

Оптический журнал

Оптическое приборостроение и метрология
Optical instrument making and metrology

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-09-55-63

УДК 681.7.013.8, 535.4

Установка для контроля характеристик качества зонной пластиинки Френеля с круглыми отверстиями

Михаил Борисович Леонов^{1✉}, Дмитрий Александрович Серегин²,
Грибова Наталья Юрьевна³

Филиал Корпорации «Комета» — Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения,
Санкт-Петербург, Россия

¹mihxeu87@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0001-8540-9312>

²seregin.dmitriy@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-1611-2739>

³nataly-g@mail.ru <https://orcid.org/000-0002-3883-6626>

Аннотация

Предмет исследования. Зонная пластиинка Френеля, кольцевые зоны которой образуются по-средством круглых отверстий, известная также как «фотонное сито», и установка для контроля ее характеристик качества. **Цель работы** — рассмотрение перспективы применения зонной пластиинки Френеля типа «фотонное сито» для оптико-электронных приборов, разработка схемы

контроля, изготовление макета установки для контроля характеристик зонной пластиинки Френеля, оценка выбранного метода изготовления и практической применимости изготовленных образцов. **Метод.** Анализ уровня развития зонной пластиинки Френеля типа «фотонное сито» для применения в оптико-электронных приборах. Определение характеристик качества изготовленных зонных пластиинок на макете установки и сравнения с расчетными характеристиками.

Основные результаты. Рассмотрены перспективы применения зонной пластиинки Френеля с круглыми отверстиями для создания оптико-электронных приборов. Исследованы образцы, разработанные для проверки доступных методов изготовления «фотонного сита», а также проведена оценка их практической применимости. Предложена схема установки для контроля «фотонного сита» с учетом низкой энергетической эффективности, реализующая стандартизированные методы контроля функций рассеяния точки, рассеяния линии, передачи модуляции. Создан макет установки на базе интерферометра в качестве источника монохроматического излучения и анализирующего узла на базе цифровой камеры. Проведена апробация макета установки для контроля функций рассеяния точки, рассеяния линии, передачи модуляции образцов зонной пластиинки Френеля. Проведено сравнение экспериментальных данных с расчетными. Из результатов сравнения видно, что побочные максимумы функции рассеяния линии значительно выше их расчетных значений, но, тем не менее, ширина главного максимума расчетной и экспериментальной функции рассеяния линии в диапазоне уровней от 0,1 до 1 отн. ед. совпадают с погрешностью, не превышающей размер пикселя цифровой камеры анализирующего узла. **Практическая значимость.** Несмотря на то, что полученные образцы зонной пластиинки Френеля и не удовлетворяют современным требованиям к характеристикам изображающих оптических систем, сама идея применения «фотонного сита» для создания сверхлегких систем космического базирования представляется довольно перспективной. В будущем стоит рассмотреть другие варианты изготовления, которые позволят создать экспериментальные образцы с большей точностью расположения отверстий. Кроме того, уже есть разработки, позволившие достигнуть значительно более высокой энергетической эффективности, что в будущем может обеспечить практическое применение

«фотонного сита» и в области космического приборостроения. Схема установки для исследования текущих образцов зонной пластинки Френеля с низкой энергетической эффективностью получилась работоспособной, что было подтверждено при ее испытаниях на макете установки, работающем на длине волн 0,6328 мкм. При совершенствовании технологии изготовления и создания более светосильных зонных пластинок Френеля могут быть усовершенствованы и методы, и схемы контроля для обеспечения достоверных результатов контроля характеристик качества зонных пластинок Френеля.

Ключевые слова: дифракционные элементы, зонная пластинка Френеля, фотонное сито, оптические измерения, функция рассеяния линии, функция передачи модуляции, энергетическая эффективность

Ссылка для цитирования: Леонов М.Б., Серегин Д.А., Грибова Н.Ю. Установка для контроля характеристик качества зонной пластинки Френеля с круглыми отверстиями // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 09. С. 55–63. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-09-55-63>

Коды OCIS: 120.4630, 120.4820, 050.1965

Measurement setup for quality control of Fresnel zone plate with pinholes

MIKHAIL B. LEONOV¹✉, DMITRY A. SEREGIN², NATALYA Y. GRIBOVA³

The Branch of "Kometa Corp." — "Electro Optical Surveillance Systems", St. Petersburg, Russia

¹muxeu87@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0001-8540-9312>

²seregin.dmitriy@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-1611-2739>

³nataly-g@mail.ru <https://orcid.org/000-0002-3883-6626>

Abstract

Subject of the study. The Fresnel zone plate with circular zones made of pinholes, is also known as a photon sieve, and measurement setup for its' quality characteristics testing. **Aim of study** is to consider the prospects of photon sieve regarding to optoelectronic devices, to develop a quality control scheme and measurement setup layout, evaluate the selected manufacturing method and practical applicability of photon sieve samples. **Method.** The Fresnel zone plate development level analysis regarding to optoelectronic devices. Manufactured Fresnel zone plate's quality characteristics testing using measurement setup prototype. Comparison between Fresnel zone plate's measurement results and calculations. **Main results.** The prospects of Fresnel zone plates with pinholes regarding to optoelectronic devices are considered. Developed samples are used to verify the available methods of Fresnel zone plate manufacturing and their practical applicability. Fresnel zone plate's quality characteristics measurement setup scheme is proposed, considering low energy efficiency, which implements point spread function, line spread function, modulation transfer function standardized test methods. Measurement setup prototype based on an interferometer (as a source of monochromatic radiation) and an analyzing unit based on a digital camera was manufactured. Measurement setup prototype for the Fresnel zone plate samples quality control measurement (point spread function, line spread function, modulation transfer function) was tested. Measurement results and calculations were compared — subsidiary maximums of line spread function are significantly higher than calculated line spread function values, but, nevertheless, the line spread function's primary maximum width coincides with calculated value at the levels from 0,1 to 1 relative units with error no more than pixel size of analyzing unit digital camera. **Practical significance.** Although the manufactured Fresnel zone plate samples dissatisfying modern imaging optical systems' quality characteristics, the idea of using the photon sieve to create ultra-light space-based optoelectronic systems seems to be promising. In the future, it is worth to consider other manufacturing options that will allow to create Fresnel zone plate samples with greater accuracy of pinholes location. Modern developments already made possible significantly higher energy efficiency, which may provide the photon sieve practical application for space instrumentation in future. Measurement setup prototype for current low energy efficiency

Fresnel zone plate samples is efficiently and approved during Fresnel zone plate samples testing on 0,6328 μm wavelength. Improving the manufacturing technology and creating more high-aperture Fresnel zone plates, both methods and quality control measurement schemes can be improved to ensure reliable results of Fresnel zone plate's quality characteristics testing.

Keywords: diffractive optical elements, Fresnel zone plate, photon sieve, optical measurements, line spread function, modulation transfer function, energy efficiency

For citation: Leonov M.B., Seregin D.A., Gribova N.Y. Measurement setup for quality control of Fresnel zone plate with pinholes [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 9. P. 55–63. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-09-55-63>

OCIS codes: 120.4630, 120.4820, 050.1965

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень оптического приборостроения предъявляет повышенные требования к разрабатываемым оптическим системам (ОС), заставляя искать новые нетривиальные решения возникающих задач. И хотя идея использования дифракционных оптических элементов (ДОЭ) в качестве составных частей ОС, формирующих изображение, была предложена довольно давно [1], она долгое время не могла быть в полной мере реализована по причине ограниченных возможностей для их производства и контроля. На сегодняшний день, в связи с появлением новых материалов и общим развитием технологий изготовления вновь стали появляться идеи использования ДОЭ в различных областях оптического приборостроения [2], в том числе во всевозможных космических системах, таких как орбитальные телескопы, спутниковые системы дистанционного зондирования Земли, системы оптической связи и др. [3–6]. В частности, в последних отчетах космических агентств рассматриваются варианты замены адаптивных зеркал мембранными ДОЭ в следующих поколениях больших космических обсерваторий, которые должны прийти на смену «Хабблу» и «Джеймсу Уэббу» [7].

Целью работы являются рассмотрение перспективы применения ДОЭ — зонной пластиинки Френеля (ЗПФ), колцевые зоны которой образуются посредством круглых отверстий, и известной также как «фотонное сите» (ФС), для создания космических оптико-электронных систем, разработка схемы контроля, изготовление макета установки для контроля характеристик ЗПФ, оценка выбранного метода изготовления и практической применимости изготовленных образцов.

В результате совместных усилий [8] Политехнического университета Петра Великого

и филиала АО «Корпорация «Комета» — «Начально-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения» были разработаны, изготовлены и исследованы образцы ФС для экспериментальной проверки доступных методов изготовления, а также оценки практической применимости. В работе показана схема установки для контроля характеристик качества ФС. Методы контроля характеристик качества ЗПФ (функции рассеяния точки, рассеяния линии, передачи модуляции) реализованы с учетом требований ГОСТ Р 58566-2019 «Оптика и фотоника. Объективы для оптико-электронных систем. Методы испытаний». Проведены апробация макета установки для контроля ФС и сравнение экспериментальных данных с расчетными.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНИМОСТИ И ПЕРСПЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТОК

Для достижения большей разрешающей способности космических ОС стремятся увеличивать их апертуру, что попутно влечет за собой увеличение габаритных размеров всей системы, однако технология изготовления крупногабаритных зеркал имеет свои пределы. Адаптивные зеркала могут решить эту проблему, но они сложнее в сборке и тяжелее за счет механических приводов управления составными частями. Для выводимых на орбиту оптико-электронных приборов требования к массогабаритным параметрам являются критическими: они ограничены возможностями современных ракетоносителей. В таких жестких рамках применение мембранных ДОЭ представляется крайне перспективным, поскольку они обладают значительным преимуществом — существенно меньшей массой при аналогичных

и даже больших габаритах, кроме того, они могут быть компактно упакованы в специальный чехол на время хранения, транспортировки и запуска и упруго разворачиваться уже на орбите [9].

Наиболее известным изображающим ДОЭ является ЗПФ в различных вариациях. В 2001 г. была изложена идея создания ЗПФ, в которой кольца не сплошные, а состоят из массива отверстий, размещенных определенным образом [10]. Этот ДОЭ был назван автором «фотонным ситом» и изначально предложен для использования в диапазоне рентгеновского излучения для спектроскопии и микроскопии высокого разрешения. Стоит отметить, что ФС разрабатывалось главным образом для решения проблем, связанных с ограниченным количеством материалов, оптически прозрачных в указанной области спектра, и их деградацией под воздействием излучения. В этом случае неоспоримые достоинства ФС, такие как большой простор для выбора материалов подложек, не слишком строгие требования к качеству и чистоте поверхности используемого материала, отсутствие дисперсии в материале, и как следствие, пропускание излучения в широком спектральном диапазоне от ультрафиолетового до инфракрасного, а также малая масса по сравнению с традиционными зеркально-линзовыми ОС, полностью перекрывают их свойственные любым ДОЭ недостатки, такие как низкая энергетическая эффективность, спектральная избирательность и ограниченное поле зрения.

Благодаря существенным успехам в создании современных материалов — сверхлегких

и сверхпрочных [2], которые могут быть использованы в качестве подложки, применение ФС в качестве мембранных ДОЭ для создания высокоапертурных сверхлегких оптико-электронных систем для космического применения представляется весьма перспективным. В этом случае описанные выше недостатки ФС выходят на первый план, и если хроматизм может быть в определенной мере скорректирован при использовании корректоров [11, 12], то низкое пропускание представляется существенной проблемой. Для решения указанной выше задачи были предложены самые разные варианты ФС: с различными расположением и размерами отверстий, полностью прозрачные или отражающие [13, 14], в том числе был описан способ создания многоуровневого ФС методом шаговой пульсирующей лазерной абляции, позволяющим достигнуть энергетической эффективности с коэффициентом пропускания вплоть до 0,497 [15].

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения эксперимента были изготовлены несколько образцов ФС с отверстиями диаметром от 0,110 до 0,318 мм (структуры с числом колец от 5 до 10). Образцы выполнены на алюминиевой фольге толщиной 0,10 мм. Отверстия изготовлены методом лазерной резки сфокусированным лазерным пучком диаметром около 0,02 мм [8].

На рис. 1 приведены общий внешний вид одной из изготовленных ЗПФ и ее фрагменты под микроскопом с разным увеличением. Общее число отверстий — 201, на кольцевой

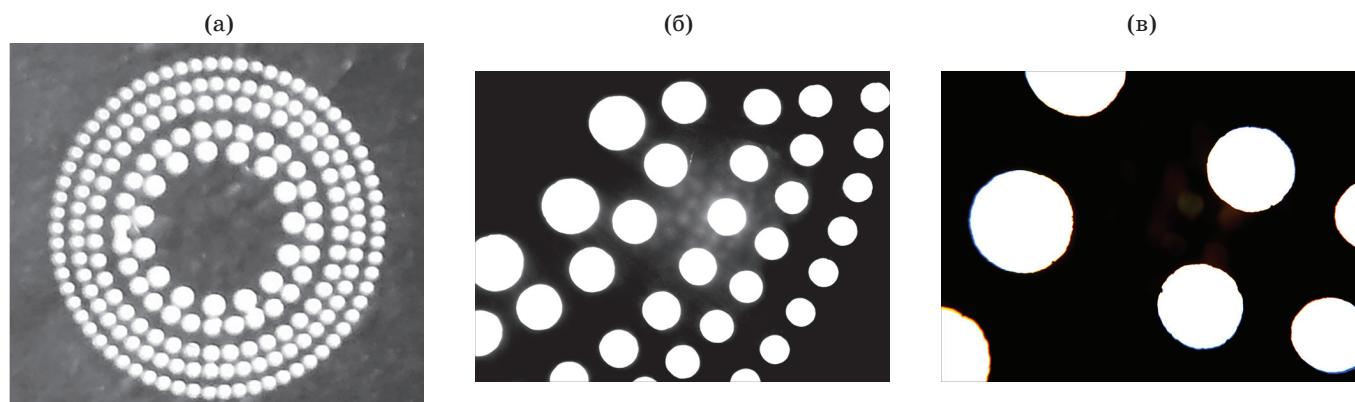


Рис. 1. Образец ЗПФ. Внешний вид (а), вид под микроскопом (б, в)
Fig. 1. Fresnel zone plate prototype. (a) General view, (b, v) view under microscope

зоне диаметром 6,478 мм расположено 66 отверстий.

При разработке установок для контроля ОС, включающих в себя ДОЭ, необходимо учитывать их энергетическую эффективность, которая определяется коэффициентом пропускания и соотношением диаметра входного зрачка D_{ps} и фокусного расстояния f_{ps} , т.е. относительным отверстием или его знаменателем — диафрагменным числом K .

Рассмотрим метод расчета коэффициента пропускания экспериментальной ЗПФ. По аналогии с дырчатой диафрагмой [16] коэффициент пропускания ЗПФ τ можно рассчитать по формуле

$$\tau = \frac{\sum S_o}{S_{ps}} = \frac{\sum D_o^2}{D_{ps}^2}, \quad (1)$$

где D_o — диаметр отверстия, мм, S_o — площадь отверстия, мм^2 , D_{ps} — диаметр ЗПФ (соответствует кольцевой зоне максимального диаметра), мм, S_{ps} — площадь ЗПФ, мм^2 .

Для расчета примем средний диаметр отверстий $D_o = (0,110 + 0,318)/2 = 0,214$ мм. Тогда при количестве отверстий 201 коэффициент пропускания составит $\tau = (201 \times 0,214^2)/6,478^2 = 0,22$. Такое низкое значение коэффициента пропускания подтверждает заявленную ранее низкую энергетическую эффективность.

Фокусное расстояние рассматриваемой ЗПФ на длине волны излучения 0,6328 мкм определено как расстояние от задней поверхности ЗПФ до плоскости наилучшего изображения и составило $f_{ps} = 1595$ мм. Тогда диафрагменное число определяется как $K = f_{ps}/D_{ps} = 1595/6,478 = 246$.

Диаметр дифракционного пятна рассеяния a' при известной длине волны излучения λ и диафрагменном числе K определяется по формуле [17]

$$a' = \frac{2,44\lambda}{D_{ps}/f_{ps}} = 2,44\lambda K. \quad (2)$$

Диаметр дифракционного пятна рассеяния на длине волны излучения 0,6328 мкм составит $a' = 2,44 \times 0,6328 \times 246 = 380$ мкм = 0,38 мм. При использовании коллиматорных установок в соответствии со стандартизованными методами испытаний ОС [17] и при таком диа-

метре дифракционного пятна рассеяния отпадает необходимость выполнения соотношения фокусных расстояний коллиматорного и испытуемого объективов для обеспечения критерия малоразмерности тест-объекта. Кроме того, ОС с коэффициентом пропускания 0,22 и диафрагменным числом 246 и, как было указано ранее, хроматизмом просто невозможна будет проверить на коллиматорных установках без монохроматических источников излучения. При использовании интерференционных фильтров будет дополнительно уменьшена облученность, создаваемая на входном зрачке ЗПФ, в результате чего чувствительности матричных фотоприемных устройств будет недостаточно для регистрации пятна рассеяния ЗПФ. Это было подтверждено при попытках контроля ЗПФ на коллиматорных установках типа *ImageMaster* (TRIOPTICS, GmbH, Германия) и отечественных аналогах с различными немонохроматическими источниками излучения.

Учитывая изложенное выше, предложена схема установки для контроля ЗПФ (рис. 2), реализующая стандартизованные методы [17]

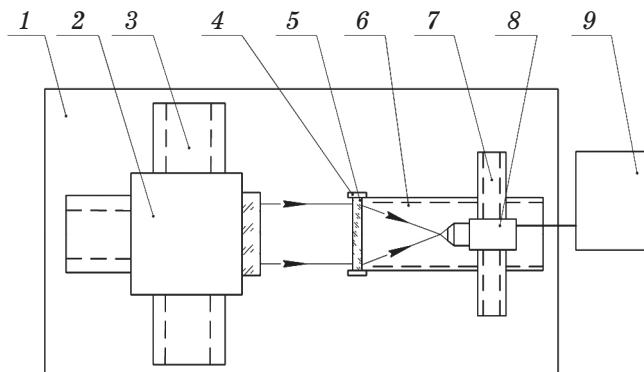


Рис. 2. Схема установки для контроля ЗПФ. 1 — единое амортизационное основание (оптический стол), 2 — источник монохроматического излучения с параллельным ходом лучей, 3 — трехкоординатное устройство, 4 — изделиедержатель, 5 — ЗПФ, 6 — станина с продольными направляющими, 7 — трехкоординатное устройство, 8 — анализирующий узел, 9 — регистрирующая аппаратура

Fig. 2. Measurement scheme of Fresnel zone plate. (1) Single shock-absorbing base (optical table), (2) source of monochromatic radiation with parallel beam travel, (3) three-coordinate device, (4) Fresnel zone plate holder, (5) Fresnel zone plate, (6) frame with longitudinal guides, (7) three-coordinate device, (8) analyzing unit, (9) data acquisition equipment

контроля функций рассеяния точки (ФРТ), рассеяния линии (ФРЛ), передачи модуляции (ФПМ).

На основе предложенной схемы установки был собран ее макет. В качестве источника монохроматического излучения с параллельным ходом лучей использован интерферометр Физо FTI-100HR ($\lambda = 0,6328$ мкм). Макет также содержит анализирующий узел на базе цифровой камеры BMR-1400HM-U (размер пикселя 0,00645 мм, область спектральной чувствительности от 0,4 до 1 мкм, разрядность аналого-цифрового преобразователя 12 бит) и трехкоординатное устройство [18]. Для достоверного измерения ФРТ необходимо, чтобы на диаметр пятна рассеяния приходилось не менее 20 отсчетов ФРТ [17, 18]. В случае ЗПФ требуемый шаг ФРТ составит $dy = a'/20 = 0,38/20 = 0,019$ мм, что больше, чем размер пикселя матрицы цифровой камеры, в связи с этим отпадает необходимость использования микропроекционной оптики для уменьшения шага ФРТ.

Принцип действия анализирующего узла заключается в следующем. С помощью трехкоординатного устройства матрица цифровой камеры устанавливается в плоскость наилучшего изображения ЗПФ по максимуму сигнала. Затем при использовании программного обеспечения [18] регистрируется кадр с ФРТ. Функцию рассеяния линии измеряют в двух взаимно перпендикулярных направлениях путем суммирования значений ФРТ по столбцам и строкам матрицы цифровой камеры, ФПМ — путем преобразования Фурье измеренных ФРЛ.

Анализирующий узел был проверен в составе других коллиматорных установок с объективом-образцом сравнения [18]. Узел обеспечивает случайную погрешность измерений ФПМ не более $\sigma T = \pm 0,01$ отн. ед. и систематическую погрешность измерений ФПМ не более $\Delta T = \pm 0,02$ отн. ед.

На представленном макете установки проведено измерение ФРТ ЗПФ в центре поля изображения. При регистрации изображения с разным временем накопления, в том числе при перенасыщении в области центрального максимума, через несколько колец от максимума наблюдалась картина (рис. 3), вызванная, судя по всему, переналожением побочных максимумов из-за неточности изготовления

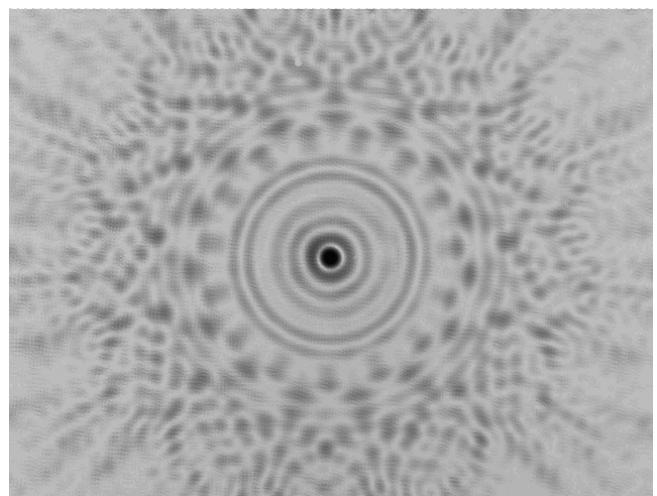


Рис. 3. Результаты контроля ФРТ ЗПФ (негатив)

Fig. 3. Point spread function of Fresnel zone plate measurement results (negative)

ЗПФ. Кадр с ФРТ регистрировался без перенасыщения в области центрального максимума. Рабочая зона, в пределах которой измеряется ФРЛ, выбрана с учетом требования стандарта [17] так, чтобы минимальное значение сигнала на выходе приемника излучения находилось в диапазоне от $0,001U_{\max}$ до $0,005U_{\max}$, где U_{\max} — максимальное значение сигнала на выходе приемника излучения.

Фокусное расстояние ЗПФ (расстояние от задней поверхности до плоскости наилучшего изображения) измерялось как разность отсчета, соответствующего положению анализирующего узла, сфокусированного на заднюю поверхность ЗПФ, и отсчета, соответствующего положительному анализирующему узла, установленного в плоскость наилучшего изображения ЗПФ по максимуму сигнала, полученных с помощью средств измерений линейных перемещений.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

По зарегистрированной ФРТ путем суммирования значений по столбцам и строкам матрицы цифровой камеры анализирующего узла получены ФРЛ в двух взаимно перпендикулярных направлениях — в меридиональном и сагиттальном сечениях (рис. 4а). Дополнительно были рассчитаны сечение дифракционной ФРТ $A(x)$ и дифракционная ФРЛ $A(x)_L$

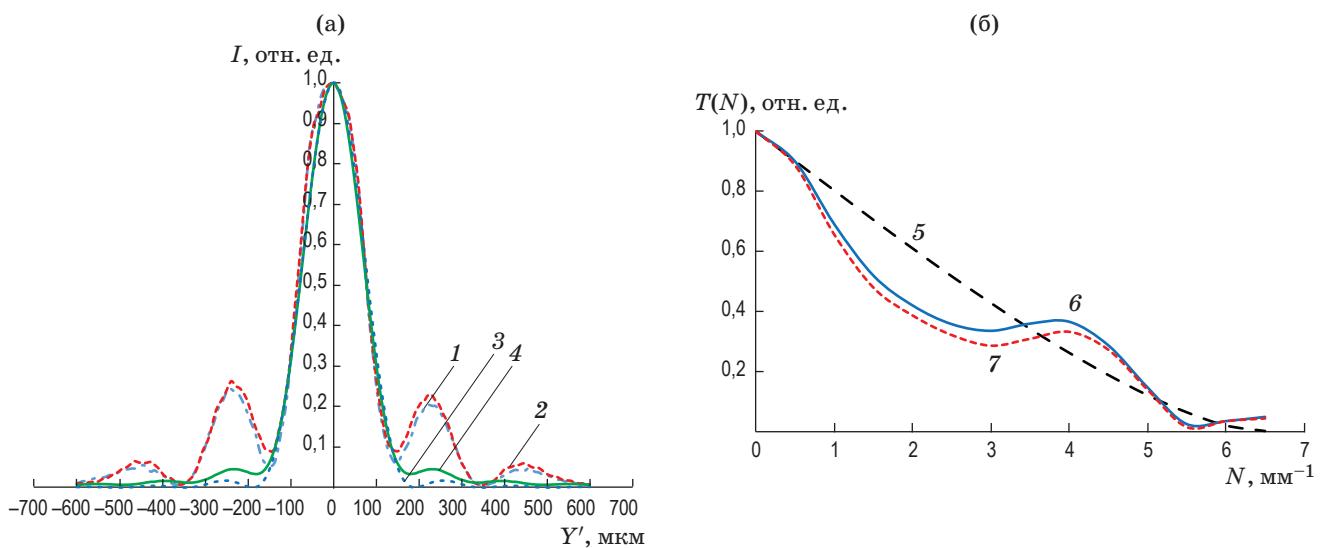


Рис. 4. Результаты контроля характеристик качества ЗПФ – ФРЛ (а), ФПМ (б). 1 — ФРЛ, измеренная в меридиональном сечении, 2 — ФРЛ, измеренная в сагиттальном сечении, 3 — сечение расчетной дифракционной ФРЛ, 4 — расчетная дифракционная ФРЛ, 5 — расчетная дифракционная ФПМ, 6 — ФПМ, измеренная в меридиональном сечении, 7 — ФПМ, измеренная в сагиттальном сечении

Fig. 4. Fresnel zone plate measurement results. (a) Line spread functions, (b) modulation transfer functions. (1) Line spread function measured in tangential section, (2) line spread function measured in sagittal section, (3) calculated section of diffraction limited point spread function, (4) calculated diffraction limited line spread function, (5) calculated diffraction limited modulation transfer function, (6) modulation transfer function measured in tangential section, (7) modulation transfer function measured in sagittal section

[19, 20], соответствующие зрачковой функции ОС с круглым входным зрачком,

$$A(x) = \left| \frac{2J_1(\pi x / \lambda K)}{(\pi x / \lambda K)} \right|^2, \quad (3)$$

$$A(x)_L = \frac{H_1(2\pi x / \lambda K)}{\left(2\pi x / \lambda K\right)^2}, \quad (4)$$

где J_1 — функция Бесселя первого рода, первого порядка, x — шаг функции рассеяния, H_1 — функция Струве первого рода, первого порядка.

Как видно из результатов контроля, побочные максимумы ФРЛ значительно выше их расчетных значений, но, тем не менее, ширина главного максимума расчетной и экспериментальной ФРЛ в диапазоне уровней от 0,1 до 1 отн. ед. совпадают с погрешностью, не превышающей размер пикселя цифровой камеры анализирующего узла, т.е. не более 0,00645 мм.

Выполнив преобразование Фурье измеренных ФРЛ, получим ФПМ, которые представлены на рис. 4б, и дополнены дифракционной ФПМ, полученной по формуле [17, 18]

$$T(N) = \left(\frac{2}{\pi} \right) \left[\arccos(\lambda \times 10^{-3} KN) - (\lambda \times 10^{-3} KN) \sqrt{1 - (\lambda \times 10^{-3} KN)^2} \right], \quad (5)$$

где N — пространственная частота, мм^{-1} .

Как видно из результатов контроля, в диапазоне пространственных частот от 0,5 до $3,5 \text{ mm}^{-1}$ значение ФПМ ниже дифракционной ФПМ, а от $3,5$ до 5 mm^{-1} — выше, что связано с увеличенными побочными максимумами ФРЛ.

Измеренное фокусное расстояние ЗПФ составило $f_{ps} = 1595 \pm 5 \text{ mm}$.

В целом полученные результаты контроля характеристик качества свидетельствуют о расхождении с расчетом, особенно по побочным максимумам ФРТ и ФРЛ, что может быть вызвано погрешностями изготовления отверстий или неточностью их расположения

по зонам ЗПФ. Кроме того, при анализе результатов может иметь место методическая погрешность, связанная с тем, что теоретические значения ФРТ, ФРЛ и ФПМ вычислялись для зрачковой функции ОС с круглым входным зрачком. В то время как зрачковая функция изготовленной ЗПФ вследствие достаточно сложной структуры может иметь отличную от круглого входного зрачка зрачковую функцию, что целесообразно рассмотреть в дальнейшем при исследовании более светосильных ЗПФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ уровня развития ЗПФ типа ФС для применения в оптико-электронных приборах. Изготовленные образцы ЗПФ в целом не удовлетворяют современным требованиям как по характеристикам качества изображающих ОС, так и по энергетической эффективности, что является критичным при создании крупногабаритных сверхлегких ОС. Однако нельзя сделать однозначный вывод, что ФС в целом не подходят для применения в этой области. Стоит рассмотреть другие варианты изготовления, которые позволяют создать экспериментальные образцы с большей точностью расположения отверстий. Кроме того, не стоит забывать и про новейшие исследования

и разработки, уже позволившие достичнуть значительно более высоких значений энергетической эффективности, что в будущем может обеспечить ФС практическое применение в области космического приборостроения.

Предложена схема установки для контроля характеристик качества (ФРТ, ФРЛ, ФПМ) ЗПФ с низкой энергетической эффективностью. На базе интерферометра в качестве источника монохроматического излучения и анализирующего узла на базе цифровой камеры был создан макет установки для контроля ЗПФ и осуществлена его апробация на изготовленных образцах ЗПФ. Стоит отметить, что разработанная схема установки не является единственным возможным вариантом схемы контроля, однако для текущей ЗПФ с низкой энергетической эффективностью она получилась работоспособной, что было подтверждено при испытаниях ЗПФ на макете установки, работающем на длине волны излучения 0,6328 мкм. В перспективе при смене типа источника излучения установка может работать в спектральном диапазоне от 0,4 до 1 мкм. В будущем при использовании более современных технологий изготовления ЗПФ и создании более светосильных ЗПФ могут быть усовершенствованы методы и схемы контроля для обеспечения достоверных результатов контроля характеристик качества ЗПФ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бобров С.Т., Грейсух Г.И., Туркевич Ю.Г. Оптика дифракционных элементов и систем. Л.: Машиностроение, ЛО, 1986. 223 с.
Bobrov S.T., Greisukh G.I., Turkevich Yu.G. Optics of diffractive elements and systems [in Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" Publ., 1986. 223 p.
2. Горбунов Г.Г., Еськов Д.Н., Паргин М.А. и др. Использование современных технологий при создании оптико-электронных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 2. С. 126–136.
Gorbunov G.G., Eskov D.N., Parpin M.A., et al. The use of modern technologies in the creation of optoelectronic systems [in Russian] // J. Instr. Eng. 2021. V. 64. № 2. P. 126–136.
3. Asmolova O., Andersen G.P., Cumming M.A. Photon sieves for creating and identifying orbital angular momentum of light // Proc. SPIE. V. 10120. Complex Light and Optical Forces XI (February 27, 2017). P. 1012009. <https://doi.org/10.1117/12.2249626>
4. Andersen G. Membrane photon sieve telescopes // Appl. Opt. 2010. V. 49. P. 6391–6394. <https://doi.org/10.1364/AO.49.006391>
5. Kim H.J., Hariharan S., Julian M., et al. Technology and opportunities of photon sieve CubeSat with deployable optical membrane // Aerospace Sci. and Technol. 2018. V. 80. P. 212–220. <https://doi.org/10.1016/J.AST.2018.07.005>
6. MacEwen H.A., Breckinridge J.B. Large diffractive/refractive apertures for space and airborne telescopes // Proc. SPIE. V. 8739. Sensors and Systems for Space Applications VI (May 21, 2013). P. 873904 <https://doi.org/10.1117/12.2015457>
7. Cunningham C.R., Evans C.J., Molster F., et al. Innovative technologies for optical and infrared astronomy // Proc. SPIE V. 8450. Modern Technologies in Space- and Ground-based Telescopes and Instrumentation II (September 13, 2012). P. 845031. <https://doi.org/10.1117/12.925573>
8. Кружалов С.В., Лавров А.П., Леонов М.Б. и др. Моделирование и экспериментальное исследование фокусирующих свойств двумерной зонной пластиинки Френеля при синтезе ее колец набором малых отверстий // VII Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике: Сб. науч. тр. М.: изд. НИЯУ МИФИ, 2018. С. 150–151.
Kruzhakov S.V., Lavrov A.P., Leonov M.B., et al. Modeling and experimental investigation of focusing properties of two-dimensional Fresnel plate in its rings synthesis by many small holes [in Russian] // Proc. VII Internat. Conf. "Photonics and Information Optics". Moscow: NRNU MEPhI Publ., 2018. P. 150–151.
9. Roose S., Stockman Y., Derauw D., et al. The challenges for large light-weight diffractive lenses

- for space telescopes // Proc. SPIE V. 10563. Internat. Conf. on Space Opt. — ICSO 2014 (November, 17 2017). P. 105635Y. <https://doi.org/10.1117/12.2304140>
10. Kipp L., Skibowski M., Johnson R., et al. Sharper images by focusing soft X-rays with photon sieves // Nature. 2001. V. 414. P. 184–188. <https://doi.org/10.1038/35102526>
11. Serre D. L'Imageur Interférométrique de Fresnel: Un instrument spatial pour l'observation à haute résolution angulaire [en français] // PhD thesis. Université Toulouse III – Paul Sabatier. France, 2007. 199 p.
12. Jian Zhang, Mengjuan Li, Ganghua Yin, et al. Fabrication of large-aperture, high efficiency, Fresnel diffractive membrane optic for space telescope // Proc. SPIE. V. 9682. 8th Internat. Symp. Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Large Mirrors and Telescopes (October, 24 2016). P. 96820O. <https://doi.org/10.1117/12.2242266>
13. Wenbo Sun, Yongxiang Hu, MacDonnell D.G., et al. Fully transparent photon sieve // Opt. Exp. 2017. V. 25. № 15. P. 17356–17363. <https://doi.org/10.1364/OE.25.017356>
14. Wenbo Sun, Yongxiang Hu, MacDonnell D.G., et al. Fully reflective photon sieve // J. Quantitative Spectrosc. and Radiative Transfer. 2018. V. 206. P. 101–104. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.11.002>
15. Julian M.N., MacDonnell D.G., Gupta M.C. High-efficiency flexible multilevel photon sieves by single-step laser-based fabrication and optical analysis // Appl. Opt. 2019. V. 58. № 1. P. 109–114. <https://doi.org/10.1364/AO.58.000109>
16. Августинович К.А. Основы фотографической метрологии. М.: Легпромбытизdat, 1990. 288 с. Avgustinovich K.A. Foundations of photographic metrology [in Russian]. Moscow: "Legprombytizdat" Publ., 1990. 288 p.
17. ГОСТ Р 58566-2019 Оптика и фотоника. Объективы для оптико-электронных систем. Методы испытаний Введ. 27.09.2019. М.: Стандартинформ, 2019. 31 с. GOST R 58566-2019 Optics and photonics. Lenses for optical-electronic systems. Test methods. [in Russian] Introduction 09/27/2019. Moscow: "Standartinform" Publ., 2019. 31 p.
18. Леонов М.Б. Особенности разработки установок для измерения характеристик качества оптических систем видимого диапазона спектра // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 5. С. 11–16. Leonov M.B. Features of the development of systems for measuring the quality characteristics of optical systems of the visible spectrum // J. Opt. Technol. 2019. V. 86. № 5. P. 268–272. <https://doi.org/10.1364/JOT.86.000268>
19. Шульман М.Я. Измерение передаточных функций оптических систем. Л.: Машиностроение, 1980. 208 с. Shulman M.Ya. Measurement of transfer functions of optical systems. [in Russian] Leningrad: "Mashinostroenie" Publ., 1980. 208 p.
20. Кирилловский В.К Современные оптические исследования и измерения: учеб. пособ. СПб.: изд. «Лань», 2010. 304 с. Kirillovskiy V.K. Modern optical studies and measurements [in Russian] St. Petersburg: "Lan" Publ., 2010. 304 p.

АВТОРЫ

Михаил Борисович Леонов — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Филиал Корпорации «Комета» — Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, 194021, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-8540-9312>, muxeu87@yandex.ru

Дмитрий Александрович Серегин — ведущий научный сотрудник, Филиал Корпорации «Комета» — Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, 194021, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-1611-2739>, seregin.dmitriy@gmail.com

Грибова Наталья Юрьевна — инженер 3 категории, Филиал Корпорации «Комета» — Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, 194021, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/000-0002-3883-6626>, nataly-g@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22.02.2023

Одобрена после рецензирования 25.05.2023

Принята к печати 24.07.2023

AUTHORS

Mikhail B. Leonov — PhD (Engineering), Senior Scientist, The Branch "Kometa Corp" — "Electro Optical Surveillance Systems", 194021, St. Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-8540-9312>, muxeu87@yandex.ru

Dmitry A. Seregin — Principal Research Engineer, The Branch "Kometa Corp." — "Electro Optical Surveillance Systems", 194021, St. Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-1611-2739>, seregin.dmitriy@gmail.com

Natalya Y. Gribova — 3rd category Engineer, The Branch "Kometa Corp." — "Electro Optical Surveillance Systems", 194021, St. Petersburg, Russia; <https://orcid.org/000-0002-3883-6626>, nataly-g@mail.ru

The article was submitted to the editorial office 22.02.2023

Approved after review 25.05.2023

Accepted for publication 24.07.2023