



Экспериментальные исследования волоконного конфокального датчика на основе метода хроматического кодирования

М. А. Завьялова, П. С. Завьялов, М. В. Савченко
Конструкторско-технологический институт
научного приборостроения СО РАН,
Новосибирск, Россия

В работе представлены результаты экспериментальных исследований волоконного конфокального датчика на основе метода хроматического кодирования с разработанными гибридными рефракционно-дифракционными и гиперхроматическими объективами. Данный датчик позволяет определять положение контролируемых поверхностей с высоким разрешением (погрешность не превышает 0,1–1 мкм) на рабочих отрезках от 20 до 220 мкм.

Ключевые слова: конфокальный датчик, метод хроматического кодирования, дифракционный оптический элемент, лазерная микрообработка материалов

Статья поступила: 11.10.2021
Статья принята: 25.11.2021

ВВЕДЕНИЕ

Лазерный синтез микроструктур на поверхности различных материалов требует разработки методов прецизионного позиционирования микрообъективов, осуществляющих фокусировку излучения. Для этих целей, как правило, используют оптические бесконтактные датчики, которые позволяют с высоким разрешением определить положение поверхности

Experimental Studies of Fiber Confocal Sensor Based on Chromatic Coding Method

M. A. Zavyalova, P. S. Zavyalov, M. V. Savchenko
Technological Design Institute of Scientific Instrument
Engineering, SB RAS, Novosibirsk, Russia

The paper presents the results of experimental studies of a fiber confocal sensor based on the chromatic coding method with the developed hybrid refractive-diffractive and hyperchromatic lenses. This sensor allows you to determine the position of the controlled surfaces with a high resolution (the error does not exceed 0.1–1 μm) on working segments from 20 to 220 μm .

Keywords: confocal sensor, chromatic coding method, diffractive optical element, laser micromachining of materials

Received on: 11.10.2021
Accepted on: 25.11.2021

INTRODUCTION

Laser synthesis of microstructures on the surface of various materials requires the development of methods for precision positioning of microlens that focus the radiation. For these purposes, as a rule, optical non-contact sensors are used, which make it possible to determine the position of the surface of the objects being processed with a high resolution. Such sensors are used in laser technological installations for the synthesis of high-precision photonic elements with sizes from a few millimeters to tens of nanometers [1–3].

The most important requirements for optical proximity sensors are high speed (up to 1 MHz) and resolution. In addition, the task of designing such sensors becomes more complicated for the cases of recording microstructures on three-dimensional surfaces, which is important at this stage in the development of a high-tech element base [4, 5]. Since the synthesized elements of photonics are optically



обрабатываемых объектов. Такие датчики применяются в лазерных технологических установках при синтезе высокоточных элементов фотоники с размерами от единиц мм до десятков нанометров [1–3].

Наиболее важными требованиями, предъявляемыми к оптическим бесконтактным датчикам, являются высокое быстродействие (до 1 МГц) и разрешение. К тому же задача проектирования таких датчиков усложняется для случаев записи микроструктур на трехмерных поверхностях, что актуально на данном этапе развития высокотехнологичной элементной базы [4, 5]. Так как синтезируемые элементы фотоники представляют собой оптически прозрачные среды с малым коэффициентом отражения, то такие датчики должны иметь необходимый запас по мощности зондирующего излучения.

Возможность синтеза микро- и наноструктур на плоских и криволинейных поверхностях позволяет производить уникальные оптические элементы и устройства на их основе, которые высоко востребованы в современной технике [6–9]. В течение последних 15–20 лет наблюдается впечатляющий прогресс в области создания лазерных технологических комплексов для обработки и структурирования различных типов материалов. Среди них уникальными являются системы, позволяющие проводить микро- и наноструктурирование трехмерных поверхностей с разрешением менее 0,1 мкм [10].

Для реализации многих из этих способов необходим точный контроль положения плоскости фокусировки рабочего микрообъектива, которая должна быть совмещена либо с плоскостью светочувствительного слоя, нанесенного на поверхность подложки, либо с поверхностью подложки. Датчик положения, входящий в систему автоматической фокусировки (САФ), необходим для постоянного удержания сфокусированного записывающего пятна на поверхности синтезируемого элемента во время записи со скоростями до 10 м/с. Важно отметить, что погрешность фокусировки, превышающая $\pm 0,2$ мкм (для объектива с числовой апертурой 0,65), приводит к существенному изменению размеров и формы записывающего пятна и, следовательно, параметров записи, а наклон оси объектива – к появлению погрешности координаты записи [11]. Если поверхность записи трехмерная, то задача усложняется и требует разработки и внедрения ранее не использовавшихся прецизионных методов автофокусировки. Разрабатываемые на этих принципах САФ позволяют контролировать технологические процессы с большой точностью. Как правило, такие системы содержат большое количество оригинальных датчиков, во многом

transparent media with a low reflection coefficient, such sensors must have the necessary power reserve of the probing radiation.

The possibility of synthesizing micro- and nanostructures on flat and curved surfaces makes it possible to produce unique optical elements and devices based on them, which are in high demand in modern technology [6–9]. Over the past 15–20 years, impressive progress has been observed in the field of creating laser technological complexes for processing and structuring various types of materials. Among them, unique are systems that allow micro- and nanostructuring of three-dimensional surfaces with a resolution of less than 0.1 μm [10].

To implement many of these methods, it is necessary to accurately control the position of the focal plane of the working microlens, which must be aligned either with the plane of the photosensitive layer applied to the substrate surface, or with the substrate surface. The position sensor, which is part of the automatic focusing system (AFS), is required to constantly hold the focused recording spot on the surface of the synthesized element during recording at speeds up to 10 m/s. It is important to note that a focusing error exceeding $\pm 0.2 \mu\text{m}$ (for a lens with a numerical aperture of 0.65) leads to a significant change in the size and shape of the recording spot and, consequently, in the recording parameters, and the tilt of the lens axis leads to an error in the recording coordinate [11]. If the recording surface is three-dimensional, then the task becomes more complicated and requires the development and implementation of previously unused precision autofocus methods. AFSs developed on these principles allow controlling technological processes with great accuracy. As a rule, such systems contain a large number of original sensors, which largely determine the efficiency of the technological process.

BASIC TECHNICAL REQUIREMENTS FOR SENSORS FOR MONITORING THE POSITION OF OBJECTS

The following requirements are imposed on sensors for monitoring the position of objects used in laser technological installations for the formation of high-quality micro- and nanostructures:

1. Compactness and integration into the technological laser channel.

Typically, such sensors must be embedded in the existing optical channels of processing units. This is due to the fact that for focusing laser radiation into



определяющих эффективность технологического процесса.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ДАТЧИКАМ КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

К датчикам контроля положения объектов, используемых в лазерных технологических установках для формирования микро- и наноструктур высокого качества, предъявляются следующие требования:

1. Компактность и встраиваемость в технологический лазерный канал.

Как правило, такие датчики необходимо встраивать в существующие оптические каналы технологических установок. Это связано с тем, что для фокусировки лазерного излучения в пятно диаметром 1 мкм и менее используются микрообъективы с большой числовой апертурой – от 0,65 и выше, и, следовательно, с малым рабочим отрезком, что затрудняет встраивание готового датчика непосредственно перед фокусирующим элементом. Зондирующее излучение датчика, таким образом, должно фокусироваться тем же элементом, что и излучение рабочего лазера.

2. Высокое быстродействие

Так как лазерные технологические установки имеют высокую скорость записи (до 10 м/с), то датчики положения должны выполнять прецизионное позиционирование исполнительных элементов при частоте сигнала от нескольких килогерц до 1 МГц.

3. Высокое разрешение

Для формирования микроструктур высокого качества с глубиной до нескольких десятков микрон разрешение датчиков должно быть на порядок лучше – 1 мкм и менее.

4. Рабочий диапазон

Эта характеристика датчика связана с глубиной синтезируемых структур, а также определяет возможность структурирования криволинейных поверхностей (угол наклона касательной к поверхности не должен превышать 8° для микрообъективов с числовой апертурой 0,65).

5. Возможность записи на криволинейных поверхностях

Так как в этом случае зондирующее излучение датчиков контроля положения объектов может допол-

нить излучение рабочего лазера, то датчик должен быть расположен в фокусе лазера, что требует использования микролинзы с диаметром пятна 1 мкм или меньше, микролинзы с большой числовой апертурой – от 0,65 и выше, и, следовательно, с малым фокусным расстоянием, что делает сложным интегрирование датчика непосредственно перед фокусирующим элементом. Таким образом, излучение датчика должно быть сфокусировано тем же элементом, что и излучение рабочего лазера.

2. High performance

Since laser technological installations have a high recording speed (up to 10 m/s), the position sensors must perform precise positioning of the actuators at a signal frequency from several kilohertz to 1 MHz.

3. High resolution

For the formation of high quality microstructures with a depth of up to several tens of micrometers, the resolution of the sensors should be an order of magnitude better – 1 μm or less.

4. Working range

This characteristic of the sensor related to the depth of the synthesized structures, and determines the possibility of structuring the curved surfaces (the angle of inclination of the tangent to the surface should not exceed 8° to microscope lenses having a numerical aperture of 0.65).

5. Recordable on curved surfaces

Since, in this case, the probing radiation of the sensors for monitoring the position of objects can additionally change its parameters due to the curvature of the surface, a preliminary assessment of the influence of the curvature on the signal from the sensor must be carried out.

6. Advanced functionality

Along with the main task of such sensors in tracking the linear movement of the controlled object and converting the change in its position into the corresponding output signal, they must automatically search for the surface to be treated, determine the size of the focused spot, measure the profile of the resulting structures, etc. All this improves the technical capabilities of laser technological installations and makes it possible to improve the quality of synthesized structures.

The optical methods of surface control used in laser technological complexes are very diverse. Non-contact optical sensors for measuring distances with high resolution (less than 1 μm) include interferometric [12], triangulation [13] and confocal

нительно изменять свои параметры из-за кривизны поверхности, то предварительно должна быть проведена оценка влияния кривизны на сигнал с датчика.

6. Расширенный функционал

Наряду с основной задачей таких датчиков в отслеживании линейного перемещения контролируемого объекта и преобразовании изменения его положения в соответствующий выходной сигнал, они должны осуществлять автоматический поиск обрабатываемой поверхности, определять размер сфокусированного пятна, измерять профиль полученных структур и т.д. Все это улучшает технические возможности лазерных технологических установок и позволяет повысить качество синтезируемых структур.

Оптические методы контроля поверхности, используемые в лазерных технологических комплексах, весьма разнообразны. К оптическим бесконтактным датчикам для измерения расстояний с высоким разрешением (менее 1 мкм) относят интерферометрические [12], триангуляционные [13] и конфокальные датчики [14, 15], которые выпускаются серийно и в больших объемах и в целом обеспечивают рост индустрии измерительного оборудования. Однако они удовлетворяют лишь части требований, описанных выше. Так, лазерные интерферометрические датчики имеют необходимые чувствительность и быстродействие, но при этом не могут быть совмещены с рабочим микрообъективом, фокусирующим лазерное излучение. Триангуляционные датчики могут измерить расстояние только до плоских поверхностей. Доступные коммерческие датчики (интерферометрического и конфокального типов) в основном производятся за рубежом и являются дорогостоящими. Они имеют оптические схемы «закрытого» типа и не могут быть внедрены в лазерные установки, в которых используются микрообъективы с малым рабочим отрезком (менее 1 мм). Поэтому области и масштабы их применения в лазерных технологических установках пока сильно ограничены, и вполне естественно, что усилия разработчиков направлены на создание таких датчиков и уменьшение их себестоимости.

Поэтому актуальной задачей при проектировании лазерных технологических комплексов являются разработка и исследование быстродействующих прецизионных датчиков для автоматической фокусировки лазерного излучения на оптических поверхностях, контроля результата взаимодействия и измерения профиля синтезированных структур.

sensors [14, 15], which are mass-produced and in large volumes and, in general, provide the growth of the measuring equipment industry. However, they satisfy only part of the requirements described above. Thus, laser interferometric sensors have the necessary sensitivity and speed, but at the same time they cannot be combined with a working microlens that focuses laser radiation. Triangulation sensors can only measure distance to flat surfaces. Available commercial sensors (interferometric and confocal types) are mainly produced abroad and are expensive. They have closed-type optical circuits and cannot be incorporated into laser systems that use microlenses with a short focal distance (less than 1 mm). Therefore, the areas and scales of their application in laser technological installations are still very limited, and it is quite natural that the efforts of developers are aimed at creating such sensors and reducing their cost.

Therefore, an urgent task in the design of laser technological complexes is the development and study of high-speed precision sensors for automatic focusing of laser radiation on optical surfaces, monitoring the result of interaction and measuring the profile of synthesized structures.

The paper will consider a fiber confocal sensor based on the chromatic coding method developed in Novosibirsk at the Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, SB RAS (hereinafter referred to as TDISIE, SB RAS).

The principle of operation of this sensor is described in detail in [16, 17]. It evaluates the spectral distribution of the intensity of optical signals reflected from the measured surfaces. For these purposes, a polychromatic sounding signal is used in combination with hyperchromatic lenses (HCL), which focus the spectral components at different distances along the direction of light propagation. The use of a special point (or confocal) diaphragm limiting the flow of background scattered light from points outside the focal plane of the lens makes it possible to select radiation with a narrow spectrum, in which the central wavelength is the chromatic code of the distance to the surface, and its change is proportional to the surface displacement.

This sensor is necessary for precise control of the position of the focusing plane of the working microlens. With its help, a constant retention of the focused recording spot on the surface of the synthesized element should be carried out during high-speed processing of optically transparent media.

В работе будет рассмотрен волоконный конфокальный датчик на основе метода хроматического кодирования, разработанный в Новосибирске в Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения СО РАН (далее – КТИ НП СО РАН).

Подробно принцип работы данного датчика описан в [16, 17]. В нем оценивается спектральное распределение интенсивности оптических сигналов, отраженных от измеряемых поверхностей. Для этих целей используется полихроматический зондирующий сигнал в сочетании с гиперхроматическими объективами (ГХО), которые фокусируют спектральные компоненты на различных расстояниях вдоль направления распространения света. Использование специальной точечной (или конфокальной) диафрагмы, ограничивающей поток фонового рассеянного света из точек вне фокальной плоскости объектива, позволяет выделить излучение с узким спектром, в котором центральная длина волны является хроматическим кодом расстояния до поверхности, а её изменение пропорционально смещению поверхности.

Данный датчик необходим для точного контроля положения плоскости фокусировки рабочего микрообъектива. С его помощью должно осуществляться постоянное удержание сфокусированного записывающего пятна на поверхности синтезируемого элемента при высокоскоростной обработке оптически прозрачных сред.

На данном этапе была разработана оптическая схема для исследования точностных характеристик датчика (рис. 1). В ней используется осветитель на основе галогенной лампы (1) DL150 (Dedolight, Германия), волоконный конфокальный датчик (КТИ НП СО РАН, г. Новосибирск) (2). Объект смещается с помощью трехкоординатного столика (3) ZSS 33.200.1.2 (Phytron, Германия). Изменение отраженного сигнала контролируется с помощью анализатора (4), в состав которого входит дифракционная решетка GT13-06V (Thorlabs, Германия) и видеокамера КЦ-1310 (КТИ НП СО РАН, г. Новосибирск). В схему также внедрен интерферометр (5) XL-80 (RENISHAW, Великобритания), который позволяет контролировать смещение объекта с погрешностью менее 0,1 мкм.

Разработанное программное обеспечение LineIntensity позволяет обрабатывать сигнал анализатора конфокального датчика. С помощью видеокамеры на экран выводится изображение спектра отраженного сигнала, представленного на рис. 2. Оно может быть цветным (рис. 2 а) либо

At this stage, an optical scheme was developed to study the accuracy characteristics of the sensor (Fig. 1). It uses an illuminator based on a halogen lamp (1) DL150 (Dedolight, Germany), a fiber confocal sensor (TDSIE, SB RAS, Novosibirsk) (2). The object is displaced using a three-coordinate stage (3) ZSS 33.200.1.2 (Phytron, Germany). The change in the reflected signal is controlled using an analyzer (4), which includes a GT13-06V diffraction grating (Thorlabs, Germany) and a KTs-1310 video camera (TDSIE, SB RAS, Novosibirsk). The scheme also includes an XL-80 interferometer (5) (RENISHAW, Great Britain), which makes it possible to control the displacement of an object with an error of less than 0.1 μm .

The developed LineIntensity software allows processing the signal from the analyzer of the confocal sensor. A video camera displays an image of the reflected signal spectrum shown Fig. 2. It can be colored Fig. 2 a, or black and white Fig. 2b depending on the mode of use of the camera.

Further signal processing consists of three stages. At the first stage, the result of the subtraction is processed with a Gaussian blur. Blur is applied to reduce the effect of noise on the original result. At the second stage, the specified constant (in fact, the background component) is subtracted to select significant pixels. At the third stage, the peak detection algorithms are implemented. In total, three algorithms were investigated: the search for the brightest point, the center of mass, and a linear approximation of the differential signal. The obtained peak coordinates are used to estimate the measurement error.

The brightest point search algorithm takes the brightest pixel available as the peak. Due to the absence of any further processing, it is the fastest algorithm available, but it increases the measurement error.

The algorithm for finding the center of mass takes as the peak the center of mass of the brightness of

pixels, calculated by the formula $r_c = \frac{\sum m_i \cdot r_i}{\sum m_i}$, where r_c

are the coordinates of the center of mass, r_i are the coordinates of the pixel, and m_i is the brightness of the pixel. This algorithm is slightly slower than the brightest point search algorithm, but at the same time its accuracy is higher.

The linear approximation of the differential signal (LFDS) algorithm is performed in three stages. At the first stage, the difference approximation of the first derivative is calculated by the formula

черно-белым (рис. 2 б) в зависимости от режима использования камеры.

Дальнейшая обработка сигнала состоит из трех этапов. На первом этапе результат вычитания обрабатывается размытием по Гауссу. Размытие применяется для снижения влияния шумов на исходный результат. На втором этапе происходит вычитание заданной константы (по сути, фоновой составляющей) для выделения значимых пикселей. На третьем этапе реализуются алгоритмы выделения пика. Всего было исследовано три алгоритма: поиск ярчайшей точки, центр масс и линейная аппроксимация дифференциального сигнала. Полученные координаты пика используются для оценки погрешности измерений.

Алгоритм поиска ярчайшей точки берет в качестве пика самый яркий пиксел из имеющихся. Из-за отсутствия какой-либо дальнейшей обработки является самым быстрым из имеющихся алгоритмов, но при этом повышается погрешность измерения.

Алгоритм поиска центра масс принимает за пик центр масс яркостей пикселей, вычисленный

$\frac{df(x)}{dx} = \frac{f(x+\Delta) - f(x-\Delta)}{2\Delta}$, where $\frac{df(x)}{dx}$ is the value of the

derivative at the point x , $f(x)$ is the value of the function at the point x , d is the approximation step. Then the resulting array of values of derivatives at points is used for linear approximation by the least squares method. And finally, at the third stage, the coordinate of the point of intersection of the obtained straight line with zero is calculated, which is the desired peak. This algorithm is the most time consuming of all the presented ones, but its accuracy is the best.

INVESTIGATION OF THE PRECISION CHARACTERISTICS OF A FIBER CONFOCAL SENSOR BASED ON THE CHROMATIC CODING METHOD

The purpose of the experimental studies was to determine the error of the fiber confocal sensor. The object was displaced using a three-coordinate stage (3) with a step of 0.1 μm , and the displacement value was

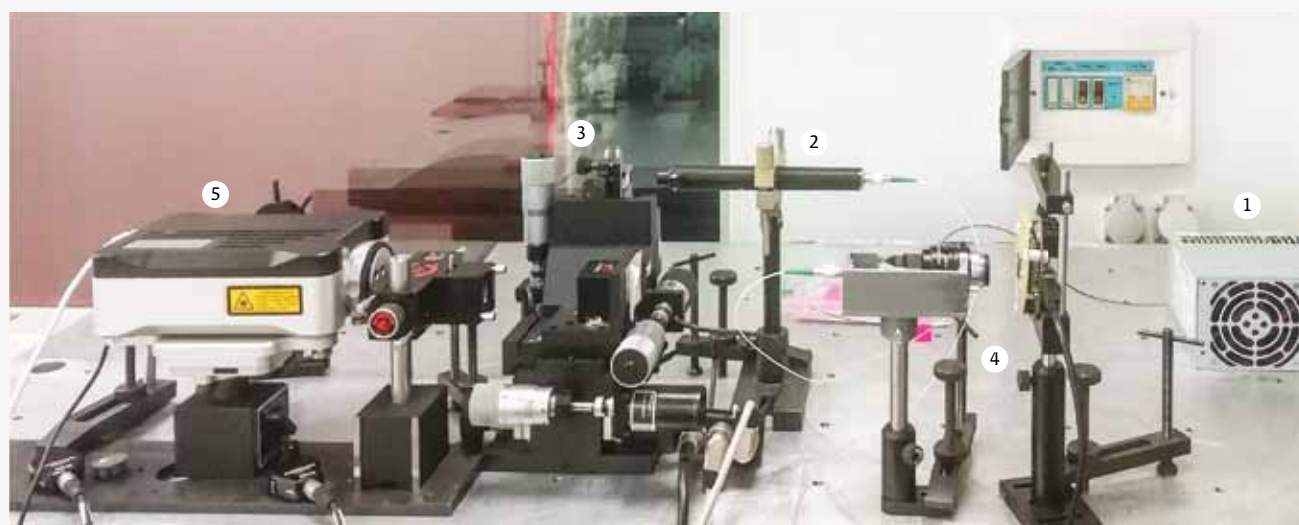


Рис. 1. Установка для исследования точностных характеристик волоконного конфокального датчика на основе метода хроматического кодирования: 1 – осветитель на базе галогенной лампы DL150 (Dedolight, Германия); 2 – волоконный конфокальный датчик на основе хроматического кодирования (КТИ НП СО РАН, г. Новосибирск); 3 – трехкоординатный столик ZSS 33.200.1.2 (Phytron, Германия); 4 – анализатор на основе дифракционной решетки GT13-06V (Thorlabs, Германия) и видеокамеры КЦ-1310 (КТИ НП СО РАН, г. Новосибирск); 5 – интерферометр XL-80 (5) (RENISHAW, Великобритания)

Fig. 1. Installation for studying the precision characteristics of a fiber confocal sensor based on the chromatic coding method: 1 – an illuminator based on a DL150 halogen lamp (Dedolight, Germany); 2 – fiber confocal sensor based on chromatic coding (TDISIE SB RAS, Novosibirsk); 3 – three-coordinate table ZSS 33.200.1.2 (Phytron, Germany); 4 – analyzer based on a GT13-06V diffraction grating (Thorlabs, Germany) and a KTs-1310 video camera (TDISIE SB RAS, Novosibirsk); 5 – XL-80 interferometer (5) (RENISHAW, Great Britain)

по формуле $r_c = \frac{\sum m_i \cdot r_i}{\sum m_i}$, где r_c – координаты центра

масс, r_i – координаты пикселя, m_i – яркость пикселя. Данный алгоритм несколько медленнее алгоритма поиска ярчайшей точки, но при этом его точность выше.

Алгоритм линейной аппроксимации дифференциального сигнала (LFDS) выполняется в три этапа. На первом этапе вычисляется разностная аппроксимация первой производной по формуле

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{f(x+\Delta) - f(x-\Delta)}{2\Delta}, \text{ где } \frac{df(x)}{dx} - \text{значение произ-}$$

водной в точке x , $f(x)$ – значение функции в точке x , d – шаг аппроксимации. Затем полученный массив значений производных в точках используется для линейной аппроксимации методом наименьших квадратов. И, наконец, на третьем этапе, вычисляется координата точки пересечения полученной прямой с нулем, которая и является искомым пиком. Данный алгоритм самый трудоемкий по времени из всех представленных, однако его точность при этом является наилучшей.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННОГО КОНФОКАЛЬНОГО ДАТЧИКА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ХРОМАТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ

Целью экспериментальных исследований было определение погрешности волоконного конфокального датчика. Объект смещался с помощью трехкоординатного столика (3) с шагом 0,1 мкм, а величина смещения определялась интерферометром (5). Типичный график зависимости представлен на рис. 3.

Полученная кривая зависимости координаты центра масс спектрального распределения мощности сигнала от смещения поверхности аппроксимировалась степенной функцией $y(x) = \lambda(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$.

Мерой отклонения $y(x)$ от заданной функции при среднеквадратичном приближении являлась величина СКО, равная сумме квадратов разностей между значениями $y(x)$ и экспериментальной функции в каждой точке. Для построения аппроксимирующей кривой использовались встроенные функции программы Excel, с помощью которых подбирались коэффициенты a_0 , a_1 , a_2 и a_3 таким образом, чтобы величина СКО была наименьшей.

Далее анализировалось СКО при определении смещений поверхности.

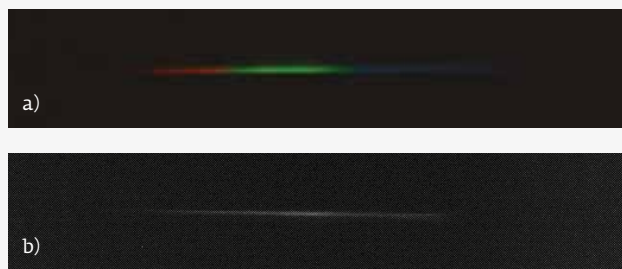


Рис. 2. Иллюстрация распределения сигнала по матрице видеокamеры, полученного с помощью конфокального датчика: а) цветное изображение; б) черно-белое изображение

Fig. 2. Illustration of the signal distribution over the video camera matrix obtained with the help of a confocal sensor: a) color image; b) black and white image

determined by an interferometer (5). A typical graph of dependence is shown Fig. 3.

The resulting curve of the dependence of the coordinate of the center of mass of the spectral distribution of the signal power on the surface displacement was approximated by the power function $y(x) = \lambda(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$.

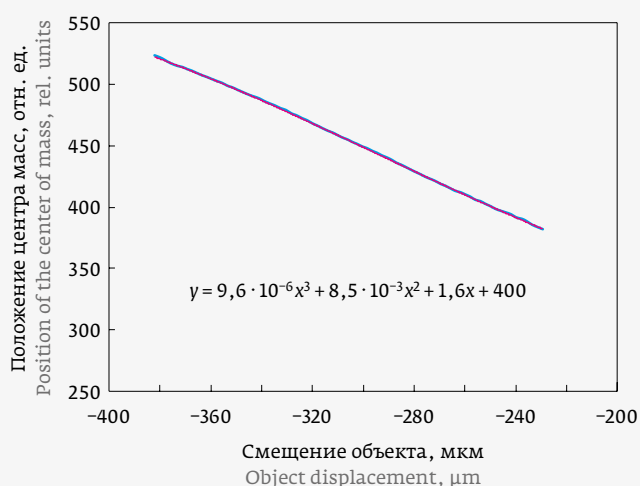


Рис. 3. Зависимость координаты центра масс спектрального распределения мощности сигнала от смещения поверхности, контролируемое с помощью интерферометра XL-80 (RENISHAW, Великобритания)

Fig. 3. Dependence of the coordinate of the center of mass of the spectral distribution of the signal power on the surface displacement, monitored using an XL-80 interferometer (RENISHAW, Great Britain)

При проведении экспериментальных исследований использовались два типа гиперхроматических объективов: рефракционно-дифракционный (РД-объектив, разложение в хроматических отрезок осуществляется с помощью дифракции лучей) и рефракционный (разложение – за счет явления дисперсии стекол, далее – гиперхромат). Так в [18] описан РД-объектив (рис. 5), который состоит из стандартного микрообъектива (3,7, 10 и 20×) и дифракционного оптического элемента (ДОЭ). ДОЭ представляет собой фазовую пластинку с осесимметричной дифракционной структурой. В совокупности такой подход позволяет получить хроматический отрезок Δz , в котором свет определенной длины волны фокусируется в пятна дифракционного качества без абберационных искажений.

В таблицу сведены параметры датчика, установленные в ходе экспериментальных исследований. Были получены следующие результаты: для объектива 3,7× погрешность определения смещения объекта составила 1 мкм на линейном участке 200 мкм, для микрообъектива 10× – 0,6 мкм на линейном участке 50 мкм и для микрообъектива 20× – 0,1 на линейном участке 20 мкм.

Основные преимущества данных объективов: простота реализации, компактность и линейная зависимость смещения фокуса от длины волны. Однако такие объективы обладают рядом недостатков. В первую очередь, это наличие паразитных дифракционных порядков, а также низкая эффективность на краях диапазона длин волн (400–700 нм). Расчет и проектирование гиперхроматических объективов, основанных на комбинации стекол с различной дисперсией, является предпочтительным при использовании широкого диапазона длин волн $\Delta\lambda$ (в пределах видимой области спектра 400–700 нм).

В [16, 17] описаны подходы к проектированию гиперхроматов. В ходе экспериментальных исследований использовался разработанный трехлинзовый объектив (рис. 6) со следующими характеристиками: рабочий отрезок – 30 мм, длина хроматического отрезка – 300 мкм; фокусное расстояние – 24 мм; увеличение 5 крат; относительное отверстие: 1/3.3; дисторсия – 0,03%.

В результате экспериментальных исследований установлено, что использование гиперхромата

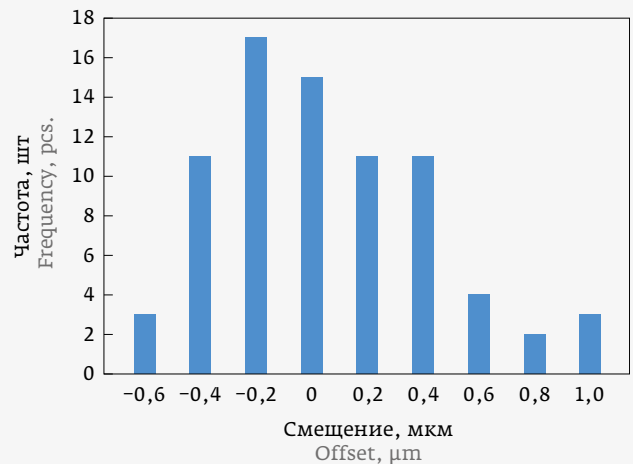


Рис. 4. Распределение СКО при определении смещений поверхности с помощью конфокального датчика

Fig. 4. RMS distribution when determining surface displacements using a confocal sensor

The measure of the deviation of $y(x)$ from the given function at the root-mean-square approximation was the value of the root-mean-square deviation, equal to the sum of the squares of the differences between the values of $y(x)$ and the experimental function at each point. To construct the approximating curve, the built-in functions of the Excel program were used, with the help of which the coefficients a_0 , a_1 , a_2 and a_3 were selected so that the value of the root-mean-square deviation was the smallest.

Further, the root-mean-square deviation was analyzed when determining the surface displacements.

During experimental studies, two types of hyperchromatic lenses were used: refractive-



Рис. 5. Гиперхроматические объективы: а) рефракционно-дифракционный объектив; б) трехлинзовый гиперхромат

Fig. 5. Hyperchromatic lenses: a) refractive-diffractive lens; b) three-lens hyperchromate

в совокупности с аподизирующей маской (которая фильтрует излучение с широким спектром) позволяет снизить погрешность измерения расстояния до поверхности в три и более раз. При отсутствии аподизирующей маски в центральной части гиперхромата среднеквадратичное отклонение (СКО) составляет 0,9 мкм в линейном измерительном диапазоне 225 мкм. А введение аподизирующей маски диаметром $0,2D$ (где D – диаметр гиперхромата) уменьшает СКО до 0,29 мкм при сокращении линейного измерительного диапазона до 120 мкм.

РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННОГО КОНФОКАЛЬНОГО ДАТЧИКА С ПОВЫШЕННЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Для определения положения оптических прозрачных сред необходимо обеспечить повышенные энергетические характеристики зондирующего излучения. Проведенный расчет показал, что использование вместо галогенной лампы суперлюминесцентного диода SLD-790-14BF (Nolatech, Россия) позволит в 100 раз увеличить уровень сигнала с конфокального датчика. На его основе был разработан осветитель с волоконным выводом излучения. Он имеет выходную мощность 5 мВт и ширину спектра 40 нм (760–800 нм). Для разложения такого узкого спектра в хроматический отрезок был рассчитан дифракционный оптический элемент с использованием программного обеспечения для расчета оптических систем Zemax Optical Studio. На рис. 6–7 представлены данные результата расчета и моделирования такого элемента. Видно, что зависимость смещения фокуса от длины волны (рис. 6) довольно линейная (нелинейность не превышает 1%), а размеры пятен для излучений с длинами волн 760, 770, 780, 790 и 800 нм меньше дифракционного предела (рис. 7).

На следующем этапе исследований будут проведены эксперименты, позволяющие определить уровень отраженного от оптически прозрачной среды сигнала в конфокальном датчике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа рынка коммерчески доступных бесконтактных датчиков для контроля положения поверхности объектов установлено, что, несмотря на их многообразие, они трудно встраиваемы в лазерные технологические установки. Сформулированы требования, предъявляемые к датчикам в таких установках, а именно: высокие быстродействие (до 1 МГц) и разрешение (погреш-

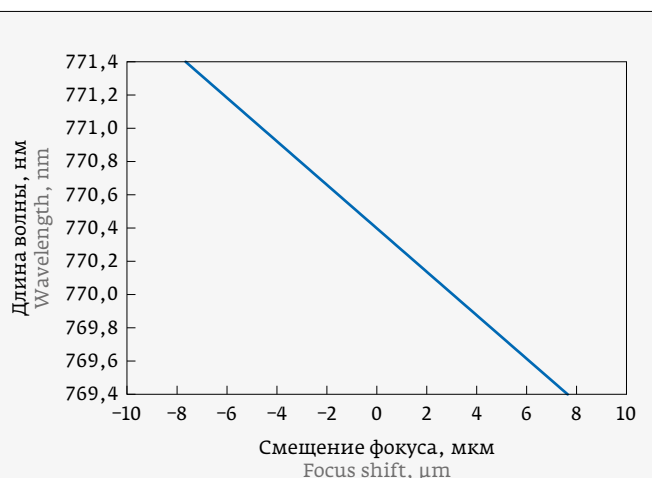


Рис. 6. Зависимость смещения фокуса от длины волны для дифракционного оптического элемента, фокусирующего излучение суперлюминесцентного диода в хроматический отрезок длиной 300 мкм

Fig. 6. Dependence of the focus shift on the wavelength for a diffractive optical element focusing the radiation of a superluminescent diode into a chromatic segment with a length of 300 μm

diffractive (RD-lense, decomposition into a chromatic segment is carried out using diffraction of rays) and refractive (decomposition is due to the phenomenon of glass dispersion, hereinafter referred to as hyperchromate). So in [18] an RD lens is described (Fig. 5), which consists of a standard microlens (3,7, 10 and 20×) and a diffractive optical element (DOE). DOE is a phase plate with an axisymmetric diffraction structure. Taken together, this approach makes it possible to obtain a chromatic segment Δz , in which light of a certain wavelength is focused into diffraction-quality spots without aberration distortion.

The table summarizes the sensor parameters established in the course of experimental studies. The following results were obtained: for the 3,7× lense, the error in determining the displacement of the object was 1 μm in the linear section of 200 μm, for the microlens 10× – 0.6 μm in the linear section of 50 μm, and for the microlens 20× – 0.1 in the linear section 20 microns.

The main advantages of these lenses are: ease of implementation, compactness and linear dependence of the focus shift on the wavelength. However, such lenses have a number of disadvantages. First of all, this is the presence of parasitic diffraction orders, as well as low efficiency at the edges of the wavelength range (400–700 nm).



ность не должна превышать 0,1 мкм), возможность контроля положения сферических (выпуклых или вогнутых) поверхностей, а также приемлемые массогабаритные характеристики. Важнейшим среди требований является совместимость оптических схем датчиков с оптическими схемами лазерных каналов.

Проведены исследования волоконного конфокального датчика, разработанного в КТИ НП СО РАН, который может войти в состав лазерных технологических комплексов и позволит контролировать положение и профиль обрабатываемой поверхности. Показано, что применение в качестве анализатора спектра цветной видеокамеры, а также рефракционно-дифракционного объектива в конфокальных датчиках позволяет определять положение контролируемой поверхности с погрешностью до 0,1 мкм.

В ходе экспериментальных исследований трехлинзового гиперхромата с введенной аподизирующей маской установлено, что погрешность определения положения контролируемой поверхности составляет 0,2 мкм.

The calculation and design of hyperchromatic lenses based on a combination of glasses with different dispersion is preferable when using a wide range of wavelengths $\Delta\lambda$ (within the visible range of the spectrum 400–700 nm).

In [16, 17], approaches to the design of hyperchromates are described. In the course of experimental studies, a developed three-lens lens was used (Fig. 6) with the following characteristics: a focal length of 30 mm, a chromatic segment length

Таблица. Экспериментальные данные

Table. Experimental data

| Кратность микро-объектива Microlens magnification | Базовое расстояние, мм Base distance, mm | Диапазон измерений, мкм Measurement range, μm | Характерный размер линейной области, мкм Characteristic size of the linear region, μm | Погрешность (усреднение по восьми кадрам), мкм Accuracy (averaging over eight frames), μm |
|--|---|---|---|---|
| 3.7× | 25 | 700 | 200 | 1 |
| 10× | 12 | 120 | 50 | 0,6 |
| 20× | 5 | 50 | 20 | 0,1 |



Представлены результаты расчета дифракционного оптического элемента для контроля положения оптически прозрачных сред, позволяющего фокусировать свет от источника с повышенными энергетическими характеристиками и узким спектром.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена на базе лаборатории лазерных промышленных технологий КТИ НП СО РАН. Финансовая поддержка осуществлялась Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

REFERENCES

1. **Orange-Kedem R., Nehme E., Weiss L. E. et al.** 3D printable diffractive optical elements by liquid immersion. *Nat. Commun.* 2021; 12, 3067. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23279-6>.
2. **Herder M., Klein J. J., Vogler M., Russev M. M., Schleunitz A., Grützner G.** Hybrid polymers for conventional and additive manufacturing of microoptical elements. *Springer Series in Optical Sciences*. 2021; vol 233. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58960-8_7.
3. **Christoph Gerhard.** *Optics manufacturing: components and systems*. 2017; ISBN: 9781351228367. <https://doi.org/10.1201/9781351228367>.
4. **Hippler M., Blasco E., Qu J., Tanaka M., Barner-Kowollik C., Wegener M., & Bastmeyer, M.** Controlling the shape of 3D microstructures by temperature and light. *Nature Communications*. 2019; 10, 232.
5. **Chandran O., Lani S., Briand D., Dunan B., Voirin G.** Additive Manufacturing on 3D Surfaces. In: Meboldt M., Klahn C. (eds) *Industrializing Additive Manufacturing – Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications – AMPA2017*. AMPA 2017. Springer, Cham. 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66866-6_13.
6. **Zeitner U. D., Dannberg P.** Double-sided hybrid microoptical elements combining functions of multistage optical systems. *Proceedings of SPIE – Lithographic and Micromachining Techniques for Optical Component Fabrication*. 2001; 4440: 44–50.
7. **Grejsuh G. I., Ezhov E. G., Sidiyakina Z. A., Stepanov S. A.** Vysokoeffektivnye rel'efno-fazovye diffrakcionnye elementy na krivolinejnyh poverhnostyakh vrashcheniya. *Komp'yuternaya optika*. 2013; 37 (1): 45–50. Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Сидякина З. А., Степанов С. А. Высокоэффективные рельефно-фазовые дифракционные элементы на криволинейных поверхностях вращения. *Компьютерная оптика*. 2013; 37 (1): 45–50.
8. **Nalimov A. G., Kovalev A. A., Kotlyar V. V., Sojfer V. A.** Modelirovanie trekhmernogo ustrojstva nanofotoniki dlya vvida izlucheniya v planarnyj volnovod. *Komp'yuternaya optika*. 2009; 33 (1): 4–9. Налимов А. Г., Ковалев А. А., Котляр В. В., Сойфер В. А. Моделирование трехмерного устройства нанопоники для ввода излучения в планарный волновод. *Компьютерная оптика*. 2009; 33 (1): 4–9.
9. **Lemeshko Y. A., Finogenov L. V., Zav'yalov P. S.** Using the diffractive optics for 3D inspection of nuclear reactor fuel assembly grid spacers. *Measurement science REVIEW*. 2008; V.8, Section 3 (3):74–77.
10. **Poleshchuk A. G., Korol'kov V. P., Vejko V. P., Zakoldaev R. A., Sergeev M. M.** Lazernye tekhnologii v mikrooptike. CH. II. Izgotovlenie elementov s trekhmernym mikrorel'efom. *Avtometriya*. 2018; 2: 3–19. – DOI: 10.15372/AUT20180201. Полещук А. Г., Корольков В. П., Вейко В. П., Заколдаев Р. А., Сергеев М. М. Лазерные технологии в микрооптике. Ч. II. Изготовление элементов с трехмерным микрорельефом. *Автометрия*. 2018; 2: 3–19. – DOI: 10.15372/AUT20180201.
11. **Koronkevich V. P., Korol'kov V. P., Poleshchuk A. G., Harisov A. A., SHERKASHIN V. V.** Tochnost' izgotovleniya diffrakcionnyh opticheskikh elementov lazernymi zapisyvayushchimi sistemami s krugovym skanirovaniem. *Komp'yuternaya optika*. 1997; 17: 63–74. Коронкевич В. П., Корольков В. П., Полещук А. Г., Харисов А. А.,

of 300 μm ; focal length – 24 mm; magnification 5 times; aperture ratio: 1/3.3; distortion – 0.03%.

As a result of experimental studies, it was found that the use of a hyperchromate in conjunction with an apodizing mask (which filters radiation with a wide spectrum) makes it possible to reduce the error in measuring the distance to the surface by a factor of three or more. In the absence of an apodizing mask in the central part of the hyperchromate, the root-mean-square deviation is 0.9 μm in the linear measuring range of 225 μm . The introduction of an apodizing mask with a diameter of 0.2D (D is the diameter of the hyperchromate), the root-mean-square deviation is reduced to 0.29 μm while reducing the linear range to 120 μm .

DEVELOPMENT OF A FIBER CONFOCAL SENSOR WITH INCREASED ENERGY CHARACTERISTICS

To determine the position of optical transparent media, it is necessary to provide increased energy characteristics of the probe radiation. The performed calculation showed that the use of a superluminescent diode SLD-790-14BF (Nolotech, Russia) instead of a halogen lamp will make it possible to increase the signal level from the confocal sensor by a factor of 100. On its basis, a fiber-coupled illuminator was developed. It has an output power of 5 mW and a spectral width of 40 nm (760–800 nm). To decompose such a narrow spectrum into a chromatic section, a diffractive optical element was calculated using the software for calculating optical systems Zemax Optical Studio. Fig. 6–7 show the data of the result of calculation and modeling of such an element. It can be seen that the dependence of the focus shift on the wavelength (Fig. 6) is rather linear (nonlinearity does not exceed 1%), and the spot sizes for radiation with wavelengths of 760, 770, 780, 790, and 800 nm are less than the diffraction limit (Fig. 7).

At the next stage of research, experiments will be carried out to determine the level of the signal reflected from the optically transparent medium in the confocal sensor.

CONCLUSION

As a result of an analysis of the market for commercially available proximity sensors for monitoring the position of the surface of objects, it was found that, despite their variety, they are difficult to integrate into laser technological installations. The requirements for sensors in such installations are formulated, namely: high speed (up to 1 MHz) and resolution (the error should not exceed 0.1 μm), the ability to control the



- Черкашин В. В. Точность изготовления дифракционных оптических элементов лазерными запирающими системами с круговым сканированием. *Компьютерная оптика*. 1997; 17: 63–74.
12. **Shpejzman V. V., Peschanskaya N. N.** Ispol'zovanie interferometricheskogo metoda izmereniya velichiny i skorosti peremeshchenij dlya nerazrushayushchego kontrolya materiala. *Fizika tverdogo tela*. 2007; 49 (7): 1201–1205.
Шпейзман В. В., Песчанская Н. Н. Использование интерферометрического метода измерения величины и скорости перемещений для неразрушающего контроля материала. *Физика твердого тела*. 2007; 49 (7): 1201–1205.
 13. **Lysenko O. N.** Triangulyacionnye datchiki rasstoyaniya. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*. 2006; 11: 13–16.
Лысенко О. Н. Триангуляционные датчики расстояния. *Автоматизация в промышленности*. 2006; 11: 13–16.
 14. **Pruss Ruprecht C., Tiziani H. J., Osten W., Lücke P., Last A., Mohr J., Lehmann P.** Confocal microoptical distance-sensor: principle and design. *Proceedings of SPIE – Optical Measurement Systems for Industrial Inspection*. 2005; 5856: 128–135.
 15. **Tiziani H. J., Wegner M., Steudle D.** Confocal principle for macro- and microscopic surface and defect analysis. *Optical Engineering*. 2000; 39 (1): 32–39.
 16. **Zavialova M. A., Zavialov P. S.** Hyperchromatic Lens for Fiber Confocal Surface Sensors Modeling and Calculation Based on Chromatic Coding Method. *Photonics Russia*. 2017; 5 (65): 80–90. DOI: 10.22184/1993-7296.2017.65.5.80.90.
Завьялова М. А., Завьялов П. С. Моделирование и расчет гиперхроматических объективов для волоконных конфокальных датчиков поверхности на основе метода хроматического кодирования. *Фотоника*. 2017; 5 (65): 80–90. DOI: 10.22184/1993-7296.2017.65.5.80.90.
 17. **Zav'yalova M. A., Zav'yalov P. S., Elesin A. G.** Povyshenie razresheniya volokonnogo konfokal'nogo datchika poverhnosti na osnove metoda hromaticheskogo kodirovaniya. *Priборы*. 2018; 11: 1–5.
Завьялова М. А., Завьялов П. С., Елесин А. Г. Повышение разрешения волоконного конфокального датчика поверхности на основе метода хроматического кодирования. *Приборы*. 2018; 11: 1–5.
 18. **Verhoglyad A. G., Zav'yalova M. A., Knyazev B. A., Makarov M. A., Stupak M. F.** Razrabotka konfokal'nogo datchika 3D poverhnosti na osnove metoda difrakcionnogo hromaticheskogo kodirovaniya dlya celej teragercovoy spektroskopii. *Sibirskij fizicheskij zhurnal*. 2010; 5 (4): 117–122.
Верхогляд А. Г., Завьялова М. А., Князев Б. А., Макаров М. А., Ступак М. Ф. Разработка конфокального датчика 3D поверхности на основе метода дифракционного хроматического кодирования для целей терагерцевой спектроскопии. *Сибирский физический журнал*. 2010; 5 (4): 117–122.

АВТОРЫ

Завьялова Марина Андреевна, к. т. н.; e-mail: mzav@tdisie.nsc.ru; к. т. н., научный сотрудник, Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН (далее – КТИ НП СО РАН), info@tdisie.nsc.ru; www.tdisie.nsc.ru; Новосибирск, Россия. Область интересов: оптоэлектронные приборы и системы, лазерные технологии.
ORCID: 0000-0003-2000-6226

Завьялов Петр Сергеевич, к. т. н.; e-mail: zavyalov@tdisie.nsc.ru; директор КТИ НП СО РАН, www.tdisie.nsc.ru; Новосибирск, Россия. Область интересов: оптоэлектронные приборы и системы, системы технического зрения, дифракционная оптика.
ORCID: 0000-0001-6222-5000

Савченко Марк Владимирович, e-mail: savchenko_mark@bk.ru; инженер-программист, КТИ НП СО РАН, www.tdisie.nsc.ru; Новосибирск, Россия. Область интересов: программирование.

ВКЛАД АВТОРОВ

Завьялова М. А.: расчет дифракционного оптического элемента, концепция эксперимента и проведение измерений, анализ результатов; Завьялов П. С.: организация эксперимента, анализ результатов и обсуждение; Савченко М. В. – проведение измерений, обработка результатов

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Все члены авторского коллектива приняли участие в написании рукописи согласно вкладу каждого в общий эксперимент и анализ полученных результатов. Авторы гарантируют оригинальность результатов и заявляют об отсутствии конфликта интересов.

position of spherical (convex or concave) surfaces, as well as acceptable weight and size characteristics. The most important requirement is the compatibility of the optical circuits of the sensors with the optical circuits of the laser channels.

Research has been carried out on a fiber confocal sensor developed at the TDISIE, SB RAS, which can be part of laser technological complexes and will allow monitoring the position and profile of the surface to be treated. It has been shown that the use of a color video camera as a spectrum analyzer, as well as a refractive-diffractive lens in confocal sensors, makes it possible to determine the position of the controlled surface with an error of up to 0.1 μm .

In the course of experimental studies of a three-lens hyperchromate with an introduced apodizing mask, it was found that the error in determining the position of the controlled surface is 0.2 μm .

The results of calculating a diffractive optical element for monitoring the position of optically transparent media, which allows focusing light from a source with increased energy characteristics and a narrow spectrum, are presented.

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out on the basis of the laboratory of laser industrial technologies of the TDISIE, SB RAS. Financial support was provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

AUTHORS

Marina Andreevna Zavyalova, Candidate of Technical Sciences; e-mail: mzav@tdisie.nsc.ru; Ph.D., Researcher, Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS (hereinafter – TDI SIE, SB RAS), info@tdisie.nsc.ru; www.tdisie.nsc.ru; Novosibirsk, Russia. Area of interest: optoelectronic devices and systems, laser technologies.
ORCID: 0000-0003-2000-6226

Zavyalov Petr Sergeevich, Candidate of Technical Sciences; e-mail: zavyalov@tdisie.nsc.ru; Ph.D., Director of TDI SIE, SB RAS, www.tdisie.nsc.ru; Novosibirsk, Russia. Area of interest: optoelectronic devices and systems, vision systems, diffractive optics.
ORCID: 0000-0001-6222-5000

Savchenko Mark Vladimirovich, e-mail: savchenko_mark@bk.ru; software engineer, TDI SIE, SB RAS, www.tdisie.nsc.ru; Novosibirsk, Russia. Area of interest: programming.

CONTRIBUTION OF AUTHORS

Zavyalova M. A.: calculation of a diffractive optical element, concept of experiment and measurement, analysis of results; Zavyalov P. S.: organization of the experiment, analysis of results and discussion; Savchenko M. V.: measurements, processing of results

CONFLICT OF INTERESTS

All members of the writing team took part in writing the manuscript according to the contribution of each to the general experiment and the analysis of its results. The authors guarantee the originality of the results and declare no conflicts of interest.