DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.7.586.599

Концепция композитных голограммных оптических элементов*

Э. Р. Муслимов[1,2], Н. К. Павлычева[1], И. А. Гуськов[1,3]
[1] Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия
[2] NOVA optical-infrared instr umentation group at ASTRON, Dwingeloo, The Netherlands
[3] АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

В настоящей работе предлагается концепция голографического оптического элемента нового типа. Такой оптический элемент будет представлять собой голограмму, записываемую путем стыковки нескольких элементарных полей. При этом в каждом элементарном поле изменяются следующие параметры: глубина профиля штриха или амплитуда модуляции показателя преломления; форма профиля штриха или полосы; частота штрихов / полос; кривизна штрихов / полос и параметры неравномерности их периода. У полученного композитного элемента такие характеристики, как дифракционная эффективность, спектральная и угловая селективность, поляризационные, дисперсионные и аберрационные свойства, могут контролироваться локально. Использование подобных элементов позволит создавать новые оптико-электронные приборы с улучшенными характеристиками. На примере схемы спектрографа для видимого диапазона 400–800 нм показано, что использование подобного элемента позволяет снизить аберрации до 2,14 раз и повысить среднеквадратическое значение дифракционной эффективности до 1,47 раз.

* *Примечание редактора:* Материалы статьи были представлены на XVII международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям «HOLOEXPO 2020».

Concept of Composite Holographic Optical Elements*

E. R. Muslimov[1,2], N. K. Pavlycheva[1], I. A. Guskov[1,3]
[1] Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia
[2] NOVA optical-infrared instrumentation group at ASTRON, Dwingeloo, The Netherlands
[3] JSC "Research and Production Association "State Institute of Applied Optics", Kazan, Russia

In the present paper we propose a concept of a new type of holographic optical element. Such an optical element will represent a hologram recorded by stitching of several elementary fields. In this case, the following parameters may change in each elementary field: the groove profile depth or refractive index modulation amplitude; the shape of groove or fringe profile; grooves / fringes frequency; curvature of the grooves / fringes and their period non-uniformity parameters. In the resulting composite element such characteristics as diffraction efficiency, spectral and angular selectivity, polarization, dispersion and aberration properties can be controlled locally. The use of such elements will make it possible to create new optoelectronic devices with improved performance. On an example of spectrograph design for the visible domain of 400–800 nm it is shown that the use of such an element allows to reduce aberrations by up to 2.14 times and to increase the root-mean-square value of the diffraction efficiency up to 1.47 times.

Key words: Imaging optical systems, Physical holograms, Recording technology, Stitching interferometry, High aperture, Wide field of view.

Received: 17.09.2020
Accepted: 27.10.2020

* *Editor's Note:* The materials of the article were presented at the XVII International Conference on Holography and Applied Optical Technologies «HOLOEXPO 2020».

Ключевые слова: изображающие оптические системы, физические голограммы, технология записи, интерферометрия со сшиванием полей, высокая апертура, широкое поле зрения.

Статья получена: 17.09.2020
Статья принята к публикации: 27.10.2020

1. ВВЕДЕНИЕ

В любой изображающей оптической системе наблюдается изменение основных оптических характеристик в пространстве – как по полю зрения, так и по апертуре. Это свойство справедливо для различных по физической природе характеристик: увеличения, геометрических аберраций, потерь на отражение на поверхностях, потерь излучения из-за поглощения и рассеяния в материале оптических деталей, дифракционной эффективности. Изменение указанных характеристик ограничивает создание оптических систем с высокой светосилой, широким полем зрения, в некоторых случаях сужает рабочий спектральный диапазон системы и, в целом, препятствует повышению ключевых функциональных показателей оптических систем, например разрешающей способности и чувствительности. С другой стороны, одновременное повышение перечисленных характеристик по апертуре и полю зрения неизбежно требует увеличения свободных коррекционных параметров и возможности их локального изменения для разных точек апертуры/поля зрения. Количество свободных коррекционных параметров ограничено рядом факторов:

- поскольку снижение оптических характеристик обусловлено различными физическими эффектами, одновременная коррекция нескольких характеристик требует использования различных физических принципов;
- технологии изготовления оптических деталей имеют ограничения, в частности, условия осевой или плоскостной симметрии оптических поверхностей, пределы точности контроля оптических поверхностей и деталей, пределы точности сборки и юстировки;
- даже в случае, если коррекция некоторой оптической характеристики возможна физически и технологически, поиск оптимального технического решения ограничен возможностями существующих алгоритмов расчета и оптимизации и их программной реализации. С увеличением числа свободных параметров влияние данного фактора резко возрастает.

1. INTRODUCTION

In any imaging optical system, a spatial change in the main optical characteristics occurs both across the field of view and the aperture. This property is valid for characteristics of different physical nature: magnification, geometric aberrations, reflection losses on surfaces, radiation losses due to absorption and scattering in the optical elements material, and diffraction efficiency. Change of these characteristics limits creation of optical systems with a high aperture, a wide field of view, in some cases narrows the operating spectral range of the system and, in general, prevents an increase in the key functional parameters of optical systems, for example, resolution and sensitivity. On the other hand, a simultaneous increase in the listed characteristics across the aperture and field of view inevitably requires an increase in the number of free correction parameters and a capability of their local change at different points of the aperture/field of view. In turn, the number of free correction parameters is limited by a number of factors:

- Since the decrease in optical performance is due to different physical effects, the simultaneous correction of several characteristics requires use of different physical principles.
- Optical elements manufacturing technologies have limitations, in particular, the conditions for axial or planar symmetry of optical surfaces, limits of optical surfaces and components testing accuracy, limits of assembly and alignment accuracy.
- Even if the correction of a certain optical characteristic is physically and technologically possible, the search for an optimal technical solution is limited by the capabilities of the existing design and optimization algorithms and their software implementation. With an increase in the number of free parameters, the influence of this factor increases sharply.

The need to improve the optical characteristics of imaging systems in terms of field of view and aperture contradicts the listed limiting factors. This system of contradictions can be generalized at the level of a scientific and technical problem, typical for the entire optoelectronic instrumentation.

2. UNDERLYING TECHNOLOGIES

It is possible to solve the problem formulated above for a quite extensive group of optical and optoelectronic devices, relying on the integral application of several existing and developing technologies:

1. **Holographic optical elements.** By definition, optical holography is an interferometric method for record-

Необходимость повышения оптических характеристик изображающих систем по полю зрения и апертуре вступает в противоречие с перечисленными ограничивающими факторами. Данная система противоречий может быть обобщена на уровне научно-технической проблемы, характерной для всего оптико-электронного приборостроения.

2. БАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Решить сформулированную выше проблему для достаточно обширной группы оптических и оптико-электронных приборов можно, опираясь на интегральное применение нескольких известных и развивающихся технологий:

1. **Голограммные оптические элементы.** Оптическая голография по определению является интерферометрическим методом регистрации когерентной электромагнитной волны, дифрагированной на объекте [1]. В контексте настоящего исследования это также мощный метод создания оптических компонентов с заданными свойствами. Голограммный оптический элемент (ГОЭ) может формировать изображение или волновой фронт заданной произвольной формы, выполнять функции рассеивателя или поляризатора. Среди существующих типов ГОЭ важно выделить следующие группы:

1а. **Физические голограммы.** ГОЭ может быть представлен и фактически изготовлен путем регистрации на фоточувствительном слое интерференционной картины от двух волновых фронтов. Как правило, при таком подходе схема записи голограммы сравнительно проста, а параметры записи и воспроизведения связаны непосредственно.

Примером могут служить изобразительные голограммы или голограммные дифракционные решетки, используемые в спектральных приборах [2].

1б. **Синтезированные голограммы, получаемые методом прямой записи лазерным пучком.** С другой стороны, ГОЭ, рассчитанный как интерференционная картина, на стадии производства может рассматриваться как система полос или штрихов, каждый из которых может быть сформирован отдельно. Например, он может быть записан с помощью лазерного источника в режиме, когда узкий лазерный луч формирует штрихи один за другим. Примерами данного подхода могут быть синтезированные голограммы [3] и голограммные решетки [4].

ing a coherent electromagnetic wave diffracted by an object [1]. In the context of this research, it is also a powerful method for creating optical components with desired properties. A holographic optical element (HOE) can form an image or a wavefront of a given arbitrary shape, perform the functions of a diffuser or polarizer. Among the existing types of HOEs, it is important to highlight the following groups:

1a. **Physical holograms.** HOE can be represented and actually manufactured by recording an interference pattern from two wavefronts on a photosensitive material. As a rule, with this approach, the hologram recording scheme is relatively simple, and the recording and reproduction parameters are directly related. An example is image holograms or holographic diffraction gratings used in spectral instruments [2].

1b. **Synthesized holograms obtained by direct recording with a laser beam.** On the other hand, a HOE designed as an interference pattern, at the production stage can be considered as a system of grooves or fringes, each of which can be formed separately. For example, it can be recorded using a laser source, in a mode, when a narrow laser beam forms the grooves one after another. The synthesized holograms [3] and holographic gratings [4] can serve as the examples of this approach.

In both cases, it is possible to create a HOE with a complex grooves pattern.

2. **Diffractive elements with a variable grooves depth.** Relief-phase reflective gratings with continuously varying groove depth are used in some spectral instruments [5]. This technical solution allows to adjust the diffraction efficiency over the entire area of the element, thereby maximizing the overall efficiency or allows building a scanning system.

3. **Stitching interferometry.** This technology is used, for example, when testing optical elements, when a complex optical surface must be measured with high accuracy [6, 7]. The accuracy of this method is mainly limited by the size of the elementary field and the number of stitched fields. As applied to the problem under consideration, this method is proposed to be used to form a complex interference pattern by stitching several elementary fields.

4. **New holographic materials.** A number of new holographic materials have recently been developed and successfully tested. Among other advantages, some of these new materials have a known and accurately calibrated exposure response and require fewer post-processing steps. For example, new photopolymers for volume holography are characterized by repro-

В обоих случаях возможно создание ГОЭ со сложной формой штрихов.

2. **Переменная глубина штриха дифракционного элемента.** Рельефно-фазовые отражательные решетки с непрерывно изменяющейся глубиной штриха используются в некоторых спектральных приборах [5]. Такое техническое решение позволяет регулировать дифракционную эффективность по всей площади элемента, тем самым максимизируя общую эффективность или позволяя построить систему сканирования.
3. **Интерферометрия со сшиванием полей.** Эта технология используется, например, при контроле оптических элементов, когда сложная оптическая поверхность должна измеряться с высокой точностью [6, 7]. Точность этого метода ограничена главным образом размером элементарного поля и количеством сшиваемых кадров. Применительно к рассматриваемой проблеме данный метод предлагается использовать для формирования сложной интерференционной картины путем сшивания нескольких элементарных полей.
4. **Новые голографические материалы.** Недавно был разработан и успешно испытан ряд новых материалов для голографии. Среди других преимуществ некоторые из этих новых материалов обладают известным и точно калибруемым откликом на экспозицию и требуют меньше этапов последующей обработки. Например, новые фотополимеры для объемной голографии характеризуются воспроизводимостью зависимости модуляции показателя преломления от экспозиции [8,9].

   Следовательно, с использованием такого материала можно изготовить ГОЭ с заданной амплитудой модуляции показателя преломления. Это означает, что такими свойствами, как положение, ширина и форма кривой дифракционной эффективности, можно управлять.
5. **Активная и адаптивная оптика.** Технологии активной оптики, например деформируемые зеркала или пространственные модуляторы света (SLM – spatial light modulator), используются для коррекции аберраций высоких порядков. В контексте описанной проблемы они могут быть применены для создания записывающего волнового фронта при изготовлении ГОЭ. Подобное использование было показано еще в [10], и иногда оно называется записью голограммной решетки второго поколения.

ducibility of the dependence of the refractive index modulation on the exposure [8, 9]. Consequently, using such a material, it is possible to manufacture a HOE with a desired refractive index modulation amplitude. This means that such properties as position, width and shape of the diffraction efficiency curve can be controlled.

5. **Active and adaptive optics.** Active optics technologies such as deformable mirrors or spatial light modulators (SLMs) are used to correct high-order aberrations. In the context of the described problem, they can be used to create a recording wavefront when manufacturing the HOE. A similar use was shown in [10] and is sometimes referred to as recording a second-generation holographic grating.

3. THE CONCEPT OF COMPOSITE HOLOGRAPHIC ELEMENTS

In the frame of this study, we consider the possibility of development and integral application of the listed technical solutions and technologies for the creation of a new type of holographic optical elements and optical systems based on them. Such an element will combine the advantages of the above technologies and will significantly increase the number of correction parameters, and, as a result, improve the main optical characteristics of imaging systems.

The proposed holographic optical elements will represent holograms recorded by stitching several elementary fields. The hologram can be volume-phase or relief-phase. In this case, the following parameters may change in each of the elementary field:

- the depth of grove profile or the refractive index modulation amplitude;
- the shape of groove/fringe profile;
- frequency of grooves/fringes;
- curvature of grooves/fringes and the parameters of their period non-uniformity.

Therefore, such parameters of the element as diffraction efficiency, spectral selectivity, angular selectivity, polarization, dispersion, and aberration properties can be controlled locally. Hereinafter, we propose to call such an optical element a composite holographic optical element – CHOE. A variant of the CHOE recording scheme is shown in Fig. 1. Laser radiation *1* passes through pinholes *2* and is collimated by objective lenses *3*. In one of the arms of the interferometer there is a device for controlling the wavefront – a deformable mirror or a spatial light modulator *4*. Also, auxiliary optical elements *5* can be used. Beams formed by them interfere forming a pattern of grooves in an elementary field *6*, which is recorded on a substrate with a photosensitive material *7*. Using the scanning mechanism *8*, the inter-

3. КОНЦЕПЦИЯ КОМПОЗИТНЫХ ГОЛОГРАММНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В рамках данного исследования рассматривается возможность развития и комплексного применения перечисленных технических решений и технологий для создания нового типа голограммных оптических элементов и оптических систем на их основе. Подобный элемент объединит преимущества указанных выше технологий и позволит значительно увеличить число коррекционных параметров и, как следствие, повысить основные оптические характеристики изображающих систем.

Предлагаемые голографические оптические элементы будут представлять собой голограммы, записываемые путем стыковки нескольких элементарных полей. Голограмма может быть объемно-фазовой или рельефно-фазовой. При этом в каждом элементарном поле изменяются следующие параметры:

- глубина профиля штриха или амплитуда модуляции показателя преломления;
- форма профиля штриха или полосы;
- частота штрихов/полос;
- кривизна штрихов/полос и параметры неравномерности их периода.

Следовательно, такие параметры элемента, как дифракционная эффективность, спектральная селективность, угловая селективность, поляризационные, дисперсионные и аберрационные свойства, могут контролироваться локально. Здесь и далее предлагаем называть такой оптический элемент композитным голограммным оптическим элементом – КГОЭ.

Вариант принципиальной схемы записи КГОЭ представлен на рис. 1. Излучение лазера *1* проходит через точечные диафрагмы *2* и коллимируется объективами *3*. В одном из плечей интерференционной установки располагается устройство для управления волновым фронтом – деформируемое зеркало или пространственный модулятор света *4*. Также могут использоваться вспомогательные оптические элементы *5*. Пучки, сформированные с их помощью, интерферируют, образуя картину штрихов в элементарном поле *6*, которая регистрируется на подложке с фоточувствительным слоем *7*. С помощью механизма развертки *8* интерференционная картина последовательно приводится на различные участки подложки. При этом за счет изменения профиля модулятора света изменяется картина штрихов и аберрационные свойства решетки в каждом из элементарных полей. С помощью поворотного механизма *9*

ference pattern is sequentially brought to different parts of the substrate. In this case, due to a change in the profile of the light modulator, the pattern of grooves and the aberration properties of the grating in each of the elementary fields change. With the help of the rotation mechanism *9*, the angles of inclination in the recording scheme and, consequently, the frequency of the fringes and their inclination can be changed. Change the exposure time and/or radiation power during recording of each elementary field will make it possible to change the parameters of the formed holographic structure and its diffraction efficiency. Next, we consider the use of a CHOE recorded in a similar scheme for constructing a flat-field spectrograph scheme. Note that the design and modeling of an optical system with such an element requires an integral use of several methods. In Figure 2

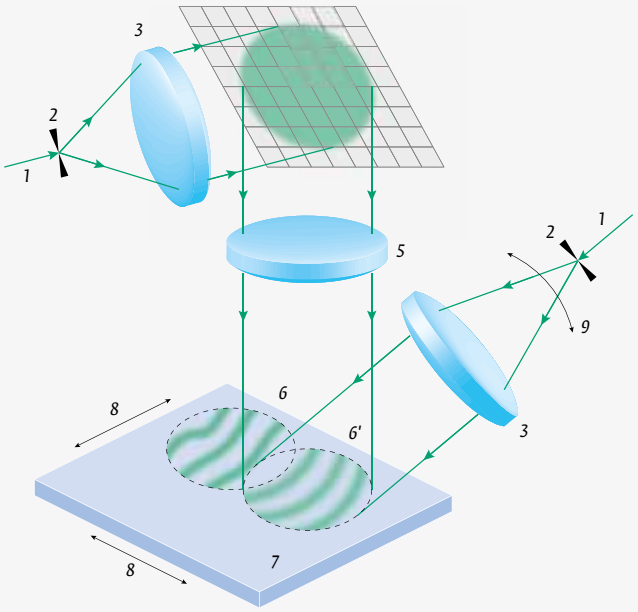

Рис. 1. *Принципиальная схема записи композитного голограммного элемента: 1 – пучок лазера; 2 – точечная диафрагма; 3 – коллиматор; 4 – деформируемое зеркало / пространственный модулятор света; 5 –вспомогательная проекционная ОС; 6, 6' – элементарные поля записываемой голограммы; 7 – подложка; 8 – система механической развертки; 9 – поворотный механизм*

Fig. 1. *A composite holographic element recording scheme: 1 – laser beam; 2 – pinhole; 3 – collimator; 4 – deformable mirror / spatial light modulator; 5 – auxiliary projection optics; 6, 6 ' – elementary fields of the recorded hologram; 7 – substrate; 8 – mechanical scanning system; 9 – rotation mechanism.*

могут изменяться углы наклона в схеме записи и, следовательно, частота штрихов и их наклон. Изменение времени экспозиции и/или мощности излучения при записи каждого элементарного поля позволит изменить параметры формируемой голографической структуры и ее дифракционную эффективность.

Далее мы рассматриваем использование КГОЭ, записанного в подобной схеме, для построения схемы спектрографа с плоским полем. Отметим, что расчет и моделирование схемы с подобным элементом требует комплексного использования нескольких методов. На рис. 2. упрощенно показан алгоритм расчета. Для других типов оптических схем он может незначительно отличаться. В качестве исходной конфигурации используется схема спектрографа с плоским полем на основе вогнутой пропускающей голограммной решетки, подобная описанной в [11]. В данном случае дифракционная решетка записывается двумя точечными когерентными источниками. Параметры схемы работы и схемы записи могут быть определены аналитически из условия коррекции дефокусировки по спектру, комы и астигматизма 1-го порядка на средней длине волны. Трассировка лучей с помощью численных методов позволяет уточнить параметры схем, например ввести угол разворота поверхности изображения. Полагая, что пропускающая решетка является объемно-фазовой, можно использовать аналитические соотношения теории связанных волн Когельника [12] для определения толщины и глубины модуляции голографической структуры, обеспечивающей максимальную дифракционную эффективность в вершине решетки. После определения подобной исходной конфигурации голограммный элемент разбивается на зоны, количество и форма которых определяется технологическими и расчетными возможностями. Полагается, что для каждой зоны такие переменные, как толщина и глубина модуляции голографической структуры, координаты источников

a simplified design algorithm is shown. For other types of optical schemes, it may differ slightly. The initial configuration is a flat-field spectrograph based on a concave transmission holographic grating, similar to that described in [11]. In this case, the diffraction grating is recorded by two point coherent sources. The parameters of the operating scheme and the recording scheme can be determined analytically from the condition for correcting defocusing along the spectrum, the 1st order coma and astigmatism at the central wavelength. Ray-tracing using numerical methods allows to refine the scheme parameters, for example, introduce the image surface tilt angle. Assuming that the transmission grating is a volume-phase one, we can use the analytical equations of the Kogelnik's coupled waves theory [12] to determine the thickness and modulation depth of the holographic structure that provides the maximum diffraction efficiency at the grating vertex. After determining such an initial configuration, the holographic element is divided into zones, the number and shape of which is defined by technological and computation capabilities. It is assumed that for each zone, such variables as the thickness and modulation depth of the

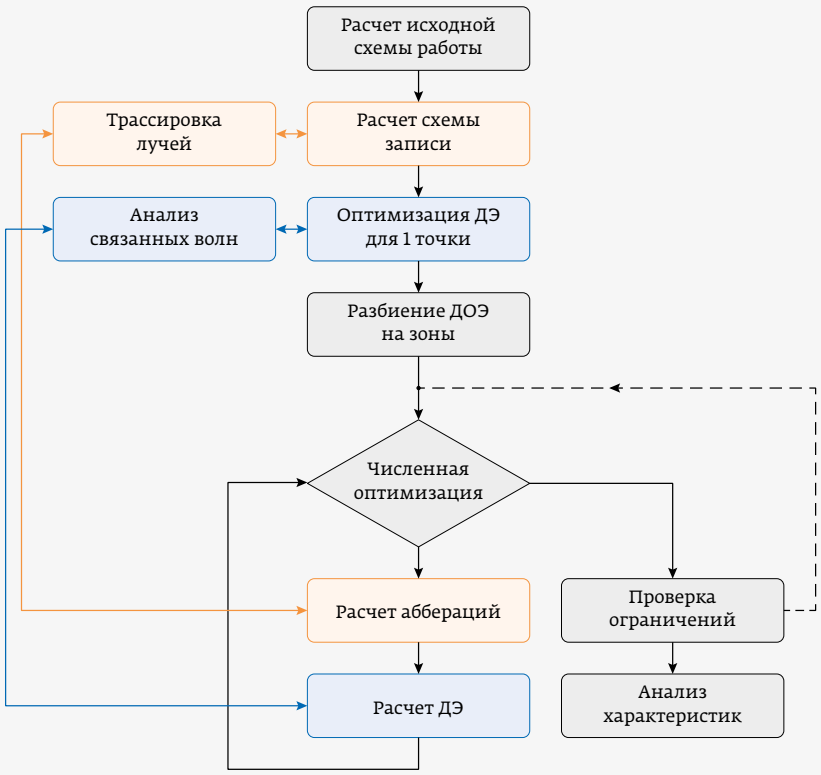

Рис. 2. *Упрощенный алгоритм расчета оптической схемы с КГОЭ*
Fig. 2. *Simplified algorithm for design of an optical scheme with CHOE*

записи и параметры формы как минимум одного записывающего волнового фронта, являются независимыми коррекционными параметрами. С помощью численных методов оптимизируется оценочная функция. Она включает в себя: взвешенную сумму аберраций на контрольных длинах волн для нескольких точек по высоте входной щели спектрографа; среднеквадратическое значение дифракционной эффективности по заштрихованной области на контрольных длинах волн; граничные условия, задающие предельные значения расстояний и углов в схемах работы и записи; предельные значения толщины и глубины модуляции голограммы, а также сохранение обратной линейной дисперсии.

Вычисления всех перечисленных значений повторяются для каждой зоны КГОЭ и суммируются в общей оценочной функции. При этом в каждом цикле оптимизации совместно вычисляются значения аберраций и дифракционной эффективности с использованием указанных ранее методов. На выходе цикла численной оптимизации дополнительно контролируется физическая реализуемость найденного решения, в том числе форма записывающих волновых фронтов и перемещения элементов схем записи при переходе от одной зоны к другой. В случае, если найденные значения реализуемы, проводится анализ достигнутых характеристик, иначе, повторяется численная оптимизация после коррекции ограничений и весовых коэффициентов.

В следующем разделе демонстрируется применение данного алгоритма для расчета схемы спектрографа для видимой области спектра и приводятся оценки преимуществ с точки зрения коррекции аберраций и максимизации дифракционной эффективности, достигаемые в схеме с КГОЭ в сравнении с исходной конфигурацией.

4. ПРИМЕР ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СПЕКТРОГРАФА

Рассмотрим оптическую схему спектрографа для видимого спектрального диапазона 400–800 нм, работающую с эквивалентным относительным отверстием 1:3,2. Она состоит из единственного оптического элемента – вогнутой пропускающей решетки, устанавливаемой в сходящемся пучке в нормальном падении. Расстояние от поверхности решетки до фокуса пучка (мнимой входной щели) составляет 200 мм. Рассматривается случай работы с входной щелью высотой 10 мм. Решетка наносится на вогнутой поверхности концентрического мениска с радиусом 200 мм.

holographic structure, the coordinates of the recording sources and the shape parameters of at least one recording wavefront are independent correction parameters. Using numerical methods, a merit function is optimized, which includes:

- a weighted sum of aberrations at the reference wavelengths for several points along the the spectrograph entrance slit,
- a root-mean-square value of the diffraction efficiency over the grating area at the reference wavelengths,
- boundary conditions that set the limiting values of distances and angles in the schemes of operation and recording, limiting values of the hologram thickness and modulation depth, as well as maintenance of the reciprocal linear dispersion.

Calculations of all the listed values are repeated for each CHOE zone and are summed up in a general merit function. In this case, in each optimization cycle, the values of aberrations and diffraction efficiency are calculated simultaneously using the methods mentioned above. At the output of the numerical optimization cycle, the physical feasibility of the found solution is additionally checked, including the shape of recording wavefronts and the movement of recording scheme elements when passing from one zone to another. If the found values are realizable, the achieved characteristics are analyzed, otherwise the numerical optimization is repeated after correcting the constraints and weight coefficients.

The next section demonstrates application of this algorithm for design of spectrograph scheme working in the visible spectral region and provides estimations of the advantages in terms of aberration correction and maximization of diffraction efficiency achieved in the scheme with CHOE in comparison with the initial configuration.

4. AN EXAMPLE OF SPECTROGRAPH OPTICAL SCHEME

Let us consider an optical scheme of spectrograph for the visible spectral range of 400–800 nm, operating with an equivalent F/# of 3.2. It consists of a single optical element – a concave transmission grating set up in a converging beam at normal incidence. The distance from the grating surface to the beam focus (imaginary entrance slit) is 200 mm. The case of operation with a 10 mm high entrance slit is considered. The grating is imposed on the concave surface of a concentric meniscus with the radius of 200 mm. The meniscus central thickness is 5 mm and it is made of K8 (Schott BK7 equivalent) glass. As the initial configuration, we use a scheme with a grating recorded by

Мениск имеет толщину по оси 5 мм и выполнен из стекла К8. В качестве исходной конфигурации используем схему с решеткой, записываемой двумя точечными источниками на длине волны 441,6 нм. При этом центр изображения спектра имеет координаты (207,93 мм; 13,89°), а его длина 34,1 мм.

Для расчета схемы используется алгоритм, представленный на рис. 2. Параметры схемы записи и голографической структуры, найденные для исходной конфигурации, указаны в сводной табл. 1.

При модификации данной схемы будем рассматривать композитную голограммную решетку, состоящую из трех элементарных полей размером 21,4×64 мм, смещенных относительно друг друга в меридиональной плоскости. Вид схемы спектрографа с КГОЭ представлен на рис. 3.

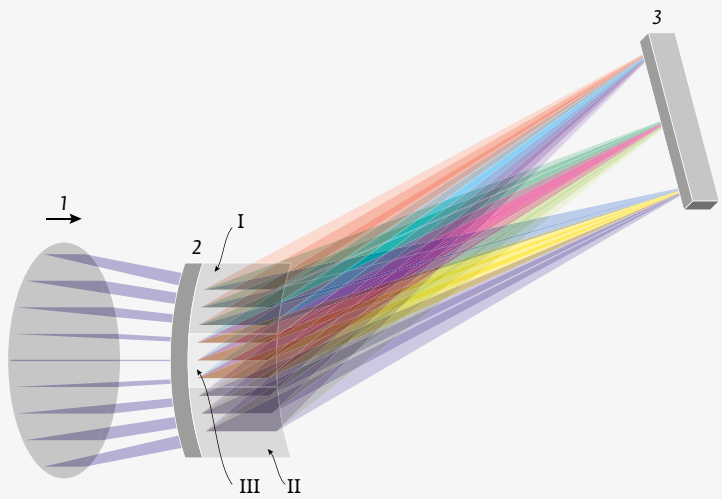

Рис. 3. *Оптическая схема спектрографа с КГОЭ: 1 – падающее излучение; 2 – КГОЭ (I, II и III – элементарные поля); 3 – плоскость регистрации спектра*

Fig. 3. *Optical scheme of the spectrograph with CHOE1 – incident beam; 2 – CHOE (I, II and III – elementary fields); 3 – spectral image plane*

Рассмотрим основные оптические характеристики исходной конфигурации схемы. На рис. 4 даны точечные диаграммы схемы спектрографа на трех контрольных длинах волн для центра и края входной щели. Очевидно, что исходный аналитический метод расчета обеспечивает хорошую коррекцию аберраций первого порядка лучей средней длины волны диапазона для центра щели. К краям спектра значительно возрастает астигматизм, хотя дефокусировка в меридиональной плоскости по-прежнему скорректирована. Также можно отметить снижение качества изображения по высоте входной щели.

Для удобства численной оценки и сравнения данные об аберрациях представлены в виде таблицы (табл. 2.)

two point sources at 441.6 nm. In this case, the center of the spectrum image has coordinates (207.93 mm; 13.89°), and its length is 34.1 mm.

The scheme is designed using the algorithm shown in Fig. 2. The parameters of the recording scheme and holographic structure found for the initial configuration are shown in the summary Table 1. When modifying this scheme, we will consider a composite holographic grating consisting of three elementary fields 21.4×64 mm in size, offset with respect to each other in the tangential plane. The schematic view of the spectrograph with CHOE is shown in Fig. 3. Let us consider the main optical characteristics of the scheme initial configuration. Figure 4 shows spot diagrams of the spectrograph at the three reference wavelengths for the center and the edge of entrance slit. It is obvious that the original analytical design method provides good first-order aberration correc-

Таблица 1. Основные параметры структуры КГОЭ

Table 1. The main parameters of CHOE structure

Параметр	Исходная схема	КГОЭ зона I	КГОЭ зона II	КГОЭ зона III
Координаты источника 1 (y_1; z_1), мм	45,56; 205,14	34,97;213,82	33,99;208,83	35,58;213,99
Координаты источника 2 (y_2; z_2), мм	8,63; 203,87	6,61;208,73	6,25;203,95	7,15;208,73
Толщина слоя t, мкм	4,3	2,588	2,588	2,588
Глубина модуляции Δn	0,063	0,1004	0,1004	0,1004

Дифракционная эффективность решетки в исходной схеме была рассчитана с использованием соотношений теории Когельника. Отметим, что реализация данных вычислений в программе расчета оптических систем требует создания пользовательских библиотек и подпрограмм-макросов. Распределение дифракционной эффективности по поверхности решетки показано на рис. 5. Аналогично, используются три контрольные длины волны – центр и края рабочего диапазона. Диаграммы демонстрируют, что для средней длины волны в вершине решетки достигается эффективность, близкая к 100%, что обеспечивается оптимизацией исходной схемы. Однако эффективность изменяется по поверхности решетки и по рабочему спектральному диапазону. В результате среднеквадратическая эффективность на коротковолновом краю диапазона снижается до 51,9%. При этом для некоторых точек на поверхности эффективность близка к нулю.

Для записи каждого из элементарных полей КГОЭ используется схема, показанная на рис. 6а. Интерференционная картина формируется двумя волновыми фронтами. В одном плече интерферометра используется точечный источник, в другом – точечный источник и деформируемое зеркало. При этом полагается, что в обеих ветвях интерферометра, используемого для записи, предусмотрено изменение угла падения и расстояния до источника. Зеркало имеет диаметр 36,4 мм, форма его поверхности описывается стандартными полиномами Цернике Z_4–Z_{15}. На рис. 6б рассчитанная форма вспомогательного зеркала показана

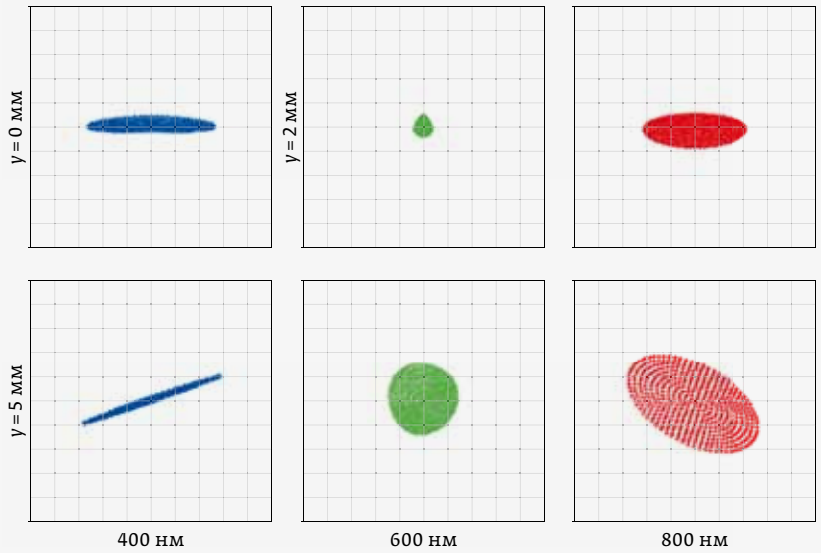

Рис. 4. *Точечные диаграммы для исходной схемы спектрографа*
Fig. 4. *Spot diagrams for the initial spectrograph scheme*

Таблица 2. Аберрации исходной оптической системы
Table 2. Aberrations of the initial optical system

m, мм	*M*, мм	λ=400 нм, *y'*=–17,36 мм		λ=600 нм, *y'*=0 мм		λ=800 нм, *y'*=16,74 мм	
		Δ*y'*, мкм	Δ*x'*, мкм	Δ*y'*, мкм	Δ*x'*, мкм	Δ*y'*, мкм	Δ*x'*, мкм
y=0 мм							
–31	0	98,2	0	–52,6	0	119,7	0
–19	0	48,9	0	–37,7	0	77,0	0
–6	0	13,1	0	–14,5	0	27,2	0
6	0	–10,1	0	16,4	0	–28,5	0
19	0	–21,8	0	54,8	0	–88,9	0
31	0	–23,5	0	99,8	0	–152,0	0
0	6	0,5	–103,3	0,4	–11,8	0,1	83,0
0	19	4,8	–309,9	3,9	–35,3	0,7	248,9
0	31	13,3	–516,3	10,8	–58,6	1,9	414,9
y=5 мм							
–31	0	97,8	175,1	–52,6	260,6	120,4	348,9
–19	0	48,7	106,8	–37,6	158,8	77,6	212,3
–6	0	13,0	36,4	–14,5	53,6	27,5	71,5
6	0	–10,0	–36,4	16,4	–54,0	–28,9	–72,0
19	0	–21,7	–110,0	54,4	–162,9	–89,9	–216,9
31	0	–23,6	–184,1	98,9	–272,1	–154,1	–361,5
0	6	–36,7	–106,5	–55,3	–15,0	–75,5	79,6
0	19	–106,6	–320,7	–162,8	–46,8	–225,3	236,1
0	31	–171,2	–526,1	–265,2	–80,9	–372,3	389,2

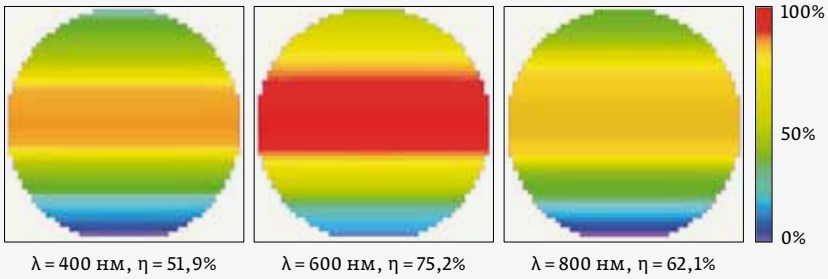

Рис. 5. *Диаграммы распределения дифракционной эффективности для исходной схемы спектрографа*

Figure: 5. Diagrams of the diffraction efficiency distribution for the initial spectrograph scheme

как отклонение поверхности от плоскости в мкм. Среднеквадратическое отклонение составляет 153,5 мкм, максимальное – 355,8 мкм.

Полученные в результате оптимизации значения координат источников записи и параметров голографической структуры для каждой из зон представлены в табл. 1. Можно отметить, что смещения источников при переходе от зоны к зоне сравнительно невелики и технологически реализуемы. При этом параметры голографической структуры, равно как и форма вспомогательного зеркала, остаются низменными для всех зон.

Для демонстрации преимуществ, достигаемых в схеме с КГОЭ с точки зрения коррекции аберраций, рассмотрим точечные диаграммы спектрографа (рис. 7). Очевидно, что использование

tion for the average wavelength and for the center of the slit. The astimatism increases significantly towards the edges of the spectrum, although defocusing in the tangential plane remains corrected. We can also note a decrease in the image quality along the height of the entrance slit.

For convenience of numerical assessment and comparison, data on aberrations are presented as a table (Table 2.)

The grating diffraction efficiency in the initial scheme was computed using the Kogelnik theory equations. Note that the implementation of these calculations in an optical system design software requires creation of user defined libraries and macros. The distribution of the diffraction efficiency over the grating surface is shown in Fig. 5. Similarly, three reference wavelengths are used – the center and the edges of the working range. The diagrams show that for the average wavelength at the grating vertex the efficiency close to 100% is achieved, which is ensured by optimization of the initial scheme. However, the efficiency varies over the grating surface and over the working spectral range. As a result, root-mean-square (RMS) efficiency at the shortwave end of the range is reduced to 51.9%. Moreover, for some points on the surface, the efficiency is close to zero.

To record each of the CHOE elementary fields, the scheme shown in Fig.6a is used. The interference pattern is formed by two wavefronts. One arm of the interferometer uses a point source, the other uses a point source and a deformable mirror. It is assumed that in both arms of the recording interferometer the angle of incidence and distance to the source can be changed. The mirror has diameter of 36.4 mm, the shape of its surface is described by the standard Zernike polynomials Z4–Z15. In Fig.6b, the calculated shape of the auxiliary mirror is shown as the deviation of surface from a plane in μm. The standard deviation is 153.5 microns, the maximum is 355.8 microns.

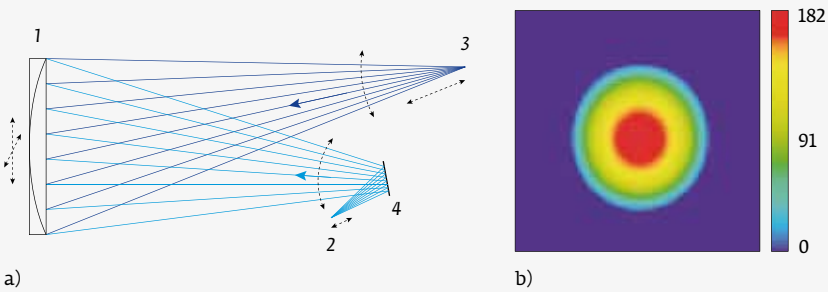

Рис. 6. *Схема голографической записи КГОЭ: a) – принципиальная схема записи: 1 – подложка КГОЭ, 2 и 3 – точечные источники записи, 4 – вспомогательное зеркало свободной формы; b) – диаграмма асферичности вспомогательного зеркала (в мкм)*

Fig. 6. *CHOE holographic recording scheme: a) – schematic diagram of recording: 1 – CHOE substrate, 2, 3 – recording point sources, 4 – auxiliary free-form mirror; b) – diagram of the auxiliary mirror asphericity (in microns).*

КГОЭ позволило значительно уменьшить аберрации системы. В первую очередь, следует отметить снижение аберраций для центра спектрального диапазона, которое можно соотнести с коррекцией аберраций высших порядков за счет использования вспомогательного зеркала. Также достигнуты лучшая коррекция по спектральному диапазону и высоте щели, в том числе за счет независимой оптимизации параметров записи для различных зон КГОЭ.

Аналогично, для численной оценки достигаемых преимуществ в табл. 3. даны аберрации системы. Сравнение данных в табл. 2 и табл. 3 показывает, что использование КГОЭ позволяет достичь уменьшения аберраций в меридиональной плоскости в 1,64–1,92 раз, в сагиттальной плоскости – в 1,74–2,14 раз.

Рассмотрим дифракционную эффективность КГОЭ в данной схеме работы. Диаграммы распределения эффективности по поверхности решетки показаны на рис. 8.

Как видно из рисунка, дифракционная эффективность повышена до 1,47 раз. При этом минимальная эффективность по поверхности решетки возросла до 49%. Достигнутый эффект объясняется особенностями алгоритма расчета, позволяющего одновременно учитывать влияние углов падения в схеме записи на аберрационные характеристики и дифракционную эффективность, а также возможностью изменять угол наклона полос решетки для разных зон КГОЭ в соответствии с углами падения в схеме работы.

В целом рассмотренные оптические схемы наглядно демонстрируют преимущества в основных оптиче-

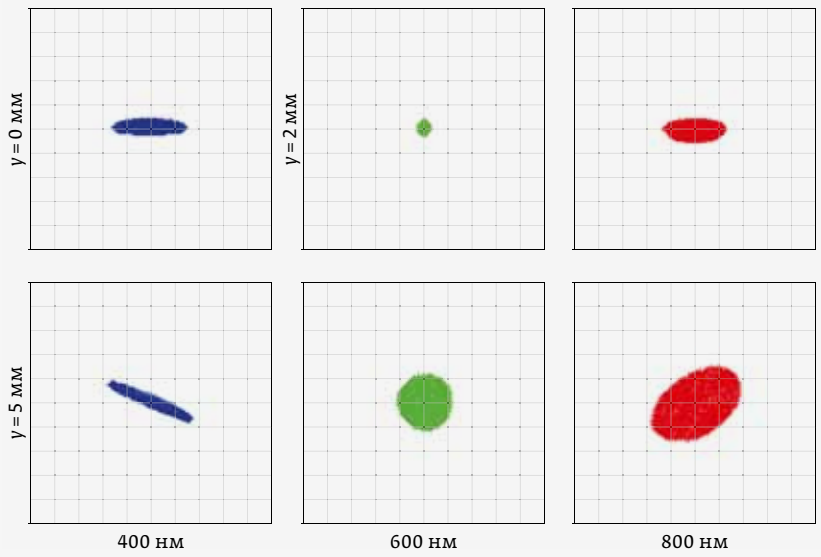

Рис. 7. *Точечные диаграммы для спектрографа с КГОЭ*
Fig. 7. *Spot diagrams for the spectrograph with CHOE*

Таблица 3. Аберрации оптической системы с КГОЭ
Table 3. Aberrations of the optical system with CHOE

Зона	*m*, мм	*M*, мм	λ=400 нм, *y'*=–17,36 мм		λ=600 нм, *y'*=0 мм		λ=800 нм, *y'*=16,74 мм	
			Δ*y'*, мкм	Δ*x'*, мкм	Δ*y'*, мкм	Δ*x'*, мкм	Δ*y'*, мкм	Δ*x'*, мкм
y=0 мм								
I	–31	0	63,1	0	–28,8	0	57,5	0
I	–19	0	26,9	0	–27,3	0	29,2	0
II	–6	0	8,2	0	–7,8	0	14,6	0
II	6	0	–6,0	0	9,1	0	–15,3	0
III	19	0	–17,7	0	22,5	0	–57,9	0
III	31	0	–13,3	0	53,8	0	–83,9	0
II	0	6	0,4	–56,1	0,3	–5,4	0	47,1
II	0	19	3,4	–168,2	2,5	–16,3	–0,1	141,3
II	0	31	9,3	–280,1	6,9	–26,9	–0,4	235,7
y=5 мм								
I	–31	0	62,8	129,5	–28,9	192,2	57,7	257,2
I	–19	0	26,7	79,0	–27,3	117,3	29,4	156,8
II	–6	0	8,2	26,9	–7,7	39,8	14,7	53,3
II	6	0	–5,9	–27,2	9,0	–40,3	–15,4	–53,8
III	19	0	–17,7	–81,8	22,3	–121,2	–58,6	–161,7
III	31	0	–13,4	–136,9	53,3	–202,6	–85,2	–270,0
II	0	6	–27,3	–59,4	–41,5	–8,8	–56,7	43,7
II	0	19	–79,6	–179,0	–122,4	–27,7	–169,7	128,9
II	0	31	–128,0	–299,7	–200,0	–48,6	–281,1	211,3

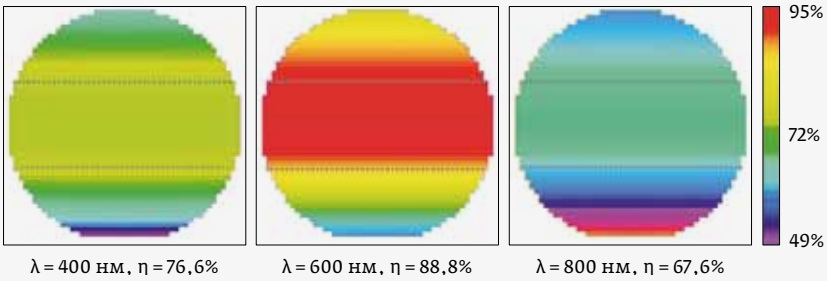

Рис. 8. *Диаграммы распределения дифракционной эффективности для спектрографа с КГОЭ*

Fig. 8. *Diagrams of the iffraction efficiency distribution for a spectrograph with CHOE*

ских характеристиках, достигаемые за счет использования КГОЭ.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей работе изложена концепция нового типа оптических элементов – композитных голограммных оптических элементов. Она опирается на ряд существующих и перспективных технологий, а предложенный элемент – КГОЭ – займет промежуточное положение между несколькими известными типами голограммых элементов, объединив их преимущества. Возможность точного контроля и изменения характеристик голограммы для множества элементарных полей позволяет учесть изменение условий записи и работы голограммы при больших значениях апертуры, поля зрения в широком спектральном диапазоне и создать оптические системы с улучшенными функциональными характеристиками. Расчет и моделирование схемы спектрографа с плоским полем для видимого диапазона на основе КГОЭ показали, что за счет использования подобного элемента удается достичь снижения аберраций в меридиональной плоскости в 1,64–1,92 раз, в сагиттальной плоскости – в 1,74–2,14 раз одновременно с повышением дифракционной эффективности до 1,47 раза.

Использование КГОЭ может представлять особый интерес при создании оптических систем следующих групп:

1. Спектральные приборы:
   - спектрометры высокого разрешения,
   - для научных исследований,
   - компактные спектрометры лабораторного и промышленного применения,
   - компактные спектрометры авиационного и космического базирования.

The values of the recording sources coordinates and the holographic structure parameters obtained as by optimization for each of the zones are presented in Table 1. It can be noted that the displacements of sources during the transition from one zone to another are relatively small and technologically feasible. In this case, the parameters of the holographic structure, as well as the shape of the auxiliary mirror, remain the same for all zones.

To demonstrate the advantages achieved in a scheme with a CHOE in terms of aberration correction, we consider the spectrograph spot diagrams (Fig. 7). It is seen that the use of CHOE made it possible to significantly reduce the spectrograph aberrations. First of all, a decrease in aberrations for the spectral range center should be noted, which can be related to the correction of higher-order aberrations due to the use of auxiliary mirror. Also, a better correction along the spectral range and slit height was achieved, including that due to the independent optimization of recording parameters for different CHOE zones.

Similarly, for a numerical assessment of the achieved benefits the aberrations of the system are given in Table 3. Comparison of the data in Table 2 and Table 3 shows that the use of CHOE makes it possible to achieve a decrease of aberrations in the tangential plane by 1.64–1.92 times, and those in the sagittal plane – by 1.74–2.14 times.

Further we consider the CHOE diffraction efficiency in this operaton scheme. The efficiency distribution diagrams over the grating surface are shown in Fig. 8. As can be seen from the figure, the diffraction efficiency is increased up to 1.47 times. In this case, the minimum efficiency over the grating surface is increased to 49%. The achieved effect is explained by the peculiarities of the design and modelling algorithm, which makes it possible to simultaneously take into account the influence of the angles of incidence in the recording scheme on the aberration characteristics and the diffraction efficiency, as well as by the possibility of changing the angle of inclination of the grating fringes for different zones of the CHOE in accordance with the angles of incidence in the operating scheme.

In general, the considered optical schemes clearly demonstrate the advantages in the main optical characteristics achieved through the use of CHOE.

2. Голограммные дисплеи:
   - наголовные,
   - шлемные,
   - автомобильные.
3. Измерительные системы:
   - голографические датчики волнового фронта,
   - эталонные оптические компоненты.
4. Системы формирования лазерного излучения:
   - сканирующие системы,
   - компрессоры лазерного излучения.

Дальнейшие исследования и разработки в рамках предложенной концепции могут включать совершенствование методов расчета и моделирование КГОЭ, в т.ч. за счет использования численных методов анализа связанных волн, создание методик расчета различных типов оптических систем на базе КГОЭ, разработку алгоритмов пересчета расчетных параметров КГОЭ в технологические с учетом конечной точности сшивания элементарных полей и разработку технологии изготовления КГОЭ с использованием пространственных модуляторов счета, деформируемых зеркал и современных фотополимерных голографических материалов.

REFERENCES

1. **Toal V.** *Introduction to holography* / 1st edition – NY: CRC Press. 2011. 502 p. ISBN 978-0367382322.
2. **Palmer C., Loewen E.** Diffraction Gratings and Applications (Optical Science and Engineering) / 1st edition – NY: CRC Press. 1997. 630 p. ISBN: 978–0824799236.
3. **Poleshchuk A. G., Nasyrov R. K., Asfour J.-M.** Combined computer-generated hologram for testing steep aspheric surfaces. *Opt. Express*. 2009. 17: 5420–5425. DOI: 10.1364/OE.17.005420.
4. **MacLachlan D. G., Thomson R. R., Cunningham C. R., Lee D.** Mid-Infrared Volume Phase Gratings Manufactured using Ultrafast Laser Inscription. *Opt. Mater. Express*. 2013. 3:1616–1624. DOI: 10.1364/OME.3.001616.
5. **Lagarde B., Sirotti F., Taleb-Ibrahimi A., Miron C., Polack F.** On the contribution of gratings with laterallygraded groove depths to the design and performances of SOLEIL soft X-raymonochromators. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2013. 425: 152022. DOI: 10.1088/1742-6596/425/15/152022.
6. **Murphy P., Forbes G., Fleig J., Dumas P., Tricard M.** Stitching Interferometry: A Flexible Solution for Surface Metrology. *Optics & Photonics News*. 2003. 14(5): 38–43. DOI: 10.1364/OPN.14.5.000038.
7. **Huang L., Wang T., Nicolas J. et al.** Two-dimensional stitching interferometry for self-calibration of high-order additive systematic errors. Opt. Express. 2019. 27: 26940–26956. DOI: 10.1364/OE.27.026940.
8. **Bruder F.-K., Bang H., Fäckeet T. et al.** Precision holographic optical elements in Bayfol HX photopolymer. *Proc. SPIE*. 2016. 9771, Practical Holography XXX: Materials and Applications: 977103. DOI: 10.1117/12.2209636.
9. **Zanutta A., Landoni M., Riva M., Bianco A.** Spectral multiplexing using stacked volume-phase holographic gratings – I. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2017. 469(2): 2412–2422. DOI: 10.1093/mnras/stx1030.
10. **Lemaître G.R. and Duban M.** Universal method for holographic grating recording: multimode deformable mirrors generating Clebsch–Zernike polynomials. *Appl. Opt*. 1998. 37: 3438–3439. DOI: 10.1364/AO.40.000461.
11. **Muslimov E. R., Pavlycheva N. K.** Optical schemes of spectrographs with a diffractive optical element in a converging beam. *Journal of the European Optical Society – Rapid publications*. 2015. 10:15011. DOI: 10.2971/jeos.2015.15011.
12. **Kogelnik H.** Coupled wave analysis for thick hologram gratings. *Bell Syst. Tech. J*. 1969. 48:2909–2947. DOI: 10.1002/j.1538–7305.1969.tb01198.x.

5. CONCLUSION

Thus, in this paper, we outline the fundamentals of the concept of a new type of optical elements – composite holographic optical elements. It relies on a number of existing and prospective technologies, and the proposed element – CHOE will take an intermediate position between several known types of holographic elements, combining their advantages. The ability to accurately control and change the characteristics of the hologram for a number of elementary fields allows one to take into account changes in the recording and operating conditions of a hologram at large values of the aperture, field of view in a wide spectral range, and to create optical systems with improved functional characteristics. Calculation and modeling of a flat-field spectrograph scheme for the visible range based on CHOE showed that by using such an element it is possible to achieve a decrease in aberrations in the tangential plane by 1.64–1.92 times, and those in the sagittal plane by 1.74–2.14 times simultaneously with an increase in the diffraction efficiency up to 1.47 times.

The use of CHOE can be of particular interest when creating optical systems of the following groups:

1. Spectral devices:
   - high resolution spectrometers,
   - spectrographs for scientific research,
   - compact spectrometers for laboratory and industrial use,
   - compact air- and space-borne spectrometers.
2. Hologram displays:
   - head-mounted displays, including AR/VR glasses,
   - helmet displays,
   - automotive head-up displays.
3. Measurment systems:
   - holographic wavefront sensors,
   - reference optical components.
4. Laser beam shaping systems:
   - scanning systems,
   - compressors of laser radiation.

Further research and development within the framework of proposed concept may include the improvement of methods for design and modeling of CHOE, incl. that by use of coupled waves analysis numerical methods, the creation of design methods for various types of optical systems based on CHOE, the development of algorithms for transfer of the calculated CHOE parameters into technological ones, taking into account the final accuracy of the elementary fields stitching, and the development of CHOE manufacturing technology using spatial light modulators, deformable mirrors and modern photopolymer holographic materials.

АВТОРЫ

Муслимов Эдуард Ринатович, e-mail: ermuslimov@kai.ru, д.т.н., доц. кафедры оптико-электронных систем ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ», 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10;
оптик-конструктор NOVA group, Нидерландский институт радиоастрономии (ASTRON), Нидерланды.
ORCID 0000-0002-3242-9894
Scopus ID 55785536800
РИНЦ ID 729251

Павлычева Надежда Константиновна, корреспондирующий автор, e-mail: nkpavlych@rambler.ru, проф., д.т.н., проф. кафедры оптико-электронных систем ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ», 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10.
ORCID 0000-0001-9395-3967
Scopus ID 6701787491
РИНЦ ID 42047

Гуськов Илья Андреевич, e-mail: ilyaggipo@yandex.ru, аспирант кафедры оптико-электронных систем ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ», 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10;
инж.-конструктор АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики» 420075, Казань, Липатова 2
ORCID 0000-0003-1480-8572
Scopus ID 57203765483
РИНЦ ID 1064551

ABOUT AUTHORS

Muslimov Eduard Rinatovich, e-mail: ermuslimov@kai.ru, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Optoelectronic Systems, "Kazan National Research Technical University. A. N. Tupolev-KAI", 420111, Kazan, st. K. Marx, 10;
Optical designer at NOVA group, Netherlands Institute for Radio Astronomy (ASTRON), Oude Hoogeveensedijk 4, 7991 PD Dwingeloo, The Netherlands
ORCID 0000-0002-3242-9894
Scopus ID 55785536800
RSCI ID 729251

Pavlycheva Nadezhda Konstantinovna, Corresponding Author, e-mail: nkpavlych@rambler.ru, Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Optoelectronic Systems, Kazan National Research Technical University. A. N. Tupolev-KAI ", 420111, Kazan, st. K. Marx, 10.
ORCID 0000-0001-9395-3967
Scopus ID 6701787491
RSCI ID 42047

Guskov Ilya Andreevich, e-mail: ilyaggipo@yandex.ru, postgraduate student of the Department of Optoelectronic Systems, "Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev-KAI", 420111, Kazan, st. K. Marx, 10;
Design engineer of JSC "Scientific and Production Association" State Institute of Applied Optics "420075, Kazan, Lipatova 2
ORCID 0000-0003-1480-8572
Scopus ID 57203765483
RSCI ID 1064551

ВКЛАД АВТОРОВ

Э. Р. Муслимов – принципы расчета КГОЭ, расчет контрольного примера, подготовка рисунков и таблиц, подготовка рукописи.

Н. К. Павлычева – аналитические методы расчета и коррекции аберраций голограммных решеток, исходные данные для расчета контрольного примера, расчет исходной оптической схемы для сравнения.

И. А. Гуськов – разработка дополнительных программных инструментов для моделирования в среде Zemax.

Представленные в статье исследования выполнялись без финансовой поддержки, по их результатам направлена заявка на получения гранта РНФ для проведения дальнейших исследований.

CONTRIBUTION OF AUTHORS

E. R. Muslimov – principles of CHOE design, the example design development, preparation of figures and tables, preparing the manuscript.

N. K. Pavlycheva – analytical methods of design and aberrations correction for holographic gratings, initial data for the example design, design of the initial optical scheme for comparison.

I. A. Guskov – development of additional software tools for modeling in the Zemax environment.

The studies presented in the article were carried out without financial support; based on their results, an application was sent for a grant from the Russian Science Foundation for further research.

ИНФОРМАЦИЯ О КОНФЛИКТЕ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что реальный или потенциальный конфликт интересов в связи с рукописью отсутствует.

Все авторы ознакомлены и согласны с рукописью.

CONFLICT OF INTEREST INFORMATION

The authors acknowledge that there is no real or potential conflict of interest in relation to the manuscript.

All authors are familiar with and agree with the manuscript.