

## Экспериментальное исследование изображающего объектива на основе дифракционных линз, корректирующих aberrации

© Р.В. Скиданов<sup>1,2</sup>, С.В. Ганчевская<sup>1,2</sup>, В.С. Васильев<sup>1</sup>, В.В. Подлипнов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ИСОИ РАН — филиал ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“ РАН, 443001 Самара, Россия

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086 Самара, Россия

e-mail: romans@ipsiras.ru

Поступила в редакцию 16.12.2020 г.

В окончательной редакции 16.12.2020 г.

Принята к публикации 22.12.2020 г.

Рассмотрен простейший объектив, состоящий из рефракционной и дифракционной линз, в котором за счет формы дифракционной линзы компенсируются основные геометрические aberrации. Рассмотрен способ расчета такой системы на основе минимизации хроматической aberrации. Представлены результаты эксперимента, в котором напрямую определялась частотно-контрастная характеристика гибридного объектива.

**Ключевые слова:** дифракционная линза, гибридный объектив, хроматическая aberrация, геометрические aberrации.

DOI: 10.21883/OS.2021.04.50772.304-20

### Введение

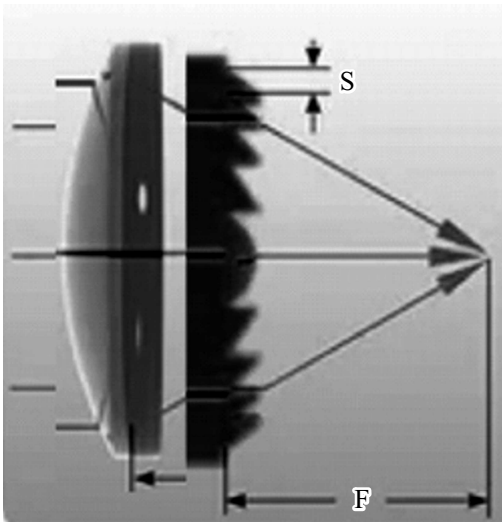
В современных смартфонах используется все более сложная оптика для получения высокого качества изображения. Поскольку толщина корпуса уже не позволяет уместить такие объективы при нормальном расположении, в последних моделях смартфонов используется конфигурация с поворотной призмой. Минимизация размеров объектива является актуальной задачей, без решения которой невозможно дальнейшее сокращение размеров таких устройств. Минимизировать размеры объектива можно, используя дифракционную или гармоническую линзу [1–8]. За счет особой формы таких линз можно уменьшить хроматизм, но все же относительно высокая хроматическая aberrация этих оптических элементов должна устраняться дополнительной цифровой обработкой [9]. С одной стороны, дополнительная обработка вполне подходит для регистрирующих устройств в современных смартфонах, обладающих высокими вычислительными мощностями, с другой стороны, оптическое разрешение в современных смартфонах настолько высоко, что цифровой обработки недостаточно, и желательно использование объектива, сопоставимого по качеству изображения с объективами классического типа на основе большого количества рефракционных линз. Все чаще рассматриваются гибридные системы, содержащие как рефракционные, так и дифракционные элементы [10–15]. Однако работы по гибридным системам не используют все возможности коррекции aberrаций на основе дифракционных линз. Дифракционные линзы в таких системах используются классическим образом как некий ахроматизирующий элемент в составе классического многолинзового объектива

[10] либо в сочетании с рефракционным элементом свободной формы [12], который компенсирует геометрические aberrации в объективе. Также используются принципиально двухфокусные системы [14,15]. Ни в одной работе не попытались модифицировать рельеф дифракционной линзы для компенсации основных геометрических aberrаций. В настоящей работе сделана попытка объединить компенсацию хроматических и геометрических aberrаций в одной дифракционной линзе.

### 1. Основные формулы

Основная идея использования дифракционной оптики в составе классических изображающих объективов основана на том, что материальная дисперсия рефракционных линз и дисперсия фокусирующих свойств дифракционной линзы имеют разные знаки. С увеличением длины волны фокусное расстояние рефракционной линзы увеличивается, для дифракционной же линзы наблюдается обратный эффект. Использование дублета (рис. 1) из рефракционной и дифракционной линз позволяет при правильном подборе параметров полностью исключить хроматическую aberrацию на двух длинах волн и уменьшить ее в интервале между этими длинами волн.

Данная схема рассматривается исключительно как в принципе не пригодная к практическому использованию модель, поскольку при использовании стандартной сферической рефракционной линзы и стандартной дифракционной линзы, аппроксимирующей подобную же сферическую линзу, получается система с существенными геометрическими aberrациями. Поэтому дифракционная



**Рис. 1.** Классическая иллюстрация дублета из рефракционной и дифракционной линз, в котором компенсируется хроматическая аберрация.

оптика рассматривается в составе достаточно сложных оптических систем [7,8] лишь как элемент компенсации хроматической аберрации. Однако возможности дифракционной оптики не ограничиваются только компенсацией хроматических аберраций. Особое внимание следует обратить на результаты работы [9], где для компенсации геометрических аберраций использовали сложнейший рефракционный элемент свободной формы, а в оптической системе находится и дифракционная линза. Эта работа хорошо иллюстрирует подход исследователей, хорошо знакомых с расчетом рефракционных систем и не использующих все возможности дифракционной оптики. Дифракционная линза может аппроксимировать расположением зон любую асферическую поверхность сколь угодно высокой сложности, что позволяет использовать ее одновременно и как компенсатор геометрических аберраций, и дифракционный хроматизм от этой формы практически не зависит.

Рассмотрим основные расчетные формулы для формирования рефракционно-дифракционного ахроматического дублета. Условие ахроматизации — это равенство фокусных расстояний системы из двух линз при двух длинах волн. Для рефракционной линзы фокусное расстояние на длине волны  $\lambda_1$  будет определяться формулой

$$f(\lambda_1) = \frac{R_1 R_2 n(\lambda_1)}{[n(\lambda_1) - 1][n(\lambda_1)(R_1 + R_2) - d(n(\lambda_1) - 1)]}, \quad (1)$$

где  $R_1$  — радиус кривизны первой поверхности,  $R_2$  — радиус кривизны второй поверхности,  $d$  — толщина линзы,  $n(\lambda_1)$  — показатель преломления на длине волны  $\lambda_1$ .

Для дифракционной линзы фокусное расстояние будет определяться как

$$f^d(\lambda_1) = \frac{\lambda_0 f_0}{\lambda_1}, \quad (2)$$

где  $\lambda_0$  — расчетная длина волны,  $f_0$  — расчетное фокусное расстояние. Аналогично для длины волны  $\lambda_2$

$$f(\lambda_2) = \frac{R_1 R_2 n(\lambda_2)}{[n(\lambda_2) - 1][n(\lambda_2)(R_1 + R_2) - d(n(\lambda_2) - 1)]}, \quad (3)$$

$$f^d(\lambda_2) = \frac{\lambda_0 f_0}{\lambda_2}. \quad (4)$$

Совокупное фокусное расстояние системы из дифракционной и рефракционной линз выражается формулой

$$F = \frac{f f^d}{f + f^d - D}. \quad (5)$$

Условие равенства общего фокусного расстояния

$$\frac{f(\lambda_1) \lambda_0 f_0}{\lambda_1 [f(\lambda_1) + \frac{\lambda_0 f_0}{\lambda_1} - D]} = \frac{f(\lambda_2) \lambda_0 f_0}{\lambda_2 [f(\lambda_2) + \frac{\lambda_0 f_0}{\lambda_2} - D]}. \quad (6)$$

После несложных преобразований получаем

$$\lambda_0 f_0 = \frac{f(\lambda_1) f(\lambda_2) (\lambda_1 - \lambda_2) - d[f(\lambda_2) \lambda_2 - f(\lambda_1) \lambda_1]}{f(\lambda_1) - f(\lambda_2)}. \quad (7)$$

Очевидно, что наилучший результат достигается, если расчетная длина волны будет располагаться между  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ,  $\lambda_0 = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$ , тогда формула (7) преобразуется к виду

$$f_0 = \frac{2\{f(\lambda_1) f(\lambda_2) (\lambda_1 - \lambda_2) - d[f(\lambda_2) \lambda_2 - f(\lambda_1) \lambda_1]\}}{(\lambda_1 + \lambda_2)[f(\lambda_1) - f(\lambda_2)]}. \quad (8)$$

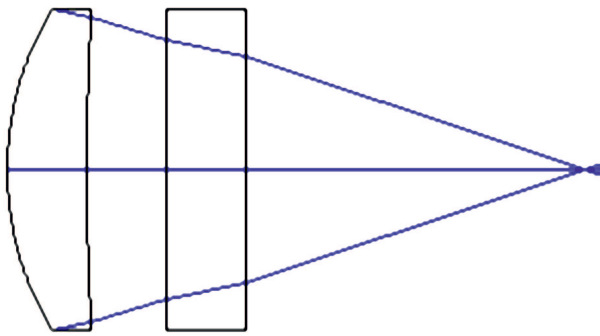
Расчет фазовой функции дифракционной линзы проводится исходя из простого условия: неидеальный волновой фронт  $\varphi_R(r)$  от падающего на систему пучка, параллельного оптической оси, сформированный рефракционной линзой, после прохождения через дифракционную линзу должен стать идеальным сферическим волновым фронтом  $\varphi_0(r)$ , сходящимся точно в точку пересечения фокальной плоскости системы с оптической осью. Таким образом, фазовая функция линзы будет определяться разностью фазовых функций сформированного рефракционной линзой и идеального волновых фронтов

$$\varphi^d(r) = \varphi_0(r) - \varphi_R(r), \quad (9)$$

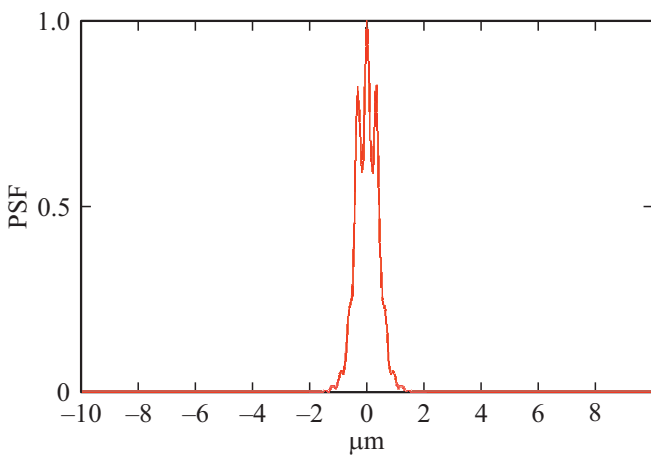
где  $r$  — расстояние от оптической оси.

## 2. Моделирование

Первоначально была рассчитана система с оптическими параметрами, соответствующими среднему объективу смартфона. На рис. 2 представлена одна из возможных конфигураций объектива  $f = 3.5 \text{ mm}$  (эквивалент



**Рис. 2.** Гибридная система из рефракционной и дифракционной линз с фокусным расстоянием 3.5 mm.



**Рис. 3.** Функция рассеяния точки гибридного объектива с фокусным расстоянием 3.5 mm: зависимость интенсивности света от пространственной координаты в направлении, перпендикулярном оптической оси.

28 mm при кроп-факторе 8), выполненная в коммерческом пакете ZEMAX. Устанавливается первая линза — обычная сферическая, с  $R_1 = 1.9$  mm,  $R_2 = 16.7$  mm, толщиной 0.5 mm (стекло BK7), на расстоянии 0.5 mm от нее располагается дифракционная линза на подложке из того стекла и той же толщины. Микрорельеф линзы на пленке ПММА толщиной 0.81 μm. Дифракционная линза является аппроксимацией линзы, полученной по формуле (9).

К сожалению, ZEMAX не позволяет работать с нестандартными дифракционными линзами (на рис. 2 использована стандартная линза Френеля), поэтому для расчета функции рассеяния точки (ФРТ) сформированной гибридной системы было разработано специальное программное обеспечение, которое позволило определить ФРТ. На рис. 3 представлена рассчитанная в этой программе ФРТ для объектива по диапазону длин волн от 400 до 700 nm.

Как видно из рис.3, ширина ФРТ получившейся гибридной системы составляет 0.9 μm, что примерно соответствует дифракционному пределу.

### 3. Изготовление дифракционной линзы

Для проведения эксперимента промоделированная гибридная система не подходит из-за технических проблем с реализацией экспериментальной оптической схемы. Имеющиеся у экспериментаторов светочувствительные матрицы существенно больше, чем матрицы, используемые в смартфонах. Для расчета экспериментальной системы в качестве основы была выбрана рефракционная линза с точно известными параметрами:  $f = 30$  mm, двояковыпуклая с одинаковыми радиусами кривизны из стекла BK7. Расчет велся для диапазона длин волн от 450 до 1000 nm. В качестве расчетной длины волны была использована длина волны в середине этого диапазона — 725 nm. Поскольку линза формировалась на фоторезисте с показателем преломления 1.64, расчетная высота микрорельефа составила 1130 nm. Это позволило точно рассчитать параметры волнового фронта, формируемого линзой на расстоянии 5 mm от ее задней главной плоскости, и на основе расчетов сформировать фазовую функцию дифракционной линзы. Из-за причин технологического характера фазовую добавку для компенсации волнового фронта (9) решено было реализовать в виде огибающей дифракционного микрорельефа (рис. 4). Методом прямой лазерной записи по фоторезисту [16] была изготовлена дифракционная линза, профиль которой представлен на рис. 4. Фокусное расстояние линзы составило около 1200 mm. Высота микрорельефа линзы ближе к центру, к сожалению, немного выше расчетной (около 1400 nm), но начиная с радиуса 1500 μm совпадает с расчетным значением с ошибкой не более 10%. Учитывая, что через область радиусом 1500 μm проходит менее 10% световой энергии, эта ошибка не должна оказать заметного влияния на качество формируемого изображения.

Совокупное фокусное расстояние образованной рефракционной и дифракционной линзами системы составило 29.25 mm, что не сильно отличается от исходного фокусного расстояния и позволяет в дальнейшем сравнивать результаты работы одиночной рефракционной линзы и разработанной гибридной системы.

### 4. Эксперимент

Для проведения эксперимента была собрана оптическая схема, представленная на рис. 5.

Проверка работы гибридного объектива предполагалась в широкоугольном режиме, поэтому мира шириной 300 mm располагалась на расстоянии всего 800 mm от объектива (поле зрения около 20°). На рис. 6 представлено изображение одной из мир, использованных в экспериментах. Использовано три полосатых мира с разными положениями относительно оптической оси системы.

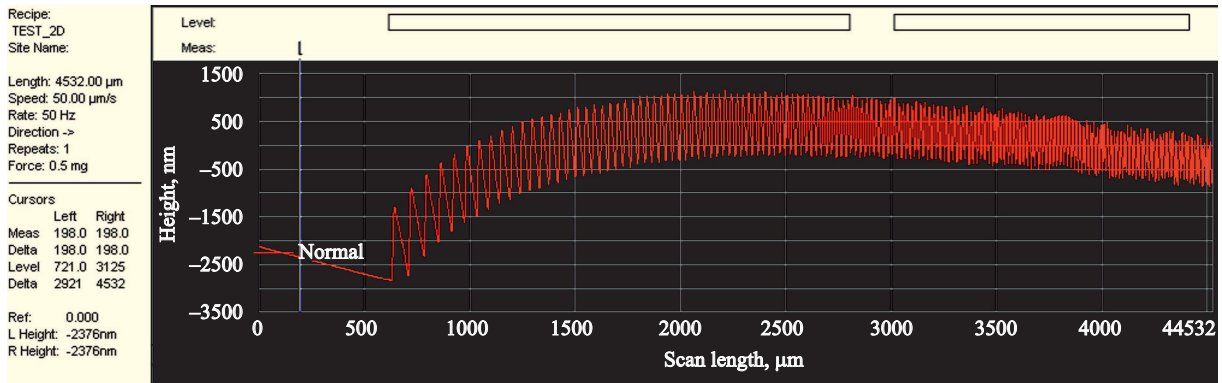


Рис. 4. Профилограмма изготовленной дифракционной линзы с фокусным расстоянием 1190 mm.

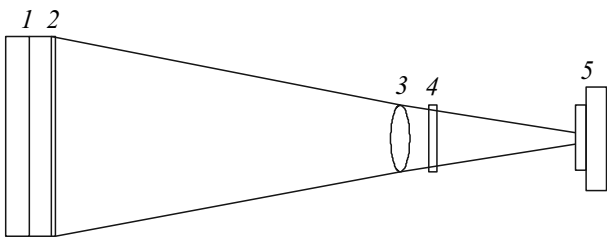


Рис. 5. Схема оптической установки: 1 — светодиодная панель с равномерной яркостью, 2 — пленка со светотехнической миры, 3 — рефракционная линза  $f = 30$  mm, 4 — дифракционная линза  $f = 1190$  mm, 5 — светочувствительная матрица.

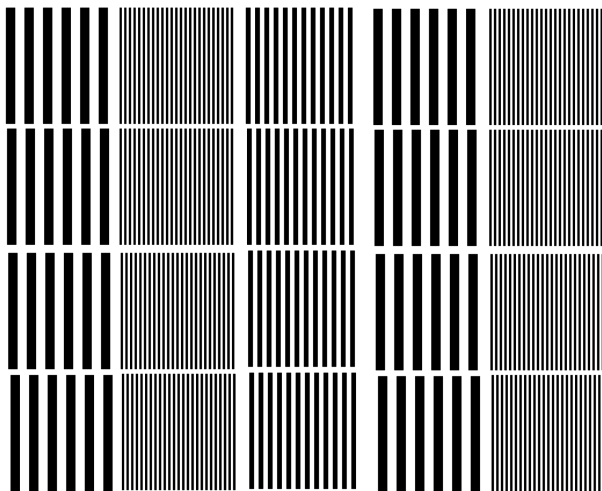


Рис. 6. Мира для эксперимента с гибридным объективом.

Для эксперимента разработано специальное программное обеспечение, которое на основе полученных изображений мир рассчитывало контраст изображения полос разной частоты.

На рис. 7 представлено изображение участка миры и его сечение в программном обеспечении, по которому и вычислялся контраст в зависимости от частоты линий (частотно-контрастная характеристика, ЧКХ).

Из рис. 7 видно, что гибридная система наиболее хорошо работает в области вблизи оптической оси (более низкочастотные линии слева имеют меньший контраст, чем более высокочастотные в центре).

На основе серии экспериментов с разными мирами были получены ЧКХ для гибридной системы и для одиночной рефракционной линзы. На рис. 8 приведены экспериментальные ЧКХ для гибридной системы, частоты даны на растр светочувствительной матрицы (ширина 10 mm, размер пикселя 4.75 μm).

Среднее значение контраста по серии экспериментов составило 0.17. Для одиночной рефракционной линзы среднее значение контраста 0.14. При сужении поля зрения с 20° до 10° средние значения контраста составили 0.22 и 0.16 соответственно. Таким образом, при сужении поля зрения преимущество такой гибридной системы перед одиночной рефракционной линзой возрастает. Набор линий на рис. 8 на частоте около 90 образовался из-за

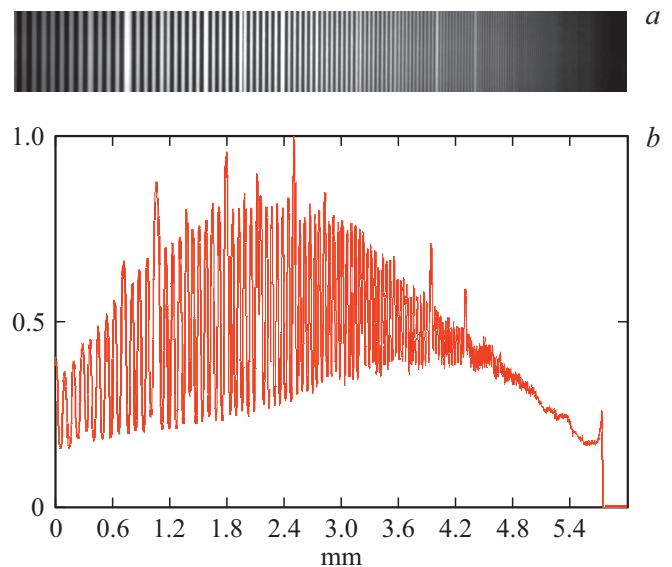
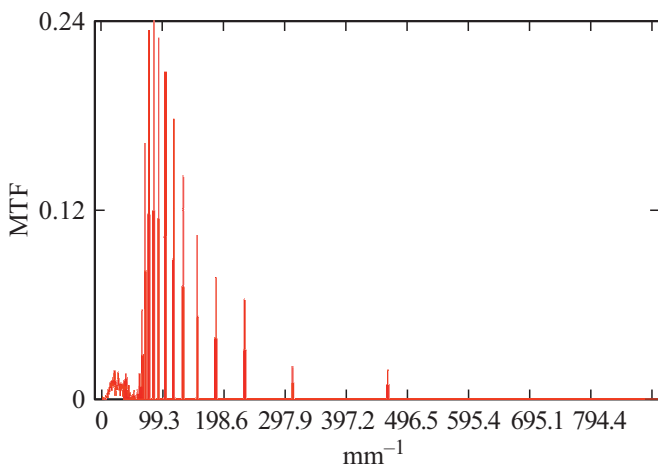


Рис. 7. Изображение участка миры (a) и сечение (зависимость интенсивности от пространственной координаты от 0 до 0.95 mm) этого изображения (b).



**Рис. 8.** Экспериментальная ЧКХ для гибридной системы (частоты даны в расчете на размер раstra светочувствительной матрицы).

неточного экспериментального определения частоты в изображении ( $\pm 1-2$  пиксела).

## Выводы

Гибридная система в виде рефракционно-дифракционного дублета способна формировать ФРТ, сопоставимую по ширине дифракционному пределу в достаточно широком спектральном диапазоне, что подтверждается данными моделирования. Проведенный эксперимент доказывает существенное улучшение ЧКХ разработанной системы по сравнению с ЧКХ одиночной рефракционной линзы с тем же фокусным расстоянием, что позволяет подтвердить данные моделирования. Дальнейшее повышение качества изображения в такой оптической системе является чисто технической задачей по повышению точности формирования микрорельефа дифракционной линзы.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность ЦКПО „Нанофотоника и дифракционная оптика“ за предоставленное технологическое оборудование.

## Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФ 20-69-47110 в части создания дифракционных линз, 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 гибридного объектива.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Meem M., Banerji S., Majumder A., Pies Ch., Oberbiermann T., Sensale-Rodriguez B., Menon R. // Appl. Phys. Lett. 2020. V. 117. P. 041101.
- [2] Banerji S., Meem M., Majumder A., Vasquez F.G., Sensale-Rodriguez B., Menon R. // Optica. 2019. V. 6. N 6. P. 805.
- [3] Park S., Lee G., Park B., Seo Y., Park C., Chun Y.T., Joo Ch., Rho J., Kim J.M., Hone J., Jun S.Ch. // Light. Sci. Appl. 2020. V. 5. N 9. P. 98.
- [4] Lin H., Xu Zai-Quan, Cao G., Zhang Yu., Zhou J., Wang Z., Wan Zh., Liu Zh., Loh K.P., Qiu Cheng-Wei, Bao Q., Jia B. // Light. Sci. Appl. 2020. V. 11. N 9. P. 137.
- [5] Banerji S., Cooke J., Sensale-Rodriguez B. // Sci. Rep. 2020. V. 10. P. 14608
- [6] Greisukh G.I., Ezhov E.G., Antonov A.I., Danilov V.A., Usievich B.A. // Quant. Electron. 2020. V. 50. N 7. P. 623-628.
- [7] Greisukh G.I., Danilov V.A., Stepanov S.A., Antonov A.I., Usievich B.A. // Opt. Spectrosc. 2018. V. 125. N 2. P. 232-237.
- [8] Antonov A.I., Greisukh G.I., Ezhov E.G., Stepanov S.A. // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2017. V. 53. N5. P. 421-430.
- [9] Nikonov A.V., Petrov M.V., Bibikov S.A., Yakimov P.Y., Kutikova V.V., Yuzifovich Y.V., Morozov A.A., Skidanov R.V., Kazanskiy N.L. // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2018. V. 11. N 9. P. 3338-3348. 8424456.
- [10] Mao S., Zhao J. // Appl. Opt. 2020. V. 59. N 20. P. 5888.
- [11] Piao M., Zhang B., Dong K. // Opt. Express. 2020. V. 28. N 20. P. 29076.
- [12] Choi H., Yoon Y.J., Kim B., Lee S.H., Kim W.C., Park N.Ch., Park Y.P., Kang S. // Jap. J. Appl. Phys. 2008. V. 47. N 8. P. 6678.
- [13] Greisukh G.I., Ezhov E.G., Antonov A.I. // Computer Optics. 2020. V. 44. N 2. P. 177-184.
- [14] Koronkevich V.P., Lenkova G.A., Korolkov V.P., Poleschuk A.G., Isakov I.A., Gutman A.S. // Computer Optics. 2008. V. 32. N 1. P. 50-58.
- [15] Koronkevich V.P., Lenkova G.A., Korol'kov V.P., Isakov I.A. // J. Optical Technology. 2007. V. 74. N 12. P. 818-822.
- [16] Korolkov V.P., Nasyrov R.K., Sametov A.R., Suhii S.A. // Proc. of SPIE. 2011. V. 7957. P. 795710.