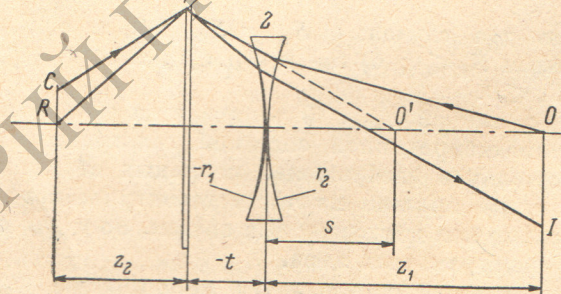


МОНОХРОМАТИЧЕСКИЕ АБЕРРАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЛИНЗА—ГОЛОГРАММА

Г. И. Грейсух

Получены выражения для коэффициентов первичных aberrаций оптической системы тонкая линза—голограмма. Приведен анализ возможности компенсации aberrаций как в системе без воздушного промежутка, так и в дублете с воздушным промежутком между компонентами. Показано, что в первом случае возможна полная компенсация всех монохроматических aberrаций, за исключением астигматизма, а во втором — при устраненной сферической aberrации частичная компенсация комы, астигматизма и кривизны поля или полная компенсация двух из них, например комы и астигматизма при значительном снижении третьей.

В работах [1, 2] показана принципиальная возможность компенсации монохроматических aberrаций в оптической системе, включающей разделенные тонкой воздушной прослойкой отрицательную стеклянную и осевую голографическую линзы. Настоящая работа посвящена теоретическому анализу aberrаций системы тонкая линза—голограмма наиболее общего вида.



Оптическая схема системы линза—голограмма.

1 — голограмма, 2 — компенсационная линза, O, R, C, I — объектный, опорный, восстанавливающий и восстановленный источники соответственно.

Оптическая схема системы представлена на рисунке. Предполагается, что только один из пучков, формирующих периодическую структуру голограммы, — O проходит через компенсационную линзу, опорный же пучок заводится на голограмму непосредственно (в противном случае система обладала бы сферической aberrацией). В общем случае оптическая сила компенсационной линзы может быть как положительной, так и отрицательной.

Схема записи голограммы может быть реализована при подаче одного из пучков со стороны голограммы с последующим его отражением от полупрозрачного зеркального слоя, нанесенного на подложку фотопластины или от полупрозрачного зеркала, установленного нормально к оси системы между фотопластиной и компенсационной линзой. Выбором формы

пучка обеспечивается соответствие отраженного волнового фронта требуемому опорному [1]. Кроме того, принципиально возможно синтезировать требуемую голографическую линзу при использовании оборудования и технологии применяемых в производстве полупроводниковых приборов [3].

Коэффициент поперечного увеличения дублета с тонкой компенсационной линзой описывается выражением

$$M = -\frac{z_1}{z_2} + \frac{t(f-z_1)}{fz_2}, \quad (1)$$

где f — фокусное расстояние тонкой линзы.

Если апертурная диафрагма, а следовательно, и входной зрачок системы расположены в плоскости голограммы, а система координат выбрана так, что ось z совпадает с оптической осью дублета и точка C лежит в плоскости xz ($y_c = 0$), то волновая aberrация голографической линзы, образованной источниками O' , R и восстанавливаемой из точки C , имеет вид

$$W_r = -\frac{1}{2} A_r \rho^2 \cos^2 \theta - \frac{1}{4} A_r \rho^2 + \frac{1}{2} C_r \rho^3 \cos \theta, \quad (2)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A_r &= -\frac{x_c^2}{z_2^2} \left(\frac{1}{s-t} + \frac{1}{z_2} \right), \\ C_r &= \frac{x_c}{z_2} \left[\frac{1}{(s-t)^2} - \frac{1}{z_2^2} \right], \\ s &= \frac{z_1 f}{f-z_1}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ρ , θ — полярные координаты в плоскости голограммы [4].

Используя общее выражение для волновой aberrации классической оптической системы, формулы коэффициентов первичных aberrаций тонкой линзы [5] и переходя от переменных Зайделя к переменным, принятым при анализе голограмм, получим выражение для волновой aberrации компенсационной линзы

$$W_x = A_x \frac{x_c^2}{z_2^2} \rho^2 \cos \theta + \frac{1}{2} F_x \frac{x_c^2}{z_2^3} \rho^2 - C_x \frac{x_c}{z_2} \rho^3 \cos \theta - D_x \frac{x_c^3}{z_2^3} \rho \cos \theta, \quad (4)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A_x &= h^4 l^2 U + 2h^2 l V + \frac{1}{2} P, \\ F_x &= h^4 l^2 U + 2h^2 l V + \frac{n+1}{2n} P, \\ C_x &= h^4 l U + h^2 V, \\ D_x &= h^4 l^3 U + 3h^2 l^2 V + l \frac{3n+1}{2n} P, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} U &= \frac{n^2}{8(n-1)^2} P^2 - \frac{n}{2(n+2)} K^2 P + \frac{1}{2n(n+2)} P \left[\frac{n+2}{2(n-1)} \sigma + 2(n+1) K \right]^2, \\ V &= \frac{1}{2n} P \left[\frac{n+1}{2(n-1)} \sigma + (2n+1) K \right], \\ K &= -\left(\frac{2}{2f} + \frac{1}{s} \right), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \\ \sigma &= (n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} h &= \frac{s}{t-s}, \\ l &= \frac{t(t-s)}{s}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

n — показатель преломления стекла.

Суммируя aberrации голограммы и линзы, получим выражение для волновой aberrации рассматриваемого дублета

$$W = -\frac{1}{2} A \rho^2 \cos^2 \theta - \frac{1}{4} F \rho^2 + \frac{1}{2} C \rho^3 \cos \theta + \frac{1}{2} D \rho \cos \theta, \quad (9)$$

где

$$A = -\frac{x_c^2}{z_2^2} \left[\frac{f - z_1}{z_1 f - t(f - z_1)} + \frac{1}{z_2} + 2A_x \right], \quad (10)$$

$$F = -\frac{x_c^2}{z_2^2} \left[\frac{f - z_1}{z_1 f - t(f - z_1)} + \frac{1}{z_2} + 2F_x \right], \quad (11)$$

$$C = \frac{x_c}{z_2} \left[\frac{(f - z_1)^2}{[z_1 f - t(f - z_1)]^2} - \frac{1}{z_2^2} - 2C_x \right], \quad (12)$$

$$D = -2 \frac{x_c^3}{z_2^3} D_x. \quad (13)$$

Анализ возможности компенсации aberrаций наклонных пучков проведем как для системы без воздушного промежутка, так и для дублета с воздушным промежутком между линзой и голограммой.

В первом случае, т. е. при $t \rightarrow 0$, дисторсия системы отсутствует, а выражения для коэффициентов астигматизма, кривизны поля и комы существенно упрощаются

$$A = -\frac{x_c^2}{z_2^2} \left(\frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_1} \right), \quad (14)$$

$$F = -\frac{x_c^2}{z_2^2} \left(\frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_1} + \frac{1}{nf} \right), \quad (15)$$

$$C = \frac{x_c}{z_2} \left(\frac{1}{z_1} - \frac{1}{z_2} - \frac{2}{z_1 f} + \frac{n - N}{nf^2} \right), \quad (16)$$

где

$$N = \frac{n + 1}{2(n - 1)} \beta + \frac{(2n + 1)(2f - z_1)}{2z_1}, \quad (17)$$

$$\beta = \sigma f. \quad (18)$$

Введенный здесь коэффициент β позволяет изменять кривизну рабочих поверхностей компенсационной линзы, оставляя неизменной ее оптическую силу. Последнее легко показать, комбинируя формулы (7) и (18)

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{2(n - 1)}{\beta + 1} f, \\ r_2 &= \frac{2(n - 1)}{\beta - 1} f. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Анализ выражений для коэффициентов aberrаций показывает, что в приближении тонкой линзы астигматизм рассматриваемой системы не зависит от оптической силы стеклянной линзы и равен астигматизму одиночной голограммы, объектный и опорный источники которой расположены в точках O и R соответственно.

Кривизна поля дублета может быть сведена к нулю отрицательной компенсирующей линзой, оптическая сила которой определяется из соотношения

$$\frac{1}{f} = -2n \left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} \right). \quad (20)$$

Кома системы может полностью компенсироваться как положительной, так и отрицательной стеклянной линзой, коэффициент формы ко-

торой β при выбранной оптической силе определяется из условия равенства нулю выражения (16)

$$\beta = \frac{2(n-1)}{n+1} \left[n \left(\frac{1}{z_1^2} - \frac{1}{z_2^2} \right) f^2 + \frac{1}{z_1} f - 0.5 \right]. \quad (21)$$

Таким образом, в оптической системе линза—голограмма, не имеющей воздушного промежутка между компонентами, возможна полная компенсация всех первичных монохроматических аберраций, за исключением астигматизма.

Введение воздушного промежутка между линзой и голограммой ($t \neq 0$) существенно изменяет аберрационные свойства системы. В этом случае возможна частичная компенсация трех аберраций наклонных пучков — комы, астигматизма и кривизны поля, или полная компенсация двух из них, например комы и астигматизма, при значительном снижении третьей.

Дисторсия системы в силу отсутствия этой аберрации у осевых голографических линз полностью определяется дисторсией стеклянной линзы, зависящей как от ее конструктивных параметров, так и от положения входного зрачка, т. е. от расстояния между линзой и голограммой.

Ввиду громоздкости выражений (10)—(13) представляется целесообразным исследовать аберрации в зависимости от параметров системы и оптимизацию этих параметров осуществлять численными методами с помощью ЭВМ. Алгоритм расчетов, использованный автором для анализа аберраций, позволял получать значения t , β , r_1 , r_2 , M , W_F и W_D в зависимости от z_1 , z_2 и f при полностью скомпенсированных аберрациях комы и астигматизма (W_F и W_D — остаточные кривизна поля и дисторсия соответственно). Расчеты проводились для систем с различными относительными отверстиями при значениях $x_c \leq \rho$.

Анализ полученных результатов показал, что кома и астигматизм системы могут полностью компенсироваться как положительной, так и отрицательной стеклянной линзой, причем абсолютное значение величины ее оптической силы может изменяться в широких пределах. Однако наибольший интерес представляют дублеты с отрицательной линзой, так как в этом случае и расстояние между компонентами системы и остаточные аберрации много меньше, чем при использовании собирающей линзы.

При $\infty \gg M > 1$ и $-\infty < f \leq -0.5 z_2$ расстояние между компонентами системы не превышает величины z_2 . С уменьшением абсолютной величины оптической силы линзы при постоянном увеличении системы остаточная кривизна поля сокращается, а $|t|$ и $|\beta|$ увеличиваются, последнее вызывает увеличение кривизны рабочих поверхностей компенсационной линзы. Очевидно, что с увеличением кривизны поверхностей линзы уменьшается апертура, в пределах которой приближения теории тонкой линзы справедливы, а отступление от закона синусов для крайних лучей пренебрежимо мало. Уменьшение апертуры при заданном разрешении в конечном счете приводит к сокращению полезного поля изображения системы. Следовательно, оптимальной является такая величина оптической силы компенсационной линзы, которая обеспечит минимальную суммарную остаточную аберрацию, включающую как остаточную кривизну поля, так и кому, вызванную отступлением от закона синусов в системе с реальной линзой.

С уменьшением коэффициента увеличения системы абсолютная величина оптической силы компенсационной линзы, при которой остаточная кривизна поля остается постоянной, изменяется незначительно, в то время как $|t|$ и $|\beta|$ возрастают, а радиусы кривизны поверхностей r_1 и r_2 уменьшаются. Следовательно, наибольшее полезное поле изображения дублета может быть получено при $M \rightarrow \infty$, т. е. $z_1 \gg z_2$.

Одновременная компенсация комы и астигматизма при $M < 1$ возможна лишь в дублете с положительной линзой. Однако в этом случае и расстояние между компонентами, и остаточная кривизна поля значительно превышают допустимые пределы, поэтому для получения уменьшенного изображения целесообразно дублет, записанный при $z_1 > z_2$, восстанавливать со стороны стеклянной линзы.

Дисторсия системы минимальна при $M = \infty$, но ее величина значительно превышает остаточную кривизну поля.

Приведенный выше анализ системы линза—голограмма может быть проиллюстрирован результатами расчетов, сделанных, в частности, для системы с параметрами $x_c = \rho = 2.5$ мм, $z_2 = 20$ мм, $n = 1.5$, $\lambda = 632.8$ нм, линейное разрешение в соответствующей плоскости ~ 3 мкм. Табл. 1 показывает изменение параметров системы и остаточных aberrаций при $M = \infty$ в зависимости от оптической силы компенсационной линзы. Табл. 2 отражает изменение значений f , t , β , r_1 , r_2 и W_D с уменьшением коэффициента увеличения системы при постоянной остаточной кривизне поля, равной 0.25λ .

Таблица 1

$-f$, мм	$-t$, мм	$-\beta$	r_1 , мм	r_2 , мм	$-W_F \lambda^{-1}$	$-W_D \lambda^{-1}$
250	14.644	31.595	8.171	7.669	0.106	4.543
150	13.459	15.403	10.414	9.144	0.171	4.941
100	12.492	8.894	12.764	10.168	0.255	5.446
50	10.999	3.543	19.666	11.007	0.513	7.054

Таблица 2

M	$-f$, мм	$-t$, мм	$-\beta$	r_1 , мм	r_2 , мм	$-W_D \lambda^{-1}$
∞	102.5	12.566	9.133	12.603	10.115	5.420
12	102.5	13.266	10.634	10.639	8.810	6.312
6	102.5	13.868	11.951	9.360	7.914	7.414
3	102	15.140	16.015	6.793	5.995	10.461
1.5	101.5	17.529	34.692	3.013	2.844	24.737

Задача оптимизации для системы с вышеприведенными параметрами решалась и в более общем виде, т. е. ограничения накладывались не на отдельные aberrационные коэффициенты, а на суммарную волновую aberrацию (за исключением дисторсии) в соответствии с критериями Рэля и Марешаля. Алгоритм расчета включал поиск по трем основным параметрам f , t и β . Полученные оптимальные значения этих параметров принципиально не отличались от представленных в табл. 2.

В заключение отметим, что оптимизация параметров данной системы методом машинного расчета хода лучей показала, что при толщине компенсационной линзы, не превышающей 0.1 мм, оптимальные конструктивные параметры близки к полученным теоретически.

Автор благодарен М. М. Бутусову и Ю. Г. Туркевичу за интерес к работе и полезные дискуссии.

Литература

- [1] Г. И. Грейсух, С. Т. Бобров. Письма ЖТФ, 2, 968, 1976.
- [2] Г. И. Грейсух. В кн.: Оптическая голография и ее применение в промышленности, 22. ЛДНТП, Л., 1976.
- [3] С. Т. Бобров, Б. Н. Котлецов, В. И. Минаков, Ю. Г. Туркевич. В кн.: Оптическая голография и ее применение в промышленности, 31. ЛДНТП, Л., 1976.
- [4] R. W. Meier. J. Opt. Soc. Am., 55, 987, 1965.
- [5] М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. «Наука», М., 1970.

Поступило в Редакцию 4 апреля 1977 г.