УДК 535.3+681.7.06

АСФЕРИЧЕСКИЕ КОНЦЕНТРАТОРЫ СВЕТА ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ

© 2015 г. В. Я. Баннов; А. Г. Батурин; Ю. А. Клевцов, канд. техн. наук

Научно-исследовательский институт электронных приборов, Новосибирск

E-mail: Klevtsov_yuri@mail.ru

Обсуждаются результаты исследования асферических линз большой осевой толщины, использующихся в качестве концентраторов света в оптических системах оптоэлектронных датчиков. Приводятся конструктивные параметры линз, рассчитанных как из полимеров, так и из оптического стекла. Указано, что в массовом производстве такие линзы могут быть изготовлены методом прессования, литья под давлением или прецизионного моллирования.

Ключевые слова: *оптоэлектронный датчик, концентраторы света, асферические линзы, полимеры, прецизионное моллирование.*

Коды OCIS: 220.1000

Поступила в редакцию 09.06.2014

Одной из основных характеристик оптоэлектронных датчиков является вероятность обнаружения малоразмерных объектов. Изначально датчики имели диаграммы чувствительности размером $2\omega = 2–3°$. В таких системах повышение вероятности обнаружения обеспечивается увеличением количества приемно-передающих каналов.

Другим способом повышения вероятности обнаружения, возможность реализации которого появилась в последнее время в связи с освоением отечественной промышленностью мощных малогабаритных источников излучения, является увеличение ширины диаграммы чувствительности каждого из приемно-передающих каналов. При этом на первый план выходит проблема энергетических характеристик системы, поскольку объект может перекрывать только часть диаграммы чувствительности. Для создания зондирующего оптического пучка с шириной диаграммы чувствительности $2\omega = 30–60°$ используется излучатель со сфероцилиндрическим конденсором. При падении веерообразного зондирующего оптического пучка на объект на последнем формируется изображение тела свечения излучателя в виде линии, длина и положение которой в секторе наблюдения зависят от размера объекта и его положения в пространстве. Эта линия является предметом для оптического элемента, концентрирующего свет на матричном фотоприемнике.

Поскольку системы с узкими диаграммами чувствительности были чисто энергетическими, особых требований к пятну рассеяния на фоточувствительном элементе фотоприемника не предъявлялось. Ввиду этого в качестве концентратора света использовалась обычная линза из стекла марки “крон” с относительным отверстием порядка 1:1. К достоинствам данного концентратора света следует отнести малые габариты и дешевизну. Недостатком является большое и принципиально неисправимое аберрационное рассеяние света, резко увеличивающееся с увеличением отклонения принимаемого изображения от оси линзы, что ограничивает применение таких линз в системах с широкими диаграммами чувствительности.

С увеличением ширины диаграммы чувствительности датчика, а также с применением триангуляционных методов оценки дальности, в качестве концентраторов света стали использовать асферическую линзу из стекла марки “тяжелый флинт” с передней параболической поверхностью. Использование параболической поверхности позволило увеличить относительное отверстие до 1:0,7, что улучшило энергетические характеристики системы.

Применение в качестве концентраторов света двухлинзовых систем позволяет решить пробле-

мы как увеличения поля зрения, так и уменьшения рассеяния света. Концентратор, состоящий из двух положительных линз, обеспечивает практически одинаковую светочувствительность оптоэлектронного датчика как в центре, так и на краю поля зрения. Однако двухлинзовые концентраторы света обладают большими габаритами, что не позволяет вписать их в конструкцию малогабаритного многоканального датчика. Кроме того, в случае применения таких концентраторов появляется необходимость центрирования линз, а также создается опасность запотевания и покрытия инеем межлинзового пространства в условиях воздействия низких температур окружающей среды.

Наиболее перспективным представляется применение однолинзового концентратора света со сложной формой поверхностей, обеспечивающего необходимые требования к масштабу и пятну рассеяния в плоскости фотоприемника. В настоящее время в связи с появившейся возможностью изготовления сложных формообразующих поверхностей оснастки [1], развитием технологии прецизионного моллирования линз из оптического стекла [2], а также синтезом оптических полимеров с высоким показателем преломления [3], предназначенных для изготовления линз методом прессования или литья под давлением, открылась возможность изготовления асферических линз небольшого размера практически любых форм и оптических характеристик. В связи с этим возникла возможность увеличить светосилу таких линз, тем более что указанные методы их получения позволяют обеспечить дешевизну при массовом производстве и вполне приемлемую для данных устройств точность формы асферических поверхностей (на уровне требований к оптике конденсоров).

В разрабатываемом варианте датчика диаметр входного зрачка линзы составляет 12 мм. В качестве приемника света используется матричный фотоприемник с двумя параллельными рядами светочувствительных элементов, с линейными размерами каждого ряда 8×0,8 мм. Предметом обзора датчика является часть линии, формируемой зондирующим оптическим пучком и расположенной внутри сектора $2\omega = 50–60°$, перекрываемая объектом обнаружения. Информативным признаком обнаружения объекта является его нахождение на дальности, меньшей заранее установленной, т.е. дальности, на которой электрические сигналы с обоих рядов светочувствительных элементов равны.

Эти условия определяют требования к масштабу изображения и размеру пятна рассеяния линзы-концентратора света. Размеры пятна должны быть минимальными как в центре сектора обзора, так и на его краях, кроме того, на краях сектора обзора не должно быть существенного виньетирования световых пучков.

Малые размеры пятна рассеяния способствуют быстрому увеличению разницы между сигналами с рядов фотоприемника при изменении положения изображения, обусловленного уменьшением расстояния до объекта. Тем самым уменьшаются вариации границы области обнаружения.

Поскольку в рассматриваемом варианте датчика используется 6 приемно-передающих каналов, для создания сплошного сектора обзора угловое поле отдельного приемника должно составлять $\omega = \pm(25–30)°$. По указанным выше причинам ширина изображения линии в пределах сектора обзора в плоскости фотоприемника должна быть меньше размера чувствительных элементов фотоприемника (0,8 мм). В противном случае неизбежны потери света и, как следствие, понижение чувствительности устройства, а также ухудшение селективности датчика по расстоянию. При таких больших поперечных аберрациях понятие светосилы как квадрата отношения диаметра входного зрачка к фокусному расстоянию линзы становится неопределенным. Поэтому при сопоставлении энергетических свойств отдельных линз опираются на апертурные углы лучей в пространстве изображений линзы, сопоставляя их с апертурными углами аналогичных, уже испытанных на практике линз. Относительное количество энергии света, дошедшего до фотоприемника, оценивают по относительному количеству лучей в той или иной точке поля зрения, пришедших во входной зрачок и попавших на фотоприемник.

С учетом сказанного выше были рассчитаны несколько вариантов асферических линз как из оптического стекла, так и из полимерных оптических материалов. Рассчитанные асферические линзы обеспечивают практически равномерное распределение световой энергии по сектору обзора по сравнению с использовавшимися ранее параболическими линзами. В настоящее время такие линзы могут быть получены методом прецизионного моллирования. В качестве исходного материала могут быть использованы стекла СО-550 (фирма *Corning*, $n_d = 1{,}607$),

D-ZK3 (фирма CDGM, n_d = 1,586) [1], F2 (фирма SCHOTT, n_d = 1,620). Также рассчитанные асферические линзы могут быть изготовлены методом прессования или литья под давлением из полимерных материалов типа поликарбоната (ПК, n_d = 1,585) и полиметилметакрилата (ПММА, n_d = 1,492). Указанные методы являются высокопроизводительными, что приводит к упрощению и удешевлению процесса изготовления таких линз в массовом производстве.

Рассмотрим несколько вариантов асферических линз. Конструктивные параметры линзы с передней параболической поверхностью, изготовленной из стекла ТФ10, приведены в табл. 1. Такая линза используется в настоящее время в качестве концентратора света в системе оптоэлектронного датчика. Параметры линзы, точечные диаграммы и данные оценки энергии света, дошедшего до фотоприемника, получены с помощью пакета программ расчета оптических систем “DEMOS” (разработка Государственного оптического института, Санкт-Петербург).

На рис. 1 представлен ход лучей в меридиональном сечении линзы в центре поля и четырех симметричных точках сектора обзора: ω = ±12,85° и ω = ±25,7°. Входной зрачок диаметром 12 мм находится на первой поверхности линзы. Количество лучей в пучках 9. Видно, что на краях сектора обзора часть светового потока теряется за счет полного внутреннего отражения, а остальная часть светового потока претерпевает значительное рассеяние в плоскости фотоприемника.

Таблица 1. Конструктивные параметры линз из ТФ10 и ПММА

Параметр	Стекло ТФ10	ПММА
r_1	7,047 ($e^2 = 1$)	5,989
$B_{1,2}$	–	–2,2575
$B_{1,3}$	–	1,5501
$B_{1,4}$	–	–0,66844
$B_{1,5}$	–	0,111
r_2	–58,08 ($e^2 = 0$)	–9,825
$B_{2,2}$	–	0,25794
$B_{2,3}$	–	2,8845
$B_{2,4}$	–	1,8145
$B_{2,5}$	–	0,3424
d	5,0	10,5
n_λ	1,78273	1,485
$\sin(\sigma'_{max})$	0,67	0,75
$\sin(\sigma'_{0,707})$	0,49	0,51
f'	8,3	9,81
$S'_{F'}$	5,25	3,06

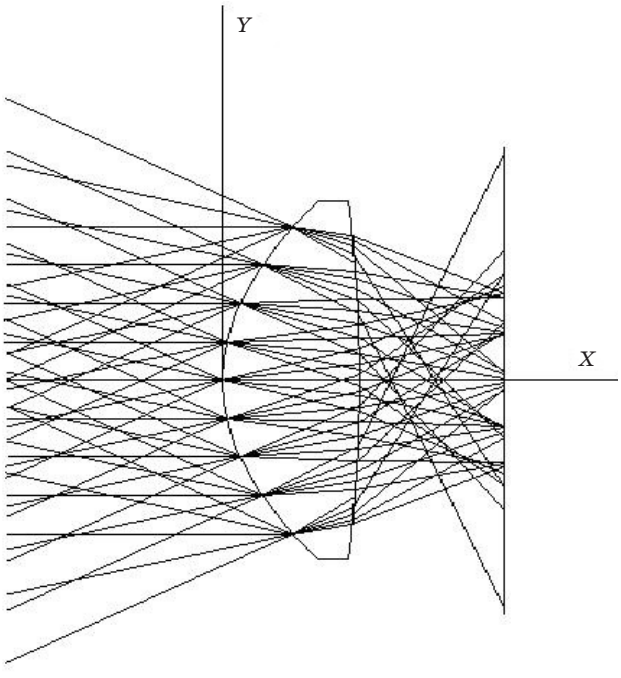

Рис. 1. Ход лучей в линзе с передней параболической поверхностью.

Чтобы судить о потерях световой энергии в отдельных точках сектора обзора были рассчитаны точечные диаграммы (рис. 2) как без ограничения света поверхностью фотоприемника (рис. 2а), так и с учетом такого ограничения (рис. 2б). Диаметр масштабного кружка здесь и далее на диаграммах составляет 1,6 мм, l' – координата Y точки пересечения главного луча с плоскостью фокусировки, относительно которой строятся точечные диаграммы. Сопоставляя диаграммы рассеяния, видно, что примерно с середины поля начинается заметное обрезание световых пучков фотоприемником. Подсчет количества лучей, прошедших через входной зрачок, и лучей, достигающих поверхности фотоприемника, показывает, что на краю сектора обзора ω = ±26,5° на фотоприемник может попасть только 34% всех лучей (см. диаграмму рис. 3, кривая *1*). Остальные лучи или испытывают полное внутреннее отражение на второй поверхности линзы, или идут вне чувствительных площадок фотоприемника.

Расчет показывает, что отступление параболической поверхности от ближайшей трехточечной сферы сравнения, касающейся поверхности на краях и в вершине, составляет 174 мкм.

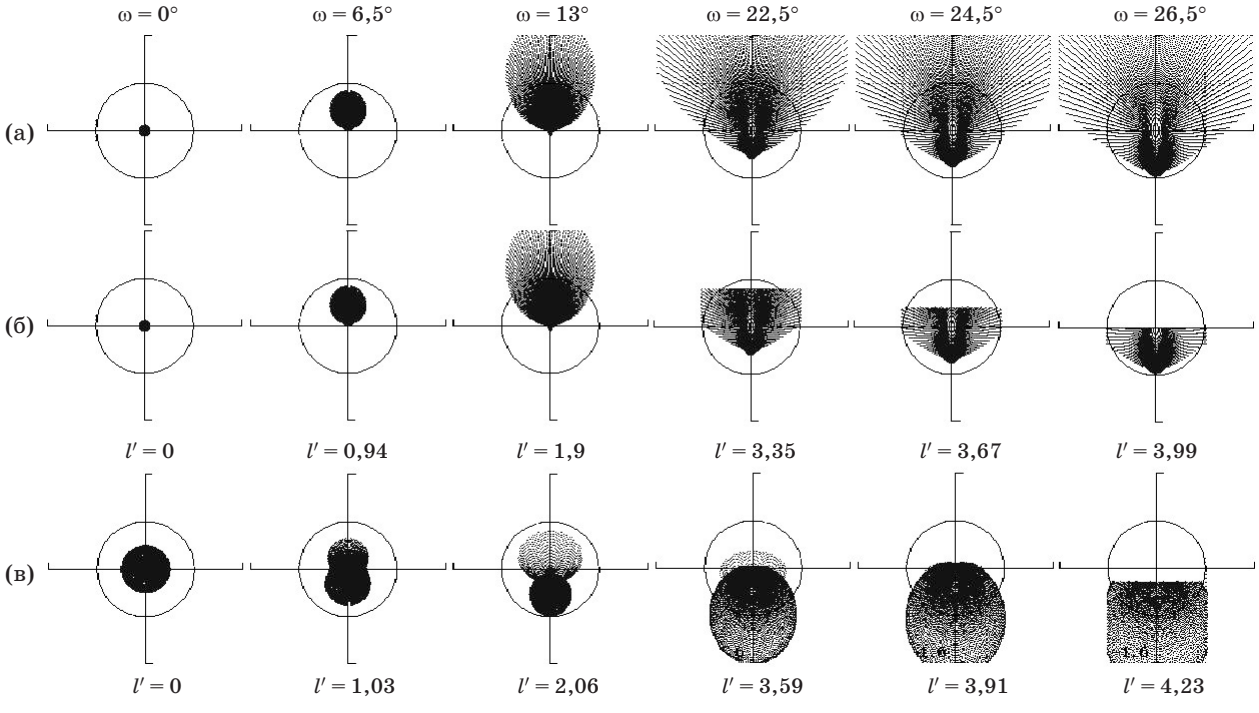

Рис. 2. Точечные диаграммы лучей в плоскости фокусировки линзы с передней параболической поверхностью (а), на фотоприемнике, установленном в плоскость фокусировки линзы с передней параболической поверхностью (б), на фотоприемнике, установленном в плоскость фокусировки линзы из ПММА (в).

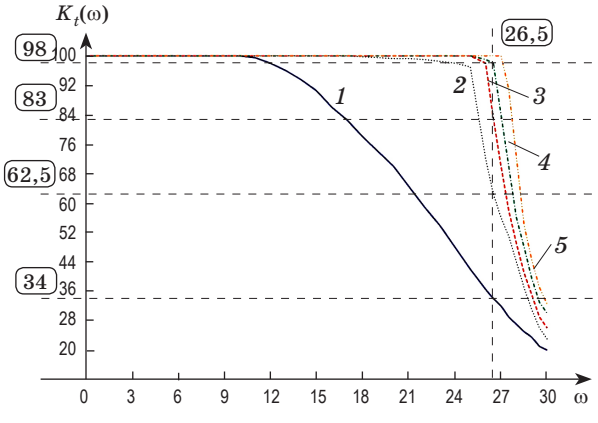

Рис. 3. Теоретические диаграммы относительного распределения энергии в линзах с передней параболической поверхностью (*1*), из ПММА (*2*), из ПК (*3*), из оптического стекла F2 (*4*), из Lineis 1,74 (*5*).

Такая большая асферичность требует специального оборудования и индивидуального изготовления каждой детали, что неприемлемо для массового производства. В связи с возможностью изготовления линз высокопроизводительными методами, не требующими индивидуального изготовления каждой детали, таких как прецизионное моллирование [2] и литье под давлением [3], было целесообразно задействовать на коррекцию аберраций все возможные конструктивные параметры одиночной линзы. В частности, были рассмотрены коррекционные возможности двояковыпуклых линз относительно большой толщины с обеими осесимметричными поверхностями асферической формы. Рассмотрим вариант асферической линзы, обе поверхности которой имеют осесимметричную форму, описываемую уравнением первого рода [5]

$$y^2 + z^2 = 2rx + B_2x^2 + B_3x^3 + B_4x^4 + B_5x^5, \quad (1)$$

где r – радиус сферы, касательной к поверхности в ее вершине.

Проведен расчет линзы из ПММА (параметры линзы см. в табл. 1). Эта линза была изготовлена методом прецизионного точения из органического стекла, имеющего тот же показатель преломления, что и ПММА. На фотографии линзы (рис. 4) хорошо видна характерная зона перегиба передней асферической поверхности в области края зрачка, способствующая уменьшению рассеяния лучей в краевых точках сектора обзора.

Для обеих линз было проведено исследование количества энергии света, дошедшего до фотоприемника, в зоне сектора обзора ω = ±30°. Для этого применялся диффузно отражающий экран, расположенный на расстоянии около 3 м

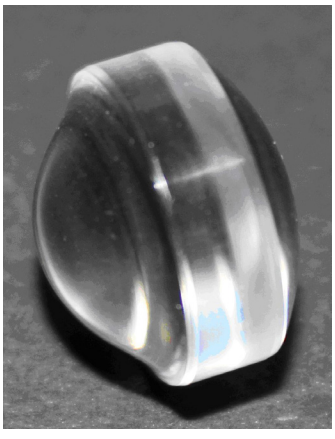

Рис. 4. Линза асферическая из органического стекла.

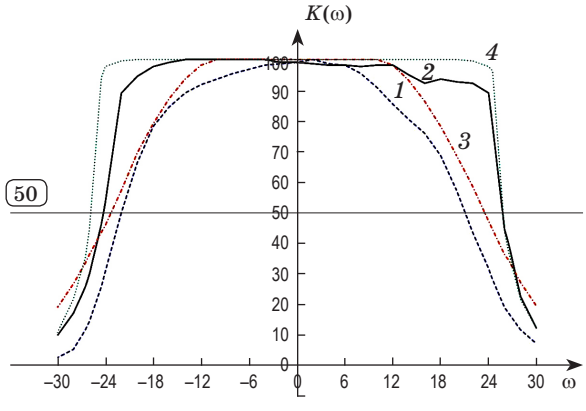

Рис. 5. Диаграммы относительного распределения энергии света: экспериментальная в линзе с передней параболической поверхностью (*1*), экспериментальная в асферической линзе из ПММА (*2*), теоретическая в линзе с передней параболической поверхностью (*3*), теоретическая в асферической линзе из ПММА (*4*).

от линзы. На экран направлялось сфокусированное излучение лазерного диода, создавая в пределах линии сектора обзора ω = ±30° равномерно освещенную эталонную площадку малых размеров. Изображение площадки строилось линзами на фотоприемнике. На рис. 5 приведена зависимость амплитуды электрического сигнала $K(\omega)$ с выхода фотоприемника для двух типов линз, нормированная к единице в центральной точке поля зрения, выражающая распределение световой энергии в плоскости фотоприемника по полю зрения датчика. Кривые *1* и *2* рис. 5 зарегистрированы в области оптимальной фокусировки линз при равенстве сигналов с обеих светочувствительных площадок фотоприемника. Кривые *3* и *4* соответствуют теоретическому распределению энергии и рассчитаны по относительному количеству дошедших до фотоприемника лучей без учета уменьшения светового потока пучков, идущих под углом к входному зрачку, и уменьшения пропускания поверхностей линзы при увеличении углов наклона лучей.

Из графиков рис. 5 следует, что распределение энергии в линзе с обеими асферическими поверхностями значительно более равномерное, чем в линзе с передней параболической поверхностью, по крайней мере, в пределах сектора обзора ω = ±24° (кривые *1* и *2*, рис. 5). Количество энергии света в обеих линзах должно уравниваться при угловом поле ω = ±27° (кривые *3* и *4*, рис. 5), однако практически на краях сектора обзора кривая относительной энергии в линзе с передней параболической поверхностью идет значительно ниже кривой линзы с обеими асферическими поверхностями. Кроме того, эта кривая идет значительно ниже теоретической кривой той же линзы, вычисленной по относительному количеству дошедших до фотоприемника лучей. В результате на краях сектора обзора до фотоприемника доходит около 15% света. Это объясняется упомянутыми выше факторами, а также бóльшим показателем преломления материала линзы и большей кривизной передней параболической поверхности, которая является входным зрачком линзы.

Очевидно, что данная асферическая линза находится на пределе своих энергетических возможностей в рамках используемого оптоэлектронным датчиком сектора обзора ω = ±25°. Чтобы улучшить результаты, было принято решение увеличить ее толщину, незначительно уменьшить расстояние от второй поверхности линзы до плоскости фотоприемника и применить оптические материалы с более высоким показателем преломления.

Стандарт [4] не предусматривает использования поверхностей вращения первого рода [5], поэтому в дальнейшем анализе свойств асферических линз пришлось ограничиться использованием поверхностей, описываемых уравнением второго рода

$$x = \frac{y^2 + z^2}{2r} + \sum_{i=2}^{5} A_{2i} \left(y^2 + z^2 \right)^{2i}. \qquad (2)$$

Все рассчитанные линзы являются двояковыпуклыми и имеют общие конструктивные особенности (рис. 6). Конструктивные параметры линз представлены в табл. 2. Расчет был проведен для следующих материалов: оптическое стекло F2 (фирма SCHOTT), оптические

Таблица 2. Конструктивные параметры линз

Параметр	Стекло F2	ПММА	ПК	*Lineis* 1,74
r_1	9,614	8,231	9,386	9,800
$A_{4,1}$	$2{,}10513\times10^{-3}$	$2{,}54581\times10^{-3}$	$2{,}14943\times10^{-3}$	$8{,}37361\times10^{-4}$
$A_{6,1}$	$-5{,}43353\times10^{-5}$	$-6{,}11648\times10^{-5}$	$-4{,}15923\times10^{-5}$	$-1{,}62588\times10^{-5}$
$A_{8,1}$	$2{,}55623\times10^{-7}$	$2{,}62910^{-7}$	$-4{,}30877\times10^{-8}$	$2{,}01208\times10^{-7}$
$A_{10,1}$	0,0			$-7{,}15991\times10^{-9}$
r_2	−7,996	−7,459	−8,511	−8,747
$A_{4,2}$	$4{,}58961\times10^{-4}$	$2{,}8106\times10^{-4}$	$1{,}78845\times10^{-4}$	$5{,}45683\times10^{-4}$
$A_{6,2}$	$-1{,}0764\times10^{-5}$	$-6{,}214\times10^{-6}$	$-5{,}28\times10^{-6}$	$-2{,}63773\times10^{-5}$
$A_{8,2}$	$5{,}5049\times10^{-8}$	$5{,}626\times10^{-8}$	$9{,}61681\times10^{-9}$	$5{,}65972\times10^{-7}$
$A_{10,2}$	0,0			$-4{,}73261\times10^{-9}$
d	11,4		11,24	12,1
n_λ	1,60677	1,485	1,5710	1,7230
$O_{\varnothing1}$	12,0			
$O_{\varnothing2}$	12,9	12,4	13,1	13,7
$\delta_1^{\max}$, мкм	186	230	204	147
$\delta_2^{\max}$, мкм	70	150	41	56
$\sin(\sigma'_{\max})$	0,76	0,73	0,76	0,78
$\sin(\sigma'_{0,707})$	0,54	0,50	0,53	0,55
f'	9,52	10,58	10,13	8,80
s'_p	2,5		2,55	2,5

Примечание. $\delta_{1,2}^{\max}$ – максимальная асферичность поверхностей, f' – фокусное расстояние линзы, s'_p – расстояние по оси линзы от второй поверхности до плоскости фотоприемника, $O_{\varnothing1,2}$ – световые диаметры первой и второй поверхностей линз, $\sin(\sigma'_{\max})$ и $\sin(\sigma'_{0,707})$ – синусы апертурных углов.

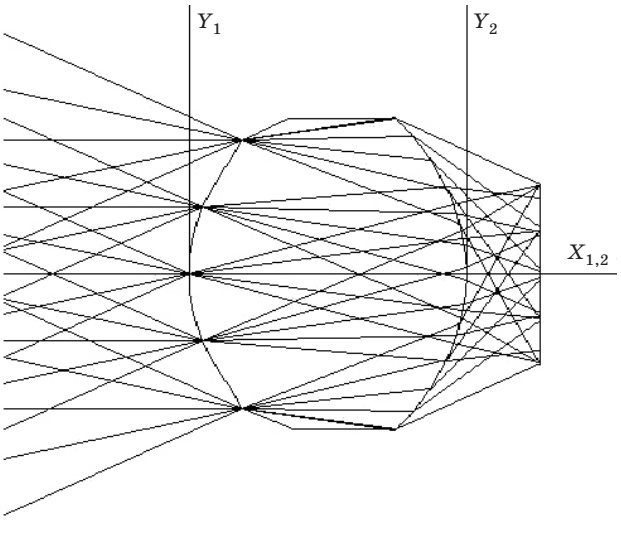

Рис. 6. Конструкция асферической линзы с ходом лучей.

полимеры ПММА, ПК и полимер *Lineis* 1,74 (фирма *Essilor*), характеризующийся большими показателями преломления и дисперсией и используемый для изготовления асферических очковых линз. Передняя поверхность линзы служит входным зрачком и имеет диаметр 12 мм. Посадочный диаметр линзы равен 14 мм. Осевая толщина линзы сопоставима с ее фокусным расстоянием и составляет $(1{,}1–1{,}4)f'$. Расстояние от второй поверхности линзы до плоскости фотоприемника около $0{,}2f'$.

Расчеты показывают, что первая асферическая поверхность линзы (рис. 6) отклоняется внутрь сферы, касательной к поверхности в ее вершине. Таким образом, по крайней мере в центральной зоне, эта поверхность близка по форме к эллипсоиду, образованному вращением эллипса вокруг его малой оси. Вблизи края эта

поверхность, из-за присутствия в уравнении (2) членов высокого порядка, имеет характерную точку перегиба (рис. 4 и 6). Вторая асферическая поверхность линзы, по крайней мере в своей центральной зоне, близка к гиперболоиду.

Из данных, приведенных в табл. 2, следует, что максимальная асферичность второй поверхности линзы значительно меньше асферичности первой поверхности. Несмотря на несколько большее фокусное расстояние, судя по значениям синусов апертурных углов, приведенных в таблице, светосила рассчитанных линз значительно выше, чем светосила применяемой в настоящее время в варианте датчика линзы (см. табл. 1).

На рис. 7 приведены точечные диаграммы лучей, достигающих поверхности фотоприемника, для всех линз, конструктивные параметры которых приведены в табл. 2 (в пределах сектора обзора с угловым полем $\omega = \pm 26{,}5°$). Коэффициент $K_t(\omega)$ – отношение количества лучей, дошедших до фотоприемника, к количеству лучей, падающих на входной зрачок, выраженное в процентах, в точке сектора обзора, заданной углом поля $\pm\omega°$. Общее количество используемых в расчете лучей, падающих на входной зрачок, в каждой точке сектора обзора составляет 22500. Для заданного варианта схемы оптоэлектронного датчика и предельного угла обзора $\omega_0 = \pm 26{,}5°$ коэффициент $K_t(\omega_0)$ равен: 34% – применяемая в настоящее время линза, 98% – линза из оптического стекла F2, 62,5% – линза из ПММА, 83% – линза из ПК, 100% – линза из *Lineis* 1,74.

Таким образом, на краю сектора обзора рассматриваемые асферические линзы имеют значительное преимущество в отношении количества световой энергии по сравнению с использующейся в настоящее время в варианте датчика линзой с передней параболической поверхностью. Выигрыш в энергетике на краях сектора обзора существенен и в зависимости

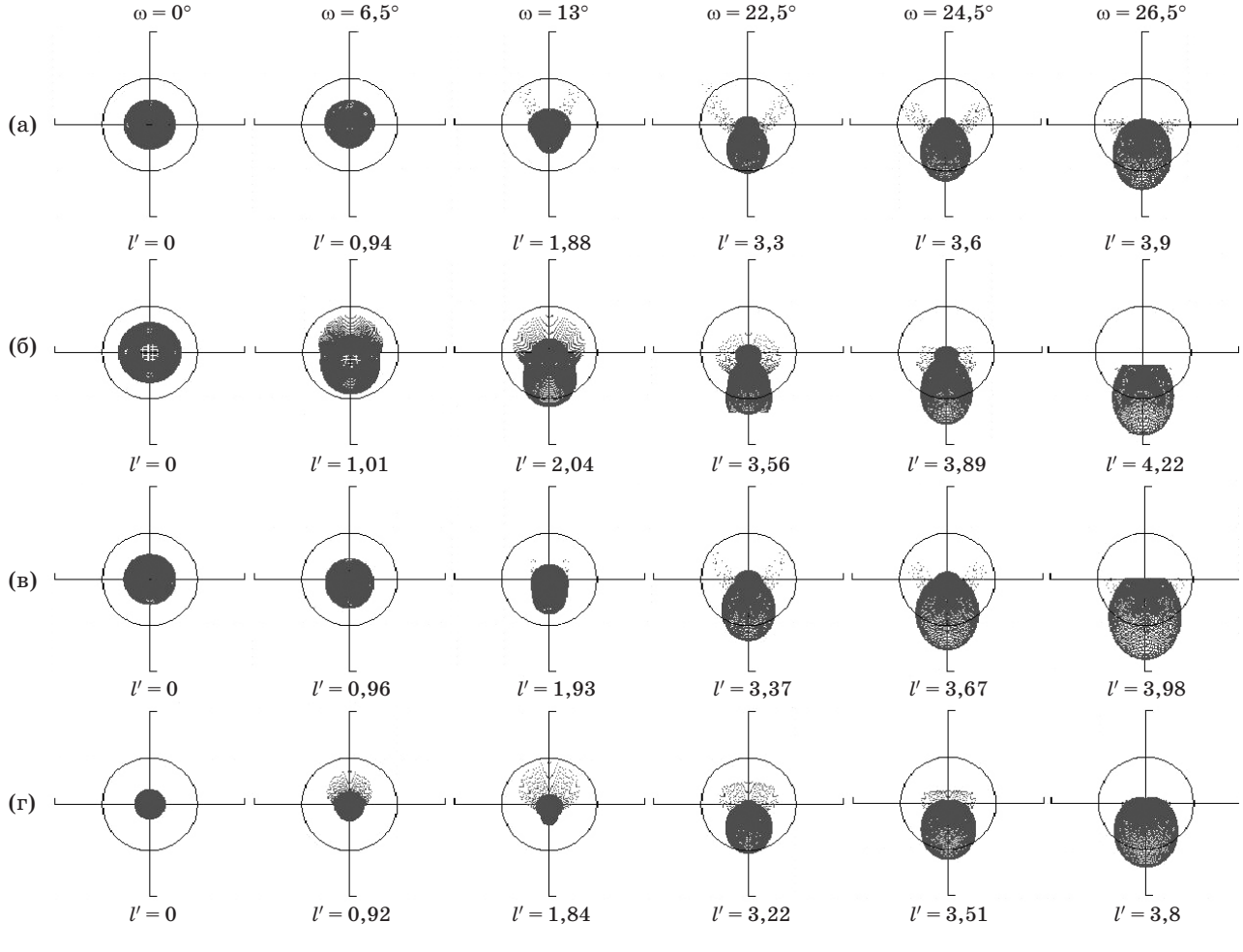

Рис. 7. Точечные диаграммы лучей на фотоприемнике для линз из оптического стекла F2 (а), из ПММА (б), из ПК (в), из *Lineis* 1,74 (г).

от материала линзы составляет от 1,8 до 2,9 раз, что соответствует улучшению энергетических характеристик на 2,5–4,6 дБ. Практически, с учетом упомянутых выше факторов, выигрыш в количестве энергии на краях сектора обзора должен быть еще больше.

Хорошие результаты показывают полимеры или оптические стекла с показателями преломления 1,57–1,61 типа ПК или F2. Вполне приемлемые результаты обеспечивают эти линзы и за пределами сектора обзора, вплоть до ±28°, куда приходит от 48 до 57% энергии света.

Очевидно, что дальнейшее улучшение энергетических свойств рассматриваемых асферических линз с одновременным расширением сектора обзора возможно с применением полимерных материалов, имеющих высокий показатель преломления (см. данные четвертого столбца табл. 2 и кривую *5* рис. 3). Такие полимерные материалы с показателем преломления n_d = 1,737 и μ = 32,5 в настоящее время выпускаются английской фирмой *Essilor* и немецкой фирмой *Rodenstok* и используются для производства асферических очковых линз [3].

Выводы

Линза с параболической поверхностью, применяемая в настоящее время в качестве концентратора света оптоэлектронного датчика, дает падение энергии света на краю сектора обзора более 85%, что связано, в основном, с невозможностью уменьшения в такой конструкции линзы, где все параметры взаимосвязаны, поперечных аберраций на краю поля зрения.

Увеличение количества световой энергии на краю сектора обзора возможно в двояковыпуклой линзе, осевая толщина которой сопоставима с фокусным расстоянием, а обе поверхности имеют осесимметричную асферическую форму. Причем первая поверхность такой линзы близка к эллипсоиду, образованному вращением эллипса вокруг его малой оси, и имеет характерную точку перегиба вблизи края зрачка, а вторая поверхность близка к гиперболоиду. Существующие технологии [1] позволяют изготовить технологическую оснастку для производства таких линз высокопроизводительными методами (прецизионное моллирование [2], прессование и литье под давлением).

Увеличение количества энергии на краю сектора обзора может быть обеспечено за счет воздействия на размеры и форму точечной диаграммы. При этом на краях поля зрения точечная диаграмма не только значительно уменьшается в размерах, но и направляется своей энергетически главной частью внутрь фотоприемника. Значительное улучшение энергетических свойств и расширение угла сектора обзора достигается при увеличении показателя преломления линзы до значения 1,57–1,72.

Оптимальные результаты по выравниванию количества энергии, поступающего на поверхность фотоприемника в пределах сектора обзора ω = ±26,5°, достигаются в линзах из стекла F2 и из оптического поликарбоната.

В заключение авторы выражают благодарность Ю.А. Печенкину и А.Ю. Клевцову за проведенное ими практическое исследование энергетических свойств асферических линз, подтверждающее теоретические результаты настоящей работы.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mertus L., Symmons A.* Implications of diamond-turned versus diamond-ground mold fabrication techniques on precision-molded optics // SPIE Optical Engineering+ Applications. International Society for Optics and Photonics. 2012. P. 848902-1–848902-17.

2. *Cogburn G., Mertus L., Symmons A.* Molding aspheric lenses for low-cost production versus diamond turned lenses // SPIE Defense, Security, and Sensing. International Society for Optics and Photonics. 2010. P. 766020-1–766020-6.

3. *Серова В.Н.* Полимерные оптические материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2011. 384 с.

4. ISO 10110-12: 1997 (E), Оптика и оптические приборы. Правила оформления чертежей оптических элементов и систем. Часть 12: Асферические поверхности.

5. ОСТ 3-4918-93. Детали оптические асферические. Типы.