

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОТТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С ДОО

А.В. Волков, Н.Л. Казанский, Г.В. Успенцев
Институт систем обработки изображений РАН

Введение

Широкие функциональные возможности, минимальные массогабаритные характеристики, низкая себестоимость тиражирования обеспечивают хорошие перспективы использования дифракционных оптических элементов (ДОО) в светотехнических устройствах. Имеются в виду в первую очередь устройства, формирующие монохроматическое излучение. Однако развитие современных технологий создания «квазидифракционных» (или «гармонических» [1,2]) оптических элементов с высотой рельефа, пропорциональной большому количеству длин волн, позволяет не только сохранить преимущества дифракционной оптики, но и минимизировать хроматические aberrации ДОО.

Первой работой, послужившей теоретической основой для использования ДОО в светотехнических приборах, можно считать публикацию [3]. В ней разрабатывалась теория расчета ДОО, формирующей требуемую диаграмму направленности излучения. Продолжением указанной темы является работа [4], посвященная созданию теоретических и программных средств для проектирования светотехнических устройств с ДОО. Настоящая статья посвящена экспериментальному исследованию светотехнических устройств, проектирование которых описано в работе [5].

1. Описание исследуемых светотехнических устройств

В работе [5] рассмотрена новая компоновка светорассеивателя заднего фонаря автомобиля. Задачей каждой секции светорассеивателя является формирование расходящегося светового пучка прямоугольной формы, имеющего разные углы расходимости по вертикали и горизонтали. В некоторых европейских моделях легковых автомобилей решение этой задачи воплощается в виде «сэндвича» из двух (перпендикулярных друг другу) наборов цилиндрических линз (рис. 1). Каждый из наборов цилиндрических линз отвечает за обеспечение требуемого угла расходимости пучка в одном из направлений (по вертикали или горизонтали), а вся система в целом – формирование требуемой диаграммы направленности излучения. При этом большинство секций (стоп-сигнал, сигнал поворота, противотуманный сигнал) характеризуются монохроматическим излучением, за исключением сигнала заднего хода. Это облегчает реализацию двух наборов (и соответственно двух оптических пластин) в виде одного оптического элемента с дифракционным микрорельефом, обеспечивающего фазовое пропускание равное сумме фазовых функций двух наборов цилиндрических линз. Расчет и изготовление такого оптического элемента не представляет никакой сложности, а улучшение конструктивного решения и технологии

сборки задних огней очевидны. При тиражировании такого элемента средствами штамповки на полиметилметакрилате (ПММА) себестоимость новой пластины практически не отличается от себестоимости одного из двух используемых ранее наборов цилиндрических линз. На рисунке 2 приведены фотошаблоны сегментов скрещенных цилиндрических линз для стоп-сигнала (а) и сигнала поворота (б), а также общий вид фотошаблона секции стоп-сигнала (в) вместе с дизайнерскими линиями.

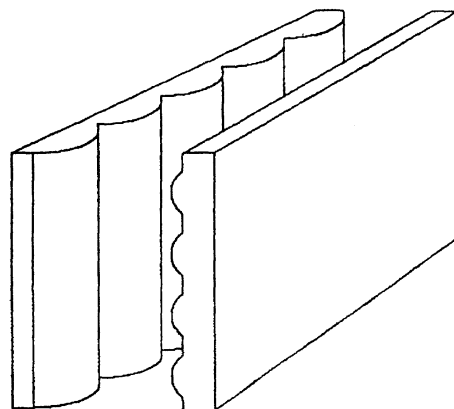
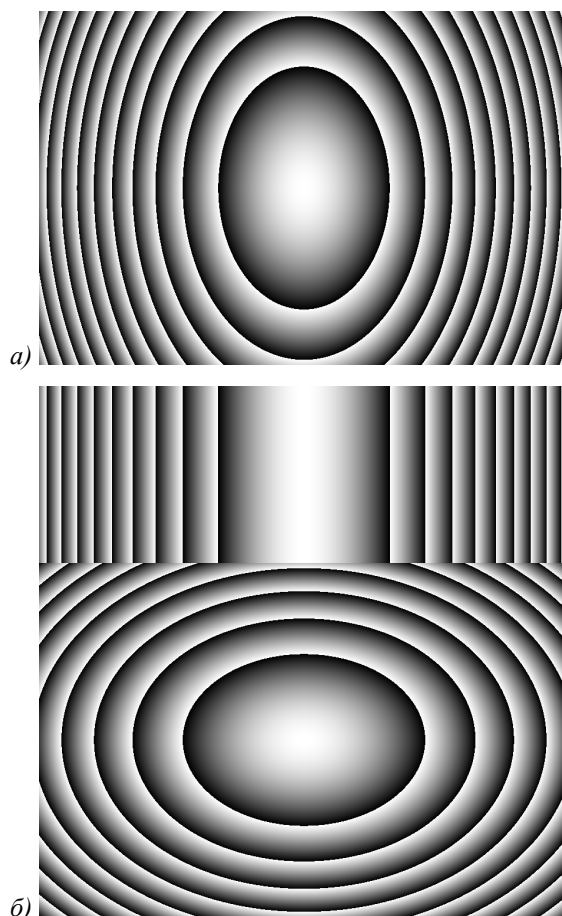


Рис. 1. Общий вид скрещенных массивов цилиндрических линз в заднем фонаре автомобиля



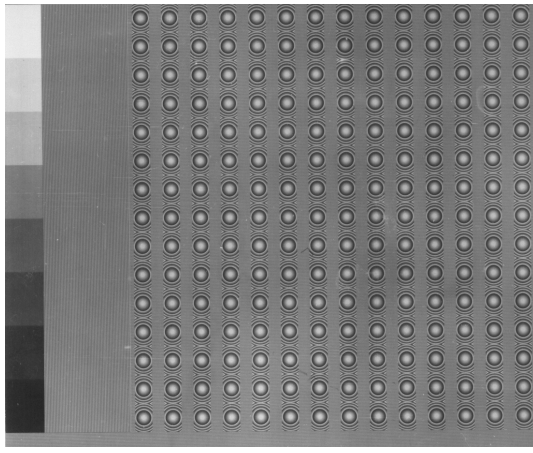


Рис. 2. Фотошаблоны ячеек секций стоп-сигнала (а) и поворота (б), а также общий вид секции стоп-сигнала (в)

Испытания макета нового фонаря описаны в следующем разделе.

В качестве актуального примера исследования оптической системы в [5] рассмотрена задача проектирования фары автомобиля. Международные требования к диаграмме направленности излучения такой оптической системы заключаются в формировании удаленного распределения интенсивности, схематично представленного на рис. 3. Построение такой формы диаграммы направленности излучения объясняется не только необходимостью освещения дороги перед автомобилем, но и задачей освещения части пространства, непосредственно прилегающей к шоссе по направлению движения, и требованием неослепления водителей движущегося навстречу транспорта.

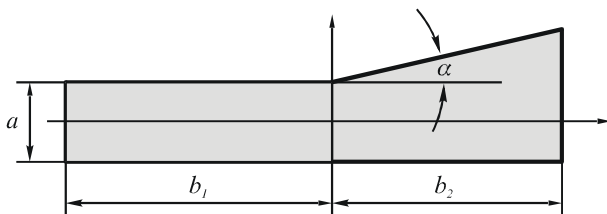


Рис. 3. Требуемая форма диаграммы направленности автомобильной фары

В современном автомобилестроении задача формирования требуемой диаграммы направленности решается, в частности, за счет использования сложной формы отражателя (например, сплюснутый по вертикали эллипсоид), диафрагмы, которая расположена в передней фокальной плоскости мощной линзы и повторяет форму диаграммы направленности (см. рис. 4), и других ухищрений.

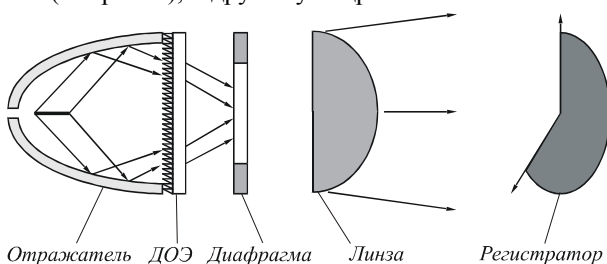


Рис. 4. Оптическая схема автомобильной фары

Использование ДОЭ позволяет упростить форму отражателя, повысить энергетическую эффективность и технологичность фары, улучшить ее функциональные характеристики и уменьшить стоимость изготовления [5]. Целью исследований в [5] была замена отражателя, имеющего дорогостоящую в изготовлении форму сплюснутого по вертикали эллипсоида, на осесимметричный эллиптический отражатель, который значительно дешевле. Для этого в оптическую схему фары (рис. 4) вводился дифракционный оптический элемент, перераспределяющий излучение из экранирующей части диафрагмы в открытую (пропускающую) часть. В качестве такого ДОЭ для оптической схемы, представленной на рис. 4, в [5] рассматривался квазипериодический фокусатор в отрезок [6]. При этом фокальный отрезок размещался в открытой части диафрагмы вблизи и вдоль нижней границы. Результаты моделирования такой оптической схемы с дифракционным оптическим элементом и без него показали эффективность использования ДОЭ [5]. При этом использовались следующие параметры оптической схемы: длина излучающей спирали - 5 мм; радиус спирали - 0,5 мм; число витков спирали - 14; смещение центра спирали от задней стенки отражателя - 18 мм; размеры полуосей осесимметричного эллипсоида-отражателя вдоль оси Z - 50 мм, вдоль осей X и Y - 40 мм; диаметр круглого отверстия в задней части отражателя для установки источника света - 10 мм; глубина отражателя - 50 мм; период на дифракционном оптическом элементе - 1 мм; длина отрезка - 30 мм; расстояние между краем отражателя и диафрагмой - 20 мм; угол наклона половины диафрагмы (соответствующий углу α на формируемой диаграмме направленности - рис. 3) - 15 градусов; диаметр линзы - 59 мм; толщина линзы - 14 мм; показатель преломления материала линзы - 1,5; расстояние от диафрагмы до линзы - 52 мм; расстояние до плоскости регистрации - 25 м. Выбранное расстояние до плоскости регистрации является стандартным при испытаниях в автомобилестроении.

Разработанный подход [4,5] позволяет создавать и исследовать оригинальные оптико-схематические решения, основанные на применении волноводных и дифракционных структур. К новому классу исследованных оптических систем относятся *компланарные осветители*. Особенностью компланарных систем является то, что подводимое сбоку (в торец) излучение затем распределяется по выходной поверхности, создавая равномерно светящееся фронтальное изображение. В [5] рассмотрено проектирование и исследование средствами вычислительного эксперимента нескольких оптических схем, реализующих идею такого устройства.

Оптическая схема 1, изображенная на рис. 5, представляет собой плоскопараллельную пластину. На передней (верхней - рис. 5) стороне пластины находится дифракционный микрорельеф, на противоположной (нижней) стороне находится отражающая дифракционная решетка. Оптическая схема работает

следующим образом. Квазиколлимированный световой пучок от источника света падает на дифракционную решетку. Отраженный поток представляет собой суперпозицию нескольких световых пучков, распространяющихся в различных направлениях. Параметры отражающей дифракционной решетки выбираются таким образом, чтобы существовали только два отраженных пучка. Первый пучок распространяется вдоль пластины, второй пучок выходит перпендикулярно пластине через дифракционный микрорельеф наружу.

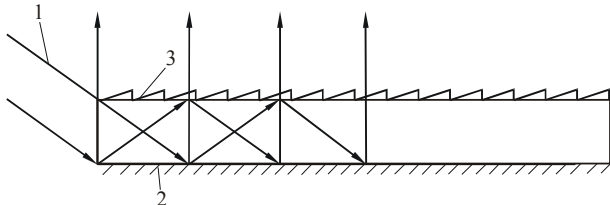


Рис. 5. Оптическая схема 1 компланарного осветителя.

- 1 - падающее излучение;
2 - отражающий дифракционный микрорельеф;
3 - пропускающий дифракционный микрорельеф

Оптическая схема 2, изображенная на рис. 8, также представляет собой плоскопараллельную пластину. На одной грани плоскопараллельной пластины, обращенной к наблюдателю, нанесен дифракционный микрорельеф, служащий для формирования заданной диаграммы направленности. На противоположной грани пластины нанесен рельеф с треугольным профилем, отражающим излучение. Оптическая схема работает следующим образом. Квазиколлимированный световой поток, формируемый источником света, падает на рельеф с отражающим покрытием. Отраженный свет проходит через дифракционный микрорельеф, нанесенный на передней стороне пластины, формируя требуемую диаграмму направленности.

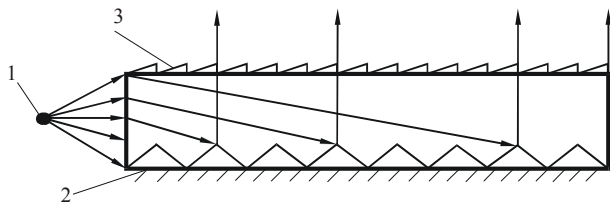


Рис. 6. Оптическая схема 2 компланарного осветителя.

- 1 - линейка светодиодов;
2 - отражающий рельеф; 3 - пропускающий дифракционный микрорельеф

Оптическая схема 3, изображенная на рис. 7, представляет собой совмещенные призматические пластины с показателем преломления n_1 , которые разделяет пилообразная щель, заполненная материалом с показателем преломления n_2 . Нижняя часть пластины является отражающей и не выпускает излучение наружу, а на верхней части пластины располагается пропускающий дифракционный микрорельеф, формирующий требуемую диаграмму направленности.

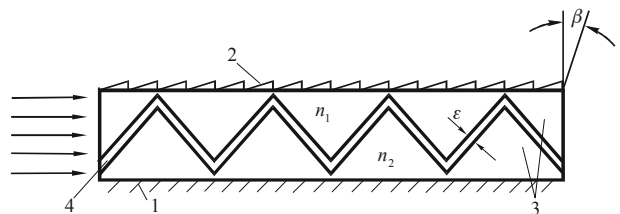


Рис. 7. Оптическая схема 3 компланарного осветителя.

- 1 - отражающее покрытие;
2 - пропускающий дифракционный микрорельеф;
3 - оптическая среда с показателем преломления n_1 ;
4 - оптическая среда с показателем преломления n_2

Соотношение между показателями преломления n_1 и n_2 выбирается в оптической схеме 3 таким образом, чтобы равномерно распределить световой поток по глубине пластины при выбранной ширине осветителя. Это обеспечивает равномерное распределение интенсивности на фронтальной выходной поверхности за счет отражения нужной доли излучения на границе двух сред.

Если необходимо (например, с точки зрения дизайна), пластины осветителей могут быть плавно изогнуты, повторяя форму кузова легкового автомобиля или интерьера.

Целью моделирования, проведенного в [5] был выбор работоспособных оптических схем (кроме представленных на рис. 5-7 рассматривались и другие) и определение оптимальных параметров исследуемой оптической схемы. В качестве критерия качества осветителя использовалось требование равномерности распределения интенсивности выходного светового потока. Такие требования предъявляются, в частности, при проектировании задних сигнальных огней легковых автомобилей.

Результатом серии вычислительных экспериментов были выбраны [5] следующие параметры и вид оптической схемы 1 (рис. 5): выходной дифракционный микрорельеф 3 отсутствует, вместо него на входе излучения в пластину стоит обычная бинарная пропускающая дифракционная решетка, которая формирует два пучка, падающих под углом на отражающий микрорельеф и на выходную плоскость, отражаясь от которой излучение проходит дальше вдоль пластины; фокусное расстояние линзы светодиода - 5 мм; диаметр линзы светодиода - 5 мм; длина пластины - 100 мм; толщина пластины - 3 мм; расстояние между светодиодом и торцом пластины - 5 мм; число светодиодов на стороне - 10 (по 10 диодов светят с правой и левой сторон пластины); расстояние между диодами - 5 мм; микрорельеф отражающей решетки рассчитывается таким образом, чтобы 95% падающей на решетку энергии уходило дальше (в нулевой порядок дифракции), а 5% энергии шло через выходную плоскость наружу (в минус первый порядок). Используемая в расчетах модель светодиода предполагает, что в первой фокальной плоскости менисковой линзы (выходной линзы светодиода) расположена светящаяся квадратная площадка размером 1 мм на 1 мм. Проведенный в [5]

теоретический анализ подтвердил работоспособность рассмотренной модификации оптической схемы 1 (рис. 5) при выбранных параметрах даже в отсутствие выходного дифракционного микрорельефа.

Для оптической схемы 2 (рис. 6) в результате моделирования [5] были выбраны следующие параметры: фокусное расстояние линзы светодиода - 5 мм; диаметр линзы светодиода - 5 мм; расстояние между светодиодом и торцом пластины - 1 мм; число светодиодов на стороне - 15 (по 15 диодов светят с правой и левой сторон пластины); расстояние между диодами - 5 мм; высота отражающего рельефа - 0,5 мм; число периодов отражающего рельефа - 100 (длина пластины, соответственно, - 100 мм); толщина пластины - 8 мм.

Для оптической схемы 3 (рис. 7) в результате моделирования [5] был выбран следующий упрощенный вариант: выходной дифракционный микрорельеф отсутствует, в качестве среды с показателем преломления n_1 используется воздух - $n_1=1$, в качестве среды с показателем преломления n_2 используется плексиглас - $n_2=1,5$; фокусное расстояние линзы светодиода - 5 мм; диаметр линзы светодиода - 5 мм; расстояние между светодиодом и краем гребенки - 5 мм; число светодиодов на стороне - 10 (по 10 диодов светят с правой и левой сторон пластины); расстояние между диодами - 5 мм; толщина слоя с показателем преломления n_2 $\varepsilon=0,4$ мм; длина пластины - 100 мм.

Проведенные в [5] теоретические исследования продемонстрировали работоспособность предложенных оптических схем и послужили основой для создания нескольких макетных образцов компланарных осветителей. При этом выбор оптимальной из исследованных оптических схем может быть осуществлен по другим (не оптическим) критериям: технологичность, дешевизна выпуска, минимальные массогабаритные характеристики и т.п. По совокупности достоинств и результатам оптических испытаний наиболее перспективной представляется оптическая схема 1 (рис. 5).

2. Результаты испытаний светотехнических устройств с ДОЭ

Для исследования качества работы светотехнических устройств, описанных выше, использовалась

Таблица 1.

Требования стандарта ЕС к фотометрической картине сигнала поворота заднего фонаря автомобиля

Угол по вертикали	Угол по горизонтали						
	-20°	-10°	-5°	0°	5°	10°	20°
10°			20%		20%		
5°	10%	20%		70%		20%	10%
0°		35%	90%	100%	90%	35%	
-5°	10%	20%		70%		20%	10%
-10°			20%		20%		

Описанный в разделе 1 метод реализации светорассеивателя заднего фонаря автомобиля в виде

автоматизированная установка, схематически представленная на рисунке 8. Фотография установки для испытания заднего фонаря автомобиля приведена на рисунке 9.

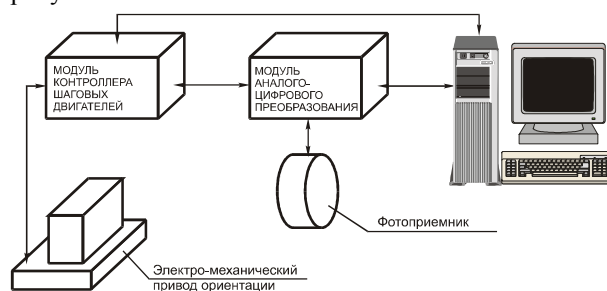


Рис. 8. Блок-схема автоматизированной системы обработки фотометрической информации



Рис. 9. Общий вид автоматизированной системы испытаний светотехнических устройств

В качестве устройства ввода фотометрических данных вместо камеры целесообразно использование прецизионных откалиброванных люксметров класса LX-02 (рис. 9). Результаты измерения показателей работы светотехнических устройств автомобиля должны удовлетворять требованиям стандартов Европейского Сообщества на яркость центра картины и процент спада интенсивности по углам зрения на установленном расстоянии. В частности, требования по спаду интенсивности излучения для сигнала порога заднего фонаря должны быть в процентах не хуже, чем представленные в таблице 1.

единой пластинки с наборами скрещенных линз, оригинальных для каждой секции фонаря (рис. 2),

был использован для формирования макета такого фонаря. При этом для изготовления микрорельефа с максимальной высотой 50 - 60 мкм (пропорциональной 50 длинам волн) использовалась технология формирования «квазидифракционного» микрорельефа на основе эффекта темного роста в слоях жидких фотополимеризующихся композиций

(ЖФПК) [1,7]. Результаты испытаний одной из секций (сигнал поворота) такого фонаря представлены в таблице 2. С учетом того, что яркость в центре картины удовлетворяет требованиям стандарта, общая равномерность засветки картины с большим запасом вписывается в стандарты ЕС.

Таблица 2.

Результаты испытаний сигнала поворота, квазидифракционный светорассеиватель которого изготовлен на основе ЖФПК

Угол по вертикали	Угол по горизонтали						
	-20°	-10°	-5°	0°	5°	10°	20°
10°			77.29%	78.36%	79.71%		
5°	72.46%	82.61%	86.96%	91.79%	89.86%	77.78%	67.63%
0°	72.46%	88.89%	97.10%	100%	94.20%	82.13%	69.08%
-5°	73.43%	82.13%	91.79%	93.72%	90.82%	79.23%	65.22%
-10°			79.71%	79.71%	77.78%		

В качестве дифракционного элемента в оптической схеме фары (рис. 4) при испытаниях использовался бинарный квазипериодический ДОЭ, фокусирующий излучение в область, приближенную по форме к форме отверстия диафрагмы. На рисунке 10 представлена диаграмма направленности, формируемая ячейкой квазипериодического ДОЭ. Расчет ячейки проводился на основе метода согласованных прямоугольников [8], полученная фазовая функция использовалась затем для создания квазипериодического ДОЭ [6]. Использование для испытаний бинарного элемента обусловлено технологической простотой получения бинарного микрорельефа.

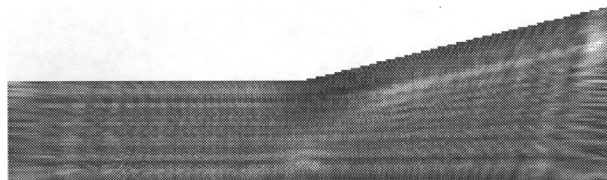


Рис. 10. Диаграмма направленности излучения, формируемого одиночной ячейкой квазипериодического ДОЭ

На рисунке 11 представлены результаты испытания фары (рис. 4) с бинарным квазипериодическим ДОЭ, но без диафрагмы. Симметрия полученной картины обусловлена бинарным характером микрорельефа ДОЭ. При введении в оптическую схему диафрагмы симметрия диаграммы направленности устраняется, и получаемая картина практически полностью начинает соответствовать требуемой (рис. 3). При этом энергетическая эффективность работы фары увеличивается на 12-14% по сравнению с работой осесимметричного эллиптического рефлектора с диафрагмой, но без бинарного ДОЭ. При качественном изготовлении многоуровневого ДОЭ и использовании его вместо бинарного эффективность может быть дополнительно увеличена на 10-15%.

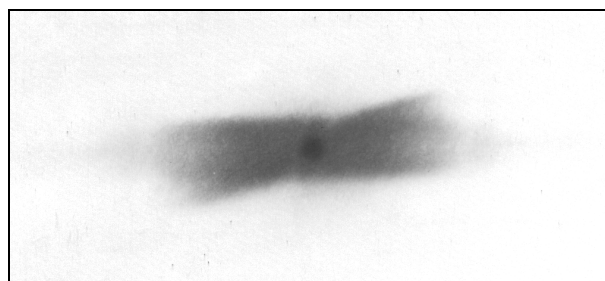


Рис. 11. Диаграмма направленности, формируемая оптической схемой фары (рис. 4) без диафрагмы с бинарным квазипериодическим ДОЭ

Для исследования работоспособности компланарных осветителей были изготовлены макетные образцы, реализующие оптические схемы 1 и 3, представленные на рисунках 5 и 7 соответственно. Целью реализации было изготовление полного макета заднего фонаря автомобиля с минимальными массогабаритными характеристиками, поэтому для каждой секции фонаря был рассчитан оригинальный микрорельеф, обеспечивающий формирование требуемой диаграммы направленности секции. Дифракционный микрорельеф формировался средствами сухой литографии (плазмохимического травления [9-10]) на основе фотошаблонов, полученных на электронном литографе ZVA-20 фирмы «Карл Цейс» (г. Йена, Германия) и круговой лазерной записывающей машины [11] Института автоматики и электротехники СО РАН (г. Новосибирск). Внешний вид работающих секций, реализующих разные оптические схемы, представлен на рисунке 12.

В таблице 3 представлено измеренное распределение от компланарной секции поворота заднего фонаря автомобиля, реализованного на основе оптической схемы 3 (рис. 7). Сравнения с требованиями (табл. 1) свидетельствуют об удовлетворении стандарта с большим запасом по равномерности формируемой диаграммы направленности. Характеристики реализации схемы 1 (рис. 5) несколько выше.

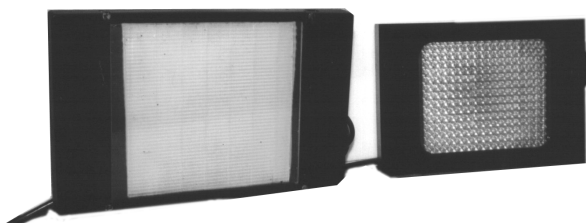


Рис. 12. Внешний вид работающих компланарных осветителей, изготовленных в соответствии с оптическими схемами 1 (рис. 5) и 3 (рис.7)

Таблица 3.

Результаты тестирования компланарной секции поворота заднего фонаря автомобиля, реализованной в соответствии с оптической схемой 3 (рис.7)

Угол по вертикали	Угол по горизонтали						
	-20°	-10°	-5°	0°	5°	10°	20°
10°			32.68%	37.96%	34.76%		
5°	18.78%	39.64%	61.83%	77.26%	63.27%	40.40%	18.04%
0°	20.53%	46.16%	78.67%	100%	77.06%	45.17%	18.83%
-5°	18.06%	34.85%	52.84%	60.93%	50.27%	34.29%	16.50%
-10°			28.63%	30.79%	27.50%		

Заключение

Проведенные исследования созданных макетных образцов светотехнических устройств подтверждают перспективность использования ДОЭ в светотехнике. Особый выигрыш в массогабаритных характеристиках достигается при совместном использовании волноводных, дифракционных, градиентных и других структур современной оптики так, как это происходит при проектировании компланарных осветителей.

Благодарность

Авторы выражают благодарность С.Г. Волотовскому, М.А. Голубу, В.А. Данилову, Л.Л. Досколовичу, В.Н. Ершову, О.Ю. Моисееву, К.В. Овчинникову, А.Г. Полещуку, Ю.А. Рункову, О.Е. Рыбакову, В.С. Соловьеву, С.И. Харитонову, В.В. Черкашину, Д.М. Якунковой за помощь в изготовлении исследованных устройств.

Литература

1. Экспериментальное исследование массопереноса в жидких фотополимеризующихся композициях / Волков А.В., Волотовский С.Г., Гранчак В.М., Казанский Н.Л., Моисеев О.Ю., Соифер В.А., Соловьев В.С., Якункова Д.М. // Журнал технической физики. - 1995. - Т.65, № 9. - С. 181-185.
2. Sweeney D.W., Sommargren G.E. Harmonic diffractive lenses // Applied Optics. - 1995. - Vol.34, № 14. - P.2469-2475.
3. Синтез оптической антенны / Голуб М.А., Казанский Н.Л., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Соифер В.А. // Компьютерная оптика. - М.: МЦНТИ, 1987. - Вып. 1. - С.35-40.
4. Казанский Н.Л., Соифер В.А., Харитонов С.И. Математическое моделирование светотехнических устройств с ДОЭ // Компьютерная оптика. -

М.: МЦНТИ, 1995. - Вып.14-15. - Ч.2. - С.107-116.

5. Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Харитонов С.И. Проектирование светотехнических устройств с ДОЭ // Компьютерная оптика. - Самара-Москва, 1998. - Вып.18. - С.91-96.
6. Сравнительный анализ аналитических и итерационных методов решения задачи фокусировки в отрезок / Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Соифер В.А., Харитонов С.И. // Компьютерная оптика. - М.: МЦНТИ, 1993. - Вып.13. - С.16-29.
7. Технология изготовления непрерывного микро-рельефа дифракционных оптических элементов / Волков А.В., Казанский Н.Л., Соифер В.А., Соловьев В.С. // Компьютерная оптика. - Самара-Москва, 1997. - Вып.17. - С.91-93.
8. A method of designing diffractive optical elements focusing into plane areas / Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Kharitonov S.I., Soifer V.A. // Journal of Modern Optics, 1996, vol.43, № 7, pp.1423-1433.
9. Волков А.В., Казанский Н.Л., Рыбаков О.Е. Исследование технологии плазменного травления для получения многоуровневых дифракционных оптических элементов // Компьютерная оптика. - Самара-Москва, 1998. - Вып.18. - С.127-130.
10. Волков А.В., Казанский Н.Л., Рыбаков О.Е. Разработка технологии получения дифракционного оптического элемента с субмикронными размерами рельефа в кремниевой пластине // Компьютерная оптика. - Самара-Москва, 1998. - Вып.18. - С.130-133.
11. Точность изготовления дифракционных оптических элементов лазерными записывающими системами с круговым сканированием / Коронкевич В.П., Корольков В.П., Полещук А.Г., Харисов А.А., Черкашин В.В. // Компьютерная оптика. - Самара-Москва, 1997. - Вып.17. - С.63-74.

Experimental study of lighting devices with DOE

*A.V. Volkov, N.L. Kazanskiy, G.V. Uspleniev
Image Processing Systems Institute of RAS*

Abstract

Wide functionality, minimal weight and size, and low cost of replication provide good prospects for the application of diffractive optical elements (DOE) in lighting devices. This refers primarily to the devices that generate monochromatic radiation. However, the development of modern technologies for creating "quasi-diffractive" (or "harmonic" [1, 2]) optical elements with a relief height proportional to a large number of wavelengths allows both to preserve the advantages of diffractive optics, and to minimize the chromatic aberrations of the DOE. This article is devoted to the experimental investigation of lighting devices, the design of which is described in [5].

Citation: Volkov AV, Kazanskiy NL, Uspleniev GV. Experimental study of lighting devices with DOE. *Computer Optics* 1999; 19: 137 - 142.

References

- [1] Volkov AV, Volotovskiy SG, Granchak VM, Kazanskiy NL, Moiseev OY, Soifer VA, Soloviev VS, Yakunenkov DM. Experimental study of mass transfer in liquid photopolymerizing compositions. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*; 1995; 65(9): 181-185.
- [2] Sweeney D.W., Sommargren G.E. Harmonic diffractive lenses // *Applied Optics*. - 1995. - Vol.34, № 14. - P.2469-2475.
- [3] Golub MA, Kazanskiy NL, Prokhorov AM, Sisakyan IN, Soifer VA. Synthesis of optical antennae. *Computer optics* 1987; 1: 35-40.
- [4] Kazanskiy NL, Soifer VA, Kharitonov SI. Mathematical modeling of lighting devices with DOE. *Computer Optics* 1995; 14-15: 107-116.
- [5] Doskolovich LL, Kazanskiy NL, Kharitonov SI. Design of DOE-based lighting devices. *Computer Optics* 1998; 18: 91-96.
- [6] Doskolovich LL, Kazanskiy NL, Soifer VA, Kharitonov SI. Comparative analysis of analytic and iterative methods for solution of task of focusing into line segment. *Computer Optics* 1993; 13: 16-29.
- [7] Volkov AV, Kazanskiy NL, Soifer VA, Soloviev VS. Fabrication techniques for a continuous microrelief of diffractive optical element. *Computer Optics* 1997; 17: 91-93.
- [8] A method of designing diffractive optical elements focusing into plane areas / Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Kharitonov S.I., Soifer V.A. // *Journal of Modern Optics*, 1996, vol.43, № 7, pp.1423-1433.
- [9] Volkov AV, Kazanskiy NL, Rybakov OE. Investigation of the technology of plasma-chemical etching for producing multilevel diffractive optical elements. *Computer Optics* 1998; 18: 127-130.
- [10] Volkov AV, Kazanskiy NL, Rybakov OE. Development of technology for creation of diffractive optical elements with submicron dimensions of the relief in the silicon wafer. *Computer Optics* 1998; 18: 130-133.
- [11] Koronkevich VP, Korolkov VP, Poleshchuk AG, Kharisov AA, Cherkashin VV. Accuracy of fabrication of diffractive optical elements by means of laser writing systems with circular scanning. *Computer optics*. 1997; 17: 63-74.