УДК 535.317

АБЕРРАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ КОМПОЗИЦИИ ТОНКОГО ОПТИЧЕСКОГО КОМПОНЕНТА С КОНЦЕНТРИЧЕСКИМ МЕНИСКОМ

В.В. Ежова, В.А. Зверев, Т.В. Точилина

Показано, что в изображении, образованном оптической системой, состоящей из тонкой линзы и концентричного входному зрачку мениска конечной толщины, принципиально можно достичь плананастигматической коррекции аберраций. Однако при этом возникает проблема выбора материала линз. Подобный анализ коррекционных возможностей оптической системы выполнен и в том случае, когда тонкий компонент состоит из двух тонких линз, оптическая сила которых имеет разный знак.

Ключевые слова: изображение, оптическая система, тонкий компонент, аберрация, концентрическая система, входной зрачок.

Введение

Теоретическую базу композиции оптических систем, удовлетворяющих требованиям современных оптических устройств, составляют результаты исследования аберрационных свойств оптических поверхностей, отдельных линз и их сочетаний. Эти исследования определяют суть научной школы вычислительной оптики в СПб НИУ ИТМО, основы которой были заложены трудами профессора М.М. Русинова и его учеников [1–4]. Предлагаемая работа посвящена исследованию аберрационных свойств тонкого компонента с концентрическим мениском конечной толщины, цель которого определяется потребностью в развитии теории композиции оптических систем соответствующего типа и в решении задач оптимизации их параметров.

Постановка задачи

Если расстояния между поверхностями сколь угодно сложной системы не являются коррекционными параметрами, в первом приближении их можно принять равными нулю. Такую систему будем называть тонким компонентом. При этом равным нулю будет и расстояние между главными плоскостями системы. Тонкий компонент можно считать простейшей структурной единицей при построении любой оптической системы. В параксиальной области тонкий компонент будем характеризовать его оптической силой φ. Оптическая сила тонкого компонента равна $\varphi_к = \sum_{i=0}^{m} \varphi_i$, где φ_i – оптическая сила *i*-ой линзы тонкого компонента. Параметры тонкого компонента позволяют получить апланатическую коррекцию аберраций в образованном изображении, т.е. коррекцию аберраций широких пучков лучей. Для коррекции аберраций узких пучков лучей необходим дополнительный компенсатор, в качестве которого можно применить второй тонкий компонент, расположенный на конечном расстоянии от первого. Однако известно, что главные плоскости концентрического мениска совмещены и проходят через центр кривизны поверхностей мениска. Таким образом, при конечном расстоянии между главными плоскостями тонкий компонент и концентрический мениск могут располагаться в непосредственной близости друг к другу. По этой причине важно выяснить возможность коррекции осевых и полевых аберраций в изображении, образованном такой достаточно компактной системой.

Анализ возможной коррекции аберраций в изображении, образованном оптической системой, состоящей из тонкого компонента и концентрического мениска конечной толщины

При нормировке величин $n' = 1$, $\alpha' = 1$, $\beta_1 = 1$ выражения, определяющие коэффициенты сферической аберрации, комы и астигматизма третьего порядка изображения, образованного тонким компонентом, можно представить в следующем виде:

$$S_{\mathrm{I}} = f'_к \mathrm{P}^{\infty},$$

$$S_{\mathrm{II}} = z_p \mathrm{P}^{\infty} + f'_к \mathrm{W}^{\infty}, \qquad (1)$$

$$S_{\mathrm{III}} = \left(\frac{1}{f'_к}\right) z_p^2 \mathrm{P}^{\infty} + 2 z_p \mathrm{W}^{\infty} + f'_к, \qquad (2)$$

где P^{∞} и W^{∞} – основные параметры тонкого компонента; z_p – расстояние от осевой точки тонкого компонента до осевой точки входного зрачка.

Положив $z_p = 0$, получаем $S_{\mathrm{I}} = f'_к \mathrm{P}^{\infty}$; $S_{\mathrm{II}} = f'_к \mathrm{W}^{\infty}$; $S_{\mathrm{III}} = f'_к$. При $\mathrm{P}^{\infty} = 0$ и $\mathrm{W}^{\infty} = 0$ независимо от положения входного зрачка имеем $S_{\mathrm{I}} = 0$; $S_{\mathrm{II}} = 0$; $S_{\mathrm{III}} = f'_к$. Пусть $S_{\mathrm{II}} = 0$ и $S_{\mathrm{III}} = 0$. Тогда из соотношений (1) и (2) находим, что

$$\mathrm{P}^{\infty} = \left(\frac{f'_к}{z_p}\right)^2 > 0, \quad \mathrm{W}^{\infty} = -\frac{f'_к}{z_p}.$$

Вполне очевидно, что чем меньше абсолютная величина параметров P^{∞} и W^{∞}, тем больше должна быть абсолютная величина отрезка z_p, необходимая для компенсации остаточных комы и астигматизма изображения. В общем случае выражение (2) можно рассматривать как квадратное уравнение относительно переменной величины z_p. Решая это уравнение, получаем

$$z_p = -\frac{\mathrm{W}^{\infty}}{\mathrm{P}^{\infty}} f'_к \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{\mathrm{P}^{\infty}}{\mathrm{W}^{\infty 2}}\left(1 - \frac{S_{\mathrm{III}}}{f'_к}\right)}\right]. \qquad (3)$$

Это уравнение имеет вещественное решение при соблюдении условия $1 - \frac{\mathrm{P}^{\infty}}{\mathrm{W}^{\infty 2}}\left(1 - \frac{S_{\mathrm{III}}}{f'_к}\right) \geq 0$. При $S_{\mathrm{III}} = 0$ это условие принимает вид: $\mathrm{W}^{\infty 2} - \mathrm{P}^{\infty} \geq 0$. Основные параметры P^{∞} и W^{∞} одиночной тонкой линзы в воздухе взаимосвязаны соотношением [5]:

$$\mathrm{P}^{\infty} = \mathrm{P}_0^{\infty} + \left[1 - \frac{1}{(n+1)^2}\right]\left[\mathrm{W}^{\infty} - \frac{1}{2(2+n)}\right]^2, \qquad (4)$$

где $\mathrm{P}_0^{\infty} = \frac{n(4n-1)}{4(2+n)(n-1)^2}$. Это соотношение можно преобразовать к виду $\mathrm{W}^{\infty 2} - \mathrm{P}^{\infty} = \frac{1}{(n+1)^2}\left(\mathrm{W}^{\infty} + \frac{1}{2}n\right)^2 - \frac{n^2}{4(n-1)^2}$. Условию $\mathrm{W}^{\infty 2} - \mathrm{P}^{\infty} \geq 0$ соответствует выражение $\left(\mathrm{W}^{\infty} + \frac{1}{2}n\right)^2 \geq \frac{1}{4}\left(\frac{n+1}{n-1}\right)^2 n^2$. Отсюда следует, что величина параметра W^{∞} должна удовлетворять условиям $W_1^\infty \geq \dfrac{n}{n-1}$; $W_2^\infty \geq -\dfrac{n^2}{n-1}$. При значениях параметра W^∞, удовлетворяющих этим условиям, и при расстоянии до входного зрачка, определяемом формулой (3), в изображении, образованном тонкой линзой в воздухе, будут отсутствовать кома и астигматизм третьего порядка. Однако при этом параметр $P^\infty \neq 0$; следовательно, не будет равен нулю и коэффициент S_{I}, определяющий остаточную сферическую аберрацию изображения.

Дополним тонкий компонент мениском, поверхности которого концентричны центру входного зрачка, расположенному в переднем фокусе тонкого компонента, как показано на рисунке. Главные плоскости концентрического мениска совмещены и проходят через центр кривизны его поверхностей. В результате получаем оптическую систему, у которой оптическая сила и задний фокальный отрезок равны

$$\varphi = \varphi_{\text{м}} + \varphi_{\text{к}} - \varphi_{\text{м}}\varphi_{\text{к}} d\ ;$$

$$s'_{F'} = \frac{\left(1-\varphi_{\text{м}} d\right)}{\varphi},$$

где d – расстояние от задней главной точки мениска до осевой точки тонкого компонента.

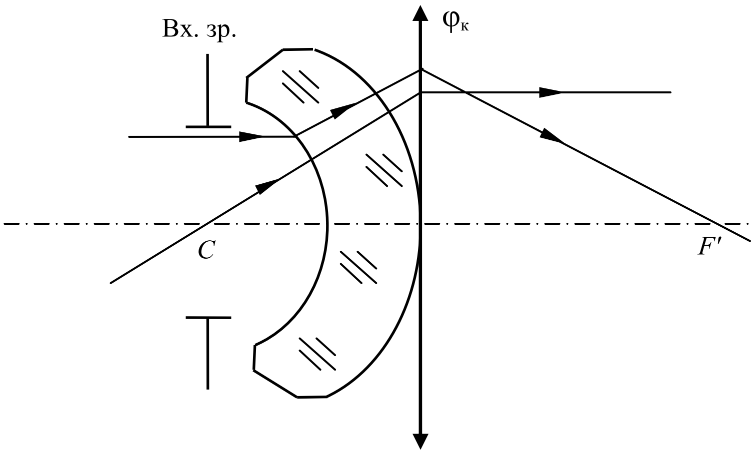

Рисунок. Схема оптики объектива

При $d = f'_{\text{к}}$ оптическая сила системы $\varphi = \varphi_{\text{м}} + \varphi_{\text{к}} - \varphi_{\text{м}} = \varphi_{\text{к}}$, а задний фокальный отрезок $s'_{F'} = \dfrac{\left(\varphi-\varphi_{\text{м}}\right)}{\varphi^2} = f'\left(1-f'\varphi_{\text{м}}\right)$. При $n'=1$, $\alpha'=1$, $\beta_1 = 1$ и $z_p = -f'_{\text{к}} = -f'$ имеем соотношения

$$S_{\mathrm{I}} = S_{\mathrm{I}\,\text{м}} + h_{\text{к}} P_{\text{к}},$$

$$S_{\mathrm{II}} = S_{\mathrm{II}\,\text{м}} + H_{\text{к}} P_{\text{к}} - J W_{\text{к}} = S_{\mathrm{II}\,\text{м}} - f'\left(P_{\text{к}} - W_{\text{к}}\right),$$

$$S_{\mathrm{III}} = S_{\mathrm{III}\,\text{м}} + \frac{f'^2}{h_{\text{к}}} P_{\text{к}} - 2\frac{f'^2}{h_{\text{к}}} W + f',$$

где $h_{\text{к}} = s'_{F'} = f'\left(1-f'\varphi_{\text{м}}\right)$. В рассматриваемом случае выражения, определяющие коэффициенты $S_{\mathrm{II}\,\text{м}}$ и $S_{\mathrm{III}\,\text{м}}$, удобно представить в виде

$$S_{\mathrm{II}\,\text{м}} = \sum_{i=1}^{2} h_i P_i \frac{\beta_{i+1}-\beta_i}{\alpha_{i+1}-\alpha_i};$$

$$S_{\mathrm{III}\,\text{м}} = \sum_{i=1}^{2} h_i P_i \left(\frac{\beta_{i+1}-\beta_i}{\alpha_{i+1}-\alpha_i}\right)^2.$$

При входном зрачке, расположенном в центре кривизны поверхностей концентрического мениска, углы $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3$. Вполне очевидно, что при этом $S_{\mathrm{II}\,\text{м}} = S_{\mathrm{III}\,\text{м}} = 0$. Тогда

$$S_{\mathrm{I}} = S_{\mathrm{I}\,\text{м}} + h_{\text{к}} P_{\text{к}}, \tag{5}$$

$$S_{\mathrm{II}} = -f'\left(P_{\text{к}} - W_{\text{к}}\right), \tag{6}$$

$$S_{\mathrm{III}} = \frac{f'^2}{h_{\text{к}}}\left(P_{\text{к}} - 2W_{\text{к}}\right) + f'. \tag{7}$$

Из выражений (6) и (7) следует, что при $S_{II}=0$ параметр $P_к = W_к$, а коэффициент

$$S_{III} = f'\left(1-\left(\frac{f'}{h_к}\right)W_к\right) = f'\left(1-\left(\frac{f'}{h_к}\right)P_к\right).$$

Пусть $S_I = 0$. Тогда $P_к = -\left(\frac{S_{Iм}}{h_к}\right)$. При этом коэффициент

$$S_{III} = f'\left(1+\left(\frac{f'}{h_к^2}\right)S_{Iм}\right). \quad (8)$$

Концентрический мениск определим углами осевого виртуального [6] (нулевого) луча с оптической осью в виде

$\alpha_1 = 0 \qquad n_1 = 1$

$\alpha_2 = \alpha_м \quad d = d_м \quad n_2 = n_м$

$\alpha_3 = \alpha'_м \qquad n_3 = 1.$

Толщина мениска $d_м = r_1 - r_2$. Приближенно можно принять $r_2 \cong f'_к = -f'$. Тогда $r_1 = d_м - f'$. Применив формулу $n_{i+1}\alpha_{i+1} - n_i\alpha_i = h_i\frac{n_{i+1}-n_i}{r_i}$, находим значение угла $\alpha_м$:

$$\alpha_м = h_1\frac{n_м - 1}{n_м r_1} = \frac{n_м-1}{n_м}\frac{1}{d_м\varphi - 1}. \quad (9)$$

Угол $\alpha_м = h_1\varphi_м = f'\varphi_м$.

Оптическая сила мениска

$$\varphi_м = (n_м - 1)\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right)+\frac{(n_м-1)^2 d_м}{n_м r_1 r_2} = \frac{n_м - 1}{n_м}\frac{d_м\varphi^2}{d_м\varphi-1}. \quad (10)$$

При этом

$$\alpha'_м = \frac{n_м-1}{n_м}\frac{d_м\varphi}{d_м\varphi-1} = \frac{n_м-1}{n_м}+\alpha_м.$$

Коэффициент $S_{Iм}$ определим выражением

$$S_{Iм} = h_1P_1 + h_2P_2 = f'P_1 + h_кP_2, \quad (11)$$

где $P = \left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta\nu}\right)^2\Delta\alpha\nu$;

$$h_к = s'_{F'} = f'(1-f'\varphi_м) = f'\frac{n_м - \varphi d_м}{n_м(1-\varphi d_м)}. \quad (12)$$

Полученные соотношения позволяют выражение (11) преобразовать к виду

$$S_{Iм} = f'\frac{n_м-1}{n_м^3}\frac{\varphi d_м}{(\varphi d_м - 1)^3}\left[n_м\varphi^2 d_м^2 - \frac{n_м^3-1}{n_м-1}(\varphi d_м - 1)\right]. \quad (13)$$

Вполне очевидно, что при $d_м = 0$ коэффициент $S_{Iм} = 0$. При этом в соответствии с формулой (8) коэффициент $S_{III} = f'$, что и следовало ожидать. Кривизна поверхности изображения, образованного системой тонкого компонента с концентрическим мениском, определяется коэффициентом S_{IV}, равным $S_{IV} = S_{IVм} + S_{IVк}$. В рассматриваемом случае коэффициенты $S_{IVм}$ и $S_{IVк}$ удобно определить формулами $S_{IVм} = \sum_{i=1}^{2}\frac{n_{i+1}-n_i}{n_{i+1}n_ir_i}$; $S_{IVк} = \sum_{i=1}^{m}\frac{\varphi_i}{n_i}$. Используя полученные соотношения, находим, что $S_{IVм} = \varphi_м$. При этом $S_{IV} = \varphi_м + \sum_{i=1}^{m}\frac{\varphi_i}{n_i}$.

Приближенно принимаем $\sum_{i=1}^{m}\frac{\varphi_i}{n_i} \approx \frac{\varphi_к}{n_к} = \frac{\varphi}{n_к}$. Тогда $S_{IV} = \varphi_м + \frac{\varphi_м}{n_к}$. Применив формулу (10) и выразив линейные величины в масштабе фокусного расстояния системы, т.е. при $\varphi = 1$, при $\sum_{i=1}^{m}\frac{\varphi_i}{n_i} = \pi$ получаем

$$d_{\text{м}} = \frac{n_{\text{м}}\left(S_{\text{IV}} - \pi\right)}{1 + n_{\text{м}}\left(S_{\text{IV}} - \pi - 1\right)}. \tag{14}$$

Полученные соотношения позволяют представить выражения (9), (12) и (13) в виде

$$\alpha_{\text{м}} = S_{\text{IV}} - \pi - \frac{\left(n_{\text{м}} - 1\right)}{n_{\text{м}}}; \tag{15}$$

$$h_{\text{к}} = -S_{\text{IV}} + \pi + 1; \tag{16}$$

$$S_{\text{Iм}} = \frac{n_{\text{м}}}{\left(n_{\text{м}} - 1\right)^2}\left(S_{\text{IV}} - \pi\right)^3 - \frac{n_{\text{м}}^3 - 1}{n_{\text{м}}}\frac{\left(S_{\text{IV}} - \pi\right)^2}{\left(n_{\text{м}} - 1\right)^2} + \frac{n_{\text{м}}^3 - 1}{n_{\text{м}}^2}\frac{S_{\text{IV}} - \pi}{n_{\text{м}} - 1}, \tag{17}$$

при этом в соответствии с формулой (8)

$$S_{\text{III}} = 1 + \frac{S_{\text{Iм}}}{\left(1 + \pi - S_{\text{IV}}\right)^2}. \tag{18}$$

Из выражения (18) следует, что коэффициент $S_{\text{III}} = 0$ при условии

$$\left(1 + \pi - S_{\text{IV}}\right)^2 + S_{\text{Iм}} = 0.$$

Для тонкого компонента в виде одиночной линзы параметр $\pi = \frac{1}{n_{\text{к}}}$. Пусть $n_{\text{к}} = n_{\text{м}}$. При этом выражения (14)–(18) принимают вид

$$d_{\text{м}} = \frac{n_{\text{м}} S_{\text{IV}} - 1}{n_{\text{м}}\left(S_{\text{IV}} - 1\right)};$$

$$\alpha_{\text{м}} = S_{\text{IV}} - 1;$$

$$h_{\text{к}} = \frac{1 - n_{\text{м}}\left(S_{\text{IV}} - 1\right)}{n_{\text{м}}};$$

$$S_{\text{Iм}} = \frac{n_{\text{м}}}{\left(n_{\text{м}} - 1\right)^2}\left(S_{\text{IV}} - 1\right)^3 - \frac{n_{\text{м}} - 1}{n_{\text{м}}} S_{\text{IV}}^2 + \frac{n_{\text{м}}^2 - 1}{n_{\text{м}}^2} S_{\text{IV}};$$

$$S_{\text{III}} = 1 + \frac{n_{\text{м}}^3}{\left(n_{\text{м}} - 1\right)^2}\frac{\left(S_{\text{IV}} - 1\right)^3}{\left[1 - n_{\text{м}}\left(S_{\text{IV}} - 1\right)\right]^2} + \frac{n_{\text{м}} - 1}{1 - n_{\text{м}}\left(S_{\text{IV}} - 1\right)} S_{\text{IV}}.$$

Легко убедиться, что при $S_{\text{IV}} = 0$ коэффициент $S_{\text{III}} = 0$ при $n_{\text{м}} \approx 1{,}905$.

В табл. 1 для ряда значений коэффициента S_{IV} приведены численные значения показателя преломления материала мениска и тонкой линзы в воздухе при $S_{\text{III}} = 0$.

S_{IV}	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25
$n_{\text{м}}$	1,9052	1,8313	1,7606	1,6932	1,6290	1,5678

Таблица 1. Зависимость $n_{\text{м}} = n_{\text{м}}\left(S_{\text{IV}}\right)$ при $n_{\text{к}} = n_{\text{м}}$

Из табл. 1 следует, что для построения оптической системы объектива рассматриваемой конструкции при плананастигматической коррекции аберраций в видимой области спектра необходимо решить проблему выбора материала линз. При неполной коррекции кривизны поверхности изображения построение такой системы вполне возможно.

В соответствии с формулой (5) коэффициент $S_{\text{I}} = 0$ при значении параметра

$$P_{\text{к}} = -\frac{S_{\text{Iм}}}{h_{\text{к}}} = -\frac{S_{\text{Iм}}^2}{1 + \pi - S_{\text{IV}}}. \tag{19}$$

Из формулы (6) следует, что коэффициент $S_{\text{II}} = 0$ при $P_{\text{к}} = W_{\text{к}}$. В общем случае взаимосвязь этих параметров с основными параметрами тонкого компонента определяется выражениями [5]

$$P_{\text{к}} = \left(\alpha' - \alpha\right)^3 \mathrm{P}_{\text{к}}^{\infty} + 4\alpha\left(\alpha' - \alpha\right)^2 \mathrm{W}_{\text{к}}^{\infty} + \alpha\left(\alpha' - \alpha\right)\left[2\alpha\left(2 + \pi\right) - \alpha'\right], \tag{20}$$

$$W_{\text{к}} = \left(\alpha' - \alpha\right)^2 \mathrm{W}_{\text{к}}^{\infty} + \alpha\left(\alpha' - \alpha\right)\left(2 + \pi\right). \tag{21}$$

Здесь угол $\alpha' = 1$, а угол $\alpha' = \alpha'_{\text{м}}$. Параметр $\mathrm{P}_{\text{к}}^{\infty}$ тонкой линзы в воздухе определяется выражением (4), которое можно представить в виде

$$\mathrm{P}_{\text{к}}^{\infty}=\mathrm{P}_{0\text{к}}^{\infty}+a\left(\mathrm{W}_{\text{к}}^{\infty}-\mathrm{W}_{0\text{к}}^{\infty}\right)^2, \tag{22}$$

где $\mathrm{P}_{0\text{к}}^{\infty}=\dfrac{n_{\text{к}}\left(4n_{\text{к}}-1\right)}{4\left(2+n_{\text{к}}\right)\left(n_{\text{к}}-1\right)^2}$, $\mathrm{W}_{0\text{к}}^{\infty}=\dfrac{1}{2\left(2+n_{\text{к}}\right)}$, $a=\dfrac{n_{\text{к}}\left(2+n_{\text{к}}\right)}{\left(n_{\text{к}}+1\right)^2}$.

Заменив параметр $\mathrm{P}_{\text{к}}^{\infty}$ в выражении (20) выражением (22), при $P_{\text{к}}=-\dfrac{n_{\text{к}}S_{\text{Iм}}}{1+n_{\text{к}}\left(S_{\text{IV}}-1\right)}$, где $n_{\text{к}}=n_{\text{м}}$, получаем квадратное уравнение относительно величины параметра $\mathrm{W}_{\text{к}}^{\infty}$. Подставив значение параметра $\mathrm{W}_{\text{к}}^{\infty}$, полученное в результате решения этого уравнения, в выражение (21), найдем значение параметра $W_{\text{к}}$. В общем случае $W_{\text{к}}\neq P_{\text{к}}$. Тогда, дополнив рассматриваемую систему такой же, получим симметричную систему, формирующую изображение с поперечным увеличением $V=-1^{\times}$. Для перехода от симметричной системы к системе, формирующей изображение бесконечно удаленного предмета, можно применить метод сохранения углов излома луча осевого пучка, предложенный в [7]. В результате получим значения конструктивных параметров оптической системы объектива типа «Планар», которые можно рассматривать в качестве исходных для последующей оптимизации по критерию качества изображения.

Если одиночную положительную линзу тонкого компонента дополнить тонкой отрицательной линзой, то жесткая взаимосвязь основных параметров тонкого компонента $\mathrm{P}_{\text{к}}^{\infty}$ и $\mathrm{W}_{\text{к}}^{\infty}$ нарушается. В этом случае коррекция первичной комы изображения, сформированного образованной системой, вполне возможна.

Подставив выражение (17) в формулу (18), получаем

$$S_{\text{III}}=1-\frac{n_{\text{м}}}{\left(n_{\text{м}}-1\right)^2}\frac{\left(\pi-S_{\text{IV}}\right)^3}{\left(1+\pi-S_{\text{IV}}\right)^2}+\frac{n_{\text{м}}^3-1}{n_{\text{м}}^2}\frac{\pi-S_{\text{IV}}}{\left(n_{\text{м}}-1\right)^2}\frac{1-n_{\text{м}}\left(1+\pi-S_{\text{IV}}\right)}{\left(1+\pi-S_{\text{IV}}\right)^2}. \tag{23}$$

Для системы двух тонких линз из кронового и флинтового стекол, имеющих средние значения показателя преломления и коэффициента дисперсии, в общем случае в первом приближении величину π можно принять равной 0,7. При этом в соответствии с выражением (23) при $S_{\text{IV}}=0$ коэффициент $S_{\text{III}}=0$ при $n_{\text{м}}\approx 2{,}37$. При применении кроновых стекол марок СТК и флинтовых стекол марок ТФ величину π можно принять равной 0,55. В этом случае при $S_{\text{IV}}=0$ коэффициент $S_{\text{III}}=0$ при $n_{\text{м}}\approx 1{,}98$. В оптических системах, предназначенных для работы в инфракрасной области спектра, применяют материалы, показатели преломления которых могут принимать значения от $n=1{,}4$ (например, флюорит) до $n=4$ (например, германий). При этом параметр π может оказаться равным примерно 0,4. В табл. 2 при трех значениях параметра π для ряда значений коэффициента S_{IV} приведены численные значения показателя преломления материала мениска при $S_{\text{III}}=0$.

π	S_{IV}					
	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
0,70	2,380	2,240	2,100	1,970	1,841	1,716
0,55	1,970	1,841	1,716	1,596	1,482	1,370
0,40	1,596	1,480	1,370	1,274	1,185	1,110

Таблица 2. Зависимость $n_{\text{м}}=n_{\text{м}}\left(S_{\text{IV}},\pi\right)$

Приведенные в табл. 2 величины могут служить ориентиром для выбора материала концентрического мениска по показателю преломления $n_{\text{м}}$ при соответствующих значениях параметра π и коэффициента S_{IV}. Выполнив подстановки в соотношение (14), находим толщину $d_{\text{м}}$ мениска. Формула (17) позволяет вычислить значение коэффициента $S_{\text{Iм}}$. Применив формулу (19), можем определить значение параметра $P_{\text{к}}$, а следовательно, и параметра $W_{\text{к}}=P_{\text{к}}$. Решив систему уравнений (20) и (21), находим значения основных параметров $\mathrm{P}_{\text{к}}^{\infty}$ и $\mathrm{W}_{\text{к}}^{\infty}$, которые позволяют оценить требуемую сложность конструкции тонкого компонента и вычислить его конструктивные параметры.

Заключение

Выполненные исследования позволили показать возможность коррекции аберраций в изображении, образованном оптической системой, состоящей из тонкого компонента и концентрического мениска конечной толщины, а числовые исследования подтвердили такую возможность. Применив полученные аналитические соотношения, можно определить параметры рассматриваемой системы. Получена оптическая система объектива с вынесенным входным зрачком при телецентрическом ходе главных лучей в пространстве изображений. Показано, что при $S_{\mathrm{I}} = 0$ и $S_{\mathrm{II}} = 0$ значение коэффициента S_{III} не зависит от положения входного зрачка. В связи с этим в частном случае входной зрачок можно совместить, например, с первой поверхностью мениска.

Литература

1. Русинов М.М. Композиция оптических систем. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1989. – 383 с.
2. Зверев В.А. Идеи композиции как принцип построения рациональной конструкции оптической системы // Научно-технический вестник СПб ГИТМО (ТУ). – 2002. – Вып. 5. – С. 56–71.
3. Грамматин А.П., Демидова Е.А., Зверев В.А., Романова Г.Э. Аберрационные свойства оптической системы из двух отражающих поверхностей сферической формы с компенсатором // Оптический журнал. – 2004. – № 4. – С. 11–15.
4. Бронштейн И.Г., Лившиц И.Л., Kim Young-Gi, Kim Tae-Young, Jung Phil-Ho. Выбор оптической схемы и расчет малогабаритных объективов для мобильных телефонов // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76. – № 5. – С. 25–31.
5. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1969. – 672 с.
6. Зверев В.А. Основы геометрической оптики. – СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2002. – 218 с.
7. Русинов М.М. Техническая оптика: Учебное пособие для вузов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1979. – 488 с.

Ежова Василиса Викторовна	–	Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, evv_foist@mail.ru
Зверев Виктор Алексеевич	–	Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, post_vaz@rambler.ru
Точилина Татьяна Вячеславовна	–	Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, tvtochilina@mail.ru