

Экспериментальное исследование дифракционных линз для работы с излучением нескольких заданных длин волн

Р.В. Скиданов^{1,2}, Л.Л. Досколович^{1,2}, С.В. Ганчевская^{1,2}, В.А. Бланк^{1,2}, В.В. Подлипов^{1,2}, Н.Л. Казанский^{1,2}

¹ ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

Аннотация

Представлены результаты экспериментальных исследований «спектральных» дифракционных линз, имеющих фокус одинакового положения для нескольких заданных длин волн. Рассмотрены две спектральные дифракционные линзы, предназначенные для работы с излучением трёх и пяти заданных длин волн видимого диапазона. Для изготовления спектральных линз использовался метод прямой лазерной записи по фоторезисту с итеративной коррекцией параметров записи, что обеспечило погрешность формирования высоты дифракционного микрорельефа менее 30 нм. Представлен эксперимент по определению длин волн, фокусируемых изготовленными линзами. Эксперимент основан на использовании точечной диафрагмы, расположенной в фокусе спектральных линз. Получены оценки функций рассеяния точки изготовленных спектральных линз с помощью перестраиваемого лазера. Для иллюстрации изображающих свойств спектральных линз получены изображения светотехнической цветной таблицы.

Ключевые слова: дифракционная линза, гармоническая линза, метод прямой лазерной записи по фоторезисту, функция рассеяния точки.

Цитирование: Скиданов, Р.В. Экспериментальное исследование дифракционных линз для работы с излучением нескольких заданных длин волн / Р.В. Скиданов, Л.Л. Досколович, С.В. Ганчевская, В.А. Бланк, В.В. Подлипов, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 1. – С. 22–28. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-646.

Citation: Skidanov RV, Doskolovich LL, Ganchevskaya SV, Blank VA, Podlipnov VV, Kazanskiy NL. Experiment with a diffractive lens with a fixed focus position at several given wavelengths. Computer Optics 2020; 44(1): 22–28. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-646.

Введение

Современные технологии прямой записи многоуровневых дифракционных микрорельефов сфокусированным лазерным пучком позволяют создавать высококачественные дифракционные линзы (ДЛ), которые могут быть использованы в системах формирования изображений [1–3]. Изображающие системы на основе ДЛ удобны для практического использования, поскольку обладают существенно меньшей массой и габаритными размерами по сравнению с системами на основе обычных рефракционных линз. В то же время ДЛ обычно рассчитываются для одной заданной длины волны и поэтому имеют большие хроматические aberrации, которые проявляются в изменении положения фокуса при изменении длины волны падающего излучения [4]. Есть методы расчёта дифракционных структур на несколько длин волн [5], но такие структуры обычно плохо работают на промежуточных длинах волн. Для уменьшения хроматических aberrаций были предложены так называемые гармонические дифракционные линзы (ГДЛ) [6–8]. ГДЛ, в отличие от обычных ДЛ, имеют более высокий дифракционный микрорельеф и могут быть рассмотрены как промежуточное звено между ДЛ и тон-

кой рефракционной линзой. Однако качество изображений, формируемых ГДЛ, оказывается недостаточно хорошим, и для компенсации хроматических aberrаций необходимо использование дополнительной цифровой обработки формируемого изображения [9].

В последние несколько лет были предложены различные методы расчёта ДЛ, предназначенных для работы с излучением нескольких заданных длин волн [10–16]. У таких ДЛ положение фокуса не изменяется на расчётных длинах волн. Чтобы отличать их от «обычных» ДЛ, рассчитанных для излучения одной длины волны, линзы, предназначенные для работы с излучением нескольких заданных длин волн, будем называть спектральными дифракционными линзами (СДЛ) [16].

По мнению авторов статьи, наиболее значимые результаты по расчёту и созданию СДЛ были получены в недавних работах [10–14], где расчёт микрорельефа СДЛ осуществляется в рамках скалярной теории дифракции с использованием варианта метода прямого бинарного поиска. Несмотря на успешное применение метода в задачах расчёта различных СДЛ [10–14], данный метод имеет ряд недостатков. В частности, в методе используется критерий оптимизации с настраиваемыми параметрами, выбор кото-

рых представляет собой отдельную нетривиальную задачу, а сходимость метода существенно зависит от начального приближения.

В [16] авторами статьи был предложен значительно более простой аналитический метод расчёта СДЛ. Метод основан на минимизации функции, характеризующей отклонение комплексных функций пропускания СДЛ для заданных длин волн, от функций комплексного пропускания дифракционных линз с одинаковым фокусом, рассчитанных отдельно для каждой из заданных длин волн. Представленные в [16] результаты численного моделирования рассчитанных СДЛ показывают, что метод обладает лучшими рабочими характеристиками по сравнению с методом бинарного поиска.

В настоящей работе представлены первые результаты экспериментальных исследований СДЛ, рассчитанных методом [16] и предназначенных для работы с излучением 3 и 5 различных длин волн. Приведённые экспериментальные результаты подтверждают технологичность метода [16] и возможность его использования в практических задачах расчёта СДЛ.

1. Изготовление спектральных дифракционных линз

Для экспериментальных исследований методом [16] рассчитаны две спектральные дифракционные линзы с радиусами апертур $R=5$ мм и фокусным расстоянием $f=100$ мм для работы с излучением 3 длин волн (450 нм, 540 нм, 580 нм) и 5 длин волн (450 нм, 500 нм, 540 нм, 580 нм, 620 нм). Далее эти СДЛ будем называть СДЛ3 и СДЛ5. В силу радиальной симметрии микрорельеф СДЛ может быть описан функцией высоты микрорельефа $h(\rho)$ в радиальном сечении, где $\rho \in [0, R]$ – радиальная координата. Радиальные профили СДЛ3 и СДЛ5 рассчитаны с учётом технологического ограничения на максимальную высоту дифракционного микрорельефа: $h(\rho) \leq h_{\max} = 6$ мкм [16]. Рассчитанные профили СДЛ показаны на рис. 1а (СДЛ3) и рис. 1в (СДЛ5). Согласно результатам численного моделирования (они не представлены в этой статье) на расчётных длинах волн обе СДЛ имеют одинаковое положение фокуса. Форма фокальных пиков практически полностью совпадает с распределениями интенсивности, формируемыми «идеальными» дифракционными линзами, рассчитанными отдельно для каждой из заданных длин волн.

Обе СДЛ изготовлены методом прямой лазерной записи на станции круговой лазерной записи CLWS-2014. Запись осуществлялась в слое позитивного фоторезиста ФП-3535 толщиной 6 мкм, который предварительно нанесён на кварцевую подложку методом центрифугирования. Для уменьшения погрешности изготовления линзы окончательный микрорельеф формировался за несколько циклов записи с коррекцией параметров

мощности записывающего лазерного пучка. На каждом цикле измерялся профиль полученного микрорельефа, и на основе анализа величины разности между измеренным профилем и требуемым рассчитанным профилем выполнялась коррекция мощности записывающего лазерного пучка в зависимости от радиальной координаты. На конечном цикле записи ошибка высоты полученного микрорельефа не превышала 30 нм.

Профили микрорельефа изготовленных СДЛ, измеренные на профилометре Tencor, представлены на рис. 1б (СДЛ3) и рис. 1г (СДЛ5).

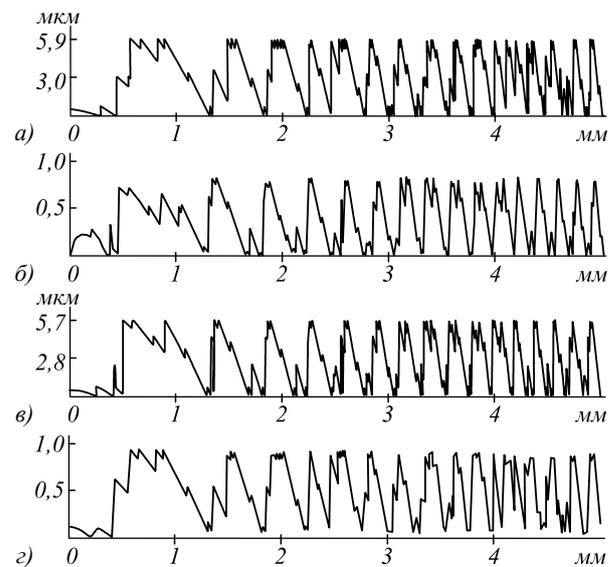


Рис. 1. Рассчитанные профили микрорельефа СДЛ3 (а) и СДЛ5 (в). Измеренные профили микрорельефа СДЛ3 (б) и СДЛ5 (г), изготовленных методом прямой лазерной записи

Из рис. 1 видно, что при $\rho > 0,5$ мм профили изготовленных СДЛ качественно совпадают с расчётными профилями. Величины среднеквадратических отклонений (СКО) рассчитанных и изготовленных профилей СДЛ при $\rho > 0,5$ мм составляют 9,1% (СДЛ3) и 18,3% (СДЛ5). Большее значение СКО для СДЛ5 обусловлено более сложным видом расчётного профиля. Корректное воспроизведение формы микрорельефа в центральных областях (при $\rho \leq 0,5$ мм) требует дальнейшей отработки режимов лазерной записи. Отметим, что площади центральных областей, в которых не удалось воспроизвести дифракционный рельеф с высокой точностью, составляют всего 1% от общей площади СДЛ. Поэтому ошибки изготовления микрорельефа в центральных зонах не будут существенно влиять на рабочие характеристики СДЛ.

2. Экспериментальное исследование работы СДЛ при широкополосном источнике излучения

В первом «простом» эксперименте исследовались спектральные свойства изготовленных СДЛ при «широкополосном» источнике излучения в виде белого светодиода. Для этого использовалась оптическая схема, представленная на рис. 2.

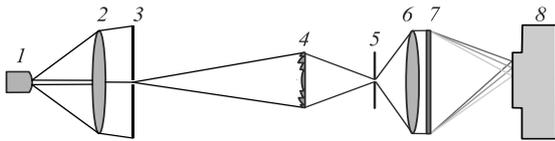


Рис. 2. Оптическая схема для анализа спектральных свойств СДЛ: 1 – белый светодиод мощностью 3 Вт, 2 – коллимирующая линза, 3 – диафрагма диаметром 300 мкм, 4 – спектральная дифракционная линза, 5 – точечная диафрагма диаметром 40 мкм, 6 – изображающая линза с фокусным расстоянием 100 мм, 7 – дифракционная решётка с периодом 10 мкм, 8 – регистрирующая камера Genie Nano M1240 Mono

Схема работает следующим образом: свет белого светодиода с помощью линзы 2 коллимируется в слабо расходящийся пучок с углом расходимости около 2° . Затем диафрагма 3 диаметром 300 мкм вырезает из слабо расходящегося пучка центральную часть. Из-за ограниченных размеров оптического стола СДЛ расположена на расстоянии 800 мм от диафрагмы 3. Вследствие этого положение плоскости фокусировки СДЛ смещается на величину $\delta = 14$ мм, и СДЛ строит изображение диафрагмы 3 на точечной диафрагме 5, расположенной на расстоянии $f + \delta = 114$ мм от СДЛ. Размер изображения диафрагмы 3 на точечной диафрагме 5 составляет около 40 мкм. Таким образом, через точечную диафрагму 5 полностью будут проходить только те длины волн, для которых рассчитана СДЛ. Излучение других длин волн из-за существенного уширения фокусируемого пятна пройдёт через точечную диафрагму со значительным ослаблением. Спектральный анализ света, прошедшего через точечную диафрагму 5, проводится с помощью комбинации изображающей линзы 6 и дифракционной решётки 7. Спектр прошедшего излучения регистрируется камерой 8. Согласно приведённому выше описанию работы оптической схемы в регистрируемом спектре должен наблюдаться набор максимумов, соответствующий длинам волн, на которые была рассчитана СДЛ.

На рис. 3а представлено распределение интенсивности, зарегистрированное камерой 8 для СДЛ3. Пятно сверху – калибровочный пучок лазера с длиной волны 532 нм, по центру этого пятна выставляется шкала длин волн.

Из рис. 3а видно, что зарегистрированный спектр имеет три выраженных максимума, соответствующих трём расчётным длинам волн (450 нм, 540 нм, 580 нм) СДЛ3. Наблюдаемые максимумы отличаются по величине почти на порядок, однако если учитывать зависимость чувствительности регистрирующей матрицы от длины волны [17], то разность величин максимумов значительно уменьшается (рис. 3б). В качестве примера на рис. 3б показано одно из характерных сечений распределения на рис. 3а, пересчитанное с учётом чувствительности матрицы. В данном случае нормированные величины спектральных максимумов отличаются менее чем в 2 раза и принимают следующие значения:

0,71 (450 нм), 1 (540 нм), 0,58 (580 нм). Ширина спектральных распределений по полуспаду составляет около 20 нм. Таким образом, приведённые результаты исследования (рис. 3) показывают, что изготовленная СДЛ3 концентрирует в одном фиксированном фокусе узкие области спектра, находящиеся в окрестности трёх расчётных длин волн.

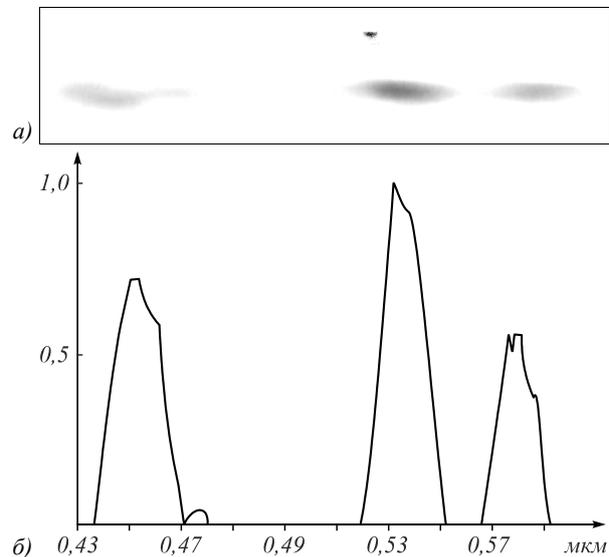


Рис. 3. Спектральное распределение на светочувствительной матрице камеры Genie Nano M1240 Mono для СДЛ3 (негативное изображение) (а), сечение спектрального распределения на светочувствительной матрице, пересчитанное с учётом зависимости чувствительности регистрирующей матрицы от длины волны (б)

На рис. 4а представлено аналогичное спектральное распределение, полученное в оптической схеме на рис. 2 для СДЛ5.

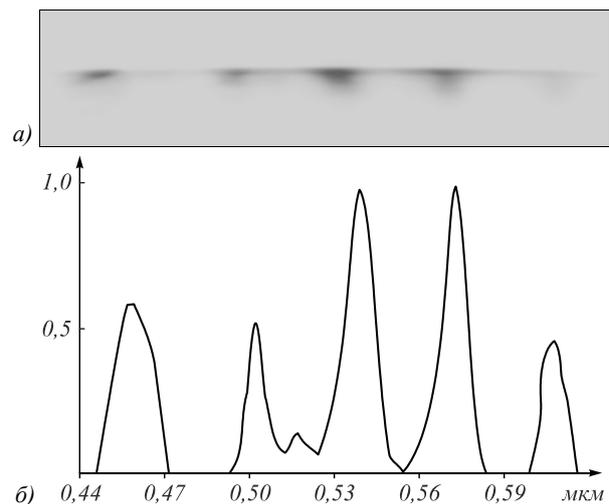


Рис. 4. Спектральное распределение на светочувствительной матрице камеры Genie Nano M1240 Mono для СДЛ5 (негативное изображение) (а), сечение спектрального распределения на светочувствительной матрице, пересчитанное с учётом зависимости чувствительности регистрирующей матрицы от длины волны (б)

Спектральные максимумы на рис. 4 наблюдаются в окрестности расчётных длин волн СДЛ5 (450 нм, 500 нм, 540 нм, 580 нм, 620 нм). Однако, как и для СДЛ3, величины максимумов значительно отличаются между собой. После учёта чувствительности матрицы (рис. 4б) величины максимумов несколько «выравниваются», но всё же отличаются по уровню примерно в 2 раза. Большие отличия величин максимумов для СДЛ 5 (по сравнению с СДЛ 3), по-видимому, обусловлены большими технологическими погрешностями изготовления линзы. Как было отмечено в параграфе 1, СКО изготовленного профиля и рассчитанного для СДЛ5 оказалось более чем в 2 раза больше, чем для СДЛ3. Поэтому результат работы СДЛ5 сильнее отличается от расчётного.

3. Экспериментальное исследование функций рассеяния точки

Для определения функций рассеяния точки изготовленных СДЛ (т.е. распределений интенсивности в фокальной плоскости на расчётных длинах волн) собрана оптическая схема, представленная на рис. 5. В качестве источника света в эксперименте использовался перестраиваемый лазер NT-242.

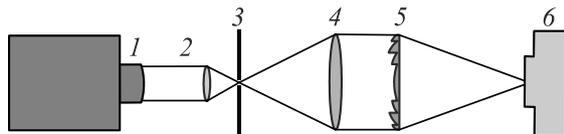


Рис. 5. Оптическая схема для измерения функций рассеяния точки спектральной дифракционной линзы: 1 – перестраиваемый лазер NT-242, 2 – микроскопический объектив 20×, 3 – точечная диафрагма диаметром 10 мкм, 4 – коллимирующая линза, 5 – СДЛ, 6 – регистрирующая камера TourCam UCМOS03100KPA

Схема работает следующим образом: перестраиваемый лазер NT-242 формирует пучок с заданной длиной волны, линза 2 фокусирует пучок на точечной диафрагме диаметром 10 мкм. Далее линза 4 формирует коллимированный пучок с углом расходимости менее $0,0001^\circ$. Коллимированный пучок падает на СДЛ, которая фокусирует свет на светочувствительной матрице камеры TourCam UCМOS03100KPA. Основной целью этого эксперимента являлась регистрация наличия ярко выраженного максимума интенсивности на расчётной длине волны и отсутствие такого максимума на других длинах волн. Для этого на перестраиваемом лазере NT 242 изменялась длина волны при неизменной мощности генерации. Надо понимать, что для точного разрешения картины Эйри в фокальной плоскости СДЛ разрешения используемой (3,2 мкм) матрицы было недостаточно и в полученных фокальных пятнах слились центральный пик и первые 2–3 кольца картины Эйри.

На рис. 6 представлены распределения интенсивности в фокальной плоскости СДЛ3 на расчётных длинах волн: 450 нм, 540 нм, 580 нм.

Как видно из рис. 6, на расчётных длинах волн формируются чёткие фокальные пятна с диаметрами по полуспаду 20 мкм, 32 мкм и 35 мкм на длинах волн 450 нм, 540 нм и 580 нм соответственно.

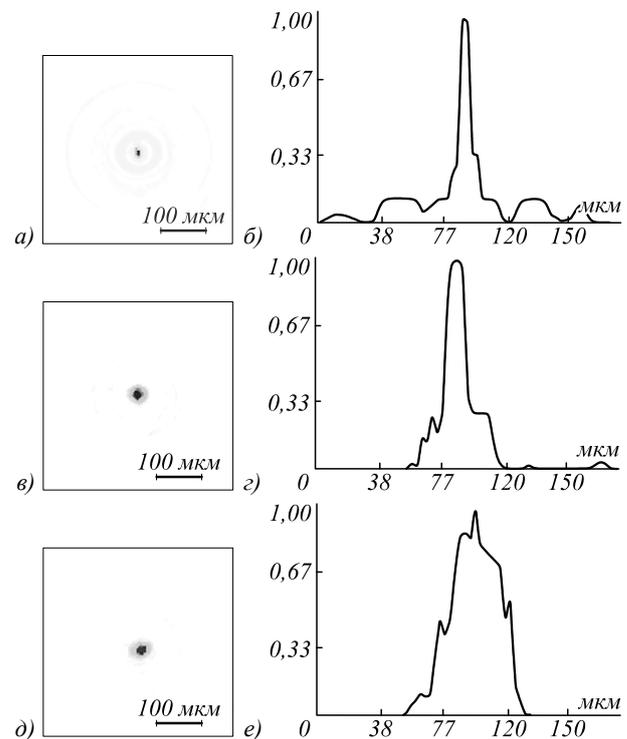


Рис. 6. Распределение интенсивности в фокальной плоскости СДЛ3 для длин волн 450 нм (а), 540 нм (в), 580 нм (д) (изображения инвертированы), а также их центральные сечения (б), (з), (е) соответственно

Исследование СДЛ5 в оптической схеме на рис. 5 даёт схожие результаты. Длины волн, которые «хорошо фокусируются» (т.е. для которых формируется чёткое фокальное пятно), находятся в окрестности расчётных значений (450 нм, 500 нм, 540 нм, 580 нм, 620 нм) и примерно совпадают с положением максимумов спектра на рис. 5, полученного в эксперименте с точечной диафрагмой. Для точного определения длин волн, дающих «лучшие» фокальные распределения, с использованием перестраиваемого лазера NT-242 проведено сканирование полного спектрального диапазона от 410 нм до 630 нм с шагом 1 нм. Наиболее чёткие фокусы, имеющие максимальную интенсивность, получены на следующих длинах волн: 460 нм, 500 нм, 540 нм, 577 нм, 620 нм. Распределения в фокальной плоскости СДЛ5 на этих длинах волн показаны на рис. 7. Отметим, что полученные длины волн для синего (460 нм) и жёлтого (577 нм) максимумов отличаются от расчётных значений (450 нм и 580 нм) на 10 нм и 3 нм соответственно, что может быть объяснено технологическими ошибками изготовления СДЛ5. Размеры фокальных пятен на рис. 7 меняются для различных длин волн в пределах от 13 мкм до 36 мкм. Диаметры фокальных пятен по полуспаду для длин волн 460 нм, 500 нм, 540 нм, 577 нм и 620 нм состав-

ляют 22 мкм, 36 мкм, 29 мкм, 22 мкм и 13 мкм соответственно.

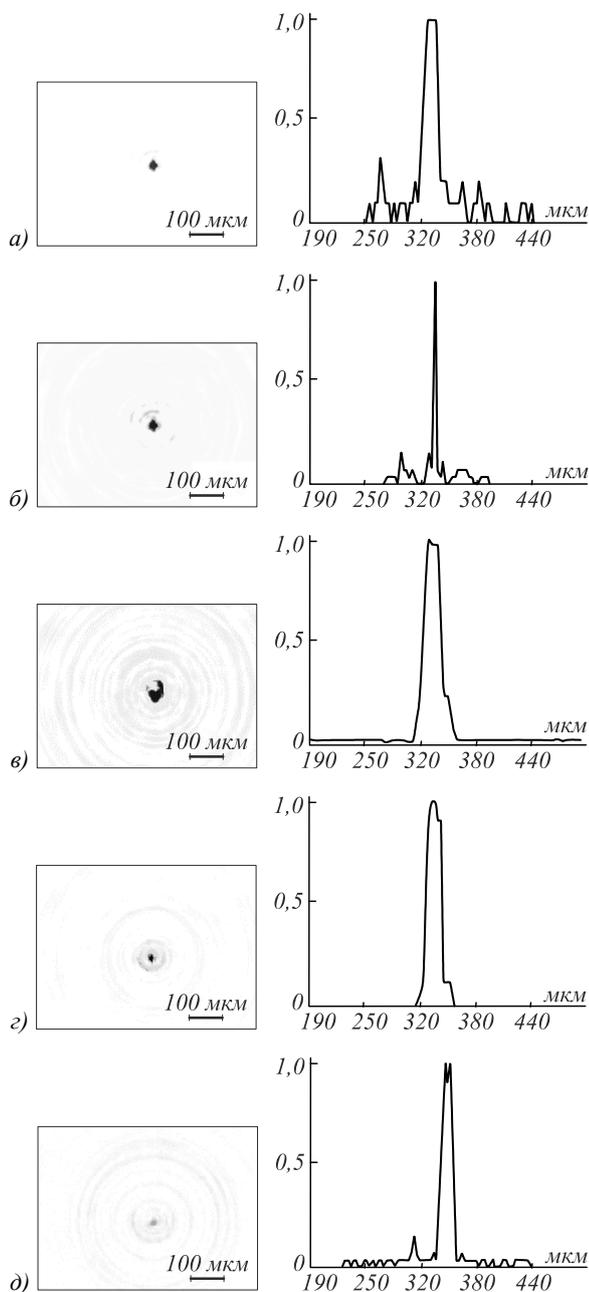


Рис. 7. Распределение интенсивности в фокальной плоскости СДЛ5 для волн 460 нм (а), 500 нм (б), 540 нм (в), 577 нм (г) и 620 нм (д) (левые изображения инвертированы)

4. Экспериментальные исследования формирования изображений с помощью СДЛ

На рис. 8 представлена оптическая схема для экспериментального формирования изображений изготовленными СДЛ. В схеме на рис. 8 СДЛ 2 формирует изображение объекта 1, которое регистрируется камерой 3. В качестве объекта использовалось формируемое на мониторе компьютера изображение цветной таблицы, показанной на рис. 9а. Монитор располагался, как и в первом эксперименте, на расстоянии 800 мм

от СДЛ, светочувствительная матрица – на расстоянии 114 мм от СДЛ. Эти расстояния были выбраны на основе анализа результатов первого эксперимента, которые показали, что СДЛ, рассчитанная на работу с плоской волной, правильно работает с источником света на конечном расстоянии.

Отметим, что СДЛ3 была рассчитаны для следующих трех длин волн: 450 нм, 540 нм, 580 нм, которые примерно совпадают с пиками чувствительности трёх типов колбочковых клеток сетчатки глаза, отвечающих за цветное зрение. На эти же максимумы чувствительности рассчитаны и большинство компьютерных мониторов. Поэтому, как показывает рис. 9б, СДЛ3 позволяет достаточно контрастно изображать все квадраты цветной таблицы (рис. 9а) как с «чистыми» цветами, так и со смешанными. Для сравнения на рис. 9в представлено изображение цветной таблицы, сформированное обычной дифракционной линзой, рассчитанной для одной длины волны $\lambda = 550$ нм [3]. Из этого рисунка видно, что качество цветопередачи в изображении заметно хуже, чем в изображении от СДЛ3.

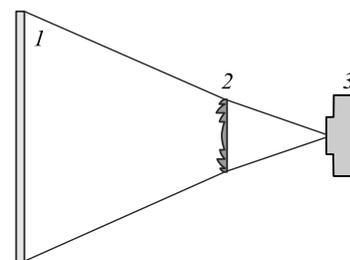


Рис. 8. Оптическая схема для формирования изображений СДЛ: 1 – экран монитора компьютеры с изображением цветной светотехнической таблицы, 2 – СДЛ, 3 – регистрирующая камера TourCam UCMOS03100KPA

Изображение цветной таблицы, сформированное СДЛ5, показано на рис. 9г и демонстрирует значительно лучшую передачу цветов по сравнению с изображением, сформированным обычной дифракционной линзой. Можно заметить, что СДЛ5 лучше передаёт цвета и по сравнению с СДЛ3 (сравним, например, цвета сформированных изображений квадрата, расположенного в левом нижнем таблицы на рис. 9а).

Заключение

Изготовлены и экспериментально исследованы две спектральные дифракционные линзы (СДЛ3 и СДЛ5), рассчитанные методом [14] и имеющие фокус одинакового положения для 3 и 5 заданных длин волн видимого диапазона. Обе СДЛ изготовлены методом прямой лазерной записи в слое фоторезиста. Величины СКО для профилей микрорельефа рассчитанных и изготовленных СДЛ составили 4,2% (СДЛ3) и 9,6% (СДЛ5). При указанных ошибках изготовления обе СДЛ показали свою работоспособность и сформировали чёткие фокальные пики в окрестности расчётных длин волн. В частности, для СДЛ3 фокальные пики

формировались строго на расчётных длинах волн, для СДЛ5 наблюдалось небольшое отклонение от 2 расчётных длин волн (величины отклонения составили 3 нм и 10 нм для расчётных длин волн 580 нм и 450 нм соответственно).

Показано, что изготовленные СДЛ позволяют формировать изображения цветных объектов, достаточно контрастно изображаются как «чистые», так и «смешанные» цвета. Приведённые экспериментальные результаты подтверждают технологичность метода [14] и возможность его использования в практических задачах расчёта СДЛ.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ 18-07-00514 и 18-29-03067 в части создания спектральных дифракционных линз и экспериментального анализа их рабочих характеристик (параграфы 1 – 3) и Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26) в части исследования формирования изображений с помощью спектральных дифракционных линз (параграф 4).

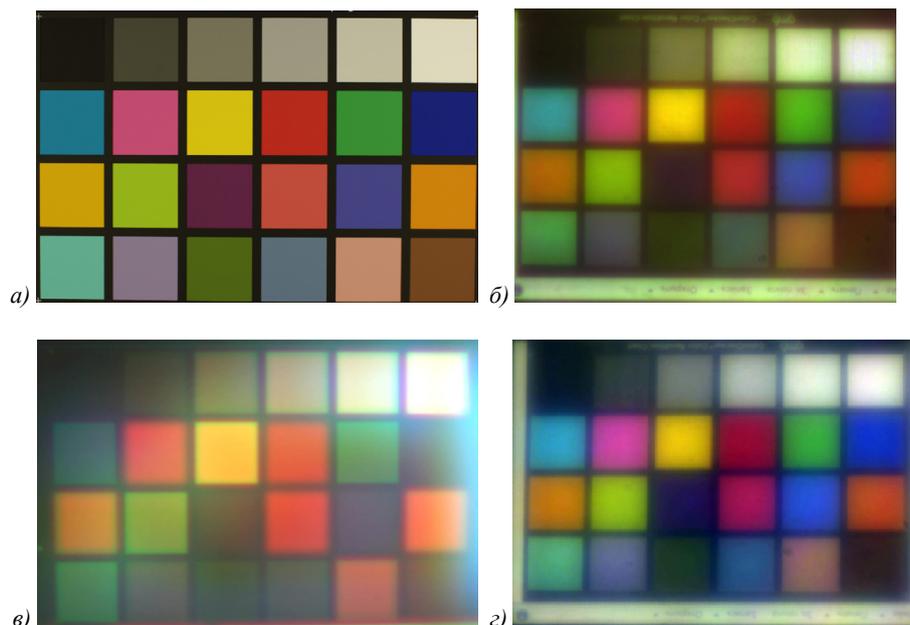


Рис. 9. Изображение исходной цветной таблицы (а); изображения таблицы, сформированные СДЛ3 (б), обычной дифракционной линзой (в) и СДЛ5 (г)

Литература

1. **Reznikova, E.F.** Liga technology for the synthesis of diffractive refractive intraocular lenses / E.F. Reznikova, B.G. Goldenberg, V.I. Kondratyev, G.N. Kulipanov, V.P. Korolkov, R.K. Nasyrov // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* – 2013. – Vol. 77, Issue 2. – P. 111-115.
2. **Poleshchuk, A.G.** Laser technologies in micro-optics. Part 2. Fabrication of elements with a three-dimensional profile / A.G. Poleshchuk, V.P. Korolkov, V.P. Veiko, R.A. Zakoldaev, M.M. Sergeev // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.* – 2018. – Vol. 54, Issue 2. – P. 113-126.
3. **Казанский, Н.Л.** Формирование изображений дифракционной многоуровневой линзой / Н.Л. Казанский, С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов, А.А. Морозов, С.И. Харитонов, С.Г. Волоотовский // *Компьютерная оптика.* – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 425-434.
4. **Карпеев, С.В.** Исследование влияния широкополосного излучения на распределение интенсивности, формируемое дифракционным оптическим элементом / С.В. Карпеев, С.В. Алфёров, С.Н. Хонина, С.И. Кудряшов // *Компьютерная оптика.* – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 689-694.
5. **Карпеев, С.В.** Расчёт и анализ трёхволнового дифракционного фокусирующего дублета / С.В. Карпеев, А.В. Устинов, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика.* – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 173-178. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-173-178.
6. **Sweeney, D.W.** Harmonic diffractive lenses / D.W. Sweeney, G.E. Sommargren // *Applied Optics.* – 1995. – Vol. 34, Issue 14. – P. 2469-2475.
7. **Хонина, С.Н.** Сравнительное исследование спектральных свойств асферических линз / С.Н. Хонина, А.В. Устинов, Р.В. Скиданов, А.А. Морозов // *Компьютерная оптика.* – 2015. – Т. 39, № 3. – С. 363-369. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-3-363-369.
8. **Rosli, A.** Design and fabrication of Si-HDPE hybrid Fresnel lenses for infrared imaging systems / A. Rosli, A. Manaf, T. Sugiyama, J. Yan // *Optics Express.* – 2017. – Vol. 25. – P. 1202-1220.
9. **Nikonorov, A.V.** Toward ultralightweight remote sensing with harmonic lenses and convolutional neural networks / A.V. Nikonorov, M.V. Petrov, S.A. Bibikov, P.Y. Yakimov, V.V. Kutikova, Y.V. Yuzifovich, A.A. Morozov, R.V. Skidanov, N.L. Kazanskiy // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* – 2018. – Vol. 11, Issue 9. – P. 3338-3348. – DOI: 10.1109/jstars.2018.2856538.
10. **Wang, P.** Chromatic-aberration corrected diffractive lenses for ultra-broadband focusing / P. Wang, N. Mohammad, R. Menon // *Scientific Reports.* – 2016. – Vol. 6. – 21545.
11. **Mohammad, N.** Broadband imaging with one planar diffractive lens / N. Mohammad, M. Meem, B. Shen, P. Wang, R. Menon // *Scientific Reports.* – 2018. – Vol. 8. – 2799.
12. **Banerji, S.** A computational design framework for efficient, fabrication error-tolerant, planar THz diffractive optical el-

- ements / S. Banerji, B. Sensale-Rodriguez // Scientific Reports. – 2019. – Vol. 9. – 5801.
13. **Meem, M.** Full-color video and still imaging using two flat lenses / M. Meem, A. Majumder, R. Menon // Optics Express. – 2018. – Vol. 26. – P. 26866-26871.
14. **Banerji, S.** Imaging with flat optics: metalenses or diffractive lenses? / S. Banerji, M. Meem, A. Majumder, F.G. Vasquez, B. Sensale-Rodriguez, R. Menon // Optica. – 2019. – Vol. 6. – P. 805-810.
15. **Doskolovich, L.L.** Multifocal diffractive lens generating several fixed foci at different design wavelengths / L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, A.A. Morozov, V. Osipov, J.S. Wolffsohn, B. Chichkov // Optics Express. – 2018. – Vol. 26, Issue 4. – P. 4698-4709. – DOI: 10.1364/OE.26.004698.
16. **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.
17. Genie Nano. GIGE camera. Small package. Big functionality. – 2019. – URL: <https://www.teledynedalsa.com/en/products/imaging/cameras/genie-nano-1gige/> (request date 18.12.2019).

Сведения об авторах

Скиданов Роман Васильевич, 1973 года рождения. В 1990 году с отличием окончил Самарский государственный университет (СамГУ) по специальности «Физика». Доктор физико-математических наук (2007 год), работает заведующим лабораторией микро- и нанотехнологий Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики СГАУ. Р.В. Скиданов – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанофотоники. В списке научных работ Р.В. Скиданова 160 статей, 7 монографий. E-mail: romans@smr.ru.

Досколович Леонид Леонидович, в 1989 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (2001 год), профессор, работает заведующим лабораторией дифракционной оптики ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, профессором кафедры технической кибернетики Самарского университета. Специалист в области дифракционной оптики, лазерных информационных технологий, нанофотоники. E-mail: leonid@smr.ru.

Ганчевская София Владиславовна, 1992 года рождения, в 2015 получила степень магистра Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королёва по специальности «Прикладные математика и физика». Работает ассистентом кафедры технической кибернетики Самарского университета, инженером лаборатории микро- и нанотехнологий. Область научных интересов: дифракционная оптика, оптическая микроманипуляция, технология изготовления дифракционных оптических элементов. E-mail: sofi@smr.ru.

Бланк Вероника Александровна, 1992 года рождения, в 2013 получила степень бакалавра в СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». Область научных интересов: дифракционная оптика. E-mail: veronica_b@smr.ru.

Подлипов Владимир Владимирович, инженер НИЛ-35 и ассистент кафедры технической кибернетики Самарского университета, инженер лаборатории микро- и нанотехнологий Института систем обработки изображений РАН – филиала Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук. Область научных интересов: математическое моделирование, электронно-лучевая литография и оптимизация технологических процессов травления в микроэлектронике, дифракционной оптике, технологии обработки и контроля поверхности. E-mail: podlipovvv@ya.ru.

Сведения об авторе **Казанский Николай Львович** см. стр. 21 этого номера.

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 15 октября 2019 г. Окончательный вариант – 26 декабря 2019 г.

Experiment with a diffractive lens with a fixed focus position at several given wavelengths

R.V. Skidanov^{1,2}, L.L. Doskolovich^{1,2}, S.V. Ganchevskaya^{1,2}, V.A. Blank^{1,2}, V.V. Podlipnov^{1,2}, N.L. Kazanskiy^{1,2}

¹IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,
Molodogvardeyskaya 151, 443001, Samara, Russia,

²Samara National Research University, Moskovskoye Shosse 34, 443086, Samara, Russia

Abstract

The paper presents results of the experimental investigation of “spectral” diffractive lenses the same focus position for several given wavelengths. Two spectral diffractive lenses designed to focus radiation of three and five specified wavelengths in the visible spectrum were investigated. Using a method of direct laser writing in photoresist with iterative correction of writing parameters, we fabricated a diffractive microrelief of the spectral lenses with the height deviation from the designed relief of less than 30 nm. Using a pinhole located at the focus of the fabricated lenses, we estimated the operation wavelengths. The point spread functions of the spectral lenses at the designed wavelengths were measured with the use of a tunable laser. The imaging properties of the spectral lenses were illustrated by the images of a reference color table.

Keywords: spectral diffractive lens, harmonic lens, point spread function, focusing, photoresist direct laser recording method.

Acknowledgements: This work was supported by the RFBR projects 18-07-00514 and 18-29-03067 regarding the creation of spectral diffraction lenses and the experimental analysis of their performance (paragraphs 1 - 3) and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the work according to the State order of the Federal Research Center for Crystallography and Photonics of the Russian Academy of Sciences (agreement No. 007-GZ / Ch3363 / 26) regarding the study of image formation using spectral diffraction lenses (paragraph 4).

Citation: Skidanov RV, Doskolovich LL, Ganchevskaya SV, Blank VA, Podlipnov VV, Kazanskiy NL. Experiment with a diffractive lens with a fixed focus position at several given wavelengths. *Computer Optics* 2020; 44(1): 22-28. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-646.

References

- [1] Reznikova EF, Goldenberg BG, Kondratyev VI, Kulipanov GN, Korolkov VP, Nasyrov RK. Liga technology for the synthesis of diffractive refractive intraocular lenses. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* 2013; 77(2): 111-115.
 - [2] Poleshchuk AG, Korolkov VP, Veiko VP, Zakoldaev RA, Sergeev MM. Laser technologies in micro-optics. Part 2. Fabrication of elements with a three-dimensional profile. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 2018; 54(2): 113-126.
 - [3] Kazanskii NL, Khonina SN, Skidanov RV, Morozov AA, Kharitonov SI, Volotovskiy SG. Formation of images using multilevel diffractive lens. *Computer Optics* 2014; 38(3): 425-434.
 - [4] Karpeev SV, Alferov SV, Khonina SN, Kudryashov SI. Study of the broadband radiation intensity distribution formed by diffractive optical element. *Computer Optics* 2014; 38(4): 689-694.
 - [5] Karpeev SV, Ustinov AV, Khonina SN. Design and analysis of a three-wave diffraction focusing doublet. *Computer Optics* 2016; 40(2): 173-178. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-173-178.
 - [6] Sweeney DW, Sommargren GE. Harmonic diffractive lenses. *Appl Opt* 1995; 34(14): 2469-2475.
 - [7] Khonina SN, Ustinov AV, Skidanov RV, Morozov AA. Comparative study of the spectral characteristics of aspheric lens. *Computer Optics* 2015; 39(3): 363-369. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-3-363-369.
 - [8] Rosli A, Manaf A, Sugiyama T, Yan J. Design and fabrication of Si-HDPE hybrid Fresnel lenses for infrared imaging systems. *Opt Express* 2017; 25: 1202-1220.
 - [9] Nikonov AV, Petrov MV, Bibikov SA, Yakimov PY, Kutikova VV, Yuzifovich YV, Morozov AA, Skidanov RV, Kazanskiy NL. Toward ultralightweight remote sensing with harmonic lenses and convolutional neural networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 2018; 11(9): 3338-3348. DOI: 10.1109/jstars.2018.2856538.
 - [10] Wang P, Mohammad N, Menon R. Chromatic-aberration corrected diffractive lenses for ultra-broadband focusing. *Sci Rep* 2016; 6: 21545.
 - [11] Mohammad N, Meem M, Shen B, Wang P, Menon R. Broadband imaging with one planar diffractive lens. *Sci Rep* 2018; 8: 2799.
 - [12] Banerji S, Sensale-Rodriguez B. A computational design framework for efficient, fabrication error-tolerant, planar THz diffractive optical elements. *Sci Rep* 2019; 9: 5801.
 - [13] Meem M, Majumder A, Menon R. Full-color video and still imaging using two flat lenses. *Opt Express* 2018; 26: 26866-26871.
 - [14] Banerji S, Meem M, Majumder A, Vasquez FG, Sensale-Rodriguez B, Menon R. Imaging with flat optics: metalenses or diffractive lenses? *Optica* 2019; 6: 805-810.
 - [15] Doskolovich LL, Bezus EA, Morozov AA, Osipov V, Wolffsohn JS, Chichkov B. Multifocal diffractive lens generating several fixed foci at different design wavelengths. *Opt. Express* 2018; 26(4): 4698-4709. DOI: 10.1364/OE.26.004698.
-

[16] Doskolovich LL, Bezus EA., Bycov DA, Skidanov RV, Kazanskiy NL. Calculation of a diffractive lens having a fixed focal position at several prescribed wavelengths. *Computer Optics* 2019; 43(6): 949-955. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-946-955.

[17] Genie Nano. GIGE camera. Small package. Big functionality. Source: <https://www.teledynedalsa.com/en/products/imaging/cameras/genie-nano-1gig/>.

Authors' information

Roman Vasilevich Skidanov (b. 1973). Graduated with honors (1990) from Samara State University (SSU), majoring in Physics. He received his Doctor in Physics & Maths (2007) degrees from Samara State University. He is the head of Micro- and Nanotechnologies laboratory of the Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences, holding a part-time position of professor at SSU’s Technical Cybernetics sub-department. He is co-author of 160 scientific papers, 7 monographs. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics. E-mail: romans@ipsiras.ru.

Leonid Leonidovich Doskolovich graduated with honors (1989) from S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (presently, Samara National Research University), majoring in Applied Mathematics. He received his Doctor in Physics & Maths (2001) degree from Samara National Research University. Head of laboratory of the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, professor at Samara University’s Technical Cybernetics sub-department. Current research interests include diffractive optics, laser information technologies, nanophotonics. E-mail: leonid@ipsiras.ru.

Sofiya Vladislavovna Ganchevskaya (b. 1992), graduated from Samara State Aerospace University in 2015, majoring in Applied Mathematics and Physics. Currently she works as an assistant professor of Technical Cybernetics sub-department of Samara University. Her research interests: diffractive optics, optical manipulation, manufacturing technology of diffractive optical elements. E-mail: sofi@ipsiras.ru.

Veronika Alexandrovna Blank (b. 1992). She received her bachelor in Applied Mathematics and Physics (2013) in SSAU. Her research interests are currently diffractive optics. E-mail: veronika_b@ipsiras.ru.

Vladimir Vladimirovich Podlipnov, an engineer at Samara National Research University's Lab-35, an engineer of the laboratory of Micro- and Nanotechnology of the Image Processing Systems Institute of the RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences. His research interests: mathematical modeling, electron-beam lithography, optimization of etching procedures in microelectronics, diffractive optics and techniques for surface processing and inspection. E-mail: podlipnovvv@ya.ru.

Nikolay Lvovich Kazanskiy (b. 1958), graduated with honors (1981) from S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (presently, S.P. Korolyov Samara National Research University), majoring in Applied Mathematics. He received his Candidate in Physics & Maths (1988) and Doctor in Physics & Maths (1996) degrees from Samara University. He is the director of the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS), also holding a part-time position of a professor at Technical Cybernetics sub-department of Samara University, a leading researcher at the laboratory of Advanced Technologies for Earth Remote Sensing at Samara University, holding the chair at the sub-department of High-Performance Computing at IPSI RAS. He is an OSA-, SPIE- and IAPR-member. He is co-author of 290 scientific papers, 12 monographs, 53 inventions and patents. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics. Website: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/kazanskiy.htm>. E-mail: kazanskiy@ssau.ru.

Received October 15, 2019. The final version – December 26, 2019.
