

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОЦВЕТНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ ЛИНЗЫ

А.И. Коваленко

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Данная работа посвящена исследованию изображения, формируемого многоуровневой дифракционной линзой в условиях полихроматического освещения. Влияние хроматизма исследуется при изменении уровней квантования и гармонического интервала (приведения фазы к уровню $2\pi n$).

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) применяются для миниатюризации и облегчения оптических систем. Кроме того, они позволяют сформировать световые пучки с такими свойствами, которые невозможно получить с помощью классических элементов рефракционной оптики. Однако ДОЭ характеризуются существенной хроматической аберрацией, которая может как негативно, так и позитивно сказываться в системах формирования изображений [1-5].

Классические линзы и зеркала разработаны на основе геометрической оптики, которые из-за большого размера не подходят для использования в оптических и оптоэлектронных микросистемах. Формирование сложных комплексных распределений лазерных полей невозможно выполнить с помощью классических рефракционных элементов. Однако эта задача очень хорошо решается с помощью средств дифракционной оптики. ДОЭ, учитывающие волновую природу света, успешно выполняют преобразование лазерного излучения в практически произвольное амплитудно-фазовое распределение [6, 7].

Основное свойство ДОЭ – использование явления дифракции для изменения направления распространения световых лучей. Дифракционные элементы разбивают световой луч на множество лучей, каждый из которых перенаправляется под разными углами. Для разных длин волн будет разным угол дифракции. Более длинные волны дифрагируют на больших углах, чем короткие длины волн. Таким образом, проявляется хроматический дисперсионный эффект [8, 9]. Негативное влияние такого эффекта сказывается как в изображающих [1, 2, 4], так и фокусирующих [10, 11] системах, содержащих ДОЭ. Для компенсации хроматизма ДОЭ часто предлагают использовать гибридные системы, т.е. сочетание рефракционных и дифракционных элементов, обладающих противоположным хроматизмом [8, 9, 12, 13].

Некоторые ДОЭ могут сочетать в себе свойства как дифракционных, так и рефракционных линз. Примером могут служить так называемые гармонические дифракционные элементы, где дифракционные и рефракционные свойства линзы зависят от приведения фазы к различным интервалам [14-16]. Гармоническим интервалом называется приведение фазы к уровню $2\pi n$. Очевидно, чем больше n , тем ближе свойства гармонического ДОЭ к рефракционному элементу. Однако изготовление таких элементов сталкивается с технологическими сложностями, так как в этом случае требуется глубокое травление. Поэтому желательно найти некоторый компромисс между необходимостью увеличения гармонического интервала с целью преодоления хроматизма и возможностями технологического процесса изготовления оптического элемента.

В данной работе рассматривается оптическая система, показанная на рисунке 1, где z_1 - расстояние от источника излучения до ДОЭ, z_2 - расстояние от ДОЭ до плоскости изображения. Будем считать, что от источника излучения идет расходящаяся сферическая волна, для которой при больших z_1 получаем параллельные пучки света.

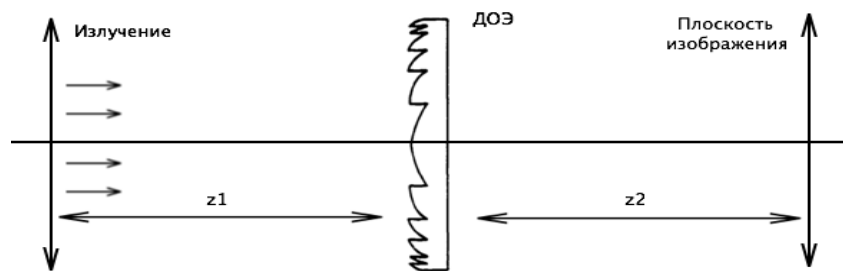


Рисунок 2 - Оптическая система с ДОЭ

Основные этапы формирования ДОЭ:

1. непрерывную фазовую функцию пропускания $\varphi(r)$ сводят к интервалу $[0, 2\pi n)$, где n - число периодичности;
2. полученную n - периодическую фазу $\varphi_i(r) = \text{mod}_{2\pi} \varphi(r)$ квантуют с некоторым шагом по высоте, формируя m уровней.

Чем больше число уровней квантования фазы m , тем точнее полученная фаза повторяет рельеф непрерывного случая. А увеличение периодичности n позволяет приблизить дифракционный рельеф к рефракционному.

В рамках данной работы было проведено исследование интенсивности света, проходящего через многоуровневый ДОЭ при изменении уровней квантования элемента. Для многоуровневых ДОЭ получили расхождение фокусов для разных длин волн и понижение интенсивности при уменьшении уровней квантования по сравнению с рефракционной линзой. Понижение интенсивности объясняется тем, что для квантованных ДОЭ часть энергии перераспределяется вдоль оптической оси ближе к оптическому элементу.

Также в рамках научной работы было проведено исследование формирования изображения в зависимости от изменения уровней квантования элемента и приведение фазы к интервалам $[0, 2\pi n)$, где $n=1, 2, \dots, 10$. Исследование было проведено для элементов с различными радиусами и была показана зависимость величин M и N от радиуса линзы.

На интенсивность света, полученную при прохождении через элемент излучения, могут влиять не только количество уровней квантования и глубина рельефа, но и число зон элемента. Как показал вычислительный эксперимент, для сближения точек фокуса необходимо уменьшать количество зон элемента до одной путем увеличения периодичности интервала (увеличения глубины рельефа элемента). Таким образом, при уменьшении зон ДОЭ будет стремиться к рефракционному случаю, однако никогда его не достигнет.

Из результатов вычислительного эксперимента было получено, что при увеличении радиуса линзы для смещения фокусов необходимо увеличивать количество уровней квантования (для линзы радиуса 1 мм достаточно 32 уровня квантования, для линзы с радиусом 10 мм – 2048 уровней). При этом, для достижения линзы одной зоны при большем радиусе соответственно глубина рельефа увеличивается (для линзы радиуса 1 мм $N = 9,1$, для радиуса 10 мм $N = 910$).

Также в рамках данной работы было рассмотрено формирование изображения с помощью рефракционной и дифракционными элементами. Пусть дан объект с нулевой фазой (рис. 2). Для формирования изображения использовалась линза с фокусным расстоянием $f=320$ мм, расположенная на расстоянии $z_1=50\,000$ мм от объекта. Рассматривалось освещение лазерным излучением с тремя длинами волн: $\lambda_1=400$ нм, $\lambda_2=550$ нм и $\lambda_3=700$ нм. Базовой считалась средняя длина волны $\lambda_0=\lambda_2$. Изображение рассчитывалось на различных расстояниях z_2 от линзы.

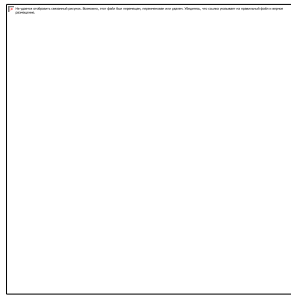


Рисунок 3 – Вид объекта

Рассмотрим формирование изображения для рефракционной линзы на расстоянии $z_2=325$ мм. На рисунке 3 приведено распределение интенсивности на оптической оси для рефракционной линзы для различных длин волн (синий цвет для $\lambda_1 = 400$ нм, зеленый цвет для $\lambda_2 = 550$ нм, красный цвет для $\lambda_3 = 700$ нм).

В таблице 2 показаны результаты моделирования построения цветных изображений для рефракционной линзы, рассчитанной для базовой длины волны λ_2 .

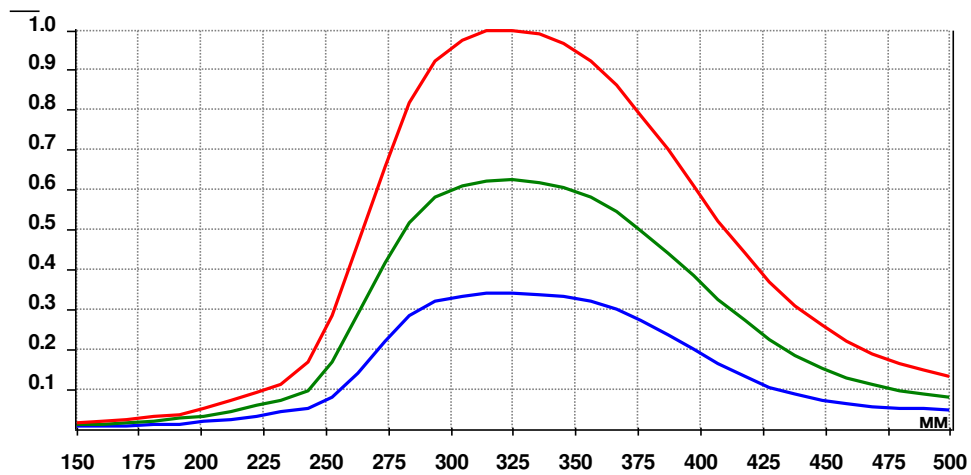


Рисунок 4 – Распределение интенсивности на оптической оси для рефракционной линзы для различных длин волн

Таблица 5 – Моделирование формирования изображения для рефракционной линзы на расстоянии 325 мм от линзы

z_2 , мм	$\lambda_1 = 400$ нм	$\lambda_2 = 550$ нм	$\lambda_3 = 700$ нм	Суммарное
325				

Рассмотрим формирование изображения для четырехуровневой дифракционной линзы на расстояниях, равных максимальным значениям интенсивностей для различных длин волн. Из рисунка 4 видно, что z_2 равно 325 и 345,5 мм.

Из рис. 4 видно смещение фокуса для длины волны равной $\lambda_3 = 700$ нм по сравнению с базовой. В таблице 2 приведены результаты моделирования. Из табл. 2 видно, что качество изображения заметно хуже по сравнению с рефракционной линзой. Для улучшения качества изображения увеличим количество уровней до 16. На рисунке 5 и в таблице 3 показаны результаты моделирования для шестнадцати уровней линзы.

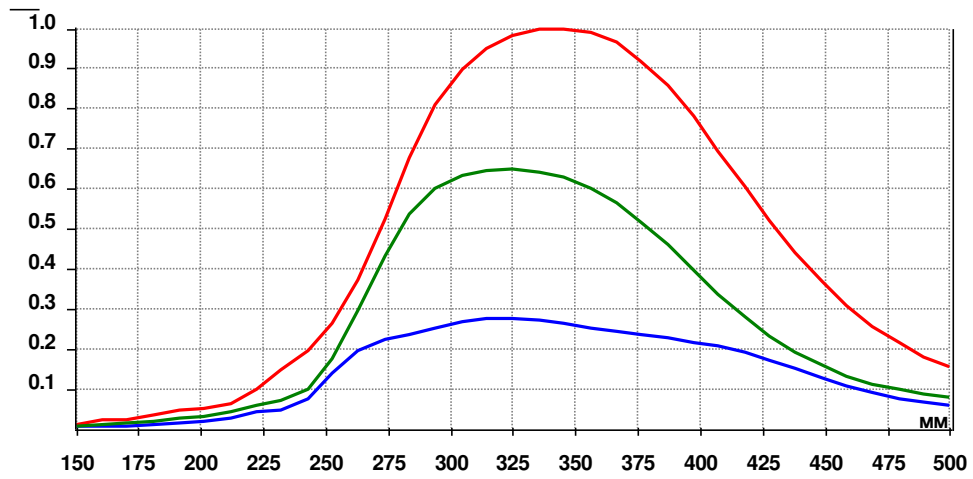


Рисунок 4 - Распределение интенсивности на оптической оси для четырехуровневой дифракционной линзы для различных длин волн

Таблица 6 - Моделирование формирования изображения на различных расстояниях от четырехуровневой дифракционной линзы

Z_2 , мм	$\lambda_1 = 400$ нм	$\lambda_2 = 550$ нм	$\lambda_3 = 700$ нм	Суммарное
325				
345, 5				

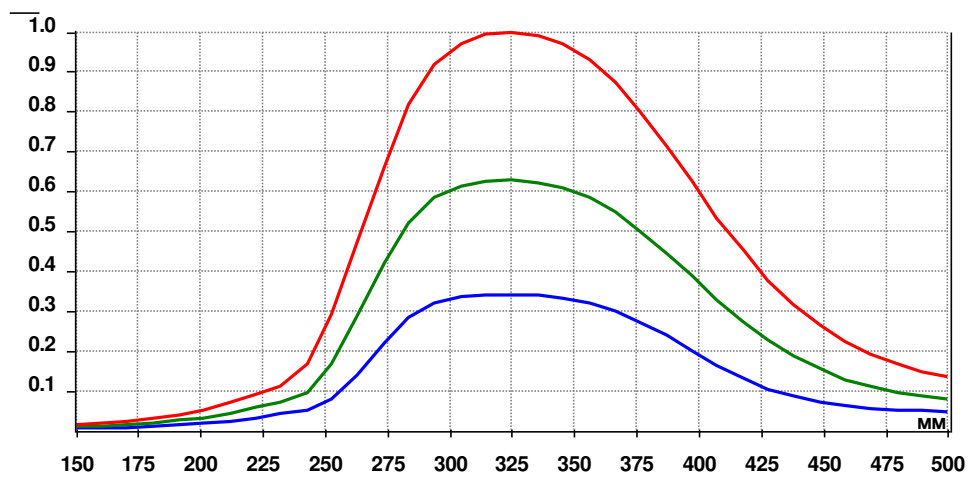
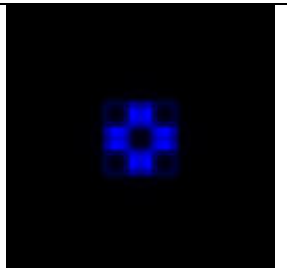
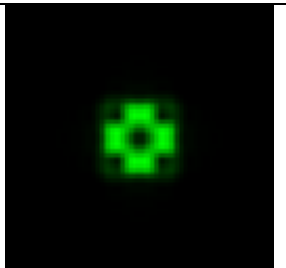
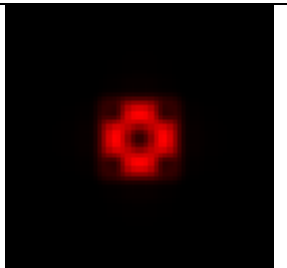
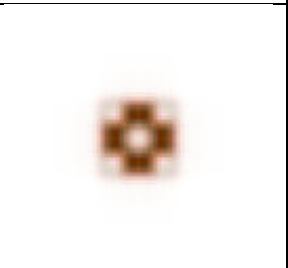


Рисунок 5 - Распределение интенсивности на оптической оси для шестнадцати уровневой дифракционной линзы для различных длин волн

Таблица 7 - Моделирование формирования изображения на расстоянии 325 мм от шестнадцати уровневой дифракционной линзы

Z_2 , мм	$\lambda_1 = 400$ нм	$\lambda_2 = 550$ нм	$\lambda_3 = 700$ нм	Суммарное
325				

Из приведенных выше результатов видно, что качество изображения для шестнадцати уровневой линзы не отличается от рефракционного случая.

В ходе исследования были получены следующие результаты:

- при уменьшении уровней квантования элемента для разных длин волн излучения наблюдаются разные фокусные расстояния, и происходит падение интенсивностей и перераспределение полезной энергии вдоль оптической оси;
- при увеличении радиуса ДОЭ для достижения смещения фокусов для разных длин волн в одну точку необходимо увеличивать число уровней квантования линзы и подбирать такое значение периодичности N , чтобы количество зон элемента было равно одному;
- при формировании изображений наиболее качественное изображение было получено у восьмиуровневой дифракционной линзы близкое по качеству к рефракционной линзе, однако приемлемое качество изображения наблюдалось и у четырехуровневой линзы. Изображения, полученные с помощью двухуровневой линзы, имеют качество совершенно недостаточное для формирования цветных изображений.

Проблему, связанную с хроматической aberrацией ДОЭ, для некоторых приложений можно решить путем внесения в волновой фронт различных aberrаций и увеличением глубины фокуса.

Литература

1. Бобров С.Т., Грейсух Г.И., Туркевич Ю.Г., Оптика дифракционных элементов и систем – Л.: Машиностроение, 1986. – 223 с.
2. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Степанов С.А., Сравнительный анализ хроматизма дифракционных и рефракционных линз // Компьютерная оптика. – 2005. – Вып. 28. – С. 60-65.
3. Казанский Н.Л., Харитонов С.И., Карсаков А.В., Хонина С.Н., Моделирование работы гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера, в рамках геометрической оптики // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 271-280.
4. Казанский Н.Л., Хонина С.Н., Скиданов Р.В., Морозов А.А., Харитонов С.И., Волотовский С.Г., Формирование изображений дифракционной многоуровневой линзой // Компьютерная оптика. - 2014 - Т. 38, №3. - С. 425-434.
5. Карпеев С.В., Хонина С.Н., Харитонов С.И., Исследование дифракционной решётки на выпуклой поверхности как диспергирующего элемента // Компьютерная оптика. - 2015. - Т. 39, № 2. - С. 211-217.
6. Дифракционная компьютерная оптика / Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В. В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, С.Н. Хонина, под ред. В.А. Сойфера. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. - 736 с.
7. Дифракционная нанофотоника / Гаврилов А.В., Головашкин Д.Л., Досколович Л.Л., Дьяченко П.Н., Ковалев А.А., Котляр В.В., Налимов А.Г., Нестеренко Д.В., Павельев В.С., Скиданов Р.В., Сойфер В.А., Хонина С.Н., Шуюпова Я.О.; под ред. В.А. Сойфера, М., Физматлит, 2011, 680 с.
8. Aieta F., Kats M.A., Genevet P., Capasso F., Multiwavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation // Scinceexpress. - 2015. - 2494 - 8pp.
9. Swanson G. J., Binary optics technology: the theory and design of multi-level diffractive optical elements // Technical Report. - 1989. - P. 1-47.

10. Алфёров С.В., Карпеев С.В., Хонина С.Н., Тукмаков К.Н., Моисеев О.Ю., Шуляпов С.А., Иванов К.А., Савельев-Трофимов А.Б., О возможности управления лазерной абляцией при острой фокусировке фемтосекундного излучения // Квантовая электроника. - 2014. - Т. 44, № 11. - С. 1061-1065
11. Карпеев С.В., Алфёров С.В., Хонина С.Н., Кудряшов С.И., Исследование влияния широкополосного излучения на распределение интенсивности, формируемое дифракционным оптическим элементом // Компьютерная оптика. - 2014. - Т. 38, № 4. - С. 689-694
12. Davidson N., Friesem A.A., and Hasman E., Analytic design of hybrid diffractive-refractive achromats // Applied Optics. - 1993. - Vol. 32, No. 25. - P. 4770-4774
13. Fang Y.C., Liu T.-K., Tsai C.-M., Chou J.-H., Lin H.-C., and Lin W.T., Extended optimization of chromatic aberrations via a hybrid Taguchi–genetic algorithm for zoom optics with a diffractive optical element // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. - 2009. - V. 11. - P. 045706 (14pp)
14. Sweeney D.W., Sommargen G.E., Harmonic diffractive lenses // Applied Optics. -1995. - Vol. 34, No. 14. - P. 2469-2475.
15. Rossi M., Kunz R.E., Herzig H.P., Refractive and diffractive properties of planar micro-optical elements // Applied Optics. -1995. - Vol. 34, No. 26. - P. 5996-6007.
16. Sales T. R. M., Morris G.M., Diffractive-refractive behavior of kinoform lenses // Applied Optics. - 1997. - Vol. 36, No. 1. - P. 253-257.
17. Хонина С.Н., Волотовский С.Г., Фраксикон – дифракционный оптический элемент с конической фокальной областью // Компьютерная оптика. - 2009. - Т. 33, № 4. - С. 401-411
18. Хонина С.Н., Фазовая аподизация изображающей системы с целью увеличения глубины фокуса в когерентном и некогерентном случаях / Компьютерная оптика. - 2012. - Т. 36, № 3. - С. 357