

Моделирование спектральных дифракционных линз с учетом эффектов строгой электромагнитной теории дифракции

И.С. Комаров¹, Е.А. Безус^{2,1}, Л.Л. Досколович^{2,1}

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34а, Самара, Россия, 443086

²Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

Аннотация

Работа посвящена численному исследованию спектральных дифракционных линз с учетом эффектов строгой электромагнитной теории дифракции. Реализован метод расчёта спектральных дифракционных линз (СДЛ), имеющих фиксированное положение фокуса при нескольких различных длинах волн, основанный на минимизации функции, описывающей отличие комплексных функций пропускания СДЛ для заданных длин волн от функций комплексного пропускания дифракционных линз, рассчитанных отдельно для каждой из заданных длин волн. Проведено численное моделирование растров таких линз с учетом эффектов электромагнитной теории и исследовано влияние соседних линз в растре на формируемые фокальные пятна.

Ключевые слова

Дифракционная оптика, дифракционная линза, спектральная линза

1. Введение

В последние несколько лет были предложены различные численные методы расчёта т.н. спектральных дифракционных линз (СДЛ), предназначенных для работы с излучением нескольких различных заданных длин волн [1,2]. Интерес к данной тематике обусловлен перспективами применения СДЛ в широком классе приложений, включающих создание компактных изображающих систем для мобильных устройств и беспилотных летательных аппаратов. Обычно расчет и моделирование СДЛ проводятся в рамках скалярной теории дифракции. Вместе с тем, в связи с высокой сложностью дифракционного микрорельефа СДЛ представляет интерес их моделирование в рамках строгой электромагнитной теории дифракции. Такое численное исследование проводится в настоящей работе для растров «двумерных» (цилиндрических) спектральных дифракционных линз.

2. Полученные результаты

Для расчета СДЛ, имеющей фиксированное положение фокуса для заданных длин волн, был реализован предложенный в работах [3,4] метод расчета, основанный на минимизации целевой функции, характеризующей отличие функций комплексного пропускания СДЛ на заданных длинах волн от функций комплексного пропускания линз заданного радиуса с фокусом, рассчитанных для этих длин волн. Для последующего моделирования в рамках электромагнитной теории была рассчитана цилиндрическая СДЛ для фокусировки семи длин волн от 450 до 750 нм с шагом 50 нм. При расчёте использовались следующие параметры: $f=1$ мм, числовая апертура $NA=0,18$, максимальная высота микрорельефа $h_{\max}=2,6$ мкм, шаг дискретизации $\Delta=3$ мкм, число уровней квантования $Q=128$. При $NA=0,18$ размер апертуры

СДЛ равен 0,366 мм. По расчетам в рамках скалярной теории дифракции линза имеет эффективность около 30% на каждой из семи длин волн.

Для расчета поля за СДЛ в рамках электромагнитной теории дифракции был реализован метод фурье-мод для многослойных структур с кусочно-постоянной функцией диэлектрической проницаемости слоев [5,6]. Метод фурье-мод представляет собой хорошо развитый численный метод решения уравнений Максвелла, ориентированный на моделирование дифракции электромагнитного излучения на периодических структурах.

В рамках настоящей работы моделировался периодический растр СДЛ. В частности, было исследовано влияние периода раstra (расстояния между соседними линзами) на формируемые фокальные пятна. Моделирование проводилось как в рамках электромагнитной теории дифракции с помощью метода фурье-мод, так и, для сравнения, в рамках скалярной теории дифракции. Моделирование показало, что для рассматриваемого примера результаты, полученные для раstra линз в рамках двух подходов, находятся в неплохом соответствии. В то же время, переход от одиночной линзы к их периодическому раstrу приводит для рассматриваемого примера к продольному смещению фокуса на расстояние, достигающее 30% фокусного расстояния для некоторых из «рабочих» длин волн.

3. Заключение

Полученные результаты показывают, что моделирование СДЛ в рамках электромагнитной теории дифракции с использованием методов, ориентированных на исследование периодических структур, затрудняет анализ фокусирующих характеристик линз. Это связано с необходимым в рамках такого подхода моделированием раstra линз, в котором соседние линзы существенно влияют на получаемые фокальные пятна. В рамках дальнейших исследований планируется перейти к моделированию в рамках электромагнитной теории дифракции отдельных линз с помощью т.н. непериодического метода фурье-мод.

4. Благодарности

Работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-29-03067; исследование СДЛ) и Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по гос. заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26; реализация моделирующего программного обеспечения).

5. Литература

- [1] Wang, P. Chromatic-aberration corrected diffractive lenses for ultra-broadband focusing / P. Wang, N. Mohammad, R. Menon // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6. – P. 21545.
- [2] Mohammad, N. Broadband imaging with one planar diffractive lens / N. Mohammad, M. Meem, B. Shen, P. Wang, R. Menon // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8. – P. 2799.
- [3] Досколович, Л.Л. Расчёт дифракционной линзы с фиксированным положением фокуса при нескольких заданных длинах волн / Л.Л. Досколович, Е.А. Безус, Д.А. Быков, Р.В. Скиданов, Н.Л. Казанский // *Компьютерная оптика*. – 2019. – Т. 43, № 6. – С. 946-955. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-946-955.
- [4] Досколович, Л.Л. Многофокусная спектральная дифракционная линза / Л.Л. Досколович, Е.А. Безус, Н.Л. Казанский // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, № 2. – С. 219-226. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-219-226.
- [5] Moharam, M.G. Stable implementation of the rigorous coupled wave analysis for surface-relief gratings enhanced transmittance matrix approach / M.G. Moharam // *J.Opt. Soc. Am. A*. – 1995. – Vol 12(5). – P. 1077-1084.
- [6] Moharam, M.G. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings / M.G. Moharam, E.B. Grann, D.A. Pommet // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 1995 – Vol. 12(5). – P. 1068-1072.