

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С ДОЭ

Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов
Институт систем обработки изображений РАН

Введение

Проектирование световых приборов всегда играло значительную роль в жизни человечества, начиная с распределения свечей по залу и кончая расчетом современных автомобильных фар с изменяемой диаграммой направленности излучения, которая адаптируется к состоянию окружающей атмосферы и скорости движения автомобиля. Не касаясь в данной работе методов создания источников света, остановимся подробнее на возможностях использования дифракционной оптики в оптических трактах световых приборов.

Широкие функциональные возможности, минимальные массогабаритные характеристики, низкая себестоимость тиражирования обеспечивают хорошие перспективы использования дифракционных оптических элементов (ДОЭ) 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 аберрации ДОЭ.

В качестве примера, убеждающего в перспективности использования дифракционной оптики в светотехнике, рассмотрим один из вариантов компоновки 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 "сандвича" из двух (перпендикулярных друг другу) наборов цилиндрических линз (Рис. 1). Каждый из наборов цилиндрических линз отвечает за обеспечение тре-

буемого 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 дифракционного оптического элемента, 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 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.

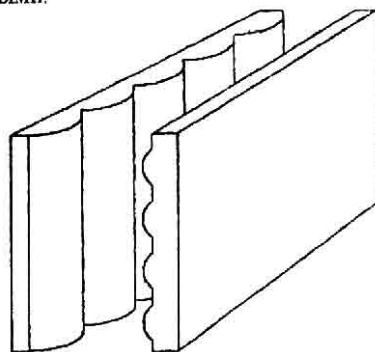


Рис. 1. Общий вид скрещенных массивов цилиндрических линз в заднем фонаре автомобиля

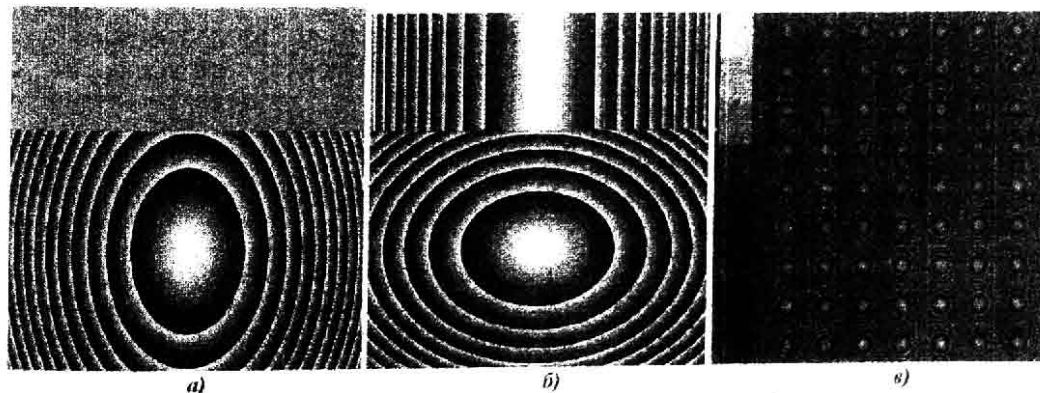


Рис. 2. Фотошаблоны ячеек секций стоп-сигнала (а) и поворота (б), а также общий вид секции стоп-сигнала (в).

Однако для осмысленного компьютерного проектирования светотехнических устройств с ДОЭ и их оптимизации в рамках вычислительного эксперимента необходимо создание оригинальных методов расчета и моделирования оптических схем с ДОЭ [3,4], отсутствующих в классической литературе по светотехнике [5-6].

Разработанные нами [3,4] методы расчета и моделирования оптических устройств, формирующих требуемую диаграмму направленности излучения с помощью ДОЭ, реализованы в виде программного обеспечения, позволяющего моделировать и проектировать оптические схемы, которые содержат не только элементы классической оптики (линзы, зеркала, призмы), но и современные оптические структуры и элементы (волноводные, голографические, дифракционные, граданы и т.д.). В качестве примера использования такого программного обеспечения в [4] рассмотрена проблема расчета и исследования фокусирующей оптической системы с неточечным источником света.

1. Проектирование автомобильных фар с ДОЭ

В качестве одной из самых актуальных задач светотехники рассмотрим проблему проектирования автомобильной фары. 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.

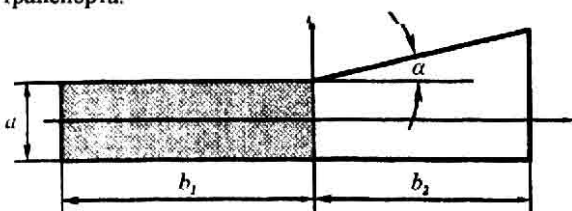


Рис. 3. Требуемая форма диаграммы направленности автомобильной фары

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.

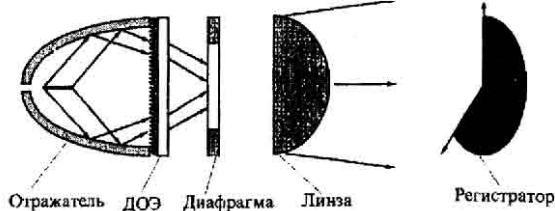


Рис. 4. Оптическая схема автомобильной фары

Использование при проектировании светотехнических устройств дифракционной оптики позволяет упростить форму отражателя, повысить энергетическую эффективность и технологичность фары, улучшить ее функциональные характеристики и уменьшить стоимость изготовления. Целью проводимых исследований может быть, например, замена отражателя, имеющего дорогостоящую в изготовлении форму сплюснутого по вертикали эллипсоида, на осесимметричный эллиптический отражатель, который значительно дешевле. Для этого в оптическую схему фары вводится (Рис. 4) дифракционный оптический элемент, перераспределяющий излучение из экранирующей части диафрагмы в открытую (пропускающую) часть. В качестве ДОЭ в оптической схеме, представленной на Рис. 4, может использоваться, например, квазипериодический фокусатор в отрезок [7]. При этом фокальный отрезок целесообразно разместить в открытой части диафрагмы вблизи и вдоль нижней границы. Результаты исследования такой оптической схемы с дифракционным оптическим элементом и без него показаны на Рис. 5. Параметры моделирования: длина излучающей спирали - 5 мм; радиус спирали - 0,5 мм; число витков спирали - 14; смещение центра спирали от задней стенки отражателя - 18 мм; размеры полусей 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; число точек на стороне регистратора - 201; число просчитываемых лучей (обратно пропорционально дискретизации на излучателе) для Рис. 5а и Рис. 5в - не менее 10000, для Рис. 5б - не менее 100000. Использование большего количества просчитываемых лучей требует существенно большего времени, но дает более точный результат (сравните Рис. 5а и Рис. 5б). Выбранное расстояние до плоскости регистрации является стандартным при испытаниях в автомобилестроении.

Анализ Рис. 5 подтверждает эффективность использования ДОЭ в светотехнических устройствах.

Расчетные распределения интенсивности на Рис. 5а и Рис. 5б при использовании предлагаемого ДОЭ намного ближе к требуемому распределению (Рис. 3), чем при использовании осесимметричного эллиптического отражателя без ДОЭ (Рис. 5в). Дальнейшая оптимизация оптической схемы фары (Рис. 4) возможна в случае использования более эффективных методов расчета применяемого ДОЭ. Например, в случае удачного применения метода согласованных прямоугольников [8] с целью расчета ДОЭ для фокусировки излучение в область, вырезаемую диафрагмой, можно упростить оптическую схему рисунка 4, исключив из нее диафрагму. При высокой эффективности работы такого ДОЭ качество фары и ее энергетическая эффективность только улучшатся.

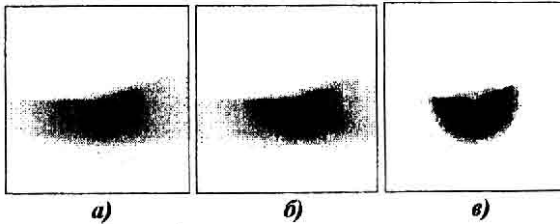


Рис. 5. Распределение интенсивности в плоскости регистрации излучения фары: а) - количество просчитываемых лучей не менее 10000; б) - количество просчитываемых лучей не менее 100000; в) - без ДОЭ

В наиболее простом варианте оптическая схема фары может быть основана на параболическом отражателе и ДОЭ, формирующем требуемую диаграмму направленности (Рис. 6). Сложность расчета ДОЭ в оптических схемах такого рода заключается в большом количестве разнонаправленных лучей, приходящих в каждую точку дифракционного элемента от протяженного источника и параболического отражателя. В результате использование только одного оптического элемента, пускай и с широкими функциональными возможностями, не всегда позволяет сформировать требуемую диаграмму направленности с достаточной эффективностью.

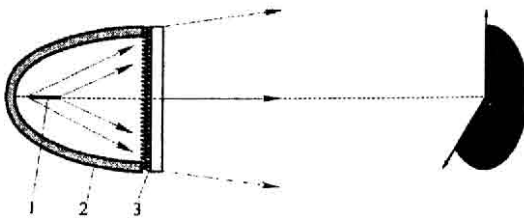


Рис. 6. Простейшая оптическая схема автомобильной фары с ДОЭ:
1) источник света; 2) параболический отражатель; 3) ДОЭ.

Проектирование компланарных осветителей

Разработанный подход позволяет создавать и исследовать оригинальные оптико-схематические решения, основанные на применении волноводных и дифракционных структур. К новому классу ис-

следованных оптических устройств относятся компланарные осветители. Особенностью компланарных систем является то, что подводимое сбоку (в торец) излучение затем распределяется по выходной поверхности, создавая равномерно светящееся фронтальное изображение. Рассмотрим несколько оптических схем, реализующих идею такого устройства.

Оптическая схема 1, изображенная на Рис. 7, представляет собой плоскопараллельную пластину. На передней (верхней - Рис. 7) стороне пластины находится пропускающий 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.

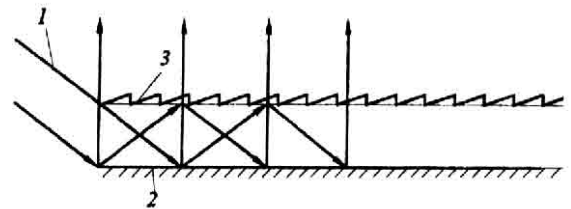


Рис. 7. Оптическая схема 1 компланарного осветителя
1 - падающее излучение; 2 - отражающий дифракционный микрорельеф; 3 - пропускающий дифракционный микрорельеф

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.

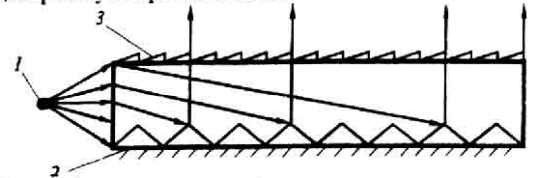


Рис. 8. Оптическая схема 2 компланарного осветителя
1 - линейка светодиодов; 2 - отражающий рельеф; 3 - пропускающий дифракционный микрорельеф

Оптическая схема 3, изображенная на Рис. 9, 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.

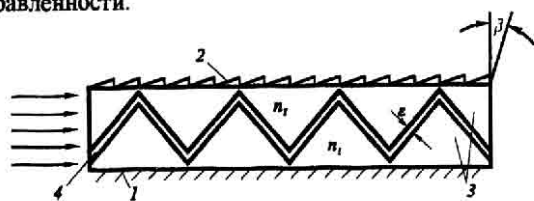


Рис. 9. Оптическая схема 3 компланарного осветителя
1 - отражающее покрытие; 2 - пропускающий дифракционный микрорельеф; 3 - оптическая среда с показателем преломления n_1 ; 4 - оптическая среда с показателем преломления n_2

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 был выбор работоспособных оптических схем (кроме представленных на Рис. 7-9 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. Некоторые интересные результаты моделирования представлены на Рис. 10-12.

На Рис. 10 представлены результаты моделирования следующей модификации оптической схемы 1 (Рис. 7): 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. Параметры моделирования: 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); число точек на стороне регистратора - 100; расстояние до первого регистратора (Рис. 10а) - 1 м; расстояние до второго регистратора (Рис. 10б) - 1 м; расстояние до третьего регистратора (Рис. 10в) - 10 м; угол на внешний край регистратора $\beta=10^\circ$; число просчитываемых лучей - не менее 5000. 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. На Рис. 10а представлено распределение интенсивности на расстоянии 1 мм от выходной плоскости осветителя, на Рис. 10б - на расстоянии 1 м; а на Рис. 10в - на расстоянии 10 м. Для качественного моделирования работы осветителя на большем расстоянии необходимо просчитывать прохождение существенно большего количества лучей. На Рис. 10а хорошо видны места расположения светодиодов, однако с увеличением расстояния (см. Рис. 10б и 10в) поле от осветителя выглядит как светящаяся прямоугольная площадка. Разный угол расходимости излучения приводит к изменению соотношения размеров сторон светящегося прямоугольника с увеличением расстояния наблюдения (сравните Рис. 10а, Рис. 10б и Рис. 10в).

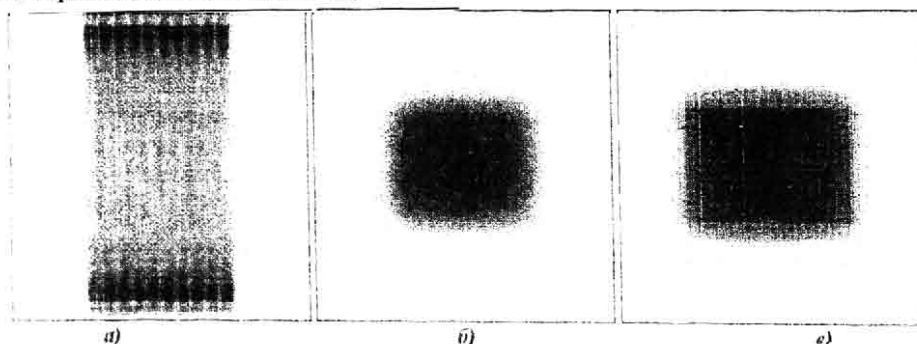


Рис. 10. Распределение интенсивности в плоскостях регистрации излучения компланарного осветителя, представленного на Рис. 7: а) - на расстоянии 1 мм; б) - на расстоянии 1 м; в) - на расстоянии 10 м

Анализ Рис. 10 подтверждает работоспособность рассмотренной модификации оптической схемы 1 (Рис. 7) при выбранных параметрах моделирования даже в отсутствие выходного дифракционного микрорельефа.

На Рис. 11 представлены результаты моделирования оптической схемы 2 (Рис. 8) при следующих параметрах: 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; число точек на стороне регистратора - 100; расстояние до первого регистратора

(Рис. 11а) - 1 мм; расстояние до второго регистратора (Рис. 11б) - 1 м; расстояние до третьего регистратора (Рис. 11в) - 10 м; угол на внешний край регистратора $\beta=10^\circ$; число просчитываемых лучей - не менее 5000.

На Рис. 11а представлено распределение интенсивности на расстоянии 1 мм от выходной плоскости осветителя, на Рис. 11б - на расстоянии 1 м, а на Рис. 11в - на расстоянии 10 м. Аналогично Рис. 10 на Рис. 11а хорошо видны места расположения светодиодов, однако с увеличением расстояния (см. Рис. 11б и 11в) осветитель выглядит как светящаяся прямоугольная площадка.

Анализ Рис. 11 подтверждает работоспособность оптической схемы 2 (Рис. 8) при выбранных проектных параметрах

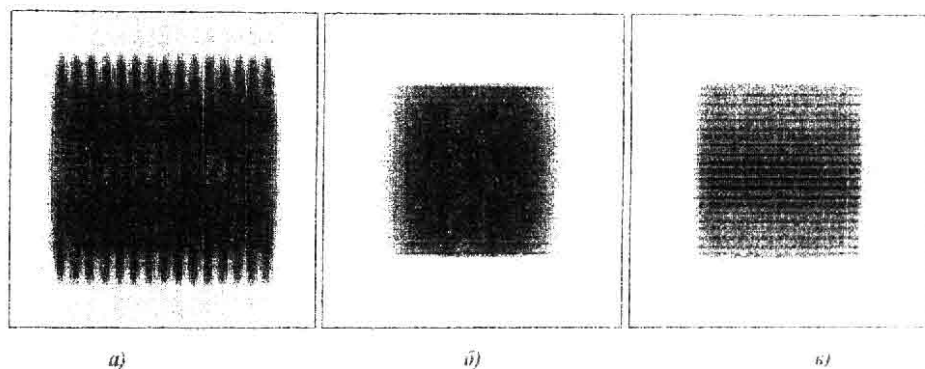


Рис. 11. Распределение интенсивности в плоскостях регистрации излучения компланарного осветителя, представленного на Рис. 8: а) - на расстоянии 1 мм; б) - на расстоянии 1 м; в) - на расстоянии 10 м

На Рис. 12 представлены результаты моделирования упрощенного варианта оптической схемы 3 (Рис. 9): 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 - $n_2=1,5$. Параметры моделирования: 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; тол-

щина слоя с показателем преломления n_2 $e=0,4$ мм; длина пластины - 100 мм; число точек на стороне регистратора - 101; расстояние до первого регистратора (Рис. 12а) - 1 мм; расстояние до второго регистратора (Рис. 12б) - 1 м; расстояние до третьего регистратора (Рис. 12в) - 5 м; угол на внешний край регистратора $\beta=30^\circ$; число просчитываемых лучей - не менее 5000. На Рис. 12а представлено распределение интенсивности на расстоянии 1 мм от выходной плоскости осветителя, на Рис. 12б - на расстоянии 1 м, а на Рис. 12в - на расстоянии 5 м.

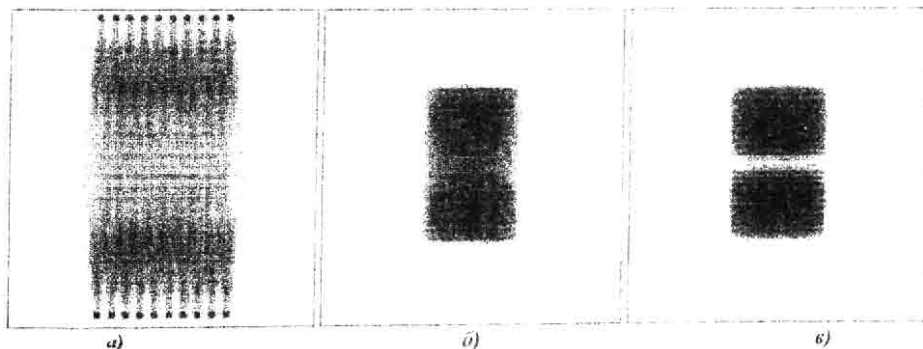


Рис. 12. Распределение интенсивности в плоскостях регистрации излучения компланарного осветителя, представленного на Рис. 9: а) - на расстоянии 1 мм; б) - на расстоянии 1 м; в) - на расстоянии 5 м

Анализ Рис. 12 подтверждает работоспособность оптической схемы 3 (Рис. 9) и в упрощенном варианте. В то же время использование при моделировании большего угла на внешний край регистратора ($\beta=30^\circ$ вместо 10° для Рис. 10 и 11) свидетельствует о более сильной расходимости выходного пучка света, а ослабление выходного излучения в центре выходного пучка осветителя (особенно заметное на Рис. 12в) говорит о необходимости дальнейшей оптимизации параметров оптической схемы 3 для более равномерного распределения излучения от светодиодов по глубине компланарного осветителя.

Проведенное исследование продемонстрировало работоспособность предложенных оптических схем и послужило основой для создания нескольких образцов компланарных осветителей. 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.7).

Заключение

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

1. Экспериментальное исследование массопереноса в жидких фотополимеризующихся композициях / Волков А.В., Волотовский С.Г., Гранчак В.М., Казанский Н.Л., Моисеев О.Ю., Соيفер В.А., Соловьев В.С., Якуненкова 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. Трёмбач В.В. Световые приборы: учебное пособие для вузов по специальности "Светотехника и источники света". - М.: Высшая школа - 1990. - 436 с.
6. Kusch O. Computer-Aided Optical Design of Illuminating and Irradiating Devices. - Moscow: "ASLAN" Publishing House. - 1993. - 189 p.
7. 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.
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.