



# МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ГИПЕРХРОМАТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТИВОВ ДЛЯ ВОЛОКОННЫХ КОНФОКАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ХРОМАТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ

М.А.Завьялова, [mzav@tdisie.nsc.ru](mailto:mzav@tdisie.nsc.ru),  
П.С.Завьялов, к.т.н.,  
Конструкторско-технологический институт науч-  
ного приборостроения СО РАН

Статья посвящена моделированию и расчету гиперхроматических объективов, составляющих основу конфокальных датчиков поверхности. Сфера применения таких датчиков весьма обширна – датчики позволяют выполнять как прецизионное позиционирование исполнительных элементов для формирования микро- и наноструктур высокого качества с глубиной до нескольких десятков микрон, так и измерение их профиля. В моделировании реализован метод хроматического кодирования. Объективы предназначены для автоматического контроля 3D-поверхностей с высоким разрешением. Представлен рассчитанный, изготовленный и экспериментально апробированный трехлинзовый гиперхроматический объектив с длиной хроматического отрезка 300 мкм и фокусным расстоянием 24 мм. На его основе впервые в России создан прототип конфокального датчика поверхности с погрешностью измерения смещения объекта 0,1 мкм.

## ВВЕДЕНИЕ

Широкое использование микро- и нанотехнологий влечет за собой необходимость разработки и исследования методов и средств для прецизионных измерений сверхмалых расстояний в ходе технологических процессов. В масштабе микронных размеров к настоящему времени сформировалась довольно значимая область промыш-

# HYPERCHROMATIC LENS FOR FIBER CONFOCAL SURFACE SENSORS MODELING AND CALCULATION BASED ON CHROMATIC CODING METHOD

М.А.Завьялова, [mzav@tdisie.nsc.ru](mailto:mzav@tdisie.nsc.ru),  
P.S.Zavialov, Candidate of Technical Sciences  
Design and Technological Institute of Scientific  
Instrumentation SB RAS

The work is devoted to the modeling and calculation of hyperchromatic lenses, which are the basis of confocal surface sensors. The scope of such sensors is very extensive – the sensors allow both precise positioning of the actuating elements for the formation of micro- and high-quality nanostructures with depths up to several tens of micrometers, and measuring their profile. The modeling based on the chromatic coding method for automatic control of 3D surfaces with high resolution. Calculated, manufactured and experimentally tested three-lens hyperchromatic lens with a chromatic length of 300  $\mu\text{m}$  and a focal length of 24 mm are presented. For the first time in Russia, a prototype of a confocal surface sensor was created on its basis, with an error in measuring displacement of an object of 0.1  $\mu\text{m}$ .

## INTRODUCTION

The extensive use of micro- and nanotechnology entails the need for the development and research of methods and tools for precision measurements of ultra-small distances during technological processes. Up to date, a significant area of industry, microsystem one, has been developed at the greater of these two scales. A whole class of sensors has been developed with the accuracy reaching 1  $\mu\text{m}$ . These include such types of sensors as parametric (inductive, capacitive, rheostatic), ultrasound and optical (triangulation, fiber optic) [1]. If referring to metrology, covering an area of sizes from 0.1 to 100 nm, then most methods, with the exception of interferometric ones, are still at the research stage, especially in Russia. Therefore, the task of developing methods for precision measurement of ultra-small distances



ленности – микросистемная. Для нее разработан целый класс датчиков, точность которых достигает 1 мкм. К ним относят такие типы датчиков, как параметрические (индуктивные, емкостные, реостатные), ультразвуковые и оптические (триангуляционные, оптоволоконные) [1]. Если же идет речь о метрологии, охватывающей область размеров от 0,1 до 100 нм, то большинство методов, за исключением интерферометрических, все еще находятся на стадии исследования. Отставание в этой области метрологического обеспечения в России становится заметным. Поэтому разработка методов прецизионного измерения сверхмалых расстояний до трехмерных объектов в наномасштабной области по-прежнему остается актуальной задачей. Прежде всего, такие методы необходимы для систем позиционирования рабочих элементов [2–4] при прецизионной лазерной обработке и исследовании трехмерных микро- и наноструктур различных материалов. Ранее в круговых лазерных записывающих системах, разработанных совместными усилиями КТИ НП и ИАиЭ СО РАН [5], запись информации осуществлялась на плоских поверхностях. Для позиционирования заготовок в зоне наилучшей фокусировки микрообъектива записи использовались триангуляционные методы [4] и видеотехнологии. Однако по мере прогресса в развитии дифракционной оптики, появились задачи формирования гибридных структур, когда профиль дифракционных оптических элементов синтезируется непосредственно на криволинейных поверхностях рефракционных линз [6–8]. Для реализации такой методики потребовались новые подходы к проектированию систем позиционирования, обладающих принципиально новыми возможностями. При работе с плоскими поверхностями основная функция системы автофокусировки – поддержание зазора между рабочим микрообъективом и обрабатываемой поверхностью. В случае записи изображений на трёхмерных поверхностях исполнительные элементы, входящие в состав систем автофокусировки, должны отрабатывать как быстрые малые отклонения поверхности, обусловленные ее движением в угловом направлении, так и медленные, но большие, обусловленные естественной кривизной поверхности при смещении записывающего лазерного пучка в радиальном направлении.

Альтернативными вариантами использования методов контроля поверхностей и сверхточного позиционирования рабочих элементов является создание ближнепольных микроскопов, в которых дифракционный предел может быть преодолен

to three-dimensional objects in the nanoscale area is urgent. First of all, such methods are necessary for systems of working elements positioning [2–4] for precision laser processing and investigation of three-dimensional micro and nanostructures of various materials. Earlier, in circular laser recording systems, developed jointly by Design and Technological Institute of Scientific Instrumentation and Institute of Automation and Electrometry of SB RAS [5], the information was recorded on flat surfaces. Triangulation methods [4] and video technologies were used to position the workpieces in the zone of the best focusing of the recording micro-lens. However, with the progress in the development of diffraction optics, issues of the hybrid structures formation have appeared when the profile of diffractive optical elements was synthesized directly on the curved surfaces of refractive lenses [6–8]. To implement such a method, new approaches to designing positioning systems that have fundamentally new capabilities were needed. While working with flat surfaces, the main function of the auto-focusing system is to maintain a gap between the working micro-lens and the surface to be machined. In the case of recording images on three-dimensional surfaces, the actuating elements that are part of the auto-focusing systems must process both fast small deviations of the surface due to its movement in the angular direction and slow, but larger ones, due to the natural curvature of the surface when the laser recording beam shifts radially.

Alternative options of using surface control methods and precision positioning of the working elements are the creation of near-field microscopes, wherein the diffraction limit can be overcome by introducing into the area of analysis of a special probe where its tip size is many times smaller than the working wavelength. This is especially true for microscopes wherein the source of radiation is a terahertz laser with a wavelength of 20–240 microns, since the long wavelength limits their resolution. In this case, using the methods of 3D surfaces automatic control, it is possible to build a scanning system that allows the position of a subwavelength probe in the region of the evanescent wave propagation with high accuracy, which makes it possible to study micro- and nanostructures in the terahertz range [9].

To develop the technology of laser ablation of optically transparent materials by ultrashort pulses, an important condition is the precise positioning of the samples surface at the focus of the working micro-lens, since the power density has a threshold character and it is necessary to avoid melting the

за счет введения в область анализа специального зонда, размер острия которого во много раз меньше рабочей длины волны. Это особенно актуально для микроскопов, в которых источником излучения служит терагерцовый лазер с длиной волны 20–240 мкм, поскольку большая длина волны ограничивает их разрешающую способность. В этом случае с помощью методов автоматического контроля 3D-поверхностей можно построить сканирующую систему, позволяющую позиционировать субволновой зонд в области распространения эванесцентной волны с высокой точностью, что дает возможность изучить микро- и наноструктуры в терагерцевом диапазоне [9].

Для разработки технологии лазерной абляции оптически прозрачных материалов импульсами сверхкороткой длительности важным условием является прецизионное позиционирование поверхности образцов в фокусе рабочего микроскопического объектива, поскольку плотность мощности носит пороговый характер. В процессе обработки необходимо избегать оплавления краев структур и появления трещин, которые возможны даже при небольшой расфокусировке лазерного пятна (0,2–0,5 мкм). Более того, высокоточное измерение геометрических параметров синтезированных структур позволяет определять экспериментальным путем скорость абляции. Таким образом, актуальной является задача разработки методов автоматического контроля трехмерных поверхностей с высоким разрешением (<1 мкм) в ходе лазерных технологических процессов как во время записи, так и после без съема образца.

### КОНЦЕПЦИЯ КОНФОКАЛЬНОГО ДАТЧИКА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ХРОМАТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ

В настоящее время одним из перспективных методов для измерения сверхмалых дистанций и контроля положения поверхностей является конфокальный метод на основе хроматического кодирования [10, 11]. Основы этого метода заимствованы из конфокальной лазерной сканирующей микроскопии (КЛСМ), которая является одним из наиболее распространенных методов для трехмерного исследования объектов с высоким разрешением. В КЛСМ в плоскости изображения используется специальная точечная (или конфокальная) диафрагма, ограничивающая поток фонового рассеянного света из точек вне фокальной плоскости объектива [12]. Это позволяет получить серии изображений на различных глубинах фокальной пло-

edges of the structures and the formation of cracks that are possible even with a small defocusing of the laser spot (0.2–0.5  $\mu\text{m}$ ). Furthermore, a high-precision measurement of the geometric parameters of synthesized structures makes it possible to determine the rate of ablation experimentally. Thus, the current problem is the development of methods for automatic control of three-dimensional surfaces with high resolution (<1  $\mu\text{m}$ ) during laser technological processes both during and after recording without removing the sample.

### THE CONCEPT OF CONFOCAL SENSOR BASED ON THE CHROMATIC CODING METHOD

Nowadays, a confocal method based on chromatic coding is one of the promising methods for measuring ultra-small distances and controlling the position of surfaces [10, 11]. The fundamentals of this method are borrowed from confocal laser scanning microscopy (CLSM) which is one of the most common methods for three-dimensional studies of high-resolution objects. In CLSM, a special point (or confocal) diaphragm is used in the image plane, which limits the flow of background scattered light from points outside the focal plane of the lens [12]. This allows you to obtain a series of images at different depths of the focal plane inside the sample and then reconstruct its three-dimensional image.

In CLSM, the object is to be scanned along the optical axis. If an enlarged longitudinal chromatic aberration is introduced into the lens of such a microscope, and the reflected signal passed through the confocal diaphragm is measured with a spectral analyzer, then a non-contact surface sensor can be built according to basic scheme shown in Fig. 1. Its distinctive feature is the absence of the need to scan an object along its optical axis.

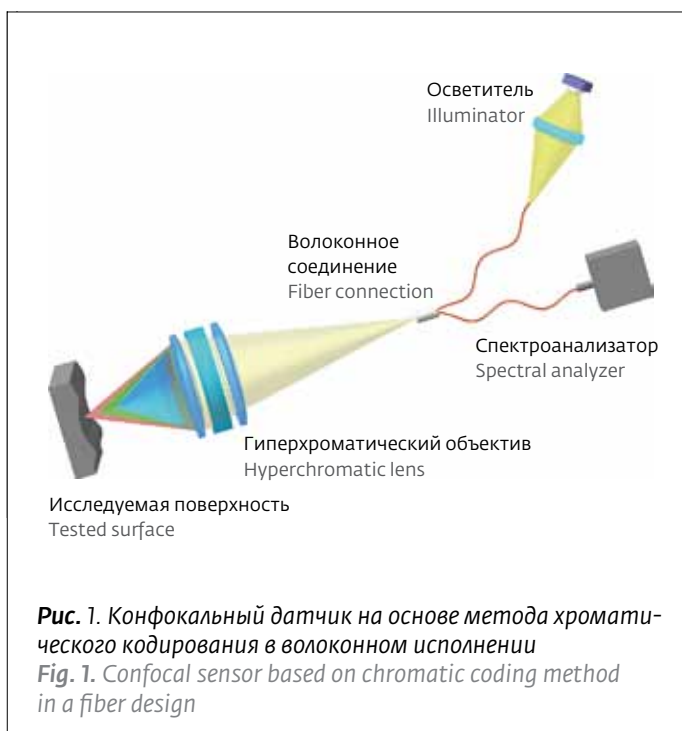
Most often, soldered multimode fibers are used in confocal sensors to reduce the size of the measuring head and carrying the lighting and receiving part beyond the measurement area. In Fig. 1, the light from the white light source is collected into an optical fiber and sent to a hyperchromatic lens (HCL), which is used to form an increased longitudinal chromatic aberration. Since the HCL focal length depends on the wavelength, the light is transformed into a line of spectrally separated foci. Only one of the foci coincides with the plane of the surface under investigation. The reflected light passes through the HCL for a second time and is collected back into the fiber. Furthermore, the light from the focal plane is focused on the fiber end coinciding with the surface

скости внутри образца и затем реконструировать его трехмерное изображение.

В КЛСМ требуется сканирование объекта вдоль оптической оси. Если же в объектив такого микроскопа ввести увеличенную продольную хроматическую aberrацию, а отраженный сигнал, прошедший через конфокальную диафрагму, измерить с помощью спектроанализатора, то можно построить бесконтактный датчик поверхности, базовая схема которого приведена на рис.1. Его отличительная особенность – отсутствие необходимости сканирования объекта вдоль оптической оси.

Чаще всего в конфокальных датчиках используются спаенные многомодовые волокна с целью уменьшения размера измерительной головки и выноса осветительной и приемной части за пределы измерительной области. На рис.1 свет от источника белого света собирается в оптическое волокно и направляется на гиперхроматический объектив (ГХО), который используется для формирования увеличенной продольной хроматической aberrации. Так как фокусное расстояние ГХО зависит от длины волны, свет трансформируется в линию спектрально разделенных фокусов. Только один из фокусов совпадает с плоскостью исследуемой поверхности. Отраженный свет проходит ГХО второй раз и собирается назад в волокно. При этом на торец волокна фокусируется свет от фокальной плоскости, совпадающей с поверхностью объекта. Свет от остальных плоскостей подвергается дефокусировке и сильному ослаблению. Спектральное распределение сигнала с волокна регистрируется на спектроанализаторе. По изменению доминирующей длины волны отраженного сигнала смещение объекта определяется автоматически [10, 13].

Для реализации ГХО обычно используют оптические схемы, основанные на комбинации стандартных оптических элементов с дифракционными [14], а также перенастраиваемых жидко-



of the object. The light from the remaining planes undergoes defocusing and strong attenuation. The spectral distribution of the signal from the fiber is recorded by the spectral analyzer. By changing the dominant wavelength of the reflected signal, the object's displacement is determined automatically [10, 13].

To implement the HCL, optical circuits based on a combination of standard optical elements with diffraction [14] and also reconfigurable liquid crystal lenses [15] are usually used. A video camera [16], a spectrometer [17], as well as multielement RGB-diodes [11] can be used as spectral analyzers. The source of radiation is a white light lamp: halogen, xenon, light-emitting diode, etc. In the next section, we shall discuss the methods for calculating the HCL in more details.



кристаллических линз [15]. В качестве спектроанализаторов могут использоваться видеокамера [16], спектрометр [17], а также многоэлементные RGB-диоды [11]. Источником излучения служат лампы белого света: галогеновые, ксеноновые, светодиодные и др. В следующем разделе остановимся подробнее на методах расчета ГХО.

## РАСЧЕТ ГИПЕРХРОМАТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТИВОВ

Как было показано выше, ключевым элементом оптической схемы хроматического конфокального датчика является объектив с существенно увеличенным хроматизмом положения ГХО. Одним из простых подходов к созданию таких объективов является использование дифракционных линз совместно с обычным рефракционным объективом или без него. В работе [14, 16] описаны рефракционно-дифракционные объективы, позволяющие фокусировать белый свет в хроматические отрезки различной длины в зависимости от требований специфических применений. Основные преимущества данных объективов – простота реализации, улучшенные массо-габаритные показатели и линейная зависимость смещения фокуса от длины волны. Однако данный подход обладает некоторыми недостатками: в первую очередь наличием паразитных дифракционных порядков, а также же низкой эффективностью на краях диапазона длин волн (400–700 нм). Расчет и проектирование гиперхроматических объективов, основанных на комбинации стекол с различной дисперсией, является предпочтительным.

Как известно, хроматизм положения в линзовых системах возникает вследствие зависимости показателя преломления используемых стекол от длины волны  $n(\lambda)$ . Так для одиночной линзы с фокусным расстоянием  $f$  изменение  $\Delta f$  описывается формулой:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{v},$$

где  $v = \frac{n_D}{n_F - n_C}$  – число Аббе,  $n_D$ ,  $n_F$ ,  $n_C$  – показатели

преломления среды на длинах волн, соответствующих фраунгоферовым линиям C (656,3 нм), D (589,2 нм) и F (486,1 нм). Для современных опти-

ческих стекол возможно достижение  $\frac{\Delta f}{f}$  вплоть

до 4,9% (сверхтяжелый флинт СТФ2 из отечественного каталога ГОСТ 3514–94 или стекло SF66 из ката-

## CALCULATION OF HYPERCHROMATIC LENSES

As it was shown above, the key element of the optical scheme of the chromatic confocal sensor is the lens with significantly increased chromaticity of the HCL position. One of the simplest approaches to the creation of such lenses is the use of diffraction lenses in conjunction with or without a conventional refractive lens. Refractive-diffraction lenses are described in [14, 16], which allow you to focus white light in chromatic segments of different length, depending on the requirements of specific applications. The main advantages of these lenses are the ease of implementation, improved mass-dimensional parameters and linear dependence of the focus shift on the wavelength. However, this approach has some drawbacks: first of all, the presence of parasitic diffraction orders, as well as low efficiency at the edges of the wavelength range (400–700 nm). Calculation and design of hyperchromatic lenses based on a combination of glasses with different variances is preferable.

Obviously, the chromaticity of position in lens systems arises from the dependence of the refractive index of the glasses used on the wavelength  $n(\lambda)$ . Thus, for a single lens with a focal length  $f$ , the change  $\Delta f$  is described by the formula:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{v},$$

Where  $v = \frac{n_D}{n_F - n_C}$  is the Abbe number,  $n_D$ ,  $n_F$ ,  $n_C$

are the refractive indices of the medium at the wavelengths corresponding to the Fraunhofer lines C (656.3 nm), D (589.2 nm) and F (486.1 nm). For

modern optical glasses, it is possible to achieve  $\frac{\Delta f}{f}$

up to 4.9% (superheavy lead glass STF2 from the domestic catalog GOST 3514–94 or glass SF66 from the Schott catalog). With the extension of the wavelength range to 400 ÷ 700 nm, the relative change in the focal length is already 12%. It can be seen that the use of glass dispersion helps to achieve significant values of the position chromaticity. However, the use of the same brand of glass has a significant disadvantage, i.e., a strong nonlinearity of the dependence of the focal length on the wavelength  $f(\lambda)$ . Thus, for a single lens such a relationship is expressed as:

$$f(\lambda) = [(n(\lambda) - 1)(\rho_1 - \rho_2)]^{-1}.$$

лога Schott). При расширении диапазона длин волн до 400÷700 нм относительное изменение фокусного расстояния достигает уже 12%. Видно, что использованием дисперсии стекол можно достичь значительных величин хроматизма положения. Однако использование стекол одной марки имеет значительный недостаток – сильную нелинейную зависимость фокусного расстояния от длины волны  $f(\lambda)$ . Так для одиночной линзы такая зависимость будет иметь вид:

$$f(\lambda) = [(n(\lambda) - 1)(\rho_1 - \rho_2)]^{-1},$$

где  $\rho_1, \rho_2$  – кривизны поверхностей линзы,  $n(\lambda)$  – зависимость показателя преломления от длины волны. Эта зависимость обычно описывается эмпирическими формулами или Шотта [18]:

$$n(\lambda)^2 = a_0 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda^{-2} + a_3\lambda^{-4} + a_4\lambda^{-6} + a_5\lambda^{-8},$$

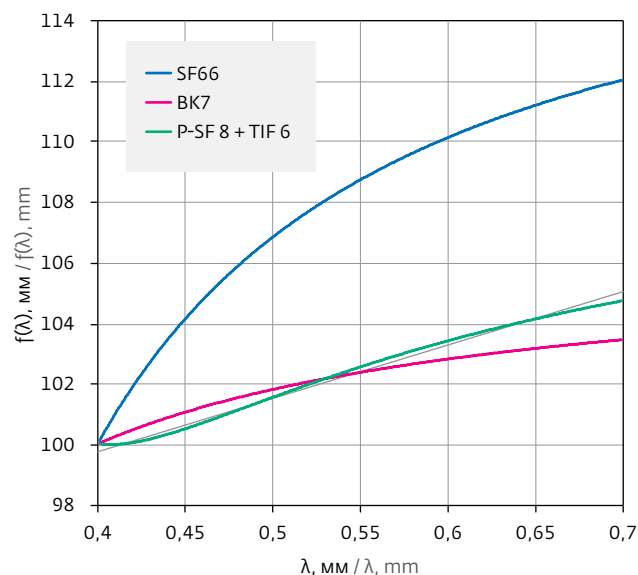
или Селмейера [18]:

$$n(\lambda)^2 - 1 = \frac{K_1\lambda^2}{\lambda^2 - L_1} + \frac{K_2\lambda^2}{\lambda^2 - L_2} + \frac{K_3\lambda^2}{\lambda^2 - L_3},$$

где  $a_i, K_i, L_i$  – коэффициенты, найденные эмпирически для каждого из материалов (приводятся в каталогах производителей оптических стекол).

На рис.2 представлены графики зависимостей фокусных расстояний линз из различных стекол от длины волны.

Из представленных графиков видно, что зависимости  $f(\lambda)$  одиночных линз имеют большую нелинейность до 20% (производные функций на краях диапазона различаются в 4–7 раз). Очевидно, что использование одной марки стекла при разработке ГХО возможно только при существенном ограничении используемого спектрального диапазона, что не является предпочтительным с точки зрения энергетики оптической системы.



**Рис.2.** Зависимости фокусных расстояний от длины для различных стекол: крон BK7 (аналог отечественного К8), сверхтяжелый флинт SF66, склейка P-SF8 + TIF6

**Fig. 2.** Dependences of the focal lengths for different glasses: crown glass BK7 (analogue of the domestic K8 glass), superheavy lead glass SF66, bonding P-SF8 + TIF6

$\rho_1, \rho_2$  are the curvatures of the lens surfaces,  $n(\lambda)$  is the dependence of the refractive index on the wavelength, which is usually described by empirical formulas of Schott [18]:

$$n(\lambda)^2 = a_0 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda^{-2} + a_3\lambda^{-4} + a_4\lambda^{-6} + a_5\lambda^{-8},$$

or Selmeyer [18]:

$$n(\lambda)^2 - 1 = \frac{K_1\lambda^2}{\lambda^2 - L_1} + \frac{K_2\lambda^2}{\lambda^2 - L_2} + \frac{K_3\lambda^2}{\lambda^2 - L_3},$$

Задача расчета ГХО для получения линейной (или близкой к ней) зависимости  $f(\lambda)$  близка к задаче расчета ахроматических объективов, где стремятся минимизировать изменения фокусного расстояния или заднего отрезка  $S'_F$  от длины волны:

$$\frac{df(\lambda)}{d\lambda} \rightarrow 0.$$

В задаче расчета ГХО, наоборот, стремятся получить значительное изменение, но оно должно быть постоянным в рабочем диапазоне длин волн  $\Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}$ :

$$\frac{df(\lambda)}{d\lambda} \rightarrow \frac{\Delta z}{\Delta\lambda},$$

где  $\Delta z$  – длина хроматического отрезка.

Покажем на примере расчета склейки двух линз, как можно добиться увеличения линейности  $f(\lambda)$ . В приближении тонких компонентов оптические силы линз в склейке складываются согласно свойству аддитивности:

$$\frac{1}{f(\lambda)} = \frac{1}{f_1(\lambda)} + \frac{1}{f_2(\lambda)}.$$

Подбирая марки материалов  $n_1(\lambda)$  и  $n_2(\lambda)$ , а также соотношение радиусов кривизны линз, можно добиться значительного увеличения линейности. На рис.2 представлен график зависимости  $f(\lambda)$  для склейки из стекол P-SF8 и TIF6. Итак, для склейки можно получить функцию, достаточно близкую к линейной зависимость  $f(\lambda)$  (нелинейность снижается до 6%). Для датчиков, работающих в режиме измерения расстояний, как правило, требуется нелинейность менее 1%. Таких значений можно добиться только в более сложных оптических схемах ГХО с использованием трех – четырех линз и, как минимум, трех марок оптических материалов.

При расчете ГХО помимо линейности диапазона также необходимо добиваться минимизации сферической aberrации и сферохроматизма (зависимости сферической aberrации от длины волны). Сферохроматизм особенно проявляется при расчете ГХО с большим рабочим диапазоном ( $\frac{\Delta f}{f} > 5\%$ ).

Если качество пятен рассеяния во всем диапазоне  $\Delta\lambda$  будет близко к дифракционному пределу, то будут минимизированы потери света при обратном ходе лучей от объекта к волокну, а также не произойдет ухудшения поперечного разрешения в плоскости объекта.

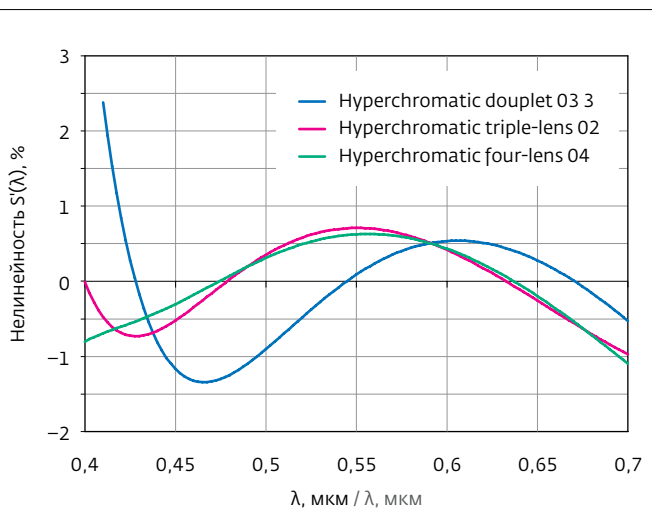


Рис.3. Отклонения от линейной составляющей графика зависимости смещения фокуса от длины волны  
Fig. 3. Deviations from the linear component of the diagram of the dependence of the displacement of the focus on the wavelength

where  $a_i$ ,  $K_i$ ,  $L_i$  are the coefficients found empirically for each of the materials (given in the catalogs of optical glass manufacturers).

Fig. 2 shows the diagrams of dependence of the focal lengths of lenses of different glasses on the wavelength.

It is seen from the presented diagrams that the dependences  $f(\lambda)$  of single lenses have a large nonlinearity up to 20% (the derivatives of functions at the edge of the range differ by 4-7 times). It is obvious that the use of a single brand of glass in the HCL development is possible only with a significant limitation of the used spectral range, which is not preferable primarily from the point of view of the energy of the optical system.

The problem of the HCL calculating for obtaining a linear (or close) dependence  $f(\lambda)$  is close to the problem of calculating achromatic objectives, where they tend to minimize changes in the focal length or the back segment  $S'_F$  of the wavelength:

$$\frac{df(\lambda)}{d\lambda} \rightarrow 0.$$

In the task of the HCL calculation, on the contrary, we tend to obtain a significant change, but it must be constant in the operating wavelength range  $\Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}$ :

$$\frac{df(\lambda)}{d\lambda} \rightarrow \frac{\Delta z}{\Delta\lambda},$$

where  $\Delta z$  is the length of the chromatic segment.

Еще одним важным аспектом при расчете ГХО является выбор апертуры объектива как со стороны оптоволокна, так и со стороны объекта. С целью уменьшения потерь энергии входная апертура объектива  $NA_{вх}$  должна быть близка к числовой апертуре использующегося волокна:  $NA_{вх} \approx NA_{вол}$ . Выходная же апертура выбирается исходя из дифракционного разрешения объектива вдоль оптической оси, которое должно быть значительно меньше рабочего отрезка, то есть должно выполняться следующее условие:

$$\eta = \frac{\Delta z}{\Delta z_{diff}},$$

где  $\Delta z_{diff}$  – дифракционно-ограниченная глубина резкости ГХО, а  $K$  – диафрагменное число.

Большие значения легко достичь простым масштабированием (увеличением) оптических схем ГХО. Однако в этом случае ухудшаются энергетические характеристики датчика, так как на фото-



a)

б)

**Рис.4.** Основные элементы конфокального датчика на основе метода хроматического кодирования: а) трехлинзовый гиперхроматический объектив; б) измерительная головка


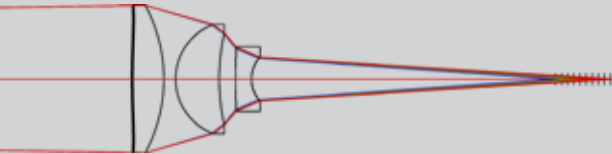
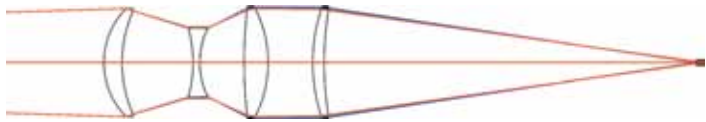
**Fig. 4.** Main elements of the confocal sensor based on the chromatic coding method: a) three-lens hyperchromatic lens; B) measuring head

Let us show, for example, the calculation of two lenses bonding, how one can achieve an increase in the linearity of  $f(\lambda)$ . In the approximation of thin components, the optical forces of the lenses in the bonding are added according to the additivity property:



Варианты оптических схем гиперхроматических объективов для формирования продольной хроматической аберрации: а) ГХО-склейка, б) трехлинзовый ГХО, в) четырехлинзовый ГХО

Options of optical schemes of hyperchromatic lenses for the formation of longitudinal chromatic aberration: а) HCL-bonding; б) three-lens HCL; в) four-lens HCL

а)		$\frac{\Delta z}{f} = 5\%; K = 9;$ линейность 2,5%; стекла: SF3, LAK10 linearity 2,5%; illuminator: SF3, LAK10
б)		$\frac{\Delta z}{f} = 10\%; K = 7;$ линейность 1%; стекла: KZFS2, FK5, LASF35 linearity 1%; illuminator: KZFS2, FK5, LASF35
в)		$\frac{\Delta z}{f} = 2,5\%; K = 3,4;$ линейность 1,1%; стекла: LAK31, SF6HT, SF11 linearity 1,1%; illuminator: LAK31, SF6HT, SF11

приемник попадает все менее узкий участок спектра. Поэтому на практике соотношение достигает значений 5÷30.

С учетом описанных выше подходов и требований к ГХО, был рассчитан ряд оптических схем объективов для диапазона длин волн 0,4–0,7 мкм. Оптические схемы ГХО и их основные характеристики представлены в табл. 1 для ГХО-склейки (а), трехлинзового ГХО (б), четырехлинзового ГХО (в). Жирными линиями отмечены асферические поверхности. На рис.3 представлен ход кривых  $S'(\lambda)$  за вычетом линейной составляющей.

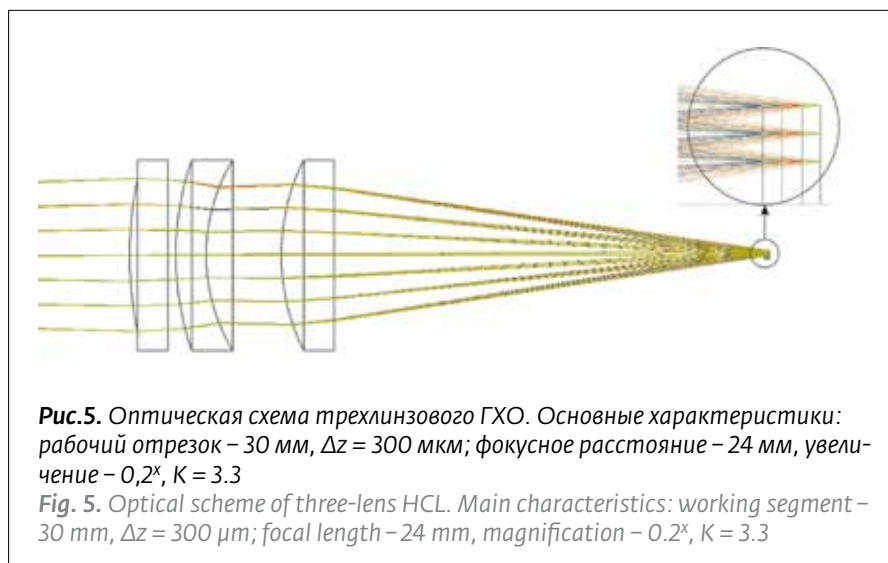
## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ

В КТИ НП СО РАН был рассчитан и изготовлен трехлинзовый ГХО с длиной хроматического отрезка 300 мкм. Его внешний вид представлен на рис.4а.

На основе ГХО впервые в России создан и уже получил экспериментальную апробацию прототип конфокального датчика на основе хроматического кодирования в волоконном исполнении. На рис.4б представлен его внешний вид. Оптическая схема датчика подробно описана в [16]. Отличием в схеме из предыдущей работы авторов является использование трехлинзового ГХО вместо гибридного дифракционно-реф-

$$\frac{1}{f(\lambda)} = \frac{1}{f_1(\lambda)} + \frac{1}{f_2(\lambda)}.$$

Selecting the material brands  $n_1(\lambda)$  and  $n_2(\lambda)$ , as well as the ratio of the radii of curvature of the lens, one can achieve a significant increase in linearity. Thus, Fig. 2 shows a diagram of the  $f(\lambda)$  dependence for the bonding of P-SF8 and TIF6 glasses. Obviously, it is possible to obtain a function sufficiently close to the linear dependence  $f(\lambda)$  (the nonlinearity is reduced to 6%) for the bonding. For sensors operating in the distance measurement mode, as a rule, a nonlinearity of less than 1% is required. Such values can be achieved only in more complex optical schemes



рационного объектива. Отдельные линзы ГХО изготовлены из доступных отечественных стёкол двух марок: ТФ10 и К8. Оптическая схема ГХО и его основные характеристики представлены на рис.5. При использовании камеры в качестве спектроанализатора получена погрешность измерения расстояния до поверхности 0,1 мкм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе представлены основные схемы гиперхроматических объективов и проанализированы их основные характеристики. Рассчитан и экспериментально апробирован трехлинзовый гиперхроматический объектив с длиной хроматического отрезка 300 мкм. Впервые в России разработан прототип конфокального датчика поверхности с хроматическим кодированием в волоконном исполнении, которое позволяет вынести за пределы измерительной области источник и спектроанализатор. Погрешность измерения смещения объекта удалось уменьшить до 0,1 мкм. Данный датчик может применяться в лазерных системах для прецизионного позиционирования рабочих элементов над обрабатываемой поверхностью во время микро- и наноструктурирования, а затем – для профилирования и восстановления ее 3D формы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Инженерные основы измерений нанометровой точности /Под ред. Р.Лич – Долгопрудный: Издательский Дом "Интеллект", 2012.
2. **J.Luo, Y.Liang, G.Yang.** Dynamic scan detection of focal spot on nonplanar surfaces: theoretical analysis and realization. – Optical Engineering 50(7), 073601 (July 2011).
3. **Ruprecht, C.Pruss, H.J.Tiziani, W.Osten, P.Lücke, A.Last, J.Mohr, P.Lehmann.** Optical Measurement Systems for Industrial inspection: confocal microoptical distance-sensor: principle and design. – SPIE Proceedings, 2005, v.5856, p.128–135.
4. **H.J.Tiziani, M.Wegner, D.Steudle,** Confocal principle for macro- and microscopic surface and defect analysis. – Opt. Eng., 2000, v.39, № 1, p.32–39.
5. **Кириянов В.П., Кириянов А.В., Корольков В.П.** Лазерные генераторы изображений с круговым сканированием: новые возможности традиционных направлений. В кн. Опτικο-информационные измерительные и лазерные технологии и системы: Юбилейный сборник избранных трудов КТИ НП СО РАН /Под ред. Ю. В.Чугуй. – Новосибирск: Академическое изд-во "Гео", 2012, с. 184–216.
6. **U.D.Zeitner, and P.Dannberg.** Double-sided hybrid microoptical elements combining functions of multistage optical systems. – Proc. SPIE, 2001, v.4440/ Lithographic and Micromachining Techniques for Optical Component Fabrication, p. 44–50.
7. **T.Stone and N.George.** Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats. – Appl. Opt., 1988, v.27, p.2960–2971.

using three or four lenses and at least 3 brands of optical materials.

When calculating the HCL, in addition to the linearity of the range, it is also necessary to minimize spherical aberrations and spherochromatism (the dependence of the spherical aberration on the wavelength). Spherochromatism is especially pronounced when calculating the HCL with a large

operating range ( $\frac{\Delta f}{f} > 5\%$ ). If the quality of the

scattering spots in the whole range of  $\Delta\lambda$  is close to the diffraction limit, light losses in the backward path of the beams from the object to the fiber will be minimized, and also the transverse resolution in the object plane will not deteriorate.

Another important aspect in the calculation of the HCL is the choice of the lens aperture, both from the fiber side and from the object side. In order to reduce energy losses, the input aperture of the objective  $NA_{input}$  should be close to the numerical aperture of the used fiber:  $NA_{input} \approx NA_{fiber}$ . The output aperture should be selected based on the diffraction resolution of the lens along the optical axis, which should be much smaller than the working segment, i.e., the following condition must be satisfied:

$$\eta = \frac{\Delta z}{\Delta z_{diff.}},$$

where  $\Delta z_{diff.}$  is the diffraction limited depth of the HCL field:, where K is the diaphragm number.

The larger values are easily achieved by simply scaling (increasing) the HCL optical schemes. However, the energy characteristics of the sensor deteriorate in this case, since the photodetector receives an increasingly narrow portion of the spectrum. Therefore, in practice, the ratio reaches values of  $5 \div 30$ .

Using the above approaches and requirements for HCL, a number of optical schemes of lenses for a wavelength range of 0.4–0.7  $\mu\text{m}$  were calculated. The HCL optical schemes and their main characteristics are given in Table 1 for the HCL-bonding (a), the three-lens HCL (b), the four-lens HCL (c). Aspherical surfaces are marked with bold lines. Fig. 3 shows the run of the curves  $S'(\lambda)$  minus the linear component.

## EXPERIMENTAL APPROBATION

Three-lens HCL with a chromatic length of 300  $\mu\text{m}$  was calculated and manufactured at the Design and Technological Institute of Scientific Instrumentation SB RAS. Physical configuration is shown in Fig. 4a.