

Гиперхроматические элементы для волоконных конфокальных измерительных систем

М. А. Завьялова¹, П. С. Завьялов^{1,2}, Д. А. Коверзнев^{1,2}, Д. Р. Хакимов¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, Россия

Для измерения смещений и микропрофиля поверхности с малым коэффициентом отражения предложена концепция волоконной конфокальной системы на основе суперлюминесцентного диода (ширина спектра 40 нм) и гибридного гиперхроматического объектива (ГХО). Смещение и перепад высот объекта в такой системе определяется измерением спектра отраженного от поверхности излучения с выделением доминирующей длины волны. В результате программного моделирования показано, что ошибка волнового фронта, формируемого ГХО, не должна превышать $\Delta W \leq \lambda/10$. Теоретически и экспериментально показано, что в ГХО при использовании линз с различным фокусным расстоянием возможна компенсация сферической аберрации путем изменения расстояния между дифракционным оптическим элементом и одиночной линзой. Разработанная система имеет чувствительность к смещениям образца из прозрачного стекла 0,1 мкм и менее.

Ключевые слова: Оптика, Дифракционные оптические элементы, Гиперхроматические объективы, Конфокальный метод, Метод хроматического кодирования.

Цитирование: Завьялова, М. А. Гиперхроматические элементы для волоконных конфокальных измерительных систем / М. А. Завьялова, П. С. Завьялов, Д. А. Коверзнев, Д. Р. Хакимов // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 273–280.

Введение

Волоконные конфокальные измерительные системы (далее – ВКИС) на основе хроматического кодирования являются бесконтактными устройствами для высокоточных измерений. Их ключевой особенностью является использование дисперсионных или дифракционных свойств оптических элементов, когда фокусировка света осуществляется не в одной точке, а с разделением по длине волны на разных расстояниях. Так, при использовании дифракционного оптического элемента (далее – ДОЭ) фокус для света с более короткими длинами волн находится на большем расстоянии от элемента чем фокус более длинноволновой части спектра. Этот принцип позволяет кодировать разные расстояния до поверхности разным цветом. ВКИС тчик не требует какого-либо сканирования вдоль оптической оси благодаря увеличенному по сравнению с глубиной фокуса диапазону измерения. Для пространственного ограничения фокусировки в области изображения используется конфокальный метод, при котором происходит фильтрация отраженного света диафрагмой с малым диаметром, а в случае волоконного исполнения ВКИС – торцом волокна.

Концепции построения ВКИС с использованием многомодового волоконно-оптического ответвителя, различных источников излучения и гиперхроматических элементов встречаются в научной литературе довольно часто [1, 2]. Кроме того, в более ранних работах авторов [3, 4] описаны различные модификации таких систем и исследованы их точностные характеристики. Целью настоящего исследования является разработка ВКИС для измерения смещений и микропрофилирования поверхности оптических прозрачных сред с малым коэффициентом отражения.

В данной работе в качестве источника света использовался волоконный суперлюминесцентный светодиод [5], который позволяет существенно увеличить уровень сигнала по сравнению с обычно используемой галогенной лампой. Для такого источника был рассчитан гиперхроматический объектив (ГХО), в котором в качестве спектрального элемента используется ДОЭ. Суперлюминесцентные светодиоды имеют ширину спектра около $\Delta\lambda = 20 - 40$ нм, поэтому применение дифракционной оптики для таких источников света является практически единственным вариантом создания ГХО с протяженным хроматическим участком Δz .

1. Расчет гиперхроматического объектива

Как известно, для одиночного ДОЭ с фокусным расстоянием f' справедливо следующее соотношение:

$$\frac{\Delta z}{f'} \approx \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad (1)$$

Из этого соотношения следует, что в случае использования суперлюминесцентного светодиода а с $\lambda = 780 \pm 20$ нм можно получить хроматический отрезок порядка 5 % от f' .

Недостатком использования одиночного ДОЭ является то, что регулировать хроматический участок Δz (а значит и диапазон измерения) можно только изменением фокусного расстояния ДОЭ, а это не всегда удобно, так как при этом также необходимо изменять апертуру ДОЭ и габариты всей ВКИС. Поэтому совместно с ДОЭ можно использовать одиночные линзы с разными фокусными расстояниями f'_l . При этом линза ввиду того, что спектральный диапазон достаточно мал $\Delta\lambda \sim 20 - 40$ нм, не вносит существенных искажений в спектральное разложение, так как хроматизм ДОЭ существенно выше хроматизма линзы. Оптическая сила всего ГХО:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_{\text{ДОЭ}}} + \frac{1}{f'_l} \quad (2)$$

Ниже приведен пример расчет такого гибридного ГХО, в котором для сжатия спектрального отрезка используется простая плоско-выпуклая линза с $f'_l = 22$ мм. Общее фокусное расстояние: $f' = 12$ мм, хроматический отрезок $\Delta z = 300$ мкм.

Существенно, что расчет ДОЭ для гибридного объектива велся с учетом сферической aberrации одиночной линзы. В фазовую функцию ДОЭ вносилась добавка, компенсирующая сферическую aberrацию линзы ΔW_s .

Наличие сферической aberrации приводит к тому, что для одной и той же длины волны лучи из центральной и краевой частей объектива фокусируются в разных точках на оптической оси. Таким образом нарушается принцип конфокальности (отсутствует острая фокусировка). Спектральный сигнал на спектрометре будет значительно расширяться, что приведет к снижению чувствительности измерений.

На рисунке 1 приведены рассчитанные спектральные сигналы ВКИС при разных значениях некомпенсированной сферической aberrации ΔW_s .

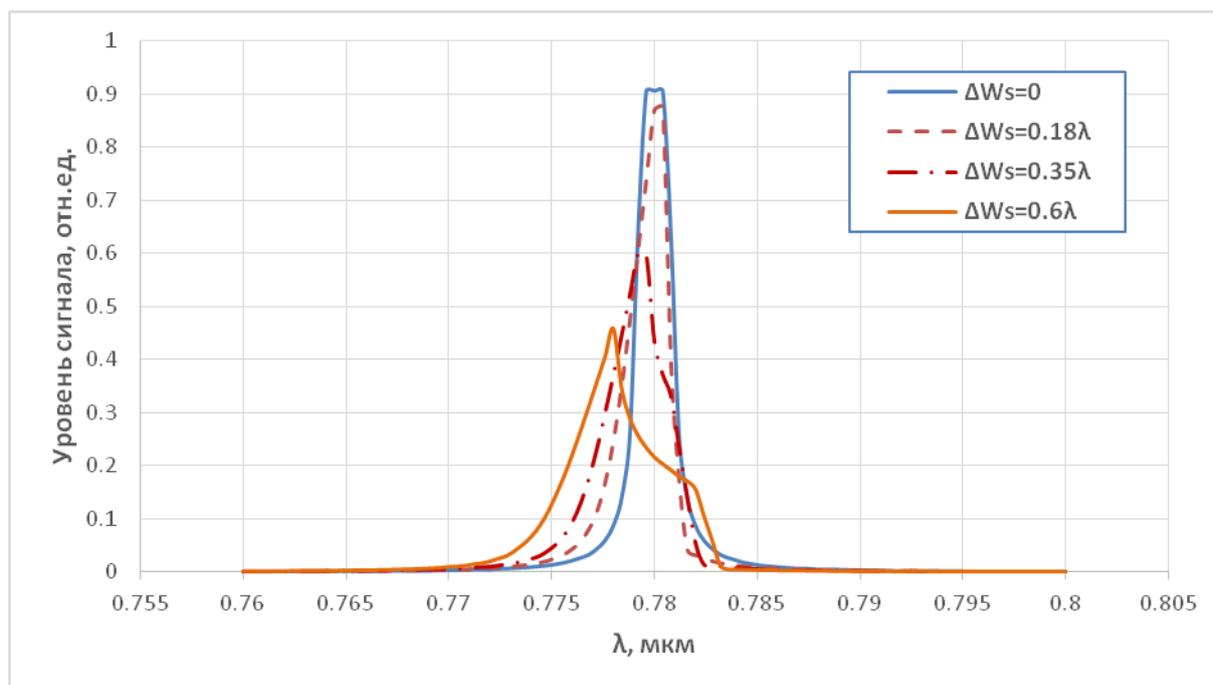


Рис. 1. Результаты моделирования спектральных сигналов волоконной конфокальной измерительной системы при наличии сферической aberrации ΔW_s

Как можно видеть из графиков на рисунке 1 помимо значительного уширения спектрального пика сферическая aberrация также приводит к его асимметрии, что может негативно сказаться на точности измерений. Асимметрия появляется даже при $\Delta W_s = 0,18\lambda$, тогда как уровень компенсации $\Delta W_s \leq \lambda/4$ считается достаточным для большинства оптических систем. Столь значительное влияние aberrаций объясняется двойным прохождением света через ГХО. При этом происходит мультиплицирование даже незначительных aberrационных искажений. Таким образом, в результате моделирования установлено, что при проектировании ВКИС следует устанавливать жесткие требования к качеству оптических элементов: ошибка волнового фронта должна быть не более $\Delta W \leq \lambda/10$.

Для достижения оптимальных характеристик ВКИС необходимо точное согласование волновых фронтов линзы и ДОЭ с целью сведения сферической aberrации к нулю. Это обстоятельство ограничивает применение различных линз с одним и тем же ДОЭ (лучше использовать линзу с параметрами, которые использовались при расчете ДОЭ).

Однако в процессе моделирования было установлено, что имеется возможность варьировать параметры используемых линз в некоторых пределах. Например, при использовании также плоско-выпуклой линзы, но с большим фокусным расстоянием, чем использовалось при расчете, можно достичь компенсации сферической aberrации путём изменения расстояния между линзой и ДОЭ. На рисунке 2 показано как при этом меняется спектральный сигнал с ВКИС. Видно, что в некоторой оптимальной точке сигнал становится симметричным и узким, т.е. здесь достигается компенсация сферической aberrации.

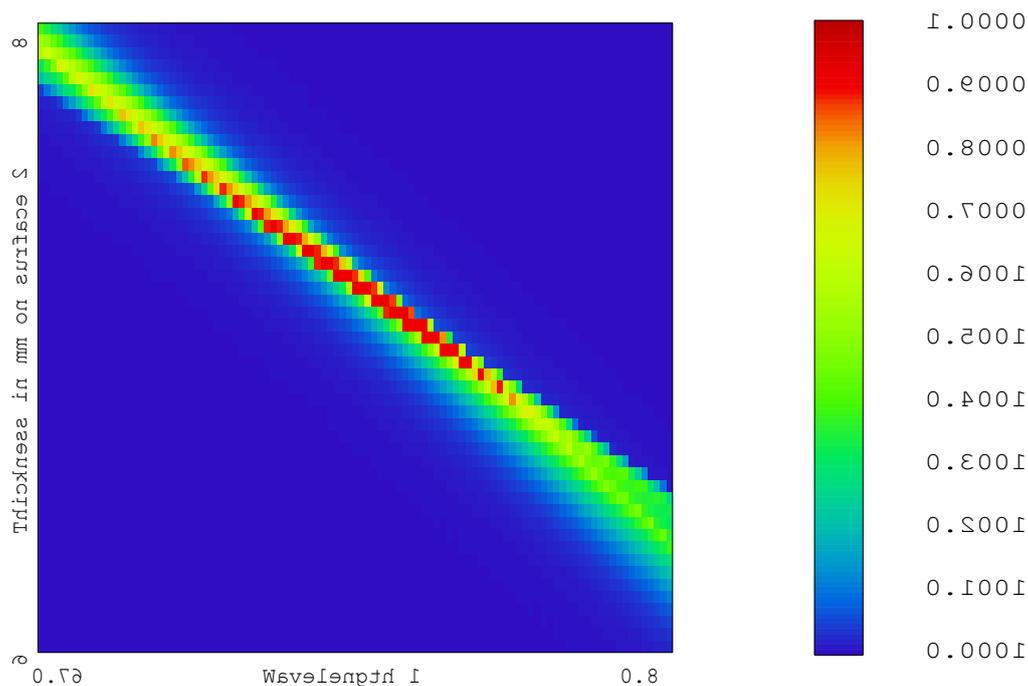


Рис. 2. Результаты моделирования спектрального сигнала волоконной конфокальной измерительной системы при изменении расстояния между линзой и ДОЭ

Таким образом показано, что путём замены линз имеется возможность изменения диапазона измерения Δz ВКИС даже при использовании одного ДОЭ.

2. Результаты экспериментальных исследований

Для проведения исследований ВКИС был спроектирован и настроен экспериментальный стенд, схема которого приведена на рисунке 3.

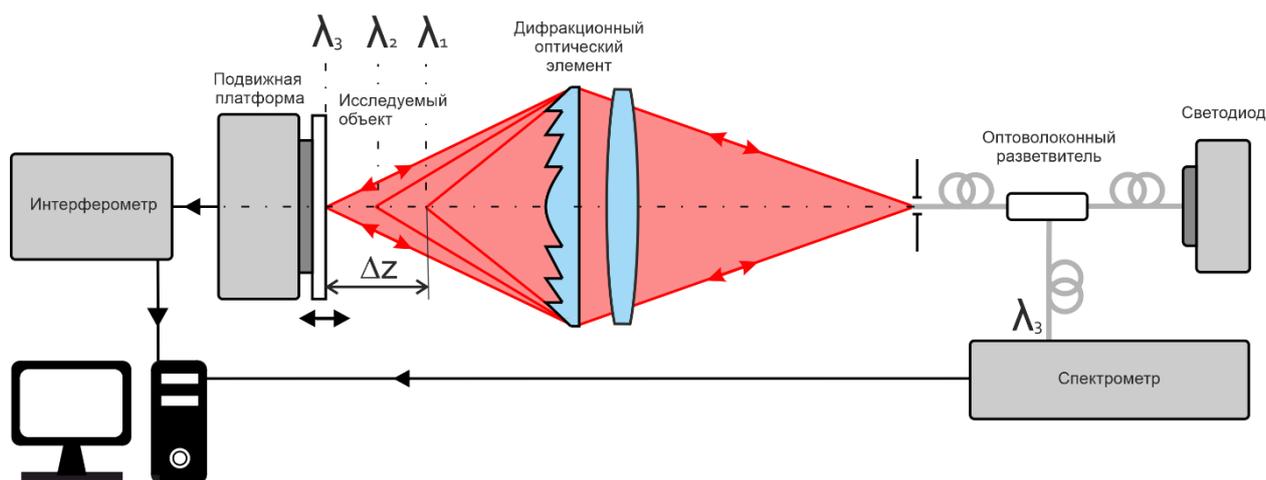


Рис. 3. Оптическая схема волоконной конфокальной измерительной системы на основе метода хроматического кодирования

В качестве осветителя используется суперлюминесцентный диод SLD-790-14BF (Nolatech, Россия). ГХО состоит из ДОЭ, изготовленного на круговой лазерной записывающей системе [6] (АО «Новосибирский приборостроительный завод), и одиночной линзы с фокусным расстоянием 36 мм. Исследуемый объект смещается с помощью подвижной платформы, в состав которой входит трехкоординатный столик ZSS 33.200.1.2 (Phytron, Германия). Спектр отраженного излучения вводится через волоконный ответвитель в спектрометр QwaveVIS (RGB Lasersystems, Germany) и далее анализируется в специальном программном обеспечении.

В ходе эксперимента было определено оптимальное расстояние между ДОЭ и одиночной линзой, при котором сферическая aberrация сводилась к нулю, а ширина спектра отраженного от объекта света уменьшалась до своего оптимального значения таким образом, как показано на рисунке 4. При такой настройке чувствительность схемы ВКИС к смещениям образца составляет 0,1 мкм и менее.

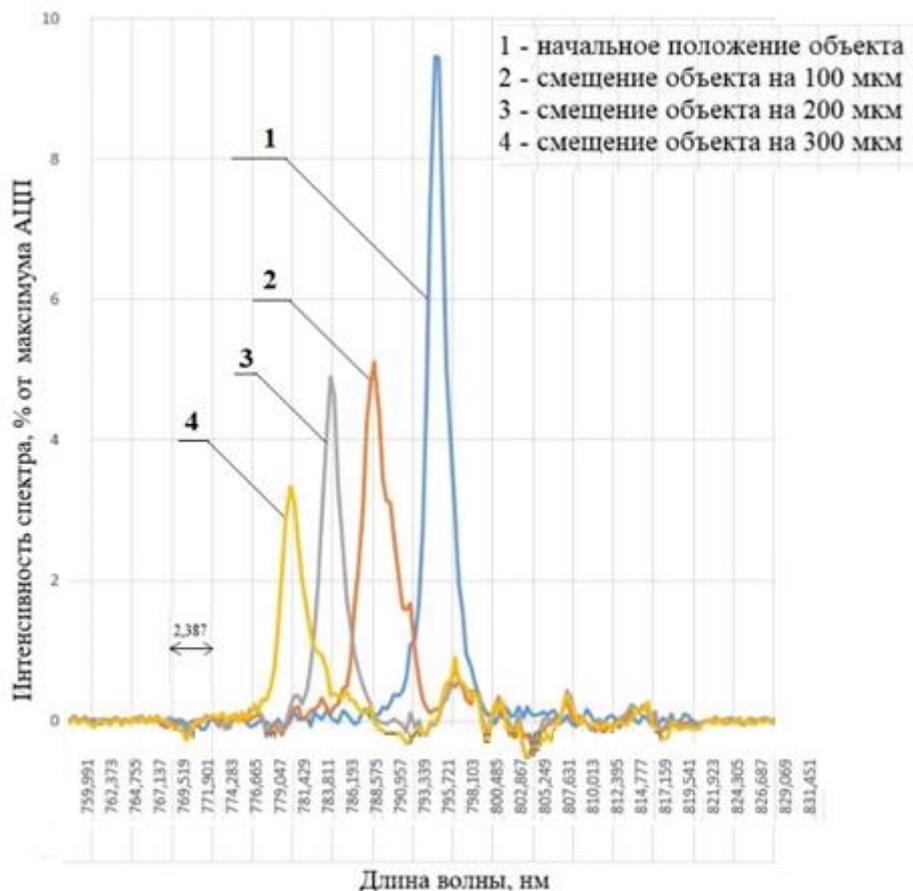


Рис. 4. Графики распределения спектра отраженного от объекта света при его разных смещениях вдоль хроматического отрезка

Заключение

В результате программного моделирования показано, что в волоконной конфокальной измерительной системе на основе хроматического кодирования при использовании источника света с шириной спектра менее 40 нм ошибка волнового фронта, формируемого ГХО, не должна превышать $\Delta W \leq \lambda/10$;

Теоретически и экспериментально показано, что в гиперхроматическом объективе при использовании линз с различным фокусным расстоянием возможна компенсация сферической аберрации путем изменения расстояния между ДОЭ и одиночной линзой.

Таким образом, для измерения смещений и микропрофиля поверхности оптических прозрачных сред проведено исследование волоконной конфокальной измерительной системы на основе суперлюминесцентного диода и гибридного гиперхроматического объектива. Смещение и перепад высот объекта определяется измерением спектра отраженного от поверхности излучения с выделением доминирующей длины волны с помощью специальных программных алгоритмов и реализации принципа конфокальности оптической схемы волоконной конфокальной измерительной системы. Фокусное расстояние гибридного гиперхроматического объектива составляет 15 мм, длина хроматического отрезка – 300 мкм, а разрешение смещения по полувысоте – менее 0,1 мкм.

Результаты экспериментальных исследований являются основой для интеграции волоконной конфокальной измерительной системы в оптические системы и комплексы для микропрофилирования поверхностей. Благодаря своим преимуществам (бесконтактный режим измерения, малое фокальное пятно, высокая точность) он позволит осуществлять прецизионное позиционирование и высокоточную оцифровку трехмерных поверхностей.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки России в части проекта АААА-А21-121011490030-4.

Список источников

- [1] **Bai, J.** et al. Chromatic confocal displacement sensor with optimized dispersion probe and modified centroid peak extraction algorithm / J. Bai, X. Li, X. Wang, Q. Zhou, K Ni //Sensors. – 2019. – Т. 19. – №. 16. – С. 3592. – DOI: 10.3390/s19163592.
- [2] **Wertjanz, D.** et al. Compact scanning confocal chromatic sensor enabling precision 3-D measurements / D. Wertjanz, T. Kern, E. Csencsics, G. Stadler, G. Schitter // Applied Optics. – 2021. – Т. 60. – №. 25. – С. 7511-7517. – DOI: 10.1364/AO.428374.
- [3] **Завьялова, М. А.** Моделирование и расчет гиперхроматических объективов для волоконных конфокальных датчиков поверхности на основе метода хроматического кодирования / М. А. Завьялова, П. С. Завьялов // Фотоника. – 2017. – №. 5. – С. 80-90. – DOI: 10.22184/1993-7296.2017.65.5.80.90.
- [4] **Завьялова, М. А.** Экспериментальные исследования волоконного конфокального датчика на основе метода хроматического кодирования / М. А. Завьялова, П. С. Завьялов, М. В. Савченко // Фотоника. – 2021. – Т. 15. – № 7. – С. 598-609. – DOI 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.7.598.609.
- [5] Акционерное общество НОВАЯ ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА / URL: <http://nolatech.ru/files/datasheet/SLD-790-14BF.pdf>.
- [6] **Верхогляд, А. Г.** Круговая лазерная записывающая система для формирования фазовых и амплитудных микроструктур на сферических поверхностях / А. Г. Верхогляд, М. А. Завьялова, А. Е. Качкин, С. А. Кокарев, В. П. Корольков // Датчики и системы. – 2015. – №. 9-10. – С. 45-52.

Hyperchromatic elements for fiber confocal measuring systems

M. A. Zavyalova¹, P. S. Zavyalov^{1,2}, D. A. Koverznev^{1,2}, D. R. Khakimov¹

¹ Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The concept of a fiber confocal system based on a superluminescent diode (spectrum width 40 nm) and a hybrid hyperchromatic objective (HCL) is proposed for measuring displacements and a microprofile of a surface with a low reflection coefficient. The displacement and height difference of an object in such a system is determined by measuring the spectrum of radiation reflected from the surface with the selection of the dominant wavelength. As a result of software simulation, it has been shown that the error of the wavefront formed by the GCR should not exceed $\Delta W \leq \lambda/10$. It has been shown theoretically and experimentally that, when using lenses with different focal lengths, it is possible to compensate for spherical aberration by changing the distance between the diffractive optical element and a single lens. The developed system has a sensitivity to displacements of a transparent glass sample of 0.1 μm or less.

Keywords: Optics, Diffractive optical elements, Hyperchromatic lenses, Confocal method, Chromatic coding method.