

ДИФРАКЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СОВРЕМЕННОЙ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

© 2009 г. Г. И. Грейсух*, доктор техн. наук; Е. А. Безус**, Д. А. Быков**;
Е. Г. Ежов*, доктор физ.-мат. наук; С. А. Степанов*, доктор физ.-мат. наук

* Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

** Институт систем обработки изображений РАН, Самара

E-mail: grey@pguas.ru, bycovd@gmail.com

На примере собственных разработок авторов продемонстрирован ряд направлений эффективного использования дифракционных оптических элементов. Особое внимание уделено возможности и условиям подавления зависимости дифракционной эффективности рельефно-фазовых структур таких элементов от длины волны.

Ключевые слова: дифракционные оптические элементы, абберация, многослойная рельефно-фазовая микроструктура, энергетическая спектральная селективность.

Коды OCIS: 050.1970, 090.2890

Поступила в редакцию 30.10.2008

Введение

Лазерные, фото- и электронно-литографические технологии в совокупности с современными методами формообразования, основанными на прецизионной штамповке, открыли возможность массового и экономически целесообразного производства высокоэффективных дифракционных оптических элементов (ДОЭ) с рельефно-фазовой микроструктурой, размещенной на плоских, сферических и асферических поверхностях. Это, в свою очередь позволяет, вводя ДОЭ в оптические системы устройств считывания информации с оптических дисков, в микрообъективы мобильных телефонов или видеокамер наблюдения, в проекционные объективы телевизоров и дисплеев, в визуальные тракты эндоскопов и проч., значительно улучшить их технические характеристики без увеличения или даже при сокращении стоимости. Наряду с ДОЭ, проводящими заданное преобразование падающего излучения в один рабочий порядок дифракции, широкое применение находят многопорядковые элементы, осуществляющие требуемые преобразования одновременно в нескольких дифракционных порядках. К таким элементам относятся многопорядковые дифракционные решетки различного назначения, фокусаторы и проч.

Дифракционные линзы в фокусирующих и изображающих системах

Пропускающий ДОЭ с вращательно-симметричной микроструктурой, закон чередования кольцевых зон которого подобен соответствующему

закону зонной пластинки Френеля, представляет собой дифракционную линзу (ДЛ). Отношение мощности излучения в заданном дифракционном порядке к мощности падающего на элемент излучения, т. е. дифракционная эффективность (ДЭ), зависит от вида модуляции освещающей волны микроструктурой линзы. В случае рельефно-фазовой микроструктуры с пилообразным профилем штриха ДЭ в первом дифракционном порядке на расчетной длине волны λ_0 может приближаться к 100%, если приращение оптического пути на одном периоде пилообразного рельефа $\Delta l = \lambda_0$ [1, 2]. С уменьшением глубины рельефа ДЭ в первом дифракционном порядке уменьшается, а в нулевом – растет, и при $\Delta l = 0,5\lambda_0$ они становятся $\approx 40\%$.

Оптическая сила и составляющие сферической абберации ДЛ легко управляются путем изменения закона чередования кольцевых зон. ДЛ является сильным диспергирующим элементом, чей первичный хроматизм существенно превышает хроматизм обычной рефракционной линзы (РЛ), выполненной из любого существующего оптического материала и, более того, имеет противоположный знак. Это позволяет существенно расширить возможности ахроматической и даже апохроматической коррекции оптических систем благодаря использованию гибридных компонентов, включающих ДЛ и РЛ [2–6]. Однако устранение первичного хроматизма еще не гарантирует высокое качество полихроматического изображения, если не приняты меры для минимизации сферохроматизма. Эта задача также успешно может решаться в

гибридных системах, включающих ДЛ и РЛ с асферическими поверхностями [7]. Наконец, несомненно ценными являются и такие абберационные свойства ДЛ, как быстрая сходимость абберационного разложения и автоматическое выполнение условия Петцваля, требуемое для получения плоского стигматического изображения.

В зависимости от назначения и условий работы оптической системы необходима первоочередная коррекция определенных групп аббераций. Существующие методики (например, [2–4, 8]) позволяют находить схемы и конструктивные параметры систем, у которых такая коррекция достигается при минимально возможном количестве дифракционных и рефракционных элементов. Ниже это демонстрируется на конкретных примерах.

Постоянное развитие и параллельное использование нескольких форматов оптических дисков обуславливает актуальность создания и совершенствования комбинированных устройств их чтения/записи. Задача усложнена тем, что объектив устройства должен иметь значительную апертуру, а при переходе с формата на формат скачкообразно изменяется не только рабочая длина волны, но и толщина плоскопараллельного слоя над информационной поверхностью диска (рис. 1). Кроме того, необходимо чтобы система объектив–диск была свободна от всех аббераций, ограничивающих качество фокусировки не только на оси, но и вблизи нее. Все вышеперечисленные требования для CD и DVD-форматов могут быть удовлетворены при построении объектива из ДЛ на поликарбонатной подложке и РЛ, выполненной из того же пластика и имеющей две асферические поверхности [9]. С целью упрощения конструкции и снижения массы объектива дифракционная структура может быть перенесена с плоскопараллельной подложки на переднюю асферическую поверхность РЛ.

Фотообъективы и, в частности, микрообъективы мобильных телефонов или видеокамер наблюдения, работающие в видимом спектральном диапазоне, требуют, прежде всего, устранения хроматизма положения и увеличения, а затем и сферохроматизма. Если к тому же учесть, что такие объективы должны формировать плоское изображение в широком поле зрения с высоким разрешением при низкой дисторсии то ясно, что параллельно требуется минимизация всех монохроматических аббераций.

На рис. 2 представлена схема микрообъектива, состоящего из трех РЛ, выполненных из по-

лиметилметакрилата и имеющих асферические поверхности. На заднюю поверхность первой РЛ микрообъектива нанесена рельефно-фазовая дифракционная структура. Оптимизация этой схемы позволила получить дисторсирующий план-апохромат с фокусным расстоянием $f' = 3,712$ мм, который при относительном отверстии 1:2,4 обеспечивает разрешение 98 мм^{-1} при контрасте не ниже 0,5 в пределах полевого угла $2\omega \leq 60^\circ$. Остаточный хроматизм положения в диапазоне от $\lambda_{\min} = \lambda_F = 0,48613$ мкм до $\lambda_{\max} = \lambda_C = 0,65626$ мкм не превышает 7,5 мкм, а дисторсия – меньше 0,5%.

Введение ДОЭ в составе корректора аббераций в визуальный тракт жесткого градиентного эндоскопа, сопряженного с ПЗС камерой (рис. 3), позволяет одновременно со снижением уровня

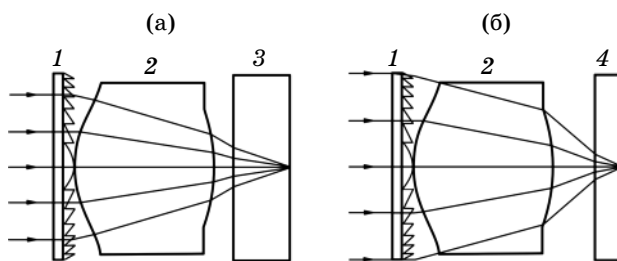


Рис. 1. CD/DVD-система объектив – цифровой диск. 1 – ДЛ, 2 – РЛ с двумя асферическими поверхностями, 3 – CD-диск, 4 – DVD-диск.

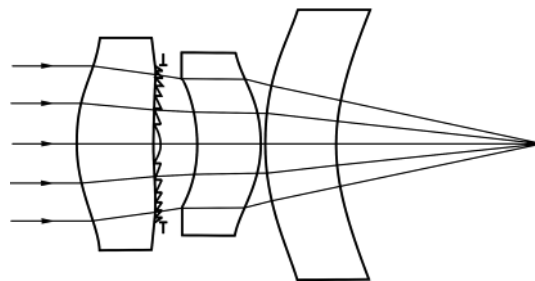


Рис. 2. Принципиальная оптическая схема микрообъектива.

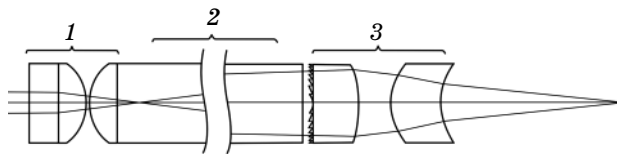


Рис. 3. Оптическая схема апохроматизированного визуального тракта жесткого эндоскопа, включающего двухлинзовый объектив (1), градиент-транслятор (2) и гибридный трехлинзовый корректор (3).

превалирующих монохроматических аберраций достичь апохроматизации, обеспечив равенство фокусных расстояний и задних отрезков на трех выбранных длинах волн. В результате разрешение системы увеличивается по отношению к разрешению некоррегированной системы в центре поля в 3,5 раза, а на краю – в 1,5 раза. При этом разрешение на краю поля ограничено не остаточными аберрациями, а виньетированием лучей, проходящих через транслятор эндоскопа [10].

Весьма ощутимый выигрыш может быть получен благодаря использованию ДЛ и в проекционных объективах телевизоров и дисплеев. В этих приборах с помощью осветителя последовательно красным, зеленым и синим светом освещается специальная микросхема. Такие микросхемы, разработанные фирмой *Texas Instruments* и получившие название *Digital Micromirror Device* (DMD-чип), представляют собой пространственные модуляторы света, содержащие матрицу индивидуально управляемых микроскопических зеркал. Приборы, реализующие эту технологию, получили название “телевизоры с проекцией на просвет” (RPTV – *rear projection TV*). Типичная схема оптического тракта RPTV представлена на рис. 4.

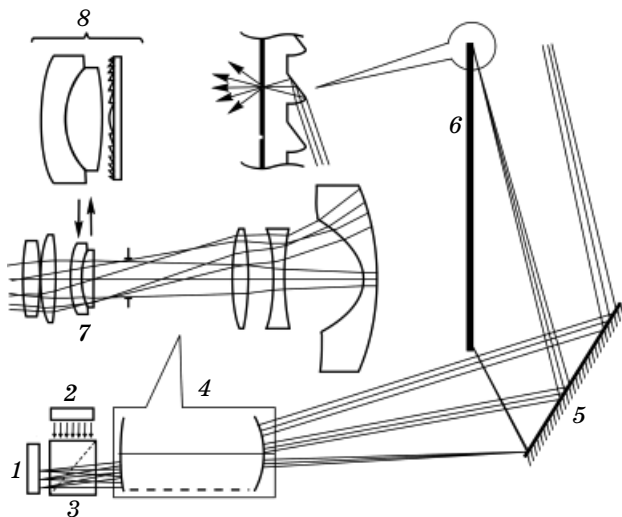


Рис. 4. Типичная схема оптического тракта RPTV и предложенный вариант модификации проекционного объектива. 1 – DMD-чип, 2 – осветитель, 3 – светоделитель, 4 – рефракционно-линзовая часть проекционного объектива, 5 – асферическое зеркало проекционного объектива, 6 – RP-экран, 7 – заменяемый компонент, 8 – дифракционно-рефракционный корректор.

Изображение, формируемое объективом RPTV, под большим углом проецируется на специальный, работающий на пропускание экран (RP-экран). Стремление уменьшить толщину проекционного телевизора или дисплея усложняет схему и ужесточает требования к уровню остаточных монохроматических аберраций проекционного объектива, что в совокупности существенно ограничивает возможности коррекции хроматизма. Замена одного из ближайших к апертурной диафрагме компонентов проекционного объектива 7 на корректор 8, состоящий из двух склеенных РЛ и ДЛ (рис. 4), позволяет апохроматизировать объектив, уменьшить поперечный хроматизм и одновременно снизить уровень остаточных монохроматических аберраций [11].

Подавление зависимости дифракционной эффективности рельефно-фазовых дифракционных структур от длины волны

Зависимость угла дифракции электромагнитной волны на структуре элемента от ее длины сопровождается одновременным перераспределением энергии между различными дифракционными порядками. Изменение ДЭ в рабочем дифракционном порядке с изменением длины волны в ряде случаев может существенно ограничивать целесообразность использования ДОЭ.

Преодолеть указанное ограничение позволяет предложенное в 1985 г. А.В. Лукиным, К.С. Мустафиным и Р.А. Рафиковым решение, ослабляющее энергетическую спектральную селективность (ЭСС) работающей на пропускание структуры и выравнивающее с той или иной степенью точности ДЭ в заданном спектральном интервале [12, 13]. Это решение предполагает построение многослойной и, в частности, двухслойной рельефно-фазовой микроструктуры, выполненной в плоскопараллельной пластине, составленной из двух оптических материалов, каждый из которых ограничен плоской и рельефной поверхностями. Рельефные поверхности подобны, имеют одинаковую глубину и находятся в оптическом контакте друг с другом (рис. 5). Аналогичное решение предложено и в ряде других более поздних работ (например, [14]).

Методика выбора материалов для двухслойных рельефно-фазовых структур с одним внутренним рельефом приведена в работе [15], где показано, что подавление спектральной селективности возможно, если материалы двух слоев имеют разную дисперсию и меньшую дисперсию

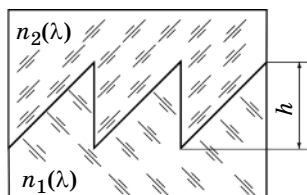


Рис. 5. Двухслойная пилообразная рельефо-фазовая микроструктура с ослабленной ЭСС, имеющая один внутренний рельеф.

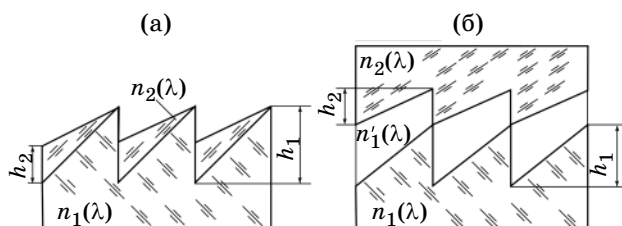


Рис. 6. Двухслойные пилообразные рельефо-фазовые микроструктуры с ослабленной ЭСС. (а) – структура с внутренним и наружным рельефами, (б) – структура с двумя внутренними рельефами.

имеет материал с большим показателем преломления. В случае стекол это реализуется парой, включающей крон (малая дисперсия) и флинт (большая дисперсия), причем показатель преломления крона должен превышать показатель преломления флинта.

Для массового производства наибольший интерес представляют дифракционные структуры, выполненные из оптических пластмасс. Выбор последних весьма ограничен, и кроноподобные пластмассы (типа акрила или полиметилметакрилата) имеют меньший показатель преломления, чем флинтоподобные (типа полистирола или поликарбоната). Решения, направленные на ослабление спектральной селективности рельефо-фазовых дифракционных структур, выполненных из таких материалов, предложены в работах [16, 17]. Положительный эффект достигается за счет использования двух или более рельефов с разной глубиной. В случае выполнения структуры из двух оптических материалов предложено два варианта чередования ее слоев, как показано на рис. 6.

Основанная на бесконечно тонком скалярном приближении методика подавления ЭСС и получения конструктивных параметров двухрельефных микроструктур приведена в работе [18]. В силу близости показателей преломления кроно- и флинтоподобных пластмасс оптимальная глу-

бина рельефа h_1 двухрельефных пилообразных микроструктур, обеспечивающая ослабление ЭСС при максимально достижимой в рабочем порядке ДЭ, более чем в 30 раз превышает центральную длину волны видимого спектрального диапазона. Это обстоятельство накладывает ограничение снизу на отношение периода микроструктуры к ее максимальной глубине, при котором результаты, получаемые в бесконечно тонком скалярном приближении, еще достоверны. Расчеты, выполненные путем строгого решения системы уравнений Максвелла, в частности, показали, что при более чем двукратном превышении периода структуры над глубиной микрорельефа скалярная методика позволяет для любой пары кроно- и флинтоподобных материалов с высокой степенью достоверности оценить предельно достижимое подавление спектральной селективности и получить конструктивные параметры структуры, обеспечивающие такое подавление. И в этом случае благодаря использованию второго слоя у двухпорядковых микроструктур с пилообразным рельефом достижимо четырехкратное снижение ЭСС, в то время как у однопорядковых пилообразных микроструктур она может быть снижена почти в 20 раз.

Заключение

Приведенные в статье примеры демонстрируют возможность, опираясь на существующие методики, находить схемы и конструктивные параметры оптических систем различного функционального назначения, у которых требуемый уровень коррекции монохроматических и хроматических аберраций достигается при минимально возможном количестве дифракционных и рефракционных элементов.

Показано, что использование многослойной и, в частности, двухслойной рельефо-фазовой микроструктуры, позволяет существенно снизить зависимость дифракционной эффективности ДОЭ от длины волны. Оптимальные конструктивные параметры такой структуры могут быть легко получены с использованием скалярной методики при условии, что период микроструктуры не менее чем в два раза превышает ее глубину.

ЛИТЕРАТУРА

1. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 640 с.
2. Ган М.А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов. Л.: ГОИ, 1984. 140 с.

3. Бобров С.Т., Грейсух Г.И., Туркевич Ю.Г. Оптика дифракционных элементов и систем. Л.: Машиностроение, 1986. 223 с.
4. Greisukh G.I., Bobrov S.T., Stepanov S.A. Optics of diffractive and gradient-index elements and systems. Bellingham: SPIE Press, 1997. 414 p.
5. Ган М.А. Голографическая коррекция aberrаций. История и современное развитие // Сб. трудов пятой международной конференции “Голография ЭКСПО-2008”. М., 2008. С. 20.
6. Greisukh G.I., Ezhov E.G., Stepanov S.A. Diffractive-refractive hybrid corrector for achro- and apochromatic corrections of optical systems // Appl. Opt. 2006. V. 45. № 24. P. 6137–6141.
7. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Степанов С.А. Сравнительный анализ хроматизма дифракционных и рефракционных линз // Компьютерная оптика / М.: ИСОИ РАН, МЦНТИ, 2005. В. 28. С. 60–65.
8. Ежов Е.Г. Разработка схем и методик расчета центрированных оптических систем, включающих однородные линзы с асферическими поверхностями, дифракционные и градиентные элементы // Автореф. докт. дис. СГАУ им. С.П. Королева, 2007.
9. Ezhov E.G. Design of combined pick-up optical heads // Appl. Opt. 2006. V. 45. № 31. P. 8040–8043.
10. Ежов Е.Г., Степанов С.А. Апохроматизация жесткого градиентного эндоскопа // Автометрия. 2007. Т. 43. № 1. С. 91–97.
11. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Степанов С.А., Братищев А.А. Projection optical system for rear projection display (Проекционная оптическая система) // Заявка на патент № 2006118187.
12. Лукин А.В., Мустафин К.С., Рафиков Р.А. Голограммный оптический элемент // Патент РФ № 1271240. 1996.
13. Лукин А.В. Голограммные оптические элементы // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 1. С. 80.
14. Ebstein S.T. Achromatic diffractive optical elements // Proc. SPIE. 1995. V. 2404. P. 211.
15. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Степанов С.А. Выбор материалов для “ахроматизации” дифракционных структур // Компьютерная оптика. 2008. Т. 32. № 1. С. 43–46.
16. Takehiko Nakai. Diffractive optical element and optical system having the same // Patent No. US 6,262,846 B1. 2001.
17. Takehiko Nakai. Diffractive optical element and optical system including the same // Patent No. US 20070297057A1. 2007.
18. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Степанов С.А. Подавление зависимости дифракционной эффективности двухпорядковых рельефно-фазовых дифракционных структур от длины волны // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 2. С. 3–6.