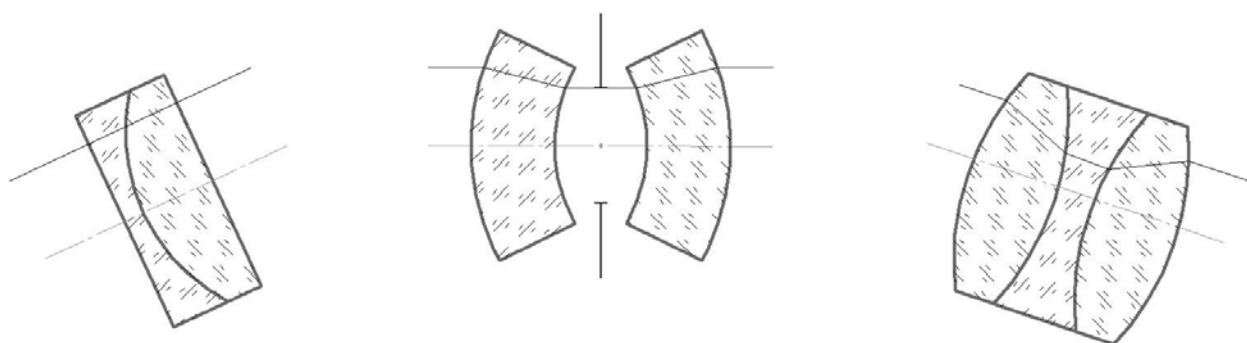


Л.Н. Андреев, В.В. Ежова, Г.С. Дегтярева

ПРИКЛАДНАЯ ТЕОРИЯ АБЕРРАЦИЙ

Часть третья



Санкт-Петербург
2016

Министерство образования и науки Российской Федерации

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Л.Н. Андреев, В.В. Ежова, Дегтярева Г.С.

ПРИКЛАДНАЯ ТЕОРИЯ АБЕРРАЦИЙ

Часть третья

Учебное пособие

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2016

Андреев Л.Н., Ежова В.В., Дегтярева Г.С. Прикладная теория aberrаций. Часть третья.- Учебное пособие. - СПб: Университет ИТМО, 2016. - 46 с.

Данное пособие посвящено модульному принципу проектирования оптических систем. Рассмотрены оптические модули и новые афокальные компенсаторы монохроматических и хроматических aberrаций.

Учебное пособие предназначено для студентов по направлению подготовки бакалавров 12.03.02 «Оптехника» и магистров 12.04.02 «Оптехника» профиль подготовки «Прикладная оптика».

Рекомендовано к печати Ученым советом факультета ЛиСИ, 11 октября 2016 года, протокол №10.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2016

© Андреев Л.Н., Ежова В.В., Дегтярева Г.С., 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЕ МОДУЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	5
ГЛАВА 2. ОПТИЧЕСКИЕ МОДУЛИ.....	9
2.1. Апланатические мениски	9
2.2. Квазиапланатическая линза.....	11
2.3. Линзы различной формы	12
ГЛАВА 3. КОМПЕНСАТОРЫ АБЕРРАЦИЙ.....	14
3.1. Компенсаторы сферической аберрации.....	14
3.2. Компенсаторы кривизны поверхности изображения	17
3.3. Компенсаторы хроматических аберраций.....	20
ГЛАВА 4. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, РАССЧИТАННЫЕ НА ОСНОВЕ МОДУЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ	23
4.1. Конденсоры с улучшенной коррекцией комы	23
4.2. Анастигматический, ортоскопический широкоугольный окуляр для микроскопа с большим удалением выходного зрачка	27
4.3. Светосильные объективы	28
4.3.1. Светосильный объектив $f' = 100$ (мм), $D/f' = 1:2,5$, $2\omega = 6^\circ$	28
4.3.2. Светосильный объектив $f' = 100$ (мм), $D/f' = 1:2,8$, $2\omega = 10^\circ$	29
4.3.3. Светосильный объектив $f' = 100$ (мм), $D/f' = 1:2$, $2\omega = 10^\circ$	31
4.4. Гиперхроматические объективы.....	32
4.5. Планахроматические объективы	37
4.6. Сферическое зеркало с компенсатором сферических аберраций	40
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	44

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное учебное пособие является продолжением учебных пособий Андреев Л.Н. «Прикладная теория aberrаций», СПб ГИТМО (ТУ), 2002 г., и Андреев Л.Н., Ежова В.В. «Прикладная теория aberrаций. Часть вторая», СПб НИУ ИТМО, 2011 г.

В пособии рассмотрен модульный принцип проектирования оптических систем, сущность которого состоит в том, что оптические системы синтезируются из компонентов с известными коррекционными свойствами.

Показана эффективность использования оптических модулей с апланатической коррекцией aberrаций.

Приведены оптические схемы и методики расчета афокальных компенсаторов aberrаций.

Для иллюстрации предложенного метода проектирования приведены результаты aberrационного расчета оптических систем, в том числе конденсоров, окуляров, объективов микроскопа, светосильных объективов.

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЕ МОДУЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Сущность модульного принципа проектирования заключается в том, что оптическая система синтезируется из оптических модулей (компонентов) с известными коррекционными свойствами.

В случае ограничения областью Зейделя оптические модули характеризуются основными параметрами P , W и C .

Из рассмотрения теории aberrаций третьего порядка применительно к оптическим системам, состоящим из тонких компонентов, наиболее интересными представляются компоненты (модули) с апланатической коррекцией, то есть у которых $P=W=0$ [6]. Выполнение этих условий обеспечивает коррекцию сферической aberrации и комы.

Для коррекции астигматизма и кривизны поверхности необходимо выполнение условия $\sum_1^k \Phi_k = 0$, где Φ_k - оптическая сила компонента.

Для коррекции хроматических aberrаций весьма эффективно применение афокальных компенсаторов, например, в виде склеенной гиперхроматической линзы - плоскопараллельной пластинки из оптических материалов, у которых главные значения показателей преломления для средней длины волны (n) близки, а коэффициенты средней дисперсии (ν) различны.

Расположение такой пластинки в параллельном ходе лучей не вносит монохроматических aberrаций. Путем изменения «хроматического» радиуса происходит коррекция хроматизма оптической системы.

В ряде случаев, с целью коррекции aberrаций, могут быть использованы афокальные компенсаторы, рассмотренные в главе 3.

Связь между aberrациями третьего порядка с коэффициентами aberrаций (суммами Зейделя $S_1 \dots S_5$) и с основными параметрами для одного тонкого компонента и двух компонентов, разделенных воздушным промежутком значительной величины, приведены в (1.1), (1.2), (1.4).

Если предмет находится на бесконечности: $\alpha_1 = 0$, $\alpha' = 1$, $\beta_1 = 1$, $h_1 = f' = 1$, $J = -1$, то

$$\begin{aligned} \Delta \bar{s}' &= \frac{1}{2} f' S_1 t g^2 \sigma'; \\ \eta &= \frac{1}{2} S_2 t g^2 \sigma'; \\ z'_m &= \frac{1}{2} f' (3S_3 + S_4) t g^2 \omega_1; \\ z'_s &= \frac{1}{2} f' (S_3 + S_4) t g^2 \omega_1 = \frac{r}{4} t g^2 \omega_1; \end{aligned} \tag{1.1}$$

$$z'_m - z'_s = f \operatorname{tg}^2 \omega_1 \bar{S}_{III} = \frac{r}{4} \operatorname{tg}^2 \omega_1 \left(-\frac{1}{4} \bar{s}_p^2 + \bar{s}_p - 1 \right);$$

$$z'_s - z'_m = f' S_3 \operatorname{tg}^2 \omega_1;$$

$$\Delta y'_D = \frac{1}{2} f' S_5 \operatorname{tg}^3 \sigma',$$

где f' - фокусное расстояние,

σ' - апертурный угол в пространстве изображения,

ω_1 - полевой угол в пространстве предметов,

$\Delta s'$ - продольная сферическая абберация,

η - отступление от изопланатизма,

z'_s, z'_m - меридиональная и сагиттальная составляющие астигматизма,

$\Delta y'_D$ - дисторсия.

Связь коэффициентов аббераций третьего порядка с основными параметрами P и W для одного компонента приведены в (1.2):

$$S_1 = P;$$

$$S_2 = HP + W;$$

$$S_3 = H^2 P + 2HW + 1; \quad (1.2)$$

$$S_4 = \pi \approx \frac{1}{n} \approx 0,65;$$

$$S_5 = H^3 P + 3H^2 W + 3,7H,$$

где H - высота пересечения второго парааксиального луча с компонентом.

В случае если входной зрачок совпадает с компонентом $H = 0$, формула (1.2) принимает вид:

$$S_1 = P;$$

$$S_2 = W;$$

$$S_3 = 1; \quad (1.3)$$

$$S_4 = \pi;$$

$$S_5 = 0.$$

Выражения для коэффициентов аббераций для системы, состоящей из двух тонких компонентов, приведены в (1.4):

$$S_1 = P_1 + h_2 P_2;$$

$$S_2 = H_1 P_1 + H_2 P_2 + W_1 + W_2;$$

$$S_3 = \frac{H_1^2}{h_1} P_1 + \frac{H_2^2}{h_2} P_2 + 2 \left(H_1 W_1 + \frac{H_2}{h_1} W_2 \right) + \Phi_1 + \Phi_2; \quad (1.4)$$

$$S_4 = \pi (\Phi_1 + \Phi_2);$$

$$S_5 = H_1^3 P_1 + \frac{H_2^3}{h_2^2} P_2 + 3 \left(H_1^2 W_1 + \frac{H_2^2}{h_2^2} W_2 \right) + \left(H_1 \Phi_1 + \frac{H_2}{h_2} \Phi_2 \right) (3 + \pi),$$

где Φ_1 и Φ_2 - оптические силы компонентов,

h и H - высоты пересечения первого и второго параксиальных лучей с компонентами, соответственно.

Параметры P и W связаны с основными параметрами \mathbf{P} и \mathbf{W} следующей зависимостью [1]:

$$P = (\alpha' - \alpha)^3 \mathbf{P} + 4\alpha(\alpha' - \alpha)^2 \mathbf{W} + \alpha(\alpha' - \alpha)[2\alpha(2 + \pi) - \alpha']; \quad (1.5)$$

$$W = (\alpha' - \alpha)^2 \mathbf{W} + \alpha(\alpha' - \alpha)(2 + \pi),$$

где α и α' - углы пересечения первого параксиального луча с оптической осью.

Из (1.5) вытекает, что для коррекции сферической aberrации, комы, астигматизма и кривизны поверхности в двухкомпонентной системе необходимо, чтобы величины P_1 , W_1 , P_2 , W_2 равнялись нулю и сумма оптических сил компонентов $\Phi_1 + \Phi_2 = 0$.

В случае однокомпонентной системы для коррекции астигматизма и кривизны поверхности следует ввести компенсаторы кривизны изображения, которые будут рассмотрены в главе 3.

При расчете объективов из двух компонентов, второй компонент отрицательной оптической силы целесообразно выполнить в виде апланатического мениска с увеличением $\beta = (n)^x$.

В этом случае у него исправлена сферическая aberrация и кома, а так как его оптическая сила равна по величине, но противоположна по знаку первому компоненту, он также исправляет кривизну поверхности и астигматизм всего объектива. На рис. 1.1 приведена оптическая схема такого объектива.

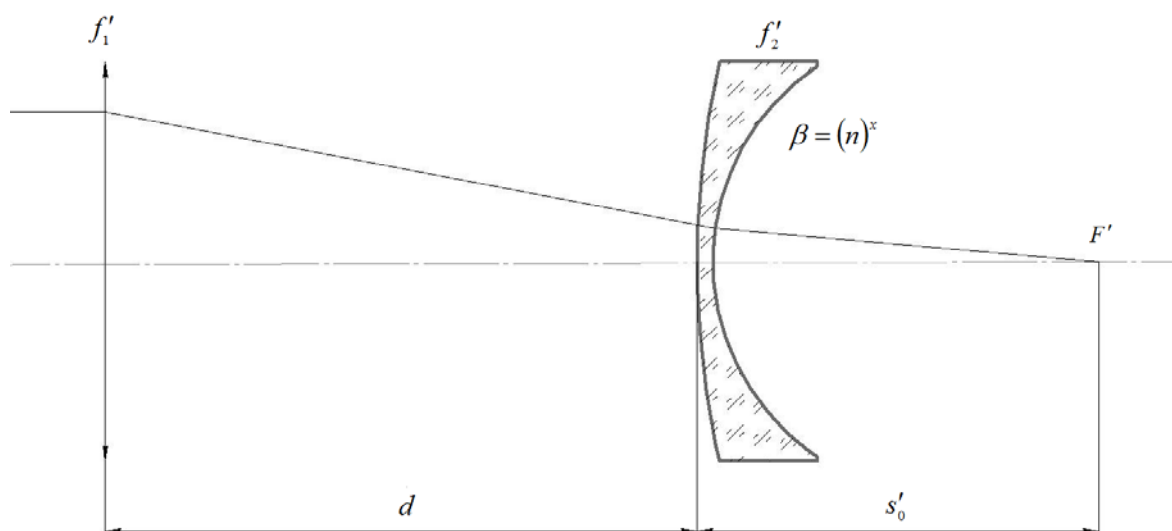


Рисунок 1.1. Оптическая схема двухкомпонентного объектива

В (1.6) приведены выражения для габаритного расчета:

$$\begin{aligned} f_1' &= -f_2' = \frac{f_0'}{n}; \\ d &= \frac{f_0'}{n^2}; \\ s_0' &= \frac{(n-1)}{n} f_0', \end{aligned} \tag{1.6}$$

где f_0' - фокусное расстояние объектива,
 f_1' и f_2' - фокусное расстояние первого и второго компонентов объектива, соответственно,
 d - расстояние между компонентами,
 s_0' - задний фокальный отрезок объектива.

ГЛАВА 2. ОПТИЧЕСКИЕ МОДУЛИ

2.1. Апланатические мениски

Как известно, у сферической поверхности имеется три пары сопряженных точек, для которых исправлена сферическая абберация и выполняется условие синусов. Эти точки называются апланатическими (рис. 2.1.1).

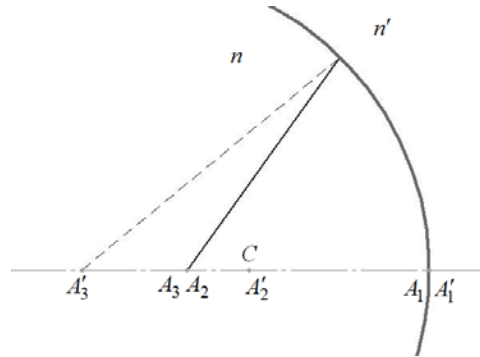


Рисунок 2.1.1. Апланатические точки сферической поверхности

Для первой пары апланатических точек A_1 и A_1' выполняется условие $s_1 = s_1' = 0$, то есть вершина гомоцентрического пучка лучей находится в вершине поверхности, там же находится и ее изображение.

Вторая пара сопряженных апланатических точек A_2 и A_2' находится в центре кривизны.

Для третьей пары A_3 и A_3' выполняются условия:

$$s = r \left(1 + \frac{n'}{n} \right);$$

$$s' = r \left(1 + \frac{n}{n'} \right).$$
(2.1.1)

Используя свойства апланатических поверхностей, можно получить апланатические мениски (рис. 2.1.2).

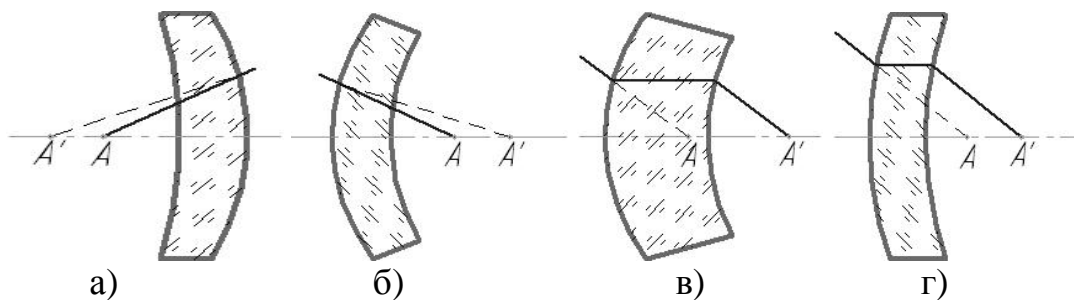


Рисунок 2.1.2. Оптические схемы апланатических менисков:

$$а) \beta = (n)^x; б) \beta = \left(\frac{1}{n} \right)^x; в) \beta = 1^x; г) \beta = 1^x$$

Рассмотрим полученные апланатические мениски.

1. Пусть первая поверхность мениска апланатическая II рода, а вторая – III рода (рис. 2.1.2 а), тогда:

$$\begin{aligned} r_1 &= s_1; \\ r_2 &= \frac{(s_1 - d)n}{(n + 1)}; \\ s'_2 &= (s_1 - d)n; \\ \beta &= (n)^x; \\ ds' &= (s_1 - d) \frac{(n - 1)}{\nu}, \end{aligned}$$

где r_1 и r_2 - радиусы поверхностей мениска,

d - толщина мениска,

n - показатель преломления материала мениска,

β - линейное увеличение мениска,

s_1 - положение точки предмета относительно первой поверхности мениска,

s'_2 - положение точки изображения относительно второй поверхности мениска,

$ds' = s'_{\lambda_2} - s'_{\lambda_1}$ - хроматизм положения,

ν - коэффициент средней дисперсии.

2. Если первая поверхность мениска апланатическая III рода, а вторая – II рода (рис. 2.1.2 б), то:

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{s_1}{(n + 1)}; \\ r_2 &= \frac{s_1}{n} - d; \\ s'_2 &= \frac{s_1}{n} - d; \\ \beta &= \left(\frac{1}{n}\right)^x \\ ds' &= -s_1 \frac{(n - 1)}{n^2 \nu}. \end{aligned}$$

3. В случае если обе поверхности мениска апланатические III рода (рис. 2.1.2 в), имеем:

$$r_1 = \frac{s_1}{(n + 1)};$$

$$r_2 = \frac{\left(\frac{s_1}{n} - d\right)n}{(n+1)};$$

$$s'_2 = \left(\frac{s_1}{n} - d\right)n;$$

$$\beta = 1^x$$

$$ds' = -d \frac{(n-1)}{v}.$$

4. Для случая, когда обе поверхности мениска апланатические II рода (рис. 2.1.2 г), имеем:

$$r_1 = s_1;$$

$$r_2 = s_1 - d;$$

$$s'_2 = s_1 - d;$$

$$\beta = 1^x$$

$$ds' = 0.$$

2.2. Квазиапланатическая линза

Квазиапланатическая линза в отличие от апланатических менисков применяется в тех случаях, когда предмет находится на бесконечности. Сферическая aberrация и кома у нее исправлена в области Зейделя (в области aberrаций третьего порядка).

Из условия коррекции комы ($W = 0$) находим радиусы такой линзы. Для этого раскроем выражение для W , из которого можно найти угол пересечения параксиального луча с осью α_2 , а затем по найденным углам α определить радиусы поверхностей:

$$W = \sum_1^2 \Delta\alpha\mu \frac{\Delta\alpha}{\Delta\mu} = \frac{\alpha^2\mu}{\mu-1} + (1-\alpha\mu) \frac{(1-\alpha_2)}{1-\mu} = 0, \quad (2.2.1)$$

где $\mu = \frac{1}{n}$, $\alpha_1 = 0$, $\alpha_3 = 1$.

Из выражения (2.2.1) находим α_2 :

$$\alpha_2 = \frac{n}{n+1}. \quad (2.2.2)$$

Далее, используя известную рекуррентную формулу, вытекающую из инварианта Аббе: $\alpha'n' - \alpha n = \frac{(n' - n)}{r} f'$, находим радиусы r_1 и r_2 :

$$r_1 = \frac{n^2 - 1}{n^2},$$

$$r_2 = \frac{n^2 - 1}{n^2 - n - 1}. \quad (2.2.3)$$

Для коррекции сферической аберрации в области Зейделя необходимо выполнить условие $P=0$. Для выполнения этого первую поверхность следует выполнить асферической второго порядка с уравнением:

$$y^2 = 2r_0z + (1 - e^2)z^2,$$

где e^2 - квадрат эксцентриситета асферической поверхности,

r_0 - радиус в вершине поверхности.

Следует заметить, что e^2 не влияет на величину W [1].

2.3. Линзы различной формы

В табл. 2.3.1 приведены числовые значения основных параметров P и W в зависимости от формы линз и изменения показателя преломления оптического материала (n). Были рассмотрены наиболее технологичные формы линз: выпуклоплоская, симметричная и плосковыпуклая. Следует заметить, что для линз отрицательной оптической силы (плосковогнутой, вогнутоплоской формы) числовые значения величин P и W такие же, как и для положительных линз.

Таблица 2.3.1. Зависимость P и W от формы линзы и n

Форма линзы	Выпуклоплоская линза		Симметричная линза		Плосковыпуклая линза	
	W	P	W	P	W	P
n						
1.50	-0.33	2.32	1.33	3.32	3.00	9.00
1.55	-0.17	1.96	1.32	3.07	2.82	7.94
1.60	-0.03	1.62	1.31	2.82	2.67	7.11
1.65	0.07	1.50	1.30	2.66	2.54	6.44
1.70	0.16	1.36	1.29	2.52	2.43	5.90
1.75	0.24	1.26	1.28	2.39	2.33	5.44
1.80	0.30	1.17	1.28	2.35	2.25	5.06
1.85	0.37	1.11	1.27	2.33	2.18	4.74
1.90	0.42	1.06	1.27	2.27	2.11	4.46
1.95	0.46	1.03	1.26	2.21	2.05	4.21
2.00	0.50	1.00	1.26	2.00	2.00	4.00

Из рассмотрения табл. 2.3.1 вытекают интересные свойства линз.

Для плосковыпуклой линзы, обращенной выпуклой поверхностью к плоскости предмета, при изменении показателя преломления от 1.50 до 2.00 величина P изменяется от 2.32 до 1.00, W - от -0.33 до 0.50. При $n \approx 1.60$

величина $W \approx 0$, то есть кома исправлена.

При переворачивании линзы на 180° величины P и W существенно увеличиваются.

Общим является то, что с увеличением показателя преломления - величины P и W уменьшаются.

Интересное свойство симметричной линзы: величина W практически постоянна и близка к значениям 1.30 - 1.35.

Величины P и W вычислены для тонких линз ($d = 0$) по известным формулам при $\alpha_1 = 0$, $\alpha_3 = 1$, $h_1 = f' = 1$ [1]:

$$P = \sum_1^2 \left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta \frac{1}{n}} \right)^2 \Delta\alpha \frac{1}{n},$$

$$W = \sum_1^2 \left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta \frac{1}{n}} \right) \Delta\alpha \frac{1}{n}.$$

Тогда имеем:

для выпуклоплоской линзы - $\alpha_2 = \frac{1}{n}$,

для симметричной линзы - $\alpha_2 = \frac{1}{2n}$,

для плосковыпуклой линзы - $\alpha_2 = 0$.

ГЛАВА 3. КОМПЕНСАТОРЫ АБЕРРАЦИЙ

3.1. Компенсаторы сферической aberrации

Для коррекции сферической aberrации объективов (зеркальных, зеркально-линзовых, линзовых) могут быть использованы линзовые афокальные компенсаторы, располагаемые перед объективами в параллельных пучках лучей.

Первый тип афокального компенсатора представляет собой *трехлинзовый несклеенный компонент*, включающий две одинаковые линзы, симметрично расположенные относительно симметричной линзы противоположной оптической силы, причем все линзы выполнены из одного материала (рис. 3.1.1) [9].

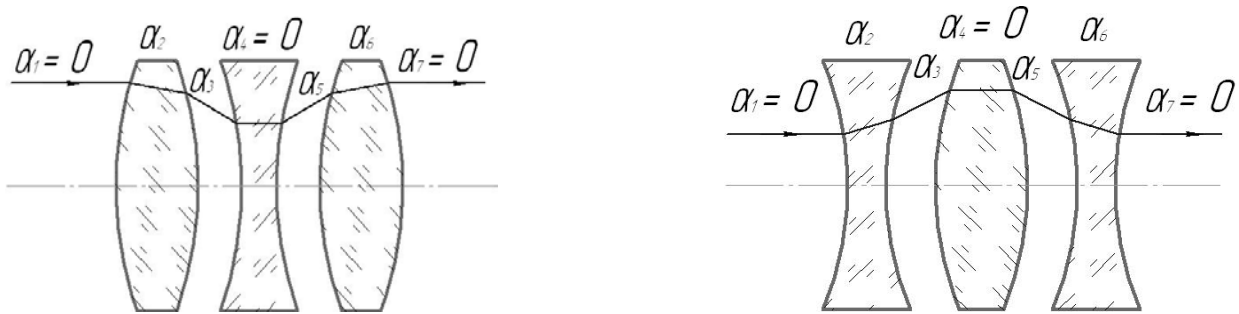


Рисунок 3.1.1. Афокальные симметричные несклеенные компенсаторы

Раскрыв выражения для основных параметров P , W и C , принимая во внимание условие симметрии компенсатора $\alpha_1 = \alpha_4 = \alpha_7 = 0$, $\alpha_2 = -\alpha_6$, $\alpha_3 = -\alpha_5$ и $n_1 = n_2 = n_3$, получаем:

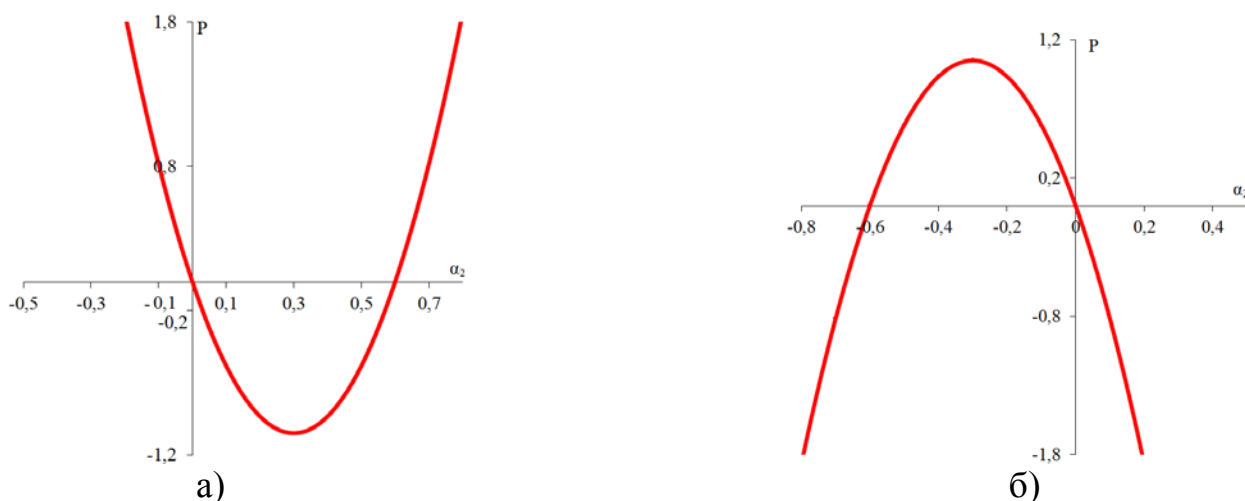
$$W = \sum_1^6 \left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta\frac{1}{n}} \right) \Delta\alpha \frac{1}{n} = 0,$$

$$P = \sum_1^6 \left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta\frac{1}{n}} \right)^2 \Delta\alpha \frac{1}{n} = 2 \frac{n^2}{(n-1)^2} \left[\frac{\alpha_2^3}{n} - \alpha_3^3 + (\alpha_3 - \alpha_2)^2 \left(\alpha_3 - \frac{\alpha_2}{n} \right) \right], \quad (3.1.1)$$

$$C = \sum_1^6 \left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta\frac{1}{n}} \right) \Delta \frac{dn}{n} = 0.$$

Из (3.1.1) следует, что такой компенсатор кроме сферической aberrации не вносит других aberrаций. Таким образом, величина P является функцией

двух переменных α_2 и α_3 . На рис. 3.1.2 приведены графики зависимостей $P = f(\alpha_2)$ при $\alpha_3 = 0.5$ и $n = 1.75$ и при $\alpha_3 = -0.5$ и $n = 1.75$.



а) $P = f(\alpha_2)$ при $\alpha_3 = 0.5$ и $n = 1.75$; б) $P = f(\alpha_2)$ при $\alpha_3 = -0.5$ и $n = 1.75$

Если принять условие, что $\alpha_2 = \alpha_3$, то зависимость $P = f(\alpha_2, \alpha_3)$ принимает вид:

$$P = -2 \frac{2n}{(n-1)} \alpha_{2,3}^3. \quad (3.1.2)$$

На рис. 3.1.3 приведен график зависимости $P = f(\alpha_2, \alpha_3)$ при $\alpha_2 = \alpha_3$ и $n = 1.75$.

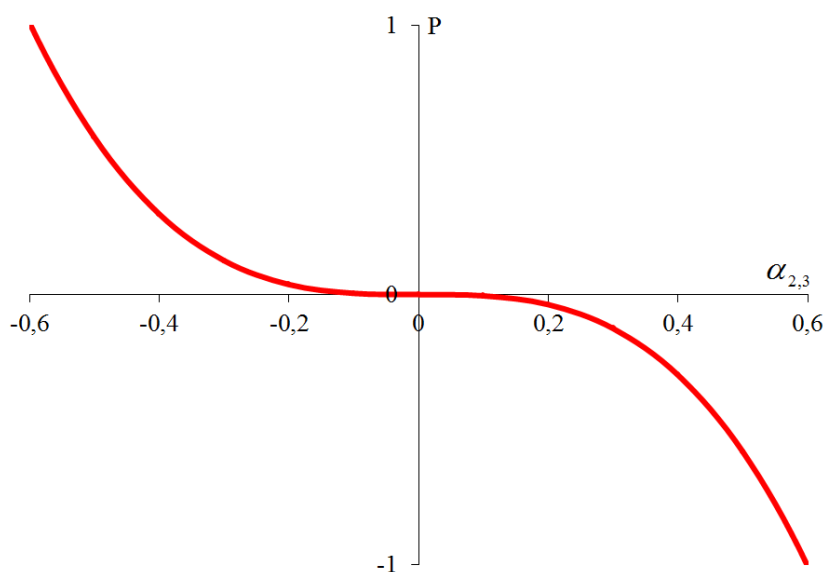


Рисунок 3.1.3. График зависимости $P = f(\alpha_2, \alpha_3)$ при $\alpha_2 = \alpha_3$ и $n = 1.75$

Таким образом, для коррекции сферической аберрации после определения необходимого значения величины P компенсатора из (3.1.1)

или (3.1.2) определяются α_2 и α_3 , а затем по известным рекуррентным формулам числовые значения радиусов поверхностей.

Второй тип афокального компенсатора представляет собой *трехлинзовый склеенный компонент*, включающий две одинаковые линзы, симметрично расположенные относительно симметричной линзы противоположной оптической силы (рис. 3.1.4).



Рисунок 3.1.4. Афокальные симметричные склеенные компенсаторы

Раскрывая выражения для величин основных параметров P , W и C , получаем:

$$W = \sum_1^4 \left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta \frac{1}{n}} \right) \Delta\alpha \frac{1}{n} = 0,$$

$$P = 2n_2 \left[\frac{1}{(1-n_2)^2} - \frac{n_3^2}{(n_2-n_3)^2} \right] \alpha_2^3, \quad (3.1.3)$$

$$C = \sum_1^4 \left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta \frac{1}{n}} \right) \Delta \frac{dn}{n} = 0.$$

На рис. 3.1.5 приведен график зависимости $P = f(\alpha_2)$ при $n_2 = 1.5900$ (КФ7) и $n_3 = 1.7460$ (СТК9).

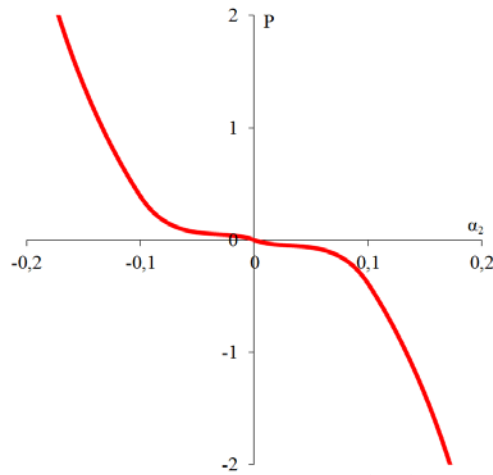


Рисунок 3.1.5. График зависимости $P = f(\alpha_2)$ при $n_2 = 1.5900$ (КФ7) и $n_3 = 1.7460$ (СТК9)

Для того, чтобы такой компенсатор не вносил хроматических aberrаций ($C = 0$) необходимо выполнение условия $\nu_1 \approx \nu_2$, а $n_1 \neq n_2$.

Таковыми парами оптических стекол, например, являются:

КФ7 $n_e = 1.5900$; $\nu_e = 50.9$,

СТК9 $n_e = 1.7460$; $\nu_e = 50.0$;

или

БФ4 $n_e = 1.5480$; $\nu_e = 52.9$,

СТК7 $n_e = 1.6900$; $\nu_e = 53.3$.

Преимуществом рассмотренных афокальных компенсаторов сферической aberrации, располагаемых перед оптической системой, по сравнению с известными компенсаторами [10], является то, что они корригируют сферическую aberrацию и не вносят других aberrаций, кроме того они не влияют на оптическую силу объектива и не сокращают его задний фокальный отрезок.

3.2. Компенсаторы кривизны поверхности изображения

Для обеспечения плоского поля изображения в области Зейделя необходимо выполнение следующих условий $S_3 = S_4 = 0$, что вытекает из рассмотрения меридиональной и сагиттальной составляющих астигматизма z'_m и z'_s бесконечно тонких пучков лучей [2]:

$$z'_m = f'(3S_3 + S_4)tg^2\omega_1;$$

$$z'_s = f'(S_3 + S_4)tg^2\omega_1,$$

где f' - фокусное расстояние,

ω_1 - полевой угол.

Для одного тонкого компонента кривизна поверхности равна

$$S_4 \approx \pi \approx \frac{1}{n} \approx 0.65 \div 0.7 \text{ [1].}$$

Тогда для коррекции кривизны поверхности тонкого компонента необходимо ввести компенсатор, у которого величина S_4 противоположного знака.

Компенсатор кривизны поверхности изображения

Компенсатор выполнен в виде «толстого» мениска, образованного апланатическими поверхностями третьего рода (рис. 3.2.1) [4, 5].

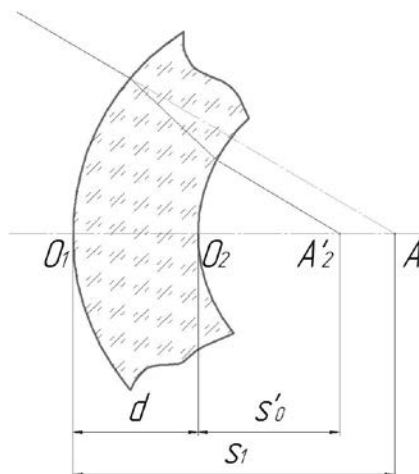


Рисунок 3.2.1. Компенсатор кривизны поверхности изображения

Такой мениск располагается в сходящемся пучке лучей и может быть расположен перед оптической системой, внутри системы или в конце системы.

Раскрыв выражение для S_4 такого мениска, получаем:

$$S_4 = -\sum_1^2 \frac{\Delta \frac{1}{n}}{r} = -\left[\frac{\frac{1}{n} - 1}{r_1} + \frac{1 - \frac{1}{n}}{r_2} \right]. \quad (3.2.1)$$

Раскрывая выражения для r_1 и r_2 и принимая во внимание, что обе поверхности мениска апланатические третьего рода, получаем:

$$\begin{aligned} s_1 &= r_1(1+n) \Rightarrow r_1 = \frac{s_1}{1+n}; \\ s'_1 &= \frac{s_1}{n}; \quad s_2 = s'_1 - d = \frac{s_1}{n} - d; \\ s_2 &= r_2 \left(1 + \frac{1}{n}\right) \Rightarrow r_2 = \frac{s_2}{\left(1 + \frac{1}{n}\right)} = \frac{\frac{s_1}{n} - d}{1 + \frac{1}{n}}. \end{aligned} \quad (3.2.2)$$

Подставляя значения r_1 и r_2 из (3.2.1) в (3.2.2), находим значение толщины мениска d .

Тогда конструктивные параметры системы равны (3.2.3) [6, 7]:

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{s_1}{n}; \\ r_2 &= \frac{n}{1+n} \left(\frac{s_1}{n} - d \right); \\ d &= \frac{s_1}{n} + \frac{1}{n \left[S_4 \frac{n}{(n^2-1)} - \frac{1}{s_1} \right]}, \end{aligned} \quad (3.2.3)$$

где s_1 - положение предмета относительно вершины первой поверхности мениска,

r_1, r_2 - радиусы кривизны мениска,

d - толщина мениска,

n - показатель преломления мениска,

S_4 - величина суммы Зейделя, определяющая кривизну поверхности мениска.

Следует заметить, что такой мениск не вносит сферическую аберрацию, кому и астигматизм третьего порядка, так как обе его поверхности апланатические третьего рода [4].

Афокальный компенсатор кривизны поверхности изображения. Компенсатор включает две одинаковые телескопические линзы, расположенные симметрично относительно диафрагмы, установленной между ними (рис. 3.2.2). Компенсатор установлен перед объективом в параллельном ходе лучей [11].

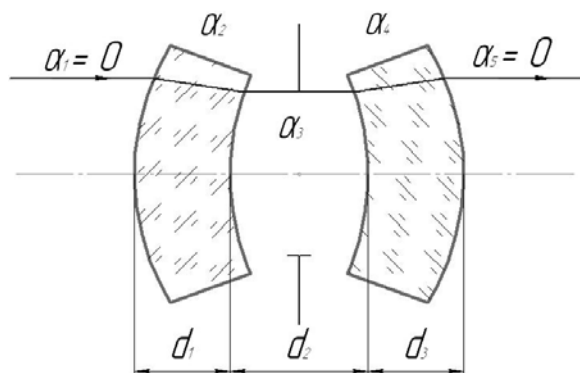


Рисунок 3.2.2. Компенсатор кривизны поверхности изображения

Определим конструктивные параметры такого афокального компенсатора.

Конструктивные параметры телескопической линзы равны:

$$r_1 = r_2 + \frac{n-1}{n}d. \quad (3.2.4)$$

Величина S_4 телескопической линзы (3.2.5) [8, 11]:

$$S_4 = \left(1 - \frac{1}{n}\right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right). \quad (3.2.5)$$

Для всего компенсатора величина четвертой суммы Зейделя имеет вид:

$$S_4 = 2 \left(1 - \frac{1}{n}\right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right). \quad (3.2.6)$$

Используя (3.2.4) и (3.2.6), варьируя величинами r_1 , d и n , добиваются нужного значения величины S_4 . Такой афокальный компенсатор свободен от комы, дисторсии и хроматизма увеличения в силу симметрии оптической схемы.

Сферическая aberrация компенсатора может быть устранена заменой сферических выпуклых поверхностей на асферические второго порядка. Хроматизм положения может быть исправлен путем введения в обеих телескопических линзах «хроматических» поверхностей (рис. 3.2.3) [11].

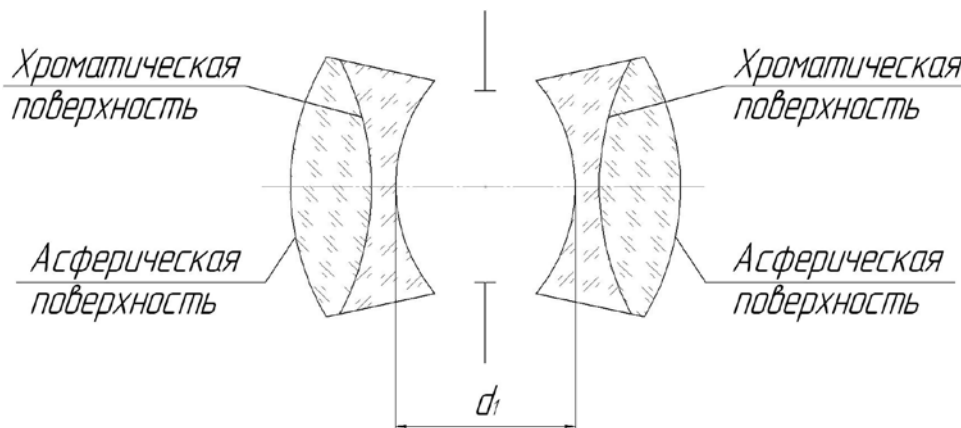


Рисунок 3.2.3. Компенсатор кривизны поверхности изображения с исправленной сферической aberrацией и хроматизмом положения

Следует заметить также, что у рассмотренных компенсаторов величина $S_3 < 0$ и линейно зависит от воздушного промежутка d .

3.3. Компенсаторы хроматических aberrаций

Для коррекции хроматических aberrаций объектива весьма эффективно применение гиперхроматической линзы, размещенной в параллельном ходе.

Гиперхроматическая линза представляет собой плоскопараллельную пластину, склеенную из оптических материалов, у которых показатели преломления для основной длины волны близки, а коэффициенты средней дисперсии – различны.

На рис. 3.3.1 приведена оптическая схема, включающая гиперхроматическую линзу (компенсатор хроматических aberrаций) и объектив в виде тонкого компонента.

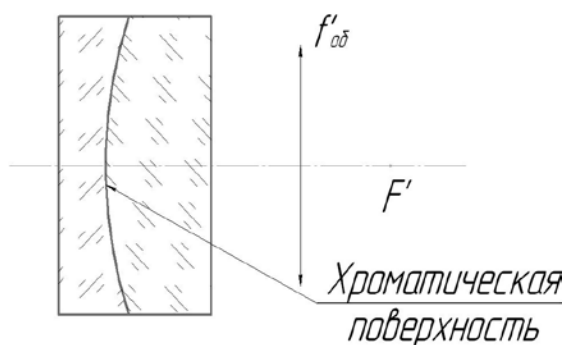


Рисунок 3.3.1. Компенсатор хроматических aberrаций и объектив в виде тонкого компонента

Хроматизм положения, внесенный гиперхроматической линзой в фокальную плоскость объектива, определяется:

$$ds' = f'^2 \frac{\Delta dn}{r_{xp}} = f'^2 \frac{(n-1)}{r_{xp}} \left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right), \quad (3.3.1)$$

где f' - фокусное расстояние объектива,

Δdn - разность средних дисперсий,

v_1, v_2 - коэффициенты средней дисперсии,

r_{xp} - радиус «хроматической» поверхности.

Следует отметить, что такой компонент не вносит в оптическую систему никаких монохроматических aberrаций, так как он расположен в параллельных пучках лучей.

С целью уменьшения сферохроматической aberrации можно ввести две или более «хроматических» поверхностей.

Наиболее распространенными хроматическими парами стекол являются:

ТК14 $n_e = 1.6155; v_e = 60.3,$

Ф1 $n_e = 1.6169; v_e = 36.7;$

или

СТК9 $n_e = 1.7460; v_e = 50.0,$

ТФ4 $n_e = 1.7462; v_e = 27.9.$

В случае необходимости коррекции и хроматизма увеличения следует применить компенсатор, состоящий из двух гиперхроматических линз, разделенных воздушным промежутком значительной величины (рис. 3.3.2).

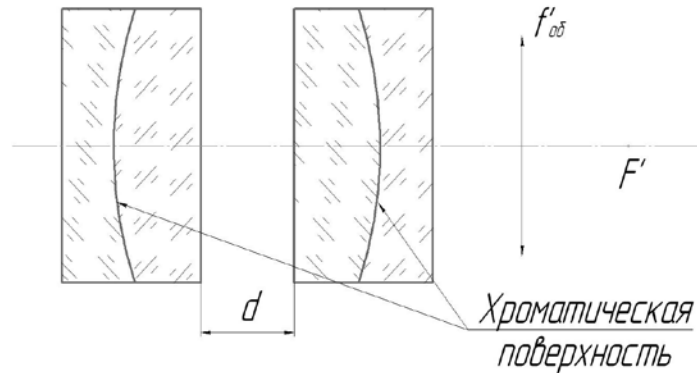


Рисунок 3.3.2. Компенсатор хроматических aberrаций, состоящий из двух гиперхроматических линз, разделенных воздушным промежутком значительной величины, и объектив в виде тонкого компонента

Кроме рассмотренных компенсаторов хроматизма, могут быть использованы компенсаторы сферической aberrации (рис. 3.1.1 и 3.1.4), в оптических схемах которых использованы линзы из стекол с различными коэффициентами дисперсии $\nu_1 \neq \nu_2$.

В ряде случаев для коррекции хроматических aberrаций целесообразно использовать введение «хроматических» поверхностей в рассмотренные во второй главе оптические модули.

В случае расположения гиперхроматической линзы в сходящемся пучке лучей, в конце оптической схемы объектива или внутри его, величина хроматизма положения определяется по (3.3.2):

$$ds' = \frac{s_1^2}{r_{xp}} (dn_1 - dn_2),$$

или

$$ds' = \frac{s_1^2}{r_{xp}} (n - 1) \left(\frac{1}{\nu_1} - \frac{1}{\nu_2} \right), \quad (3.3.2)$$

где s_1 - расстояние от пластинки до предмета,

dn_1, dn_2 - средние дисперсии,

ν_1, ν_2 - коэффициенты средней дисперсии,

r_{xp} - радиус «хроматической» поверхности.

Однако, плоскопараллельная пластинка в сходящемся пучке лучей вносит все монохроматические aberrации.

ГЛАВА 4. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, РАССЧИТАННЫЕ НА ОСНОВЕ МОДУЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Используя основные положения геометрической оптики и теорию aberrаций на основе модульного принципа проектирования, изложенного в первой главе, а также свойства оптических модулей и компенсаторов aberrаций, были рассчитаны оптические системы различного назначения.

В данной главе приводятся оптические схемы, конструктивные параметры и aberrации оптических систем: конденсоров с улучшенной коррекцией комы; широкоугольных окуляров микроскопа с увеличенным удалением выходного зрачка с астигматической и ортоскопической коррекцией aberrаций; гиперхроматических объективов микроскопа для ближней ИК области спектра; планахроматического объектива микроскопа с большим рабочим расстоянием; светосильных объективов.

4.1. Конденсоры с улучшенной коррекцией комы

При расчете конденсоров, как правило, коррекции подлежат сферическая aberrация и кома. Недостатком конденсоров, рассчитанных на минимум сферической aberrации, является то, что основной параметр, определяющий кому, независимо от количества линз, не равен нулю. Это приводит к тому, что у конденсоров с высокой апертурой всегда имеется остаточная кома значительной величины [1].

Оптическая схема конденсоров, рассчитанных по модульному принципу, включает в себя квазиапланатическую линзу и в зависимости от числовой апертуры один или два апланатических мениска с увеличением

$\beta = \frac{1}{n}^{\times}$ [11]. Апланатические мениски не вносят сферической aberrации и комы. Квазиапланатическая линза также не вносит кому, а сферическая aberrация корригируется путем интерполяции коэффициента асферической поверхности.

Параметры квазиапланатической линзы определяются выражениями (2.2.3). Радиусы поверхностей апланатических менисков рассчитываются по формулам (2.1.1). Толщины линз и воздушных промежутков определяются из конструктивных соображений.

По такому принципу были рассчитаны три конденсора с апертурами 0.4, 0.65 и 0.8.

Рассчитанный конденсор с фокусным расстоянием 30 мм и апертурой 0.4 представляет собой положительную квазиапланатическую линзу. Оптическая схема конденсора представлена на рис. 4.1.1. Конструктивные параметры конденсора приведены в табл. 4.1.1. Остаточные aberrации для точки на оси приведены в таблице 4.1.2.

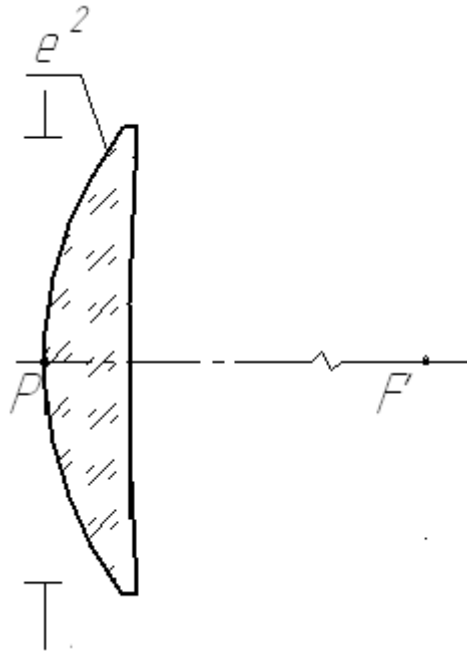


Рисунок 4.1.1. Оптическая схема конденсора

Таблица 4.1.1. Конструктивные параметры конденсора

r , мм	d , мм	Марка стекла	Показатели преломления
		Воздух	1
20.25 *	5	СТК9	1.746
203.15		Воздух	1

*) асферическая поверхность $e^2 = 0.527$

Таблица 4.1.2. Аберрации точки на оси конденсора

h , мм	$tg \sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$S'_{F'} - S'_{C'}$, мм
11.9	0.43	0	0	0.05	-0.61
8.4	0.29	0.024	0.007	-0.02	-0.59
0	0	0	0	0	-0.57

Конденсор с фокусным расстоянием 30 мм и апертурой 0.65 представляет собой положительную квазиапланатическую линзу и апланатический мениск с увеличением $\beta = \frac{1}{n}$. Оптическая схема конденсора представлена на рис. 4.1.2. Конструктивные параметры конденсора приведены в табл. 4.1.3. Остаточные аберрации для точки на оси приведены в таблице 4.1.4.

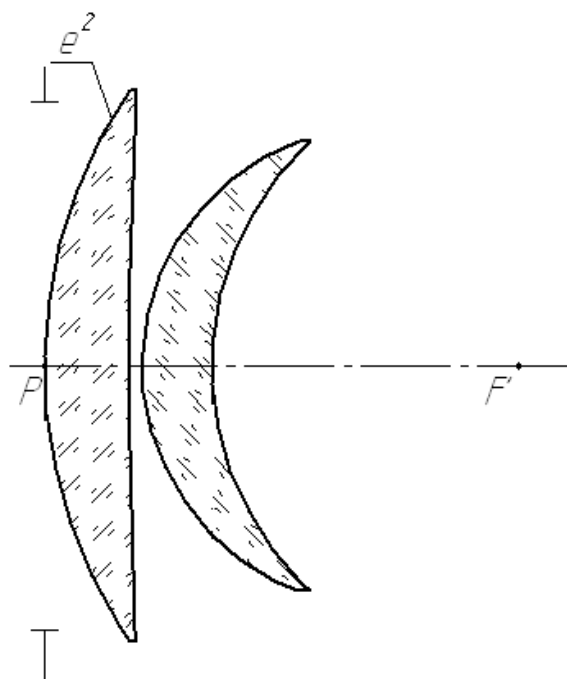


Рисунок 4.1.2. Оптическая схема конденсора

Таблица 4.1.3. Конструктивные параметры конденсора

r , мм	d , мм	Марка стекла	Показатели преломления
		Воздух	1
35.2*	6	СТК9	1.746
354.7	1	Воздух	1
17.48	5	СТК9	1.746
22		Воздух	1

*) асферическая поверхность $e^2 = 0.53$

Таблица 4.1.4. Аберрации точки на оси конденсора

h , мм	$tg \sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$S'_{F'} - S'_{C'}$, мм
19.3	0.85	0.009	0.008	0.06	-0.50
13.7	0.52	0.015	0.007	-0.01	-0.53
0	0	0	0	0	-0.56

Конденсор с фокусным расстоянием 30 мм и апертурой 0.8 представляет собой положительную квазиапланатическую линзу и два апланатических мениска с увеличением $\beta = \frac{1}{n}$. Оптическая схема конденсора представлена на рис. 4.1.3. Конструктивные параметры конденсора приведены в табл. 4.1.5. Остаточные аберрации для точки на оси приведены в таблице 4.1.6.

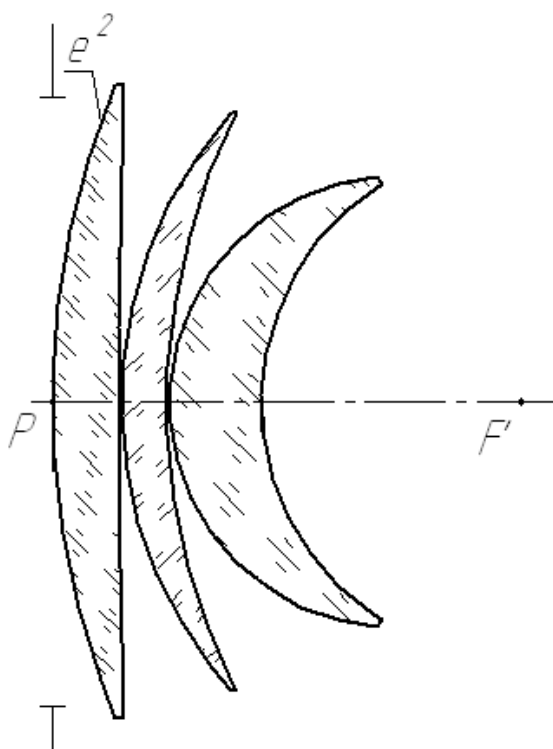


Рисунок 4.1.3. Оптическая схема конденсора

Таблица 4.1.5. Конструктивные параметры конденсора

r , мм	d , мм	Марка стекла	Показатели преломления
		Воздух	1
63.84 *	5	СТК9	1.746
643.3	0.2	Воздух	1
33.24	3.5	СТК9	1.746
48.78	0.2	Воздух	1
17.26	7	ТФ10	1.814
19.77		Воздух	1

*) асферическая поверхность $e^2 = 0.52$

Таблица 4.1.6. Аберрации точки на оси конденсора

h , мм	$tg\sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$S'_{F'} - S'_{C'}$, мм
23.9	1.33	-0.001	-0.002	-0.007	-0.62
16.9	0.68	0.0003	0.0002	-0.009	-0.73
0	0	0	0	0	-0.80

Из таблиц 4.1.2, 4.1.4 и 4.1.6 видно, что у конденсоров исправлены сферическая аберрация и кома, в отличие от конденсоров, рассчитанных на минимум сферической аберрации, у которых исправлена только сферическая аберрация.

4.2. Анастигматический, ортоскопический широкоугольный окуляр для микроскопа с большим удалением выходного зрачка

Оптическая схема окуляра представлена на рис. 4.2.1. Она состоит из гиперхроматической линзы и одиночной линзы. Форма линзы определяется из условия коррекции астигматизма и дисторсии.

Для коррекции этих aberrаций в области Зейделя необходимо выполнение условий $S_3 \approx S_5 \approx 0$.

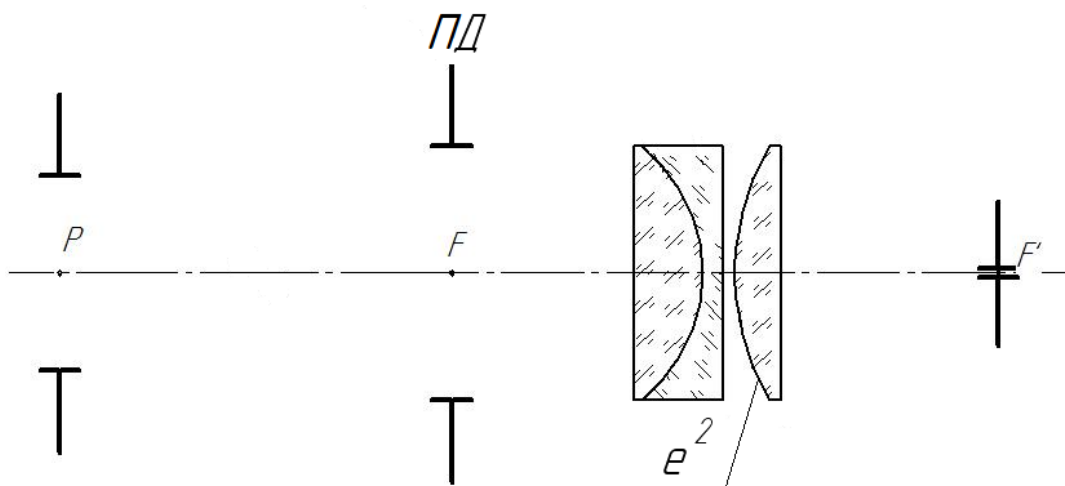


Рисунок 4.2.1. Оптическая схема окуляра

Из решения двух линейных уравнений относительно основных параметров линзы P и W при условии $\alpha_1 = 0$, $\beta_1 = 1$, $h_1 = f' = 1$, $H_1 = -1$, находим:

$$\begin{aligned} S_3 &= H^2 P + 2HW + 1 = 0, \\ S_5 &= H^3 P + 3H^2 W + 3.7H = 0 \end{aligned} \quad (4.2.1)$$

$P \approx 4.4$ и $W \approx 2.7$.

Из табл. 2.3.1 в главе 2 следует, что величиной $W \approx 2.7$ обладает плосковыпуклая линза с показателем преломления $n \approx 1.6 \div 1.7$.

Для обеспечения величины $P \approx 4.4$ сферическую поверхность заменяют на асферическую поверхность второго порядка с уравнением $y^2 = 2r_0 z + (1 - e^2)z^2$, где e^2 - квадрат эксцентриситета.

Путем интерполяции e^2 добиваются нужного значения P , при этом величина W не изменяется [5].

Коррекция хроматической aberrации увеличения осуществляется путем интерполяции радиуса хроматической поверхности.

В табл. 4.2.1 приведены конструктивные параметры окуляра с видимым увеличением $\bar{\Gamma} = 10^x$, линейным полем $2y' = 20$ мм и диаметром выходного зрачка $D' = 1$ мм. В табл. 4.2.2 приведены aberrации главного луча окуляра в обратном ходе.

Таблица 4.2.1. Конструктивные параметры окуляра

r , мм	d , мм	Марка стекла	Показатели преломления
		Воздух	1
∞	7.0	СТК9	1.7460
-14.41	2.0	ТФ4	1.7462
∞	1.0	Воздух	1
18.6512*	5.0	СТК9	1.7460
∞		Воздух	1

*) асферическая поверхность $e^2 = 1.228$

Таблица 4.2.2. Аберрации главного луча окуляра

ω , гр.мн	S_p , мм	S'_p , мм	y' , мм	z'_m , мм	z'_s , мм	$z'_s - z'_m$, мм	$\Delta\%$	$y'_{F'} - y'_{C'}$, мм
21°20'	-29.6	147	9.90	-1.28	-1.28	0	1.4	0.001
15°26'	-28.0	147	6.95	-0.59	-0.59	0	0.7	0.011
0	-26.4	147	0	0	0	0	0	0

4.3. Светосильные объективы

4.3.1. Светосильный объектив $f' = 100$ (мм), $D/f' = 1:2,5$, $2\omega = 6^\circ$

На рис. 4.3.1.1 приведена оптическая схема объектива, состоящая из гиперхроматической и квазиапланатической линз, а в табл. 4.3.1.1 приведены конструктивные параметры объектива, в табл. 4.3.1.2 и 4.3.1.3 - его аберрации.

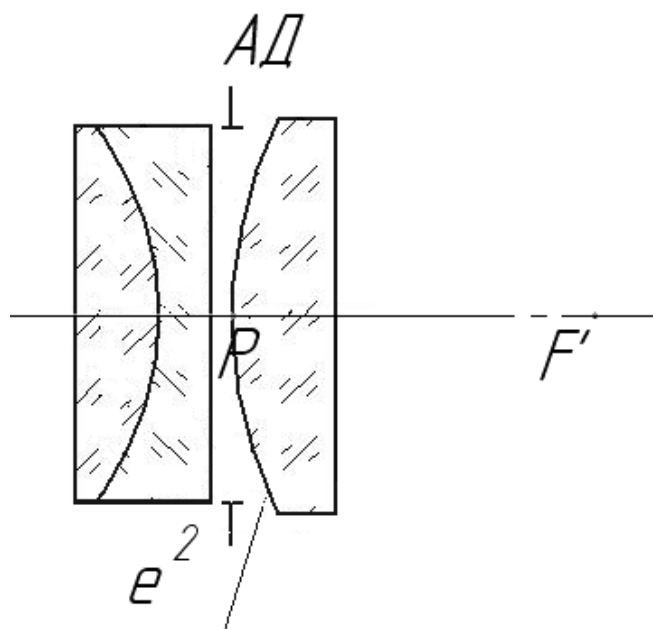


Рисунок 4.3.1.1. Оптическая схема объектива

Таблица 4.3.1.1. Конструктивные параметры объектива

r , мм	d , мм	Марка стекла	Показатели преломления
		Воздух	1
∞	5	СТК9	1.7460
-70.3	2	ТФ4	1.7462
∞	2	Воздух	1
*61.5	10	ТК16	1.6155
∞		Воздух	1

*) асферическая поверхность $e^2 = 0.61$

Таблица 4.3.1.2. Аберрации точки на оси объектива

h , мм	$tg\sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$S'_{F'} - S'_{C'}$
20	0.205	-0.01	-0.001	-0.07	0.005
14.14	0.143	0.01	0.001	-0.04	0
0	0	0	0	0	-0.004

Таблица 4.3.1.3. Аберрации точки вне оси объектива

ω , °	y' , мм	z'_s , мм	z'_m , мм	$z'_m - z'_s$, мм	$\Delta y'/y'$, %	$y'_{F'} - y'_{C'}$, мм
-3°	5.240	-0.22	-0.48	-0.26	-0.030	-0.005
-2°07'	3.701	-0.11	-0.24	-0.13	-0.020	-0.004
0	0	0	0	0	0	0

Из анализа табл. 4.3.1.2 и 4.3.1.3 следует, что у рассчитанного объектива достигнута высокая степень коррекции сферической аберрации и комы.

4.3.2. Светосильный объектив $f' = 100$ (мм), $D/f' = 1:2,8$, $2\omega = 10^\circ$

На рис. 4.3.2.1 приведена оптическая схема объектива, включающая гиперхроматическую линзу, квазиапланатическую линзу и апланатический

мениск с увеличением $\beta = \frac{1}{n}$. В табл. 4.3.2.1 приведены конструктивные параметры объектива, в табл. 4.3.2.2 и 4.3.2.3 – его аберрации.

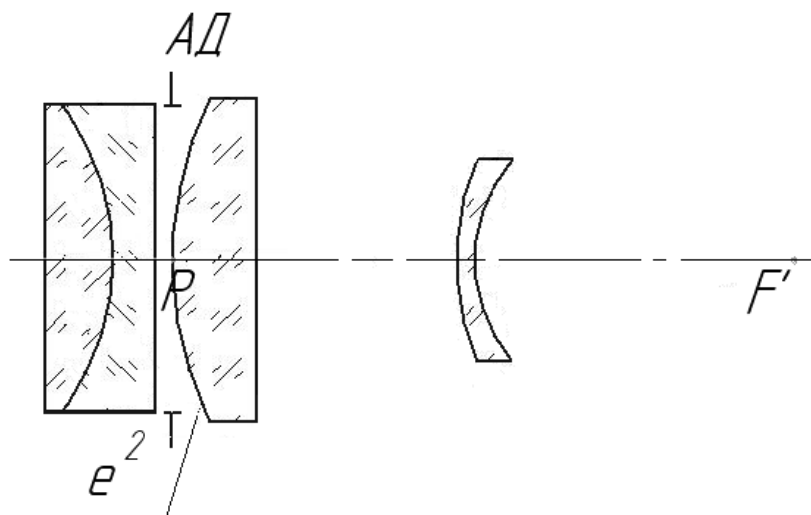


Рисунок 4.3.2.1. Оптическая схема объектива

Таблица 4.3.2.1. Конструктивные параметры объектива

r , мм	d , мм	Марка стекла	Показатели преломления
		Воздух	1
∞	8	СТК9	1.7460
-54.5	5	ТФ4	1.7462
∞	2	Воздух	1
42.68*	10	ТК16	1.6155
∞	34.83	Воздух	1
27.67	2	ЛК1	1.4414
15.15		Воздух	1

*) асферическая поверхность $e^2 = 0.604$

Таблица 4.3.2.2. Аберрации точки на оси объектива

h , мм	$tg\sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$S'_{F'} - S'_C$
18	0.183	-0.05	-0.009	-0.14	-0.01
12.73	0.128	0.01	0.002	-0.09	0
0	0	0	0	0	0.01

Таблица 4.3.2.3. Аберрации точки вне оси объектива

ω , °	y' , мм	z'_s , мм	z'_m , мм	$z'_m - z'_s$, мм	$\Delta y'/y'$, %	$y'_{F'} - y'_C$, мм
-5°	8.947	-0.03	-0.07	-0.04	2.17	0.011
-3°32'	6.254	-0.03	-0.09	-0.06	1.02	0.007
0	0	0	0	0	0	0

Из анализа табл. 4.3.2.2 и 4.3.2.3 следует, что у рассчитанного объектива достигнута высокая степень коррекции монохроматических аберраций:

сферической аберрации, комы, астигматизма, дисторсии и кривизны поверхности изображения.

4.3.3. Светосильный объектив $f' = 100$ (мм), $D/f' = 1:2$, $2\omega = 10^\circ$

На рис. 4.3.3.1 приведена оптическая схема объектива, состоящая из гиперхроматической линзы, квазиапланатической линзы, апланатического мениска с увеличением $\beta = n^x$ и апаланатического мениска с увеличением $\beta = \frac{1^x}{n}$. В табл. 4.3.3.1 приведены конструктивные параметры объектива, в табл. 4.3.3.2 и 4.3.3.3 – его аберрации.

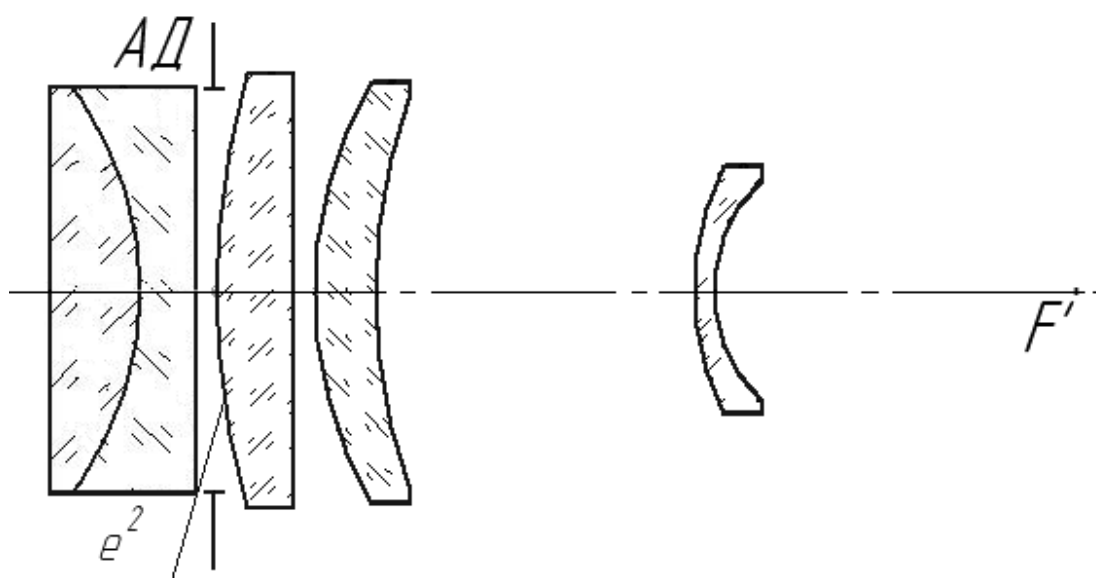


Рисунок 4.3.3.1. Оптическая схема объектива

Таблица 4.3.3.1. Конструктивные параметры объектива

r , мм	d , мм	Марка стекла	Показатели преломления
		Воздух	1
∞	8	СТК9	1.7460
-52.8	3	ТФ4	1.7462
∞	2	Воздух	1
74.52*	10	ТК16	1.6155
∞	2	Воздух	1
41.12	4	СТК9	1.7460
60.67	35.43	Воздух	1
25.24	1.5	ЛК1	1.4414
14.13		Воздух	1

*) асферическая поверхность $e^2 = 0.609$

Таблица 4.3.3.2. Аберрации точки на оси объектива

$h, \text{ мм}$	$\text{tg}\sigma'$	$\Delta s', \text{ мм}$	$\Delta y', \text{ мм}$	$\eta, \%$	$S'_{F'} - S'_{C'}$
25	0.258	-0.01	-0.002	-0.05	0.11
17.68	0.179	0.005	0.001	-0.03	0
0	0	0	0	0	-0.08

Таблица 4.3.3.3. Аберрации точки вне оси объектива

$\omega, ^\circ$	$y', \text{ мм}$	$z'_s, \text{ мм}$	$z'_m, \text{ мм}$	$z'_m - z'_s, \text{ мм}$	$\Delta y'/y', \%$	$y'_{F'} - y'_{C'}, \text{ мм}$
-5°	8.988	0.01	0.01	0	2.64	0.008
$-3^\circ 32'$	6.268	-0.02	-0.08	-0.06	1.24	0.005
0	0	0	0	0	0	0

4.4. Гиперхроматические объективы

Основной особенностью гиперхроматических объективов, в отличие от монохроматических, является то, что они обеспечивают дифракционное качество изображения для дискретных длин волн лазеров в пределах спектральной области без перефокусировки объектива (перемещения вдоль оптической оси). Величина хроматизма положения объектива определяет глубину сканирования среды вдоль оптической оси.

У гиперхроматических объективов ввиду малого углового поля обязательной коррекции подлежат сферическая аберрация, кома, кривизна поверхности.

При работе в спектральной области от 0.7 до $(1.0 \div 1.2)$ мкм возможно применять линзовые объективы, изготовленные из обычных марок стекол, так как они еще достаточно прозрачны для этой области спектра. Для области спектра от 1,2 мкм и более требуется применение специальных марок стекол и кристаллов (кварц, CaF_2 , LiF, MgO и др.).

Оптическая схема объектива с фокусным расстоянием 40 мм и передней апертурой 0.2 состоит из квазиапланатической линзы и гиперхроматической линзы. Квазиапланатическая линза не вносит кому, а сферическая аберрация исправляется коэффициентом асферической поверхности. Гиперхроматическая линза обеспечивает нужное значение хроматизма положения. Объектив рассчитан для спектрального диапазона $(0.8 \div 1.0)$ (мкм). Конструктивные параметры квазиапланатической линзы были рассчитаны по формулам (2.2.3).

На рисунке 4.4.1 представлена оптическая схема объектива. В табл. 4.4.1 представлены конструктивные параметры объектива. В табл. 4.4.2 и 4.4.3 приведены его остаточные аберрации. Значения аберраций вычислены в обратном ходе лучей. Объектив рассчитан для микроскопа с тубусом бесконечность.

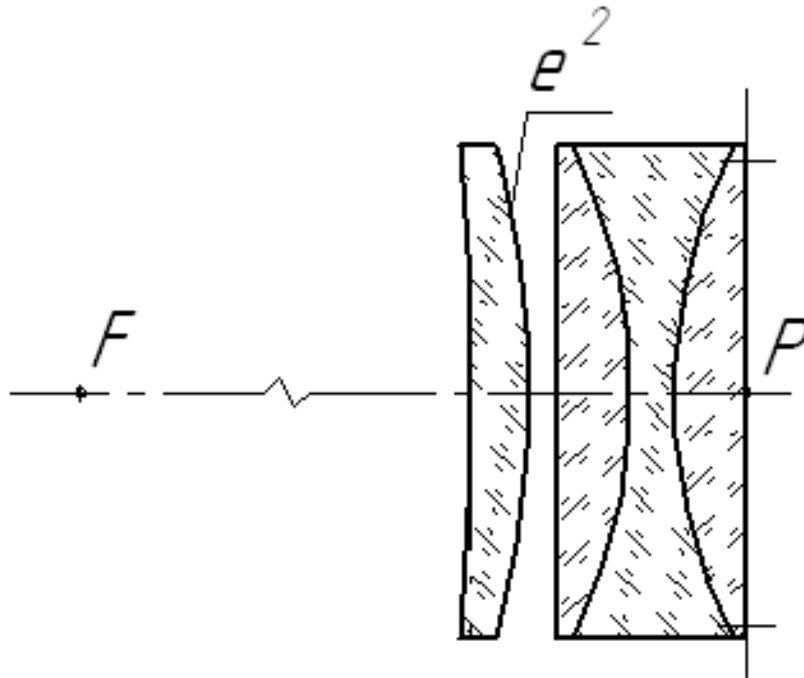


Рисунок 4.4.1. Оптическая схема гиперхроматического объектива

Таблица 4.4.1. Конструктивные параметры гиперхроматического объектива

r , мм	d , мм	Марка стекла	Показатели преломления
		Воздух	1
∞	2.5	ТФ5	1.733
-19	1.5	СТК19	1.730
19	2,5	ТФ5	1.733
∞	1	Воздух	1
31.17 *	2	СТФ3	2.117
102.05		Воздух	1

*) асферическая поверхность $e^2 = 0.355$

Таблица 4.4.2. Аберрации точки на оси гиперхроматического объектива

h , мм	$tg \sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$S'_{0,8} - S'_{1,0}$, мм	$W_{0,9}$, дл. волн	$W_{0,8}$, дл. волн	$W_{1,0}$, дл. волн
8.0	0.21	0.004	0.0008	0.10	-1.01	0.06	-0.18	0.19
5.6	0.14	0.003	0.0005	0.05	-1.0	0.02	-0.04	0.05
0	0	0	0	0	-0.98	0	0	0

Примечание: Волновые аберрации вычислены в параксиальной области изображения своей длины волны.

Таблица 4.4.3. Аберрации главного луча гиперхроматического объектива

ω	$y', \text{мм}$	$z'_m, \text{мм}$	$z'_s, \text{мм}$	$z'_s - z'_m, \text{мм}$
-1°	-0.68	-0.021	-0.009	0.012
$-42'$	-0.48	-0.010	-0.004	0.006
0	0	0	0	0

Как видно из таблиц 4.4.2 и 4.4.3, изображение находится в пределах глубины резкости. Сферическая аберрация и кома исправлены. Значения волновых аберраций для каждой длины волны удовлетворяют критерию Рэлея. Значение хроматизма положения достигает 1 мм.

Оптическая схема гиперхроматического объектива без асферических поверхностей с фокусным расстоянием 40 мм и передней апертурой 0.2 для спектрального диапазона (0.8 ÷ 1.0) мкм состоит из положительной линзы с исправленной комой и компенсатора сферической и хроматической аберраций. Конструктивные параметры одиночной линзы вычисляются по формулам (2.2.3). Конструктивные параметры компенсатора определяются из выражения (3.3.1) и рекуррентной формулы $\alpha'n' - \alpha n = h \frac{\Delta n}{r}$. Толщины линз выбираются из конструктивных соображений.

На рисунке 4.4.2 представлена оптическая схема объектива. Конструктивные параметры гиперхроматического объектива представлены в табл. 4.4.4. В табл. 4.4.5 и 4.4.6 приведены его остаточные аберрации. Значения аберраций представлены в обратном ходе лучей. Объектив рассчитан для микроскопа с тубусом бесконечность.

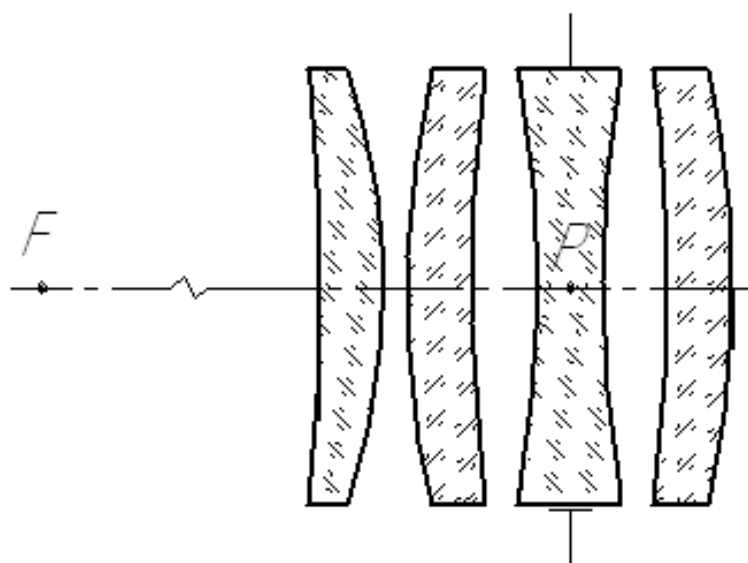


Рисунок 4.4.2. Оптическая схема гиперхроматического объектива

Таблица 4.4.4. Конструктивные параметры гиперхроматического объектива

r , мм	d , мм	Марка стекла	Показатели преломления
		Воздух	1
43.96	3	СТФ3	2.117
80.36	3	Воздух	1
-56.88	3	СТК19	1.730
56.88	3	Воздух	1
-80.36	3	СТФ3	2.117
-43.96	1	Воздух	1
31.08	3	СТФ3	2.117
99.1		Воздух	1

Таблица 4.4.5. Аберрации точки на оси гиперхроматического объектива

h , мм	$tg \sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$S'_{0,8} - S'_{1,0}$, мм	$W_{0,9}$, дл. волн	$W_{0,8}$, дл. волн	$W_{1,0}$, дл. волн
7.9	0.20	0.0008	0.0002	-0.26	-0.91	-0.09	-0.11	-0.07
5.6	0.14	-0.006	-0.001	-0.12	-0.91	-0.04	-0.05	-0.04
0	0	0	0	0	-0.91	0	0	0

Примечание. Волновые аберрации вычислены в параксиальной области изображения своей длины волны.

Таблица 4.4.6. Аберрации главного луча гиперхроматического объектива

ω	y' , мм	z'_m , мм	z'_s , мм	$z'_s - z'_m$, мм
-45'	-0.52	-0.009	-0.004	0.005
-31'	-0.36	-0.005	-0.002	0.003
0	0	0	0	0

Как видно из таблиц 4.4.5 и 4.4.6 изображение находится в пределах глубины резкости. Сферическая аберрация и кома исправлены, а значения волновых аберраций для каждой длины волны меньше четверти длины волны, что удовлетворяет критерию Релея и говорит о дифракционном качестве изображения. Значение хроматизма положения составляет 0.91 мм.

Гиперхроматический объектив с фокусным расстоянием 40 мм и передней апертурой 0.20 для спектрального диапазона (0.8 ÷ 1.0) мкм включает в себя квазиапланатическую линзу и апланатический мениск с

линейным увеличением $\beta = \frac{1}{n} \times$. Квазиапланатическая линза свободна от

комы и исправляет сферическую аберрацию системы за счет изменения коэффициента асферической поверхности. Мениск отрицательной силы не

вносит сферической аберрации и комы и позволяет удовлетворительно исправить астигматизм и кривизну поверхности. Конструктивные параметры линз вычисляются из выражений (2.2.3) и (3.3.1).

На рисунке 4.4.3 представлена оптическая схема объектива. Конструктивные параметры гиперхроматического объектива представлены в табл. 4.4.7. В табл. 4.4.8 и 4.4.9 приведены его остаточные aberrации. Значения aberrаций представлены в обратном ходе лучей. Объектив рассчитан для микроскопа с тубусом бесконечность.

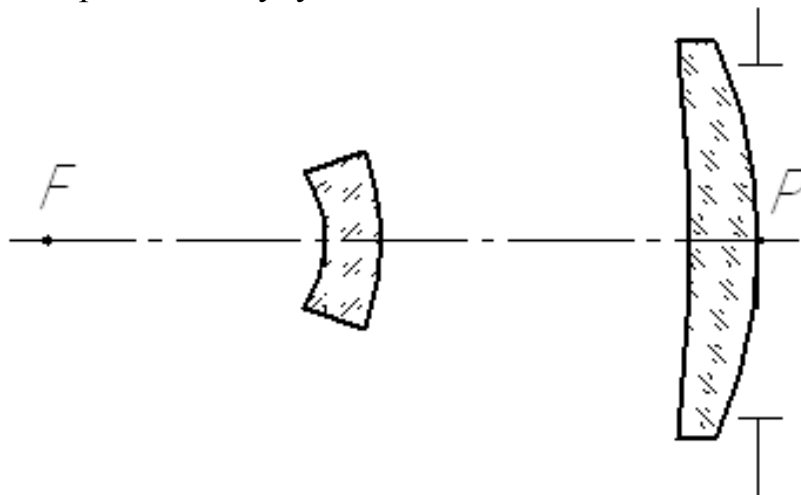


Рисунок 4.4.3 Оптическая схема гиперхроматического объектива

Таблица 4.4.7. Конструктивные параметры гиперхроматического объектива

r , мм	d , мм	Марка стекла	Показатели преломления
		Воздух	1
21.67*	3.1	СТФ3	2.117
71.13	13.9	Воздух	1
11.28	2.5	ЛК3	1.480
5.241		Воздух	1

*) асферическая поверхность $e^2 = 0.35$

Таблица 4.4.8. Абerrации точки на оси гиперхроматического объектива

h , мм	$tg \sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$S'_{0,8} - S'_{1,0}$, мм	$W_{0,9}$, дл. волн	$W_{0,8}$, дл. волн	$W_{1,0}$, дл. волн
8.0	0.21	-0.0007	-0.0001	0.08	-0.85	0.003	-0.18	0.18
5.6	0.14	0.002	0.0003	0.04	-0.84	0.002	-0.03	0.05
0	0	0	0	0	-0.82	0	0	0

Примечание. Волновые aberrации вычислены в параксиальной области изображения своей длины волны.

Таблица 4.4.9. Аберрации главного луча гиперхроматического объектива

ω	$y', \text{мм}$	$z'_m, \text{мм}$	$z'_s, \text{мм}$	$z'_s - z'_m, \text{мм}$
-2°	1.38	-0.016	0.005	0.021
$-1^\circ 24'$	0.98	-0.008	0.002	0.010
0	0	0	0	0

Анализируя таблицы 4.4.8 и 4.4.9, видно, что изображение находится в пределах глубины резкости. Сферическая аберрация и кома исправлены, а значения волновых аберраций для каждой длины волны меньше четверти длины волны, а значит, объектив создает изображение дифракционного качества. Значение хроматизма положения достигает 0.85 мм.

4.5. Планахроматические объективы

У объективов планахроматов для достижения требуемого качества изображения должны быть исправлены: сферическая аберрация, кома, астигматизм, кривизна поверхности [6].

Из рассмотрения выражений коэффициентов аберраций 3-го порядка S_1 , S_2 , S_3 и S_4 , определяющих монохроматические аберрации в области Зейделя, описанных в (1.4), вытекает, что оптическая система должна состоять из двух компонентов, разделенных воздушным промежутком конечной величины [2, 4, 6].

Планахроматический объектив с фокусным расстоянием 40 мм, передней апертурой 0.15 и линейным полем 3.5 мм для видимой области спектра состоит из квазиапланатической линзы и апланатического мениска с увеличением $\beta = n^*$. Фокусные расстояния компонентов вычислены по формулам (1.6). Радиусы кривизны квазиапланатической линзы вычислены по формулам (2.2.3), радиусы кривизны апланатического мениска вычислены из выражений (2.1.1).

Квазиапланатическая линза исправляет сферическую аберрацию объектива путем интерполяции коэффициента асферической поверхности, хроматизм положения исправляется введением в квазиапланатическую линзу хроматической поверхности. В этом случае, квазиапланатическая линза состоит из двух линз, выполненных из оптических материалов у которых показатели преломления для основной длины волны близки, а коэффициенты средней дисперсии различны [4].

На рисунке 4.5.1 представлена оптическая схема объектива. Конструктивные параметры планахроматического объектива представлены в табл. 4.5.1. В табл. 4.5.2 и 4.5.3 приведены его остаточные аберрации. Значения аберраций представлены в обратном ходе лучей. Объектив рассчитан для микроскопа с тубусом бесконечность.

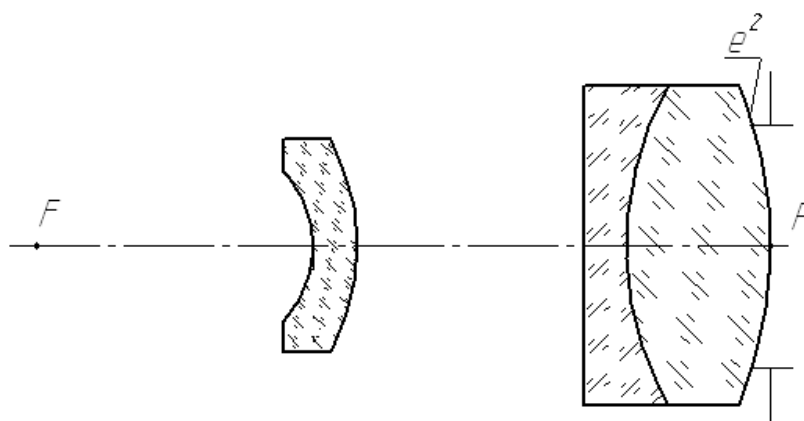


Рисунок 4.5.1. Оптическая схема ахроматического объектива

Таблица 4.5.1. Конструктивные параметры ахроматического объектива

r , мм	d , мм	Марка стекла	Показатели преломления
		Воздух	1
19.43*	6.78	СТК9	1.746
-15.12	2.0	ТФ4	1.746
1322.0	10.71	СТК9	1.746
10.56	2.0	К8	1.518
5.162		Воздух	1

*) асферическая поверхность $e^2 = 0.615$

Таблица 4.5.2. Аберрации точки на оси ахроматического объектива

h , мм	$tg \sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$S'_{F'-C'} - S'_{1,0}$, мм	W_e , дл. волн	$W_{F'}$, дл. волн	$W_{C'}$, дл. волн
5.2	0.13	-0.008	-0.001	0.18	0.09	-0.10	0.47	0.43
3.7	0.09	-0.005	-0.0004	0.08	0	-0.05	0.05	0.36
0	0	-0.01	0	0	-0.08	0	0	0

Таблица 4.5.3. Аберрации главного луча ахроматического объектива

ω	y' , мм	z'_m , мм	z'_s , мм	$z'_s - z'_m$, мм
-2°30'	1.76	0.012	0.009	-0.003
-1°46'	1.24	-0.001	-0.001	0
0	0	-0.01	-0.01	0

Анализируя таблицы 4.5.2 и 4.5.3, видно, что астигматизм почти исправлен. Сферическая аберрация и кома исправлены, а значения волновых аберраций для основной длины волны меньше четверти длины волны, а для цветных меньше половины длины волны, а значит, объектив создает изображение дифракционного качества. Хроматизм положения исправлен.

Планахроматический объектив с фокусным расстоянием 25 мм, передней апертурой 0.20 и линейным полем 2.6 мм для видимой области спектра состоит из плосковыпуклой линзы с асферической поверхностью и апланатического мениска с увеличением $\beta = n^x$ и компенсатора хроматической аберрации. Фокусные расстояния компонентов вычислены по формулам (1.6). Радиусы кривизны линз вычислены по формулам (2.1.1) и (2.2.3).

Плосковыпуклая линза исправляет сферическую аберрацию объектива путем интерполяции коэффициента асферической поверхности. Хроматизм положения исправляется компенсатором хроматической аберрации, выполненным из оптического материала, показатели преломления которых, для основной длины волны близки, а коэффициенты средней дисперсии различны [4].

На рисунке 4.5.2 представлена оптическая схема объектива. Конструктивные параметры планахроматического объектива представлены в табл. 4.5.4. В табл. 4.5.5 и 4.5.6 приведены его остаточные аберрации. Значения аберраций представлены в обратном ходе лучей. Объектив рассчитан для микроскопа с тубусом бесконечность.

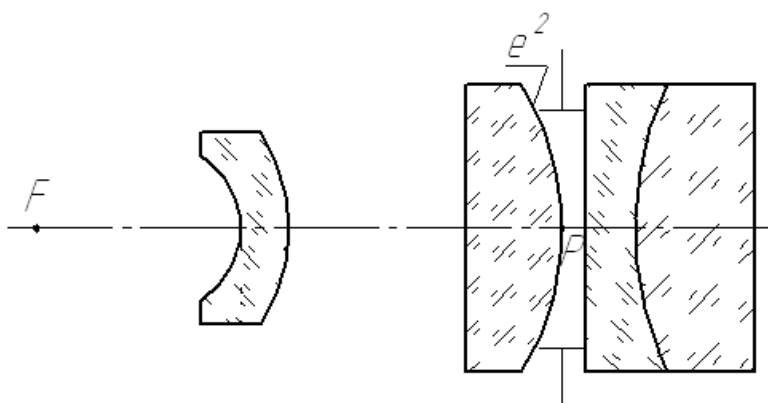


Рисунок 4.5.2. Оптическая схема планахроматического объектива

Таблица 4.5.4. Конструктивные параметры планахроматического объектива

r , мм	d , мм	Марка стекла	Показатели преломления
		Воздух	1
∞	5	СТК9	1.746
-13.86	2	ТФ4	1.746
∞	1	Воздух	1
11.45*	4	ТК20	1.625
∞	7.57	Воздух	1
7.32	2	ЛК1	1.441
3.58		Воздух	1

*) асферическая поверхность $e^2 = 0.59$

Таблица 4.5.5. Аберрации точки на оси ахроматического объектива

$h, \text{мм}$	$\text{tg}\sigma'$	$\Delta s', \text{мм}$	$\Delta y', \text{мм}$	$\eta, \%$	$S'_{F'-C'} - S'_{1,0}, \text{мм}$	$W_e, \text{дл. волн}$	$W_{F'}, \text{дл. волн}$	$W_{C'}, \text{дл. волн}$
4,75	0.19	-0.02	0.004	-0.10	-0.0007	-0.20	0.43	0.42
3.4	0.14	-0.003	-0.0004	-0.06	0.0002	-0.002	0.32	0.30
0	0	0	0	0	0.001	0	0	0

Таблица 4.5.6. Аберрации главного луча ахроматического объектива

ω	$y', \text{мм}$	$z'_m, \text{мм}$	$z'_s, \text{мм}$	$z'_s - z'_m, \text{мм}$
-3°	1.32	-0.026	-0.003	0.023
$-2^\circ 7'$	0.93	-0.015	-0.002	0.013
0	0	0	0	0

Анализируя таблицы 4.5.5 и 4.5.6 видно, что изображение находится в пределах глубины резкости. Сферическая аберрация и кома исправлены, значения волновых аберраций для основной длины волны меньше четверти длины волны, а для цветных меньше половины длины волны, а значит, объектив создает изображение дифракционного качества. Хроматизм положения исправлен.

4.6. Сферическое зеркало с компенсатором сферических аберраций

Необходимость применения компенсаторов сферической аберрации возникла при разработке зеркальных и зеркально-линзовых объективов [1-3]. В 40-х годах прошлого столетия Д.С. Волосовым и Д.Ю. Гальперном был предложен афокальный компенсатор, состоящий из двух линз со сферическими поверхностями из одного оптического материала. Однако этот компенсатор кроме коррекции сферической аберрации влияет на коррекцию комы, что в ряде случаев нежелательно. В связи с этим представляет интерес создание компенсатора, выполненного из сферических поверхностей, влияющего только на сферическую аберрацию. Эта задача может быть решена в афокальной симметричной трехлинзовой оптической системе на основе теории аберраций третьего порядка.

Причем, в случае склеенного компенсатора (рис. 4.6.1) в качестве оптических материалов для положительных линз используется оптическое стекло марки КФ7 ($n_e = 1.520$; $\nu_e = 50.9$), а для отрицательных – стекло СТК9 ($n_e = 1.746$; $\nu_e = 50.0$). Во втором варианте (рис. 4.6.2) для несклеенного компенсатора используется стекло марки СТК9 для всех линз.

На рисунке 4.6.1 представлена оптическая схема сферического зеркала с фокусным расстоянием 100 мм, относительным отверстием $D/f' = 1:1.25$ и склеенного афокального трехлинзового компенсатора. Конструктивные

параметры сферического зеркала и склеенного афокального трехлинзового компенсатора приведены в табл. 4.6.1. В табл. 4.6.2 приведены остаточные aberrации для точки на оси системы.

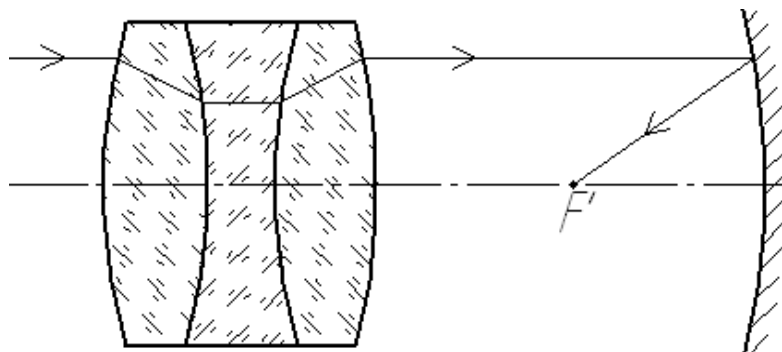


Рисунок 4.6.1. Оптическая схема сферического зеркала и склеенного афокального трехлинзового компенсатора

Таблица 4.6.1. Конструктивные параметры сферического зеркала и склеенного афокального трехлинзового компенсатора

r , мм	d , мм	Марка стекла	Показатели преломления
		Воздух	1
302.7	8	КФ7	1.520
-130	8	СТК9	1.746
130	8	КФ7	1.520
-302.7	192	Воздух	1
-200		-Воздух	-1

Таблица 4.6.2. Aberrации для точки на оси сферического зеркала и склеенного афокального трехлинзового компенсатора

h , мм	$tg \sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	W , дл. волн
34.0	0.36	-0.01	0.004	0	0.02
29.4	0.31	-0.001	0.0003	0	-0.13
24.0	0.25	0.003	-0.0008	0	-0.09
17.0	0.18	0.002	-0.0004	0	-0.002
0	0	0	0	0	0

Примечание:

1. Число Штреля $St=0.88$.

2. Волновые aberrации даны в плоскости, отстоящей от плоскости Гаусса на 3 мкм.

На рисунке 4.6.2 представлена оптическая схема сферического зеркала с фокусным расстоянием 100 мм, относительным отверстием $D/f' = 1:1.5$ и

несклеенного афокального трехлинзового компенсатора. Конструктивные параметры сферического зеркала и несклеенного афокального трехлинзового компенсатора приведены в табл. 4.6.3. В табл. 4.6.4 приведены остаточные aberrации для точки на оси системы.

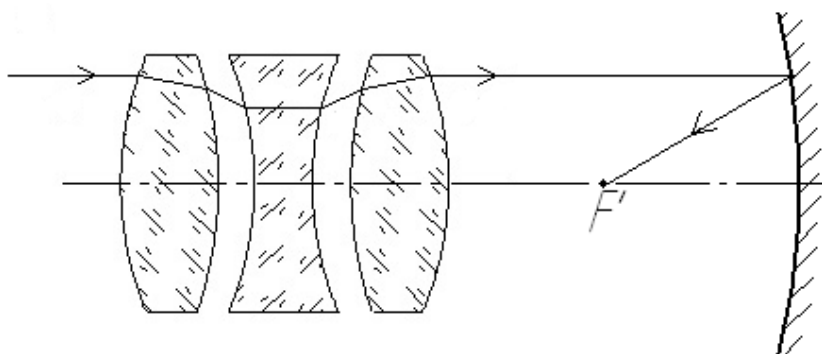


Рисунок 4.6.2. Оптическая схема сферического зеркала и несклеенного афокального трехлинзового компенсатора

Таблица 4.6.3. Конструктивные параметры сферического зеркала и склеенного афокального трехлинзового компенсатора

r , мм	d , мм	Марка стекла	Показатели преломления
		Воздух	1
294.6	8	СТК9	1.746
-1104	8	Воздух	1
-224.4	8	СТК9	1.746
224.4	8	Воздух	1
1104	8	СТК9	1.746
-294.6	184.8	Воздух	1
-200		-Воздух	-1

Таблица 4.6.4. Aberrации для точки на оси сферического зеркала и трехлинзового несклеенного компенсатора

h , мм	$tg \sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	W , дл. волн
40.0	0.44	-0.003	0.0013	0	-0.01
34.6	0.37	0.0003	-0.0001	0	-0.06
28.3	0.29	0.001	-0.0004	0	-0.02
20.0	0.20	0.0006	-0.0001	0	0.03
0	0	0	0	0	0

Примечание:

1. Число Штреля $St=0.95$.

2. Волновые aberrации даны в плоскости, отстоящей от плоскости Гаусса на 2.3 мкм.

В таблице 4.6.5 для сравнения представлены остаточные aberrации для точки на оси сферического зеркала с фокусным расстоянием 100 мм, относительным отверстием $D/f' = 1:1.5$ [7].

Таблица 4.6.5. Абберации для точки на оси сферического зеркала

$h, \text{мм}$	$\text{tg } \sigma'$	$\Delta s', \text{мм}$	$\Delta y', \text{мм}$	$\eta, \%$	$W, \text{дл. волн}$
40.0	0.43	2.06	-0.88	0	-156.0
34.6	0.36	1.53	-0.56	0	-86.3
28.3	0.29	1.01	-0.30	0	-37.7
20.0	0.20	0.50	-0.10	0	-9.3
0	0	0	0	0	0

Анализ таблиц 4.6.2, 4.6.4 и 4.6.5 показывает, что симметричные афокальные компенсаторы обеспечивают дифракционное качество изображения оптической системы со сферическим зеркалом вблизи оптической оси при относительных отверстиях $1:1.5 \div 1:1.25$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слюсарев Г.Г. Методы расчёта оптических систем. - Л: Машиностроение, 1969. – 690 с.
2. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. - Л: Машиностроение, 1975. – 639 с.
3. Русинов М.М. Композиция оптических систем. – Изд. 2-е. – Спб.: Книжный дом «Либроком», 2011. – 382 с.
4. Андреев Л.Н. Прикладная теория aberrаций. - Спб.: ИТМО, 2002. - 96 с.
5. Андреев Л.Н., Ежова В.В. Прикладная теория aberrаций. Часть вторая. - Спб.: НИУ ИТМО, 2011. - 57 с.
6. Андреев Л.Н., Ежова В.В., Дегтярева Г.С. Модульное проектирование оптических систем. - Известия вузов. Приборостроение, 2014. - Том 57, №3. - с. 57-62.
7. Андреев Л.Н., Ежова В.В., Дегтярева Г.С. Симметричные компенсаторы сферической aberrации. – Оптический журнал, 2015. – Том 82, №1. – с. 28-31.
8. Андреев Л.Н., Дегтярева Г.С. Афокальный компенсатор aberrаций. - Известия вузов. Приборостроение, 2015. - Том 58, №8. - с. 621-624.
9. Андреев Л.Н., Ежова В.В., Дегтярева Г.С. Афокальный компенсатор сферической aberrации. Патент на полезную модель №133947 от 31.05.2013.
10. Андреев Л.Н., Дегтярева Г.С. Афокальный компенсатор сферической aberrации. Патент на полезную модель №147777 от 15.11.2014.
11. Андреев Л.Н., Дегтярева Г.С. Афокальный компенсатор кривизны поверхности изображения. Патент на полезную модель №148389 от 30.11.2014.
12. Андреев Л.Н., Дегтярева Г.С. Квазиапланатическая одиночная линза. Патент на полезную модель №156256 от 16.06.2015.

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ

Кафедра прикладной и компьютерной оптики - одна из крупнейших кафедр российских ВУЗов, занимающихся задачами современной оптической науки.

Кафедра возникла при слиянии двух кафедр оптического факультета: теории оптических приборов и кафедры оптических приборов и компьютерной оптики. Поэтому на кафедре учат специалистов, имеющих самое широкое представление об оптике в целом, от проектирования оптических систем самого разного назначения до компьютерной обработки изображений и интерферограмм.

Овладение такими разнообразными знаниями невозможно без практической работы с приборами, и кафедра имеет в своем составе несколько учебно-исследовательских лабораторий.

В лаборатории оптических измерений и контрольно-измерительных приборов студенты получают знания и навыки в области метрологии, учатся измерять характеристики оптических систем и параметры деталей и материалов.

Лаборатория микроскопов и медицинских оптических приборов знакомит с различными типами микроскопов (поляризационными, биологическими, металлографическими), методами наблюдения микрообъектов и т.п., а также с приборами, применяемыми офтальмологами для диагностики зрения.

Лаборатория геодезических приборов позволяет получить начальные навыки работы с теодолитами, дальномерами и другими приборами, применяемыми в геодезии и картографии, узнать особенности проектирования различных их узлов и конструкции.

В лабораториях компьютерных средств контроля оптики и исследования качества оптического изображения занимаются проблемами контроля качества оптических поверхностей оптической системы в целом, а также компьютеризации и автоматизации этих процессов.

В учебном процессе используются научный потенциал и лабораторная база крупнейшего в России научного центра в области оптики - ВНЦ ГОИ им. С.И.Вавилова, ведущего оптического предприятия - ОАО «ЛОМО».

Достижения кафедры отмечены двумя Ленинскими премиями, пятью Государственными премиями, премией Совета Министров, премией французской Академии Наук. Кроме того, работы, выполненные на кафедре, отмечались многочисленными медалями и дипломами международных и российских выставок, медалями С.П.Королева, Ю.А.Гагарина, премиями Минвуза.

За период существования кафедры было подготовлено более 150 кандидатов наук, из них 30 иностранцев, а также 16 докторов наук. Большинство научных и производственных подразделений в области прикладной оптики в России, а также многие в США, Израиле и Китае возглавляют ученики нашей научной школы.

В настоящее время кафедра прикладной и компьютерной оптики факультета Лазерной и световой инженерии является одним из крупнейших подразделений Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, ориентированным на выпуск высококвалифицированных специалистов в области оптотехники.

С информацией о кафедре можно ознакомиться на сайте: aco.ifmo.ru.

Лев Николаевич Андреев
Ежова Василиса Викторовна
Дегтярева Галина Сергеевна

Прикладная теория аберраций. Часть третья

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

28.10.2016

Заказ №

3758

Тираж

80 экз.

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49