

РАСЧЕТ АХРОМАТИЧЕСКОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ИСПРАВЛЕННОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ АБЕРРАЦИЕЙ (часть 2)

Юрий Цыдыпович Батомункуев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физики, тел. (913)794-84-78, e-mail: opttechnic@mail.ru

Александра Алексеевна Печенкина

АО «Новосибирский приборостроительный завод», 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179/2, заместитель начальника лаборатории (в промышленности), тел. (923)107-79-46, e-mail: dianova.aleksandra@mail.ru

В работе рассматривается ахроматизация трехкомпонентной дифракционной системы, состоящей из одного толстого и двух тонких голограммных оптических элементов. Получены аналитические выражения для исправления хроматической aberrации положения толстого собирающего голограммного оптического элемента двумя рассеивающими тонкими голограммными оптическими элементами в заданном диапазоне спектра. Показано, что для такой трехкомпонентной системы ахроматизация достигается при использовании двух тонких голограммных элементов, расположенных симметрично по обе стороны от толстого элемента и имеющих величину рабочего дифракционного порядка больше чем отношение фокусного расстояния к расстоянию от тонкого элемента до плоскости изображения (на заданной длине волны). Предложенная трехкомпонентная голографическая система может быть использована для преобразования как мнимого изображения в действительное, так и действительного в мнимое изображение в заданных спектральных участках видимого, ультрафиолетового или инфракрасного диапазонов спектра.

Ключевые слова: хроматическая aberrация, дифракционный оптический элемент, голограммный оптический элемент, ахроматизация.

CALCULATION OF THE ACHROMATIC DIFFRACTION SYSTEM WITH CORRECTED SPHERICAL ABERRATION (part 2)

Yury Ts. Batomunkuev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, phone: (913)794-84-78, e-mail: opttechnic@mail.ru

Alexandra A. Pechenkina

Novosibirsk Instrument-making Plant, 179/2, D. Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049, Russia, Deputy Chief, phone: (913)794-84-78, e-mail: dianova.aleksandra@mail.ru

Achromatization of a three-component diffraction system consisting of one thick and two thin hologram optical elements is considered in the work. Analytical expressions are obtained for correcting the chromatic aberration of the position of a thick focusing hologram optical element by two scattering thin hologram optical elements in a given spectrum range. It is shown that achromatization is achieved for such a three-component system using two thin hologram elements located symmetrically on both sides of the thick element and having a value of the working diffraction order greater than the ratio of the focal length to the distance from the thin element to the image plane (at a given

wavelength). The proposed three-component holographic system can be used to convert both an imaginary image into a real image and a real into an imaginary image in predetermined spectral regions of the visible, ultraviolet or infrared ranges of the spectrum.

Key words: chromatic aberration, diffractive optical element, holographic optical element, achromatization.

Введение

Данная работа является продолжением нашей предыдущей публикации [1], в которой были представлены результаты расчетов в заданном диапазоне спектра осевой сферической aberrации пятого порядка светосильного толстого дифракционного оптического элемента для ахроматической дифракционной системы. В качестве толстого дифракционного оптического элемента нами рассматривался толстый голограммный оптический элемент, который являлся базовым элементом предложенной в [1] ахроматической дифракционной системы. Известно, что в отличие от толстых отражающих голограммных элементов [2 - 6] толстые пропускающие голограммные элементы имеют высокую дифракционную эффективность в относительно широкой спектральной области [3, 4, 7]. Было подчеркнуто в [1], что этот факт открывает возможность разработки дифракционных систем с исправленной хроматической aberrацией на базе толстых голограммных оптических элементов.

Целью настоящей работы является получение аналитических выражений для исправления хроматической aberrации положения собирающего толстого голограммного оптического элемента в заданном диапазоне спектра двумя рассеивающими тонкими голограммными элементами.

Расчет трехкомпонентной ахроматической дифракционной системы

Известно, что хроматическую aberrацию одного голограммного оптического элемента можно исправить, за счет взаимной компенсации хроматической aberrацией другого голограммного элемента [8 - 12]. При использовании таких (компенсирующих) элементов для ахроматизации толстых голограммных элементов возможно как исправление хроматических aberrаций, так и исправление сферической aberrации третьего порядка (по крайней мере на одной длине волны рабочего спектрального диапазона [1,13 - 16]). Так, в качестве примера на рис. 1 приведена (из нашей работы [1]) схема симметричной трехкомпонентной дифракционной (голографической) системы, состоящая из двух тонких пропускающих голограммных элементов и одного пропускающего толстого голограммного элемента.

Рассмотрим расчет хроматической aberrации положения тонкого рассеивающего голограммного элемента, имеющего восстанавливающую волну в виде расходящейся сферической полихроматической волны из точечного источника S_1 и восстановленные монохроматические волны в виде расходящихся сферических волн из точечных мнимых источников S'_1 . В каждом порядке дифракции

эти мнимые источники расположены на оптической оси тонкого голограммного элемента, причем мнимый источник с большей длиной волны расположен ближе к тонкому голограммному элементу.

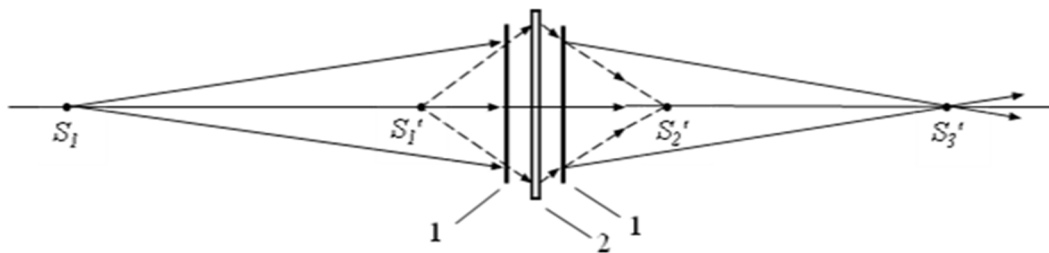


Рис. 1. Схема трехкомпонентной ахроматической голографической системы для точечного полихроматического источника S_1 : 1 – рассеивающие тонкие голограммные элементы, 2 – собирающий толстый голограммный элемент

Формула тонкого рассеивающего голограммного элемента может быть представлена в виде [5, 6, 17]

$$\frac{1}{z_{1c}} - \frac{1}{z_{1i}} = -\frac{k_1 \lambda_c}{F_{1o} \lambda_o},$$

где z_{1c} , z_{1i} – соответственно расстояния от центра тонкого голограммного элемента до точечного источника S_1 и до мнимых источников S_1' ; λ_c , λ_o – соответственно рабочая длина волны и длина волны записи; F_{1o} – фокусное расстояние тонкого голограммного элемента на длине волны записи (в первом порядке дифракции); k_1 – порядок дифракции.

При изменении рабочей длины волны на величину $\Delta\lambda_c$ соответствующая хроматическая aberrация положения Δz_{1i} тонкого рассеивающего голограммного элемента равна

$$\Delta z_{1i} = -\frac{k_1 \lambda_c z_{1i}^2}{F_{1o} \lambda_o} \Delta \lambda_c.$$

Формула толстого собирающего голограммного элемента может быть представлена (для симметричной рабочей схемы) в виде

$$\frac{2}{z_{2c}} = \frac{\lambda_c}{F_{2o} \lambda_o},$$

где z_{2c} – расстояние от центра толстого голограммного элемента до мнимых точечных источников S_1 ; F_{2o} – фокусное расстояние толстого ГОЭ (голограммный оптический элемент) на длине волны записи.

При изменении рабочей длины волны на величину $\Delta\lambda_c$ соответствующая хроматическая aberrация положения Δz_{2c} толстого собирающего голограммного элемента равна [14]

$$\Delta z_{2c} = -\frac{\lambda_c z_{2c}^2}{2F_{2o} \lambda_o} \Delta\lambda_c.$$

Приравнивая хроматические aberrации Δz_{1i} и Δz_{2c} тонкого и толстого голограммных элементов получаем условие, связывающее между собой их фокусные расстояния F_{1o} и F_{2o} :

$$\frac{z_{2c}^2}{2F_{2o}} = \frac{k_1 z_{1i}^2}{F_{1o}}.$$

Фокусное расстояние F_{2o} равно

$$F_{2o} = \frac{k_1 z_{1i}^2 \lambda_c^2}{2F_{1o} \lambda_o^2} = \frac{k_1 \lambda_c^2}{2F_{1o} \lambda_o^2} \left(\frac{1}{z_{1c}} - \frac{\lambda_c}{F_{1o} \lambda_o} \right)^{-2}.$$

При выводе этой формулы использовалась симметричность рабочей схемы толстого голограммного элемента, а именно

$$z_{2c} = 2F_{2o} \frac{\lambda_o}{\lambda_c}.$$

Расстояние z_{2c} должно быть не меньше расстояния z_{1i} ($z_{1i}/z_{2c} \leq 1$) или должно выполняться условие

$$\frac{z_{1i}}{z_{2c}} = \frac{z_{1i} \lambda_c}{2F_{2o} \lambda_o} = \frac{F_{1o} \lambda_o}{k_1 z_{1i} \lambda_c} \leq 1.$$

Таким образом, получаем, что тонкий голограммный элемент должен иметь дифракционный порядок

$$k_1 \geq \frac{F_{1o} \lambda_o}{z_{1i} \lambda_c}.$$

Фокусное расстояние тонкого голограммного элемента на длинах волн λ_c больше расстояний z_{1i} от этого элемента до мнимых источников восстановленных волн, поэтому дифракционный порядок тонкого голограммного элемента для представленной выше трехкомпонентной голографической системы должен быть больше единицы.

Аналогичным образом, приравнивая величины хроматических aberrаций положения толстого собирающего голограммного элемента и второго рассеивающего тонкого голограммного элемента, получаем, что второй рассеивающий элемент также должен иметь дифракционный порядок больше единицы. Фокусное расстояние толстого голограммного элемента связано с фокусным расстоянием второго тонкого голограммного элемента выражением

$$F_{2o} = \frac{k_3 z_{3i}^2 \lambda_c^2}{2F_{3o} \lambda_o^2} = \frac{k_3 \lambda_c^2}{2F_{3o} \lambda_o^2} \left(\frac{1}{z_{3c}} - \frac{\lambda_c}{F_{3o} \lambda_o} \right)^{-2},$$

где z_{3c}, z_{3i} – соответственно расстояния от центра второго тонкого голограммного элемента до мнимых изображений точечного источника S_2 и до мнимых источников S_3 ; F_{3o} – фокусное расстояние второго тонкого голограммного элемента на длине волны записи λ_o (в первом порядке дифракции); k_3 – порядок дифракции второго тонкого элемента.

В частном случае, при падении плоской полихроматической волны ($z_{1c} \rightarrow \infty$) расстояния z_{1i} и z_{3c} совпадают с фокусными расстояниями тонких голограммных элементов

$$z_{1i} = F_{1o} \frac{\lambda_o}{k_1 \lambda_c}, \quad z_{3c} = F_{3o} \frac{\lambda_o}{k_1 \lambda_c},$$

а фокусное расстояние толстого голограммного элемента равно половине фокусного расстояния тонкого голограммного элемента.

Заключение

Таким образом, в работе получены выражения для исправления хроматической aberrации положения трехкомпонентной голографической системы, состоящей из толстого собирающего голограммного элемента по обе стороны от которого расположены тонкие рассеивающие голограммные элементы. Представлено условие ахроматизации тонкого рассеивающего голограммного элемента и толстого собирающего голограммного элемента: удвоенное произведение фокусных расстояний тонкого и толстого голограммных элементов на выбранной длине волны равно произведению порядка дифракции тонкого голограммного элемента на квадрат расстояния от тонкого голограммного элемента до его плос-

кости изображения. Показано, что для рассмотренной трехкомпонентной системы с центральным толстым голограммным элементом ахроматизация достигается при использовании двух тонких голограммных элементов, расположенных симметрично по обе стороны от толстого элемента и имеющих значение рабочего дифракционного порядка больше чем отношение фокусного расстояния элемента к расстоянию от элемента до его плоскости изображения (на заданной длине волны). Рассмотренная трехкомпонентная голографическая система может быть использована для преобразования как мнимого изображения в действительное, так и наоборот действительного изображения – в мнимое изображение в заданных спектральных участках видимого, ультрафиолетового или инфракрасного диапазонов спектра [18-20].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Батомункуев Ю.Ц. Расчет ахроматической дифракционной системы с исправленной сферической аберрацией (часть 1) / Ю.Ц. Батомункуев, А.А. Дианова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск : сб. материалов в 9 т. Т. 8 : Национальн. конф. с междунар. участ. «СибОптика-2019». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. – С. 41–46.
2. Денисюк, Ю.Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения / Ю.Н. Денисюк // Опт. и спектр.– 1963. – Т. 15, № 4.– С. 522–532.
3. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. – М.: Мир, 1973. – 686 с.
4. Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings // The Bell Syst. Techn. J. – 1969. – V.48, N. 9. – P. 2909–2947.
5. Милер, М. Голография / Л.: Машиностроение. – 1979. – 208 с.
6. Ган, М. А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов / М.А. Ган. – Л.: ГОИ, 1984. – 140 с.
7. Tabiryan N.V., Serak S.V., Nersisyan S.R., Roberts D.E., Zeldovich B.Ya., Steeves D.M., Kimball B.R. Broadband waveplate lenses. Optics Express, 2016, Vol. 24, Issue 7, pp. 7091–7102.
8. Bennet, S. J. Achromatic combinations of hologram optical elements // Applied optics. – 1976. – V. 15, N. 2. – P. 542–545.
9. Sweatt, W. C. Achromatic triplet using hologram optical elements // Applied optics. – 1977. – V. 16, N. 5. – P. 1390–1391.
10. Мустафин, К. С. Расчет ахроматизированных голограммных линзовых систем на основе принципа таутохронизма лучей / К.С. Мустафин // Оптика и спектроскопия. – 1978. – Т. 44, вып. 1. – С. 164–167.
11. Weingärtner, I., Rosenbruch K.J. Chromatic correction of two- and three-element holographic imaging systems // Optica Acta. – 1982. – V. 29, N. 4. – P. 519–529.
12. Батомункуев, Ю.Ц. Расчет осевых сферических аберраций высших порядков светосильного фокусирующего ГОЭ с исправленной сферической аберрацией третьего порядка. Часть 2 / Ю.Ц. Батомункуев, А.А. Дианова, Т.В. Маганакова // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 4. – С. 627–636.
13. Буйнов, Г. Н. Компенсация сферической аберрации голограммных линз при коротковолновом сдвиге восстанавливающего излучения / Г.Н. Буйнов, К.С. Мустафин // Оптика и спектроскопия. – 1976.– Т. 41. – С. 157.
14. Батомункуев, Ю.Ц. Разработка и расчет объемных голографических оптических элементов / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук // СГГА. – Новосибирск, 2003. – С.184.

15. Батомункуев, Ю.Ц. Расчет осевых сферических aberrаций высших порядков светосильного фокусирующего ГОЭ с исправленной сферической aberrацией третьего порядка. Часть 1 / Ю.Ц. Батомункуев, А.А. Дианова // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 1. – С. 44–53.

16. Патент на полезную модель RU 184965 U1, 15.11.2018. Двухдиапазонная голографическая оптическая система. Батомункуев Ю.Ц., Дианова А.А.

17. Лукин, А.В. Голограммные оптические элементы / Опт. журн.– 2007. – Т. 74, № 1. – С. 80–87.

18. Ган, М.А. Широкоугольные оптические системы на основе синтезированных объемных голограмм для нашиваемых дисплеев / М.А. Ган, С.А. Щеглов, Я.М. Ган, А.С. Чертков // Оптический журнал. – 2008. – Т.75, №3. – С.18-23.

19. Корешев, С. Н. Оптические системы голографических коллиматорных прицелов / С. Н. Корешев, М. К. Шевцов // Оптический журнал - 2015. - Том 82. – № 9. – С. 22–28.

20. Одинокоев С. Б. Оптические приборы визуального наблюдения и целеуказания на основе голограммных элементов / Одинокоев С. Б., Ковалев М. С., Соломашенко А. Б., Град Я. А., Николаев В. В., Соколов Г. В., Швецов И. А. // Контенант. – 2018. – Т. 17, № 3. – С. 80–85.

© Ю. Ц. Батомункуев, А. А. Печенкина, 2020