УДК 535.317

Некоторые малоизвестные аберрационные свойства оптической поверхности

© А.Л. Сушков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Исследована возможность исправления сферической аберрации в линзе при сохранении сферической конфигурации поверхности изменением показателя преломления по поверхности линзы, получаемом при введении в оптическую среду линзы осевой или радиальной неоднородностей показателя преломления.

Ключевые слова: *светосильная оптическая система, асферическая поверхность, осевой и радиальный градиенты показателя преломления, сферическая аберрация*

Исправление сферической аберрации является одним из основных требований, предъявляемых к оптической системе (ОС). Традиционно для исправления сферической аберрации применяют асферизацию одной или ряда поверхностей ОС. В связи с этим рассмотрим свойства оптической поверхности светосильной линзы в более широком аспекте, чем это делали ранее.

Как известно, в линзе со сферическими поверхностями имеет место сферическая аберрация, обусловленная углами падения и преломления луча на поверхности, которые определяются согласно закону Снеллиуса — Декарта:

$$n \sin i = n' \sin i' , \tag{1}$$

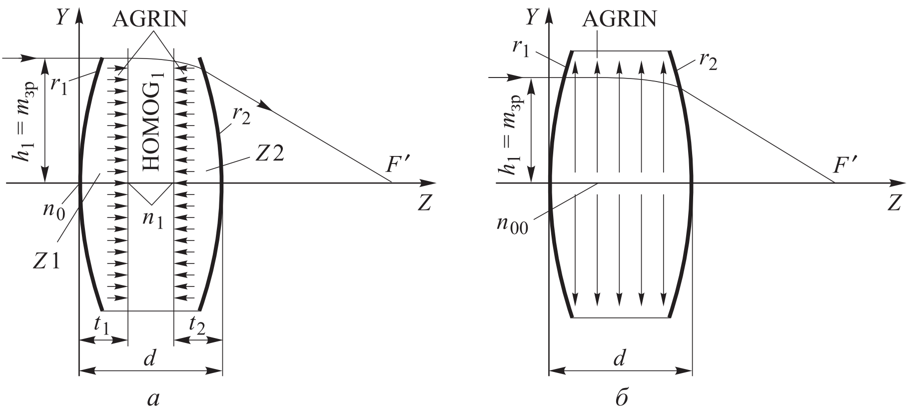
где n, n' — показатели преломления (ПП) оптических сред до и после поверхности; i, i' — углы с нормалью к поверхности в точке падения луча.

Исправление сферической аберрации в исходно однородной одиночной линзе без потери ее светосилы возможно двумя путями:

1) деформацией сферической поверхности в более пологую поверхность, несферическую (например, сфероид → параболоид). При этом изменяется угол падения луча на поверхность i и, следовательно, изменяется угол преломления i', что приводит к исправлению сферической аберрации [1];

2) изменением местного значения ПП по сферической поверхности по координате Y [2, 3] (см. рисунок).

Из теории аберраций третьего порядка известно выражение для коэффициента деформации сферической поверхности b, позволяю-



Параметры линзы с ОРПП (*а*) и РРПП (*б*)

щего исправить сферическую аберрацию исходной линзы, которая определяеется величиной коэффициента аберрации S_{I}. Деформация первой сферической поверхности линзы в асферическую второго порядка осуществляется введением в уравнение поверхности коэффициента b_1, рассчитываемого по формуле

$$b_1 = -\frac{S_{\mathrm{I}} r_1^3}{\left(n_{00}-1\right) h_1^4}, \tag{2}$$

где S_{I} — величина коэффициента сферической аберрации линзы; r_1, h_1 — радиус кривизны и высота луча на первой поверхности линзы, $h_1 = f'$; n_{00} — показатель преломления стекла.

Для второй поверхности линзы коэффициент деформации b_2 вычисляют по формуле

$$b_2 = \frac{S_{\mathrm{I}} r_2^3}{\left(n_{00}-1\right) h_2^4}. \tag{3}$$

Однако асферизация поверхностей линз малого диаметра представляет достаточно сложную технологическую задачу. Вместе с тем технология изготовления и метрология высокоточных сферических поверхностей в широком диапазоне диаметров линз достигли к концу XX века высокого уровня.

Разработка теории аберраций GRIN ОС [2, 4, 5] и развитие технологий неоднородных оптических сред, начавшееся с 1960-х годов, создало предпосылки для конструирования GRIN-линз со сферическими поверхностями и качеством аберрационной коррекции, соответствующим качеству коррекции элемента с асферическими поверхностями. В первую очередь это относится к исправлению сферической аберрации, которую можно устранить изменением показателя преломления по поверхности в соответствии с законом Снеллиуса — Декарта.

Выполнение этого требования возможно при изменении показателя преломления как по оси OZ — осевое распределение показателя преломления (ОРПП или AGRIN), так и по оси OY — радиальное распределение показателя преломления (РРПП или RGRIN):

$$n(z) = n_0 + n_{01}z + n_{02}z^2 + n_{03}z^3 + \ldots;$$

$$n(y) = n_{00} + n_{10}y^2 + n_{20}y^4 + n_{30}y^6 + \ldots$$

В случае AGRIN функция ПП по поверхности определяется, согласно [2, 3], производной от функции осевого РПП $\dot{n}(z)$. Для линейного РПП — это коэффициент n_{01}, для полиномиального РПП — это $(n_{01} + 2n_{02}t + 3n_{03}t^2 + \ldots)$, где t — глубина градиентной зоны неоднородного ПП.

Для того чтобы ПП по поверхности изменялся в пределах всего светового диаметра, необходимо наличие неоднородности ПП в зоне, толщиной не менее стрелки прогиба поверхности $t \geq a_{1,2}$, где a_1, a_2 — стрелки прогиба первой и второй поверхностей линзы.

В формульном аппарате теории аберраций градиентных ОС [3] получены зависимости, которые позволяют определять параметры осевого и радиального коррекционных РПП, обеспечивающих исправление сферической аберрации.

При использовании осевого РПП исходными расчетными данными являются величина коэффициента сферической аберрации S_{I} исходной однородной линзы или величина продольной сферической аберрации, подлежащей исправлению.

Для первой поверхности линзы при нормировке $h_1 = f'$

$$S_{\mathrm{I}} = -h_1^4 K_1, \quad K_1 = \frac{(n_{01} + 2n_{02}a_1 + \ldots)}{r_1^2}. \tag{4}$$

Переходя к канонической нормировке $S_{\mathrm{I}} = S_{\mathrm{I}k}$,

$$S_{\mathrm{I}k} = -h_1^3 K_1 = -f'^3 \frac{(n_{01} + 2n_{02}a_1 + \ldots)}{r_1^2}. \tag{5}$$

Из выражения (5) получаем величины коэффициентов n_{01} (первое приближение) и коэффициента $n_{02,}$ n_{03} и так далее (второе приближение):

$$n_{01} + 2n_{02}a_1 + \ldots = -\frac{S_{\mathrm{I}k} r_1^2}{f'^3}. \tag{6}$$

Отметим, что в формулу (6) входит не величина исходного ПП n_{00}, а производная от функции ПП, характеризующая скорость изменения ПП по поверхности линзы.

Если для линзы известна величина продольной сферической аберрации $\Delta s'$, то коэффициенты n_{01}, n_{02} можно получить из формулы

$$n_{01} + 2n_{02}a_1 + \ldots = 2\frac{\Delta s'}{f'^2}\left(\frac{r_1}{m}\right)^2, \tag{7}$$

где m — высота луча на поверхности.

Весьма желательно, чтобы сферическая аберрация линзы не сильно отличалась от аберрации третьего порядка.

Как известно, для положительной линзы продольная сферическая аберрация $\Delta s' < 0$, следовательно, в области первой поверхности ПП должен быть убывающей функцией по оси OZ, что приводит к уменьшению ПП по поверхности с увеличением высоты луча на поверхности линзы.

При наличии неоднородности ПП в области, прилегающей ко второй поверхности линзы, при известной величине S_{Ik}

$$n_{01} + 2n_{02}a_1 = \frac{S_{Ik} r_2^2}{f'^3}, \tag{8}$$

а при известной величине продольной сферической аберрации $\Delta s'$

$$n_{01} + 2n_{02}a_1 = -2\frac{\Delta s'}{f'^2}\left(\frac{r_2}{m}\right)^2 \tag{9}$$

В случае линейного ОРПП $n_{02} = 0$ получаем простую зависимость:

$$n_{01} = -2\frac{\Delta s'}{f'^2}\left(\frac{r_2}{m}\right)^2.$$

Для положительной линзы на второй поверхности $n_{01} > 0$ независимо от знака r_2.

В случае радиального РПП функция ПП определяется коэффициентом РПП n_{10}. Согласно [2, 3], при $h_1 = f'$

$$S_{\mathrm{I}} = -\left(h_1^4 \frac{4n_{10}}{r_1} - h_2^4 \frac{4n_{10}}{r_2}\right). \tag{10}$$

Переходя к канонической нормировке,

$$S_{Ik} = -\left(h_1^3 \frac{4n_{10}}{r_1} - h_2^3 \frac{4n_{10}}{r_2}\right). \tag{11}$$

Величины h_1 и h_2 исходной однородной линзы можно взять из результатов расчета первого параксиального луча в пакете программ OPAL или ZEMAX. Принимать условие $h_1 = h_2$ здесь является некорректным, поскольку при $r_1 \neq \infty$ высоты луча на первой и второй поверхностях будут не равны.

По величине коэффициента аберрации S_{1k} из уравнения (11) рассчитываем значение коэффициента n_{10}:

$$n_{10} = -\frac{1}{4}\frac{S_{1k}}{h_1^3/r_1 - h_2^3/r_2}. \tag{12}$$

Полученные величины n_{10} не являются окончательными: поскольку не учитывалось влияние толщины градиентной среды при прохождении через нее луча, необходимо провести оптимизацию, параметрами которой являются n_{10} и r_2, а оптимизируемыми функциями — величина сферической аберрации $\Delta s'$ и фокусное расстояние линзы. Результаты расчета параметров градиентной среды в положительных менисках для исправления сферической аберрации приведены далее в примерах 1, 2.

Между коэффициентами n_{10} и n_{01}, описывающими радиальное и осевое РПП для обеих поверхностей линзы, справедлива связь:

$$n_{10k} = \frac{n_{01k}}{4r_k} \tag{13}$$

Для асферической поверхности второго порядка и сферической поверхности с неоднородным ПП известны [2] формулы связи для коэффициентов b_k, n_{01k}, n_{10k}:

$$n_{01k} = \frac{b_k\left(n_{00}-1\right)}{r_k}; \quad n_{10k} = \frac{b_k\left(n_{00}-1\right)}{4r_k^2}, \quad k = 1, 2, \tag{14}$$

где b_k — коэффициент деформации поверхности, связанный с эксцентриситетом асферической поверхности второго порядка формулой $b_k = -e_k^2$.

Анализ (13) показывает, что для исправления сферической аберрации значение коэффициента n_{10} и, следовательно, величина перепада ПП коррекционного радиального РПП должны быть меньше по сравнению с осевым РПП.

В работе [3] приведен пример исправления сферической аберрации в линзе введением ОРПП. Ниже рассмотрим примеры исправления сферической аберрации введением в показатель преломления радиальной неоднородности ПП. Все размеры указаны в миллиметрах.

Пример 1. Введение радиальной неоднородности в ПП положительного мениска с выпуклой первой поверхностью.

Исходные данные линзы:

Толщина линзы 2 мм; $m_{зр}$ = 1 мм;

$r_1 = 5{,}00$; $n_{00} = 1{,}65$; $f' = 48{,}816$; $S'_f = 41{,}124$; $h_1 = 48{,}816$;

$r_2 = 5{,}00$; $\Delta s' = -1{,}656$; $S_{Ik} = 163{,}667$; $h_2 = 41{,}103$.

Рассчитанная по формуле (12) величина $n_{10} = -0{,}00436047$ мм$^{-2}$.

Линза после оптимизации вариацией r_2 и n_{10}:

Толщина линзы 2 мм;

$r_1 = 5{,}00$; $n_{00} = 1{,}65$; $f' = 44{,}824$; $S'_F = 37{,}265$; $h_1 = 44{,}824$;

$r_2 = 4{,}31$; $\Delta s' = -0{,}0039$; $S_{Ik} = -0{,}628$; $h_2 = 37{,}265$.

После оптимизации $n_{10} = -0{,}00482047$ мм$^{-2}$.

Пример 2. Введение радиальной неоднородности в ПП положительного мениска с вогнутой первой поверхностью.

Исходные данные линзы:

Толщина линзы 2 мм;

$r_1 = -5{,}00$; $n_{00} = 1{,}65$; $f' = 48{,}816$; $S'_F = 56{,}508$; $h_1 = 48{,}816$;

$r_2 = -5{,}00$; $\Delta s' = -3{,}67$; $S_{Ik} = 361{,}329$; $h_2 = 41{,}103$.

Рассчитанная по формуле (12) величина n_{10} = — 0,0070436 мм$^{-2}$.

Линза после оптимизации вариацией r_2 и и n_{10}:

Толщина линзы 2 мм;

$r_1 = -5{,}00$; $n_{00} = 1{,}65$; $f' = 49{,}257$; $S'_F = 55{,}517$; $h_1 = 49{,}257$;

$r_2 = -7{,}40$; $\Delta s' = 0{,}03755$; $S_I = -1{,}958$; $h_2 = 55{,}517$.

После оптимизации $n_{10} = -0{,}012$ мм$^{-2}$.

Заключение. Малоизвестное свойство оптической поверхности состоит в том, что сферическую аберрацию в исходно однородной линзе можно исправить не только деформацией поверхности, но и введением неоднородности ПП по поверхности за счет осевого или радиального градиентов ПП. Деформация поверхностей малого диаметра вызывает значительные технологические затруднения, поэтому в линзе целесообразно применять неоднородный ПП осевого или радиального типов.

Выбор поверхности ОС для введения в прилегающую к ней зону оптической среды осевого РПП осуществляется согласно результатам анализа чувствительности поверхности по исправлению сферической аберрации и характеристикам технологически доступного полинома РПП: для положительных линз — убывающего от поверхности в глубину стекла, для отрицательных — возрастающего от поверхности в глубь стекла. Как правило, влияние градиента ПП на исправление сферической аберрации более заметно на крутых поверхностях линзы, при этом местный ПП по поверхности от оси к краю световой зоны должен уменьшаться.

Градиент РРПП меньше градиента ОРПП в $4r$ раз, при этом следует учитывать небольшое изменение фокусного расстояния линзы.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Запрягаева С.А., Свешникова И.С. *Расчет и проектирование оптических систем*. Москва, Логос, 2000, 584 с.
[2] Sands P.J. Third-order aberrations of inhomogeneous Lenses. *JOSA*, 1970, p. 1436.
[3] Сушков А.Л. Исправление сферической аберрации третьего порядка в линзе введением неоднородностей показателя преломления. *Известия вузов. Сер. Приборостроение*, 2010, т. 53, № 5, с. 67–72.
[4] Сушков А.Л. *Монохроматические аберрации граданов как базовых элементов жестких эндоскопов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 44 с.
[5] Сушков А.Л. Алгоритм расчета Зейделевых аберраций для оптической системы с распределенным показателем преломления. *Известия вузов. Сер. Приборостроение*, 2012, т. 55, № 5, с. 64–72.

Статья поступила в редакцию 24.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Сушков А.Л. Некоторые малоизвестные аберрационные свойства оптической поверхности. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 7.

URL: http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/828.html

Сушков Александр Леонидович родился в 1950 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1973 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Оптико-электронные приборы научных исследований» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор шести публикаций. Область научных интересов: аналитическое изучение свойств линзовых элементов с неоднородным показателем преломления.