителей стекла. Перспективным направлением представляется изготовление инверсной по рельефу матрицы с последующим тиражированием дифракционных корректоров путем копирования структуры в слое полимерного материала на поверхности заранее подготовленной подложки.

Экспериментальная проверка объектива с дифракционным корректором (рефракционная линза из стекла СТК19) подтвердила правильность расчета и достаточную точность изготовления ДЛ: в фокальной плоскости была получена точка требуемого размера. Вес объектива в оправе составлял менее 0,6 г, что немаловажно для работы систем автофокусировки и слежения за дорожкой в проигрывателе.

В целом можно утверждать, что описанная конструкция фокусирующего высокоапертурного объектива с дифракционным корректором является вполне работоспособной, легкой и позволяет упростить изготовление объектива по сравнению с чисто рефракционным аналогом.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В г а а т J.J.M. Aspherics surfaces: design and optical advantages // Philips Tech. Rev. 1983/84, Vol. 41, No. 10, P. 289-295.
2. Накадзима Х., Огава Х. Цифровые грампластинки / Пер. с япон. М.: Радио и связь, 1988. -168 с.
3. Михайлов И.А., Савидова Б.М. Киноформные корректоры сферической абберации // ОМП, 1988, № 1, С. 23-26.
4. Бобров С.Т. Высокоапертурный фокусирующий объектив. Авт. свид. № 1335910 // Бюл. изобр., 1987, № 33.
5. Бобров С.Т., Грейсух Г.И., Туркевич Ю.Г. Оптика дифракционных элементов и систем. Л.: Машиностроение, 1986. - 223 с.
6. Бобров С.Т., Грейсух Г.И., Степанов С.А. Компенсация сферохроматизма дифракционной линзы // Опт. и спектр., 1987. Т. 62, Вып. 3, С. 669-673.
7. Спектор Б.И. Об одном методе синтеза фазовой структуры киноформов // Автометрия, 1985, № 6, С. 34-38.