

## АХРОМАТИЗАЦИЯ ОБЪЕМНЫХ ГОЛОГРАММНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Юрий Цыдыпович Батомункеев*

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

В работе рассматривается двухкомпонентная голографическая оптическая система, имеющая базовый элемент в виде толстого (объемного) голограммного оптического элемента и предназначенная для использования в заданном спектральном диапазоне. Расчет двухкомпонентной голографической системы проводится с применением формул, полученных из предложенной автором зеркально-линзовой модели толстого голограммного элемента. Указывается, что согласно зеркальной модели толстый голограммный оптический элемент обладает ахроматичностью в первом приближении. Для этого локальный период объемной дифракционной структуры голограммного элемента должен во много раз превышать величину рабочей длины волны, а поперечные размеры элемента должны быть меньше его толщины. Приводятся аналитические выражения для взаимной коррекции хроматической аберрации положения толстого голограммного оптического элемента и рельефного киноформного элемента. Сформулировано условие ахроматизации этой двухкомпонентной голографической системы.

**Ключевые слова:** хроматическая аберрация, голограммный оптический элемент, ахроматизация.

## ACHROMATIZATION OF THE VOLUME HOLOGRAPHIC OPTICAL ELEMENTS

*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

The work considers a two-component holographic optical system having a base element in the form of a thick (volume) hologram optical element and intended for use in a given spectral range. The calculation of a two-component holographic system is carried out using formulas obtained from the mirror-lens model of the thick hologram element proposed by the author. It is indicated that according to the mirror model a thick hologram optical element is achromatic in a first approximation. For this the local period of the volume diffraction structure of the hologram element must be many times greater than the working wavelength, and the transverse dimensions of the element must be less than its thickness. Analytical expressions are given for the mutual correction of the chromatic aberration of the position of a thick hologram optical element and a relief kinoform element. The condition for achromatization of this two-component holographic system is formulated.

**Keywords:** chromatic aberration, holographic optical element, achromatization.

## *Введение*

Ахроматизации голограммных оптических элементов посвящено довольно много работ, например [1–4]. Однако практически во всех этих работах рассматривались лишь тонкие голограммные оптические элементы, которые обладают целым рядом недостатков (низкой дифракционной эффективностью, наличием множества дифракционных порядков, высоким уровнем светорассеяния и паразитных шумов), и поэтому не представлявшие широкого практического интереса. В то же время прогресс в создании с требуемыми эксплуатационными характеристиками объемных голографических материалов открыл возможность практической реализации толстых (объемных) голограммных элементов [5] для разнообразных преобразований световой волны [6, 7]. К отличительным особенностям толстых голограммных оптических элементов относятся высокая дифракционная эффективность и наличие одного порядка дифракции (интенсивностью света в остальных дифракционных порядках, включая и нулевой порядок дифракции, можно пренебречь). Рабочий дифракционный порядок толстого голограммного оптического элемента является единственным, но он может отличаться от первого порядка. Наряду с известными технологиями, например [8, 9], изготовления рельефных голограммных и дифракционных оптических элементов в последние годы совершенствуются и выходят на новый уровень развития оборудование и технологии изготовления рельефных дифракционных элементов, обладающих высокой эффективностью и заданным одним порядком дифракции [10–17]. Это открывает возможность практической ахроматизации толстых голограммных элементов в комбинации с рельефными дифракционными элементами.

Целью работы является анализ возможности исправления хроматической абберации положения толстого голограммного оптического элемента в заданном диапазоне спектра одним тонким рельефным дифракционным элементом.

### *Ахроматизация толстого (объемного) голограммного оптического элемента*

Ахроматизации осевых фокусирующих и рассеивающих толстых голограммных оптических элементов посвящено относительно мало работ, это связано с тем, что толстый голограммный элемент обладает спектральной и угловой селективностью. Угловая селективность приводит к тому, что при изменении рабочей длины волны дифракция имеет место не во всем объеме голограммного элемента, а лишь в центральной части, причем при увеличении толщины световой диаметр этой части элемента уменьшается. Угловая селективность приводит к уменьшению поля зрения. Эти обстоятельства не позволяют широко применять толстые голограммные элементы в качестве аналогов линз для формирования изображений в заданном диапазоне спектра. Тем не менее, существует круг задач, связанный с фокусировкой и коллимацией световой волны в заданном диапазоне, особенно в инфракрасной области спектра, где толстые голограммные элементы востребованы. Возможность ахроматизации двух толстых голограммных оптических элементов была нами рассмотрена в [18]. В работе [18] пред-

ставлены результаты расчетов в заданном диапазоне спектра осевой сферической aberrации пятого порядка светосильного толстого голограммного оптического элемента для ахроматической дифракционной системы.

В настоящей работе рассматривается возможность взаимного исправления хроматических aberrаций положения толстого голограммного оптического элемента и тонкого рельефного дифракционного элемента. Для учета объемности и селективности толстого голограммного элемента при выполнении расчетов используется его формула в виде [19, 20]

$$\frac{1}{z_{1c}} + \frac{1}{z_{1i}} = \frac{1}{P_o} \left( \frac{1}{z_{1c}} - \frac{1}{z_{1i}} \right) = \frac{k_1 \lambda_c}{F_{1o} \lambda_o}, \quad (1)$$

где  $z_{1c}$ ,  $z_{1i}$  – соответственно расстояния от толстого голограммного элемента до точечного источника  $S_1$  и до мнимых источников  $S^*_1$ , являющихся изображениями источника  $S_1$ ;  $\lambda_c$ ,  $\lambda_o$  – соответственно рабочая длина волны и длина волны записи;  $F_{1o}$  – фокусное расстояние голограммного элемента на длине волны записи (в первом порядке дифракции);  $k_1$  – порядок дифракции, который, как правило, может быть равен 1 или 2;  $P_o$  – параметр зеркально-линзовой модели толстого голограммного оптического элемента [19,20].

Согласно зеркально-линзовой модели толстый (объемный) голограммный оптический элемент может быть представлен одновременно в виде тонкого голограммного элемента, формула которого по форме совпадает с формулой тонкой линзы, и отражающего сферического зеркала. В формуле этого сферического зеркала отсутствует зависимость, как от длины волны записи, так и от рабочей длины волны [19, 20], тогда как фокусное расстояние тонкого голограммного элемента обратно пропорционально его рабочей длине волны. Поэтому хроматическая aberrация толстого голограммного элемента характеризуется его линзовой моделью и совпадает с хроматической aberrацией аналогичного тонкого голограммного элемента. Согласно же зеркальной модели толстый (объемный) голограммный элемент в первом приближении характеризуется ахроматичностью. Этот факт согласуется с подобным результатом, полученным в работе [21] из другого подхода к описанию формирования изображения голограммным элементом. Отмеченная хроматичность не проявляется у толстого голограммного элемента, так как зеркальная модель является следствием учета толщины элемента, и aberrации, обусловленные толщиной намного меньше aberrаций, зависящих и независящих от поперечных размеров голограммного элемента. При величинах локального периода дифракционной структуры толстого (объемного) голограммного элемента существенно превышающих рабочие длины волн, а также при поперечных размерах этого голограммного элемента, не превышающих его толщины, зеркальная модель в первом приближении будет более корректно описывать формирование ахроматического изображения толстым голограммным элементом [19].

Известно, что хроматическая aberrация положения толстого голограммного элемента (и других аналогичных дифракционных элементов) в первом приближении не зависит от его светового диаметра и возникает из-за сильной зависимости фокусного расстояния от рабочей длины волны. Поэтому хроматическую aberrацию одного голограммного элемента можно исправить за счет взаимной компенсации хроматической aberrацией другого (корректирующего) дифракционного элемента [1-3]. В работе для толстого голограммного элемента в качестве корректирующего элемента рассматривается киноформный оптический элемент.

Рассмотрим расчет хроматической aberrации положения киноформного элемента в обратном ходе лучей, то есть имеющего предметную волну в виде расходящейся сферической полихроматической волны из точечного источника  $S_2$  (в плоскости изображения) и монохроматические волны в виде расходящихся сферических волн из точечных мнимых источников  $S'_2$  (сформированных киноформным элементом).

Формула тонкого рассеивающего киноформного элемента может быть представлена в виде

$$\frac{1}{z_{2c}} - \frac{1}{z_{2i}} = -\frac{k_2 \lambda_c}{F_{2o} \lambda_o}, \quad (2)$$

где  $z_{2c}$ ,  $z_{2i}$  – соответственно расстояния от киноформного элемента до точечного источника  $S_2$  и до мнимых источников  $S'_2$ , являющихся изображениями источника  $S_2$ ;  $F_{2o}$  – фокусное расстояние (в первом порядке дифракции) от киноформного элемента на длине волны, совпадающей с длиной волны записи толстого голограммного элемента;  $k_2$  – порядок дифракции.

При изменении рабочей длины волны на величину  $\Delta\lambda_c$  соответствующая хроматическая aberrация положения  $\Delta z_{2i}$  рассеивающего киноформного элемента из формулы (2) равна

$$\Delta z_{2i} = -\frac{k_2 \lambda_c z_{2i}^2}{F_{2o} \lambda_o} \Delta \lambda_c.$$

При изменении рабочей длины волны на величину  $\Delta\lambda_c$  соответствующая хроматическая aberrация положения  $\Delta z_{1c}$  толстого собирающего голограммного элемента равна

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

Приравнивая хроматические aberrации  $\Delta z_{2i}$  и  $\Delta z_{1c}$  киноформного элемента и толстого голограммного элемента получаем условие, связывающее между собой их фокусные расстояния и  $F_{2o}$  и  $F_{1o}$

$$\frac{k_2 z_{2i}^2}{F_{2o}} = \frac{k_1 z_{1i}^2}{F_{1o}}. \quad (3)$$

Выражение (3) может быть представлено в виде

$$\frac{k_1}{F_{1o}} \left( \frac{1}{z_{1c}} - \frac{k_1 \lambda_c}{F_{1o} \lambda_o} \right)^{-2} = \frac{k_2}{F_{2o}} \left( \frac{1}{z_{2c}} - \frac{k_2 \lambda_c}{F_{2o} \lambda_o} \right)^{-2}. \quad (4)$$

Известно, что фокусное расстояние  $F_o$  на длине волны записи  $\lambda_o$  двухкомпонентной системы, состоящей из толстого голограммного элемента и киноформного элемента, связано с фокусными расстояниями  $F_{1o}$  и  $F_{2o}$  этих элементов формулой

$$\frac{k_1}{F_{1o}} + \frac{k_2}{F_{2o}} = \frac{1}{F_o}. \quad (5)$$

Выражения (4) и (5) образуют систему уравнений из которой могут быть определены значения фокусных расстояний  $F_{1o}$  и  $F_{2o}$ . В рассматриваемой двухкомпонентной системе в общем случае элементы не располагаются вплотную друг другу. При выполнении расчетов предполагается, что у толстого голограммного и у киноформного элементов исправлены сферические aberrации третьего порядков на рабочей длине волны.

В нашей работе [18] представлен один из возможных вариантов ахроматической системы из двух разнесенных толстых голограммных элементов с исправленной сферической aberrацией третьего порядка.

### ***Заключение***

В работе указывается, что следствием модельного представления толстого голограммного оптического элемента в виде сферического зеркала является ахроматичность этого элемента. В работе получены выражения для исправления хроматической aberrации положения двухкомпонентной системы, состоящей из толстого собирающего голограммного оптического элемента и рассеивающего киноформного элемента. Представлено условие ахроматизации толстого собирающего голограммного элемента: отношение фокусных расстояний киноформного и толстого голограммного элементов на заданной длине волны равно отно-

шению квадратов расстояний от киноформного элемента до плоскости изображения толстого голограммного элемента и от толстого голограммного элемента до его плоскости изображения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bennet, S. J. Achromatic combinations of hologram optical elements // *Applied optics*. – 1976. – V. 15, N. 2. – P. 542–545.
2. Sweatt, W. C. Achromatic triplet using hologram optical elements // *Applied optics*. – 1977. – V. 16, N. 5. – P. 1390–1391.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Вениаминов, А.В. Голографические полимерные материалы с диффузным проявлением: принципы, компоновка, исследования и применения / А.В. Вениаминов, В.В. Могильный // *Оптика и спектроскопия*. – 2013. – Т. 115, № 6. – С. 1014 – 1038.
7. Твердохлеб, П.Е. Трехмерная лазерная модификация объемных светочувствительных материалов / Твердохлеб П.Е., Шелковников В.В., Жаркова Г.М., Щепеткин Ю.А., Пен Е.Ф., Штейнберг И.Ш., Родионов М.Ю., Трубецкой А.В., Васильев Е.В., Лоскутов В.А., Русских В.В., Петров А.П., Хачатурян В.М., Беликов А.Ю., Вьюхина Н.Н., Затолокин В.Н., Иванов Д.Н., Шаталов И.Г. // *Новосибирск*. – 2012. – 353 с.
8. Лукин, А.В. Голограммные оптические элементы / *Опт. журн.* – 2007. – Т. 74, № 1. – С. 80–87.
9. Гальперн, А.Д. Методы регистрации тиражирования изобразительных рельефно-фазовых голограмм / А.Д. Гальперн, В.П. Смаев // *Оптико-механическая промышленность*. – 1988. – № 11. – С.49-57.
10. Ганжерли, Н.М. Формирование случайных и регулярных рельефно-фазовых структур на галоидосеребряных фотоэмульсиях голографическими методами / Н.М. Ганжерли, С.Н. Гуляев, А.С. Гурин, Д.Д. Крамущенко, И.А. Маурер, Д.Ф. Черных // *ЖТФ*. – 2009. – Т. 79, вып. 7. – С. 76–80.
11. Ганжерли, Н.М. Формирование поверхностного рельефа сложных голографических структур на фотоматериале / Н.М. Ганжерли, С.Н. Гуляев, И.А. Маурер, Д.Ф. Черных // *Оптический журнал*. — 2015. — Том 82. — №3. — С. 37—42.
12. Одинокоев С.Б. Технология изготовления дифракционных и голограммных оптических элементов с функциональным микрорельефом поверхности методом плазмохимического травления / С.Б. Одинокоев, Г.Р. Сагателян // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. – 2010. – №2. – С. 92–104.
13. Комоцкий, В. А. Оптический фильтр, построенный с применением глубокой периодической отражающей рельефной структуры / В. А. Комоцкий, Ю. М. Соколов Н. В. Суетин // *НОЛОЕХРО 2018: XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов*. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. – С. 165–169.
14. Верхогляд, А.Г. Круговая лазерная записывающая система для формирования фазовых и амплитудных микроструктур на сферических поверхностях / А.Г. Верхогляд, М.А. За-

вьялова, А.Е. Качкин, С.А. Кокарев, В.П. Корольков // Датчики и системы. – 2015. – № 9. – С.45–52.

15. Наливайко, В.И. Фотомодификация аморфных халькогенидных полупроводниковых слоев и их применение для получения фазового рельефа / В.И. Наливайко // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 8-3. – С. 263-265.

16. Петров, В. М. Динамические свойства голографических решеток и контроль их записи в фоточувствительном полиметилметакрилате (РММА) / В. М. Петров // HOLOEXPO 2018 : XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. – С. 289–290.

17. Kutanov, A. Direct laser recording on amorphous silicon film / A. Kutanov, I. Snimshikov, Nurbek Sydyk uulu // Physics Procedia. — 2015. — Vol. 73. — P. 82–86.

18. Батомункуев, Ю.Ц. Расчет осевых сферических aberrаций высших порядков светосильного фокусирующего ГОЭ с исправленной сферической aberrацией третьего порядка. Часть 2 / Ю.Ц. Батомункуев, А.А. Дианова // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 4. – С. 627–636.

19. Батомункуев, Ю.Ц. Разработка и расчет объемных голографических оптических элементов / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук // СГГА. – Новосибирск, 2003. – С.184.

20. Батомункуев, Ю.Ц. Зеркально-линзовая модель объемных голограммных оптических элементов / Ю.Ц. Батомункуев // Опт. журн. – 2009. – Т.76, № 7. – С. 48-52.

21. Сисакян, И. Н. Ахроматическое восстановление волнового фронта / И. Н. Сисакян, А. М. Смолович // Письма в ЖТФ. – 1991.— Том 17. — № 1. — С. 41–44.

© Ю. Ц. Батомункуев, 2020