

Применение дифракционных оптических элементов для контроля промышленных изделий

П. С. Завьялов^{1,2}, М. С. Кравченко¹, М. В. Савченко¹, Е. В. Власов¹, 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

Применение оптических дифракционных элементов (ДОЭ) в составе промышленных оптико-электронных комплексов позволяет повысить точность, надежность и производительность контроля ответственных деталей и узлов, а также исключить «человеческий фактор». Как правило, такие ДОЭ представляют собой фокусаторы в наборы колец, полос, дуг, которые при совместном использовании со специальными объективами позволяют получать изображение поверхности контролируемого образца (внутренней или наружной) и определять размеры, дефекты, отклонения от прямолинейности и плоскостности. В работе представлены результаты по расчету, изготовлению и применению таких ДОЭ при реализации промышленных систем автоматизированного контроля с достигнутыми погрешностями измерений (0,1 - 10 мкм и менее) и высоким быстродействием (1 шт./с).

Ключевые слова: Дифракционные оптические элементы, Фокусаторы, Метод структурного освещения, Метод светового сечения, Конфокальный датчик.

Цитирование: Завьялов, П. С. Применение дифракционных оптических элементов для контроля промышленных изделий / П. С. Завьялов, М. С. Кравченко, М. В. Савченко, Е. В. Власов, Д. Р. Хакимов // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 18–30.

Введение

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) представляют собой математически заданные и перенесенные с помощью лазерных технологий на поверхность оптических материалов микроструктуры, которые позволяют изменять характеристики проходящего через них света определенным образом. Они широко используются в оптико-электронных системах для контроля геометрических параметров различных изделий с высокой точностью для обеспечения качества их производства. Как правило, в таких системах метод структурного освещения является эффективным и обладает высокой чувствительностью к изменениям геометрии 3D-объектов [1-4].

В КТИ НП СО РАН на протяжении последнего десятилетия предложены и реализованы методы структурного освещения на базе ДОЭ при разработке широкого спектра систем контроля ответственных промышленных изделий. В работе представлен обзор, описаны особенности оптических схем и приведены результаты технических характеристик приборов на основе ДОЭ.

Контроль параметров протяженных отверстий на базе ДОЭ

В работах [5, 6] был предложен высокопроизводительный оптико-электронный метод контроля отверстий с использованием дифракционного фокусатора в кольцо. Данный метод позволяет создать малогабаритный зонд для контроля 3D формы отверстий.

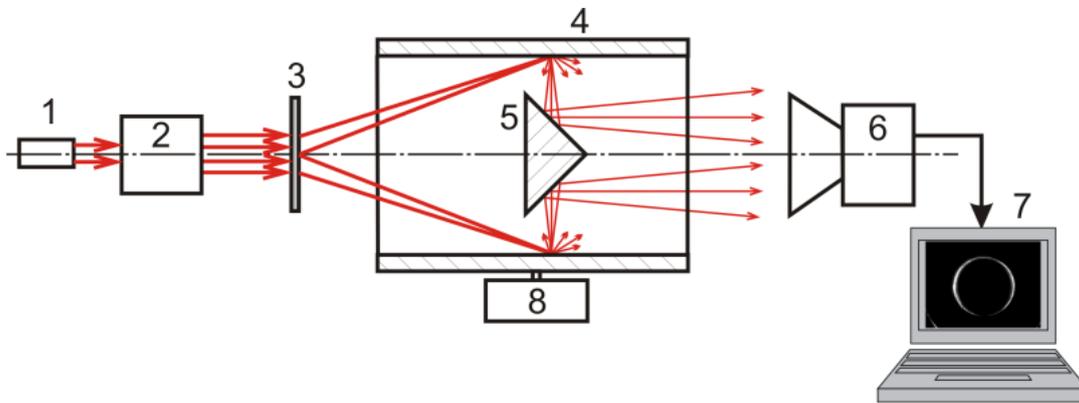


Рис. 1. Принцип контроля отверстий: 1 – лазер; 2 – коллиматор; 3 – ДОЭ; 4 – цилиндрический канал; 5 – коническое зеркало; 6 – камера; 7 – компьютер; 8 – устройство перемещения детали

Метод измерения заключается в формировании узкого светового кольца на внутренней поверхности изделия, приёме и обработке изображения освещенного участка поверхности. Свет, рассеянный от стенки отверстия, попадает на матрицу камеры благодаря коническому зеркалу. Сканирование всей поверхности осуществляется посредством перемещения объекта вдоль оси (рис. 1).

В предлагаемом методе измерения важнейшей задачей является фокусировка светового пучка в узкое кольцо (рис. 2). В качестве такого оптического элемента был использован дифракционный фокусатор [7], со следующей фазовой функцией:

$$\phi(r) = -k\sqrt{f_0^2 + (r - r_0)^2}, \quad 0 \leq r \leq a, \quad (1)$$

где r – полярный радиус; f_0 – фокусное расстояние; a – радиус фокусатора, r_0 – радиус кольца фокусировки.

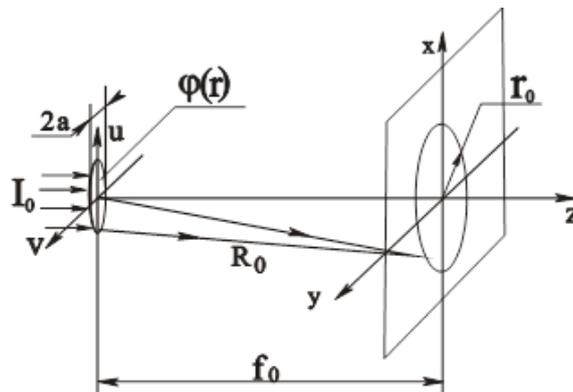


Рис. 2. Геометрия фокусировки в кольцо

Использование ДОЭ позволяет добиться высокой точности измерений при одновременной минимизации габаритов оптической схемы зонда.

Разработана конструкция компактного зонда для бесконтактного контроля протяженных отверстий (рис. 3). В качестве источника света используется полупроводниковый лазер с волоконным выходом (длина волны 660 нм, мощность 80 мВт). Для введения излучения в зонд используется волоконный кабель 2, который прокладывается внутри и снаружи зонда и выводится в его центр – на оптическую ось. Расходящийся лазерный пучок коллимируется сферическим зеркалом 4 и освещает ДОЭ 3. Далее излучение выходит через окна 6 в корпусе зонда и попадает на контролируемое отверстие, формируя на его поверхности узкое световое кольцо. Наблюдение за освещенной поверхностью производится с помощью конического зеркала 5, линзы 7 и эндоскопа 8. Корпус зонда выполнен в виде трубки диаметром 10 мм и длиной более 1 м.

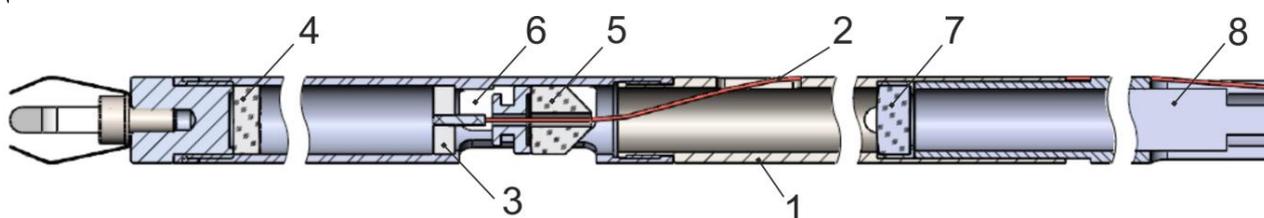


Рис. 3. Конструкция зонда: 1 – корпус; 2 – оптоволоконно; 3 – ДОЭ; 4 – сферическое зеркало; 5 – коническое зеркало; 6 – окна в корпусе зонда; 7 – линза; 8 – эндоскоп

Разработанная оптическая схема зонда имеет высокую чувствительность к изменению геометрии контролируемого канала (около 4 мкм на 1 пиксель изображения) и позволяет сканировать отверстия диаметром от 12,6 до 13,2 мм.

На рис. 4 приведено реальное изображение кольцевой метки, полученное в процессе сканирования канала нарезного ствола. Видны три области, в которых метка экранируется на деталях корпуса зонда. Так как съемка осуществляется в движении, то спекл-шум на изображении достаточно хорошо сглаживается.

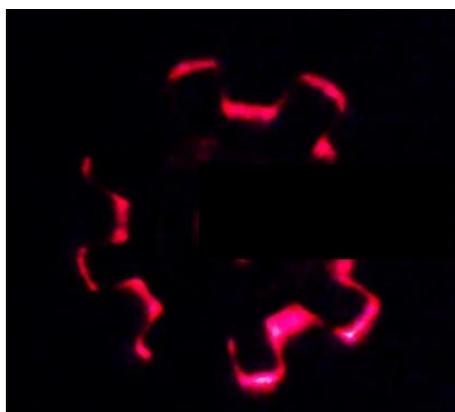


Рис. 4. Изображение кольцевой метки, полученное при сканировании нарезного ствола диаметром 12,7 мм

В рамках работ с ОАО «Завод им. В. А. Дегтярёва» разработана и изготовлена установка для контроля прямолинейности канала ствола (шифр «Струна») [8, 9]. Результаты измерений выводятся оператору в виде 3D кривой, иллюстрирующей искривление оси канала. При этом указывается значение и координаты (по длине и углу) наибольшего отклонения оси (рис. 5).

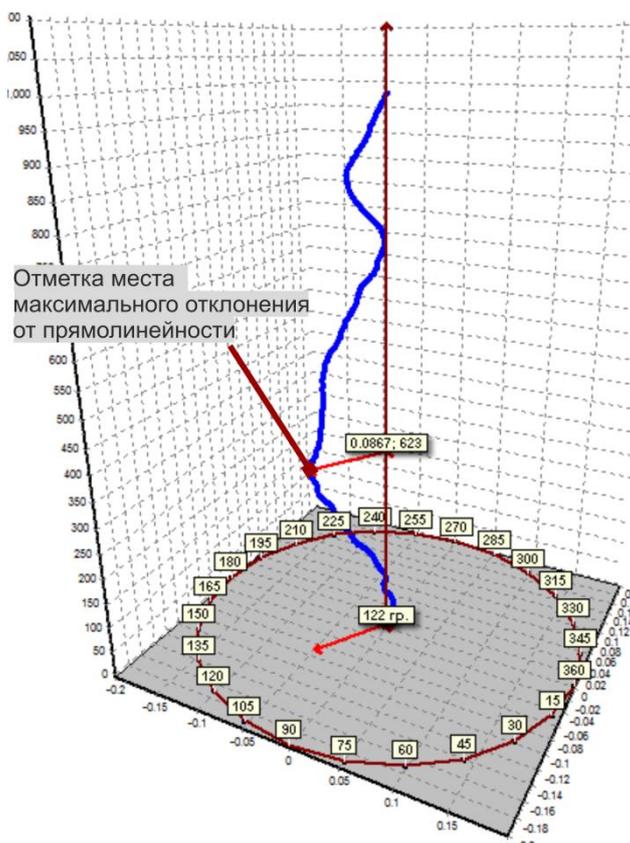


Рис. 5. Результаты сканирования канала ствола: 3D визуализация формы оси

Контроль дистанционирующих решеток

Для контроля таких сложных 3D-объектов как дистанционирующие решетки (ДР) тепловыделяющих сборок (ТВС) предложен метод структурного освещения на основе мультикольцевых фокусаторов (МКФ) [10, 11]. Метод обеспечивает контроль следующих параметров шестиугольных ДР: диаметров ячеек и отверстий под канал, формируемых их выступами – пуклёвками; расстояний между центрами соседних ячеек; сдвигов центров ячеек относительно номинального положения по чертежу; габаритных размеров ТВС. Для квадратных ДР вместо диаметров контролируются расстояния между противоположными пуклёвками.

В предложенном методе увеличение быстродействия достигается путем освещения внутренней поверхности 3D объекта мультикольцевым световым зондом, который может быть создан на основе ДОО. При этом измерение одной ячейки ДР по всей длине производится за один кадр, содержащий всю информацию о её геометрии. Также при таком мультикольцевом структурном освещении не имеет принципиального значения количество

и расположение пуклёвок ячейки, поэтому метод позволяет контролировать геометрические параметры как шестигранных (российских), так и квадратных (зарубежных) дистанционирующих решеток.

Суть метода поясняется на рис. 6. Структурное освещение в виде набора колец формируется специально рассчитанным ДОЭ – МКФ, который фокусирует падающее на него лазерное излучение в систему колец равного диаметра, расположенных вдоль оси Z ячейки с некоторым шагом Δz . Освещенная поверхность ячейки проецируется на фотоприёмную матрицу камеры с помощью специального объектива для контроля отверстий, имеющего большую кривизну поля и дисторсию. Он фокусирует различные сечения по глубине в плоскость фотоприемника, при этом, чем ближе сечение объекта, тем больше радиус его изображения. Для измерения геометрических параметров всех ячеек и параметров решетки в целом используется сканирующий двухкоординатный стол для её перемещения в плоскости, перпендикулярной оптической оси системы.

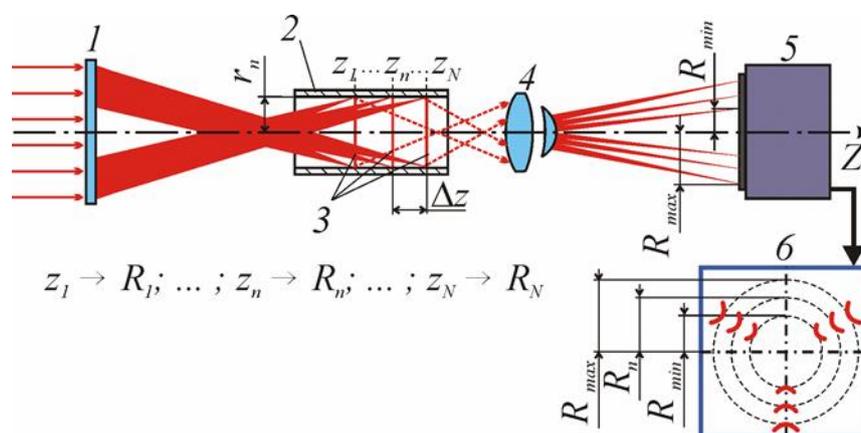


Рис. 6. Иллюстрация метода контроля ДР на основе МКФ: 1 – МКФ; 2 – контролируемая ячейка; 3 – световые кольца; 4 – объектив для контроля отверстий; 5 – камера; 6 – изображение ячейки; R_{min} и R_{max} – минимальный и максимальный радиусы изображения; Δz – шаг колец; $2r_n$ – диаметр ячейки

К МКФ предъявляются следующие требования. Для обеспечения информативности контроля по длине пуклёвки необходимо контролировать от 10 до 15 сечений, поэтому МКФ должен формировать на пуклёвках такое же количество колец с шагом $\Delta z = 0,5 - 1$ мм. Диапазон фокусировки кольца в радиальном направлении должен соответствовать допуску на положение центра ячейки (0,15 - 0,3 мм).

Дифракционные элементы, фокусирующие излучение в систему колец, можно создать двумя способами. Во-первых, можно разбить поверхность дифракционного элемента на радиальные сегменты, каждый из которых будет создавать одно световое кольцо. Во-вторых, можно создать дифракционный элемент, который всей поверхностью формирует набор световых колец вдоль оптической оси. В этом случае он работает как голограмма, а передаточная функция такого МКФ имеет следующий вид:

$$H(\rho) = \sum_{i=0}^{N-1} \sqrt{J_i} \cdot \exp \left[jk \sqrt{(\rho + r_0)^2 + (f_0 + i \cdot \Delta z)^2} \right], \quad \rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max}, \quad (2)$$

где J_i – относительная интенсивность i -го светового кольца; r_0 – радиус колец, f_0 – фокусное расстояние МКФ; Δz – шаг колец; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

Такие МКФ с диаметром 45 мм могут генерировать до 20 узких световых колец равного диаметра с шириной 50 – 100 мкм и шагом по глубине в пределах от 0,5 до 1 мм. На рис. 7а показана структура разработанных МКФ.

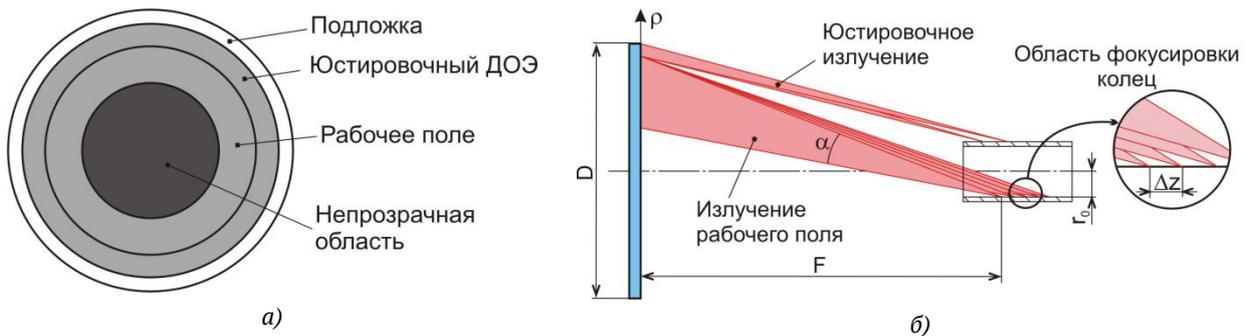


Рис. 7. Дифракционный оптический элемент: а) структура ДОЭ; б) ход лучей МКФ

Кроме рабочего поля, МКФ имеет в центре непрозрачную область, а на периферии – дополнительный юстировочный элемент. Непрозрачная область в центре выполняет несколько функций. Во-первых, она не пропускает прямое излучение от лазера в проекционный объектив. Во-вторых, эта область уменьшает угловую апертуру α рабочего поля (рис. 7б), вследствие чего освещение поверхности производится излучением, в котором отсутствуют скользкие лучи. Юстировочный ДОЭ создает два кольца того же диаметра, что и рабочее поле (рис. 7б), однако в этом случае юстировочные лучи не пересекают оптическую ось. Таким образом, при наличии ячейки в зоне контроля эти лучи не попадают в апертуру проекционного объектива, и поэтому юстировочные кольца не наблюдаются. Когда же ячейка отсутствует, в апертуру объектива не попадает рассеянное от ячейки излучение рабочего поля ДОЭ. При этом видны два юстировочных кольца, по которым можно настраивать приёмную оптическую часть по отношению к освещающей оптической системе.

На рис. 8 показаны зарегистрированные ПЗС-линейкой (ширина пикселя 14 мкм) распределения интенсивности, формируемые изготовленными ДОЭ. В рабочее поле намеренно введен признак (пропуск одного кольца посередине, рис. 8а), позволяющий при обработке изображений безошибочно пронумеровать световые полосы.

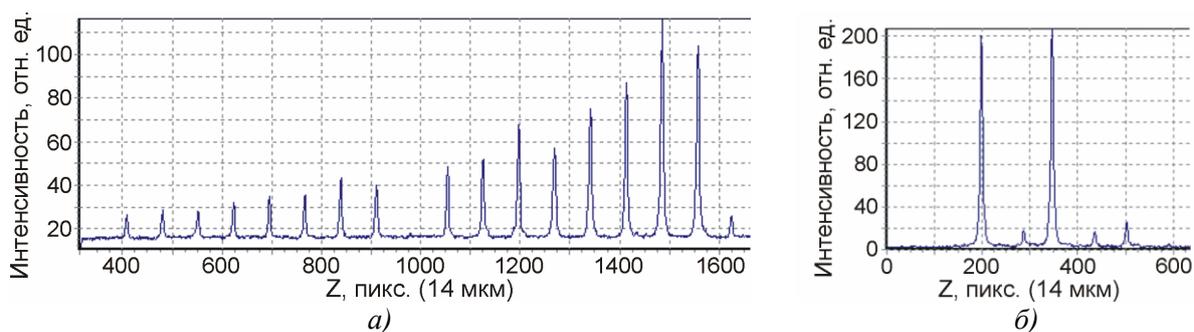


Рис. 8. Экспериментально полученные распределения интенсивности МКФ, генерирующего 16 колец с шагом $\Delta z = 1$ мм (а), два юстировочных кольца (б)

На основе предложенного метода разработаны и созданы системы контроля геометрических параметров дистанционирующих решёток («Решетка-Н», 2 ед.), которые находятся в эксплуатации в ПАО «Новосибирский завод химконцентратов», г. Новосибирск.

Контроль внешнего вида оболочек ТВЭЛ

Задача автоматического обнаружения дефектов (наколов, царапин, вмятин) с определением их размеров является исключительно важной при контроле поверхности оболочек ТВЭЛ, изготовленных из циркониевого сплава. Диаметр оболочек равен примерно 9 – 14 мм, а длина 3,8 – 4,5 м. Однако требования к чувствительности обнаружения дефектов на оболочке ТВЭЛ достаточно жесткие. При высокой скорости контроля (скорость движения около 170 мм/с) требуется обнаруживать дефекты глубиной несколько десятков микрон. Существующие установки контроля оболочек используют токовихревой метод обнаружения дефектов, который позволяет только определять наличие дефектов, а их обмер осуществляется на отдельной позиции на высокоточном приборе с изъятием ТВЭЛ из конвейера.

Известен оптический метод светового сечения, который широко применяется для контроля формы протяженных объектов [12]. Суть метода заключается в формировании на поверхности объекта световой полосы, лежащей в плоскости, перпендикулярной продольной оси объекта. Регистрация изображения производится с помощью камеры, расположенной под некоторым углом к плоскости полосы. Недостатком данного метода является низкая производительность в случае контроля изделий с большой кривизной формы поверхности, таких как оболочки ТВЭЛ. Зарегистрированное изображение будет иметь форму дуги и, следовательно, будет занимать большое количество строк, а считываемые кадры – большой объем информации, значительная часть которой, при наличии мелких дефектов, будет бесполезной. Это обстоятельство ограничивает производительность контроля и применение данного метода для контроля оболочек ТВЭЛ.

С целью преодоления этих ограничений исследован высокопроизводительный оптико-электронный метод контроля с определением глубины дефектов, основанный на использовании в качестве формирователя световой полосы дифракционного ДОЭ [13]. Трехмерная конфигурация освещающего пучка позволяет минимизировать объем считываемой информации и регистрировать только отклонения формы поверхности от

номинальной (дифференциальный режим считывания). При этом высокая производительность контроля достигается за счет обработки малоразмерных кадров изображений ($20 \div 100$ строк).

На рис. 9 представлена структурная схема одного канала устройства, реализующего предлагаемый метод контроля с определением глубины дефектов. Блок контроля оболочек ТВЭЛ содержит четыре идентичных канала (рис. 10).

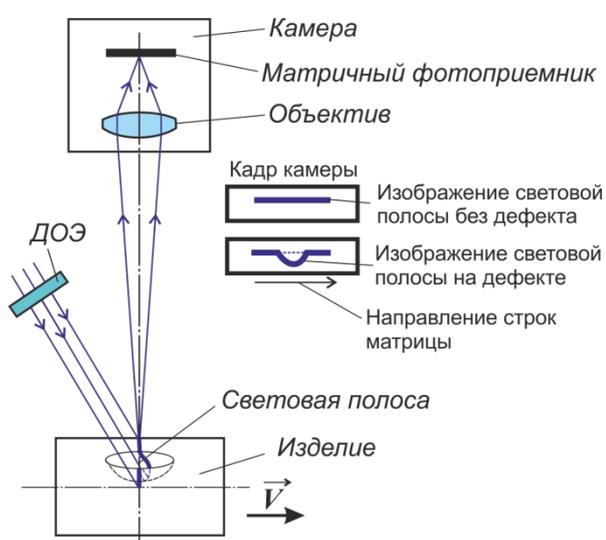


Рис. 9. Структурная схема оптического канала, реализующего метод светового сечения с использованием ДОЭ

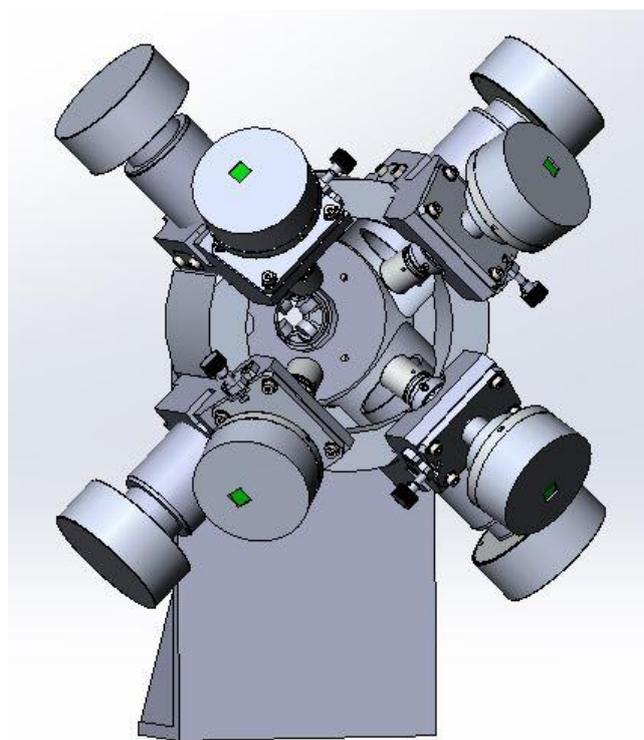


Рис. 10. 3D-модель блока светового сечения для контроля оболочек ТВЭЛ

Для измерения глубины дефектов необходимо, чтобы ДОЭ формировал на цилиндрической поверхности световую дугу – фрагмент окружности, диаметр которой равен диаметру контролируемого цилиндра D_c . При использовании 3 – 4 оптических каналов угловой размер дуги должен быть $90^\circ \div 120^\circ$. Известны методы аналитического расчета фазовой функции дифракционного фокусатора в дугу окружности [7, 14].

Однако, нами использовался более простой и универсальный метод расчета на основе численного решения интеграла Френеля – Кирхгоффа. Данный метод подразумевает дискретизацию формируемой световой картины. Формируемое поле задается в виде набора из N точек (δ -функций), лежащих на дуге окружности с некоторым шагом Δ друг относительно друга (рис. 11).

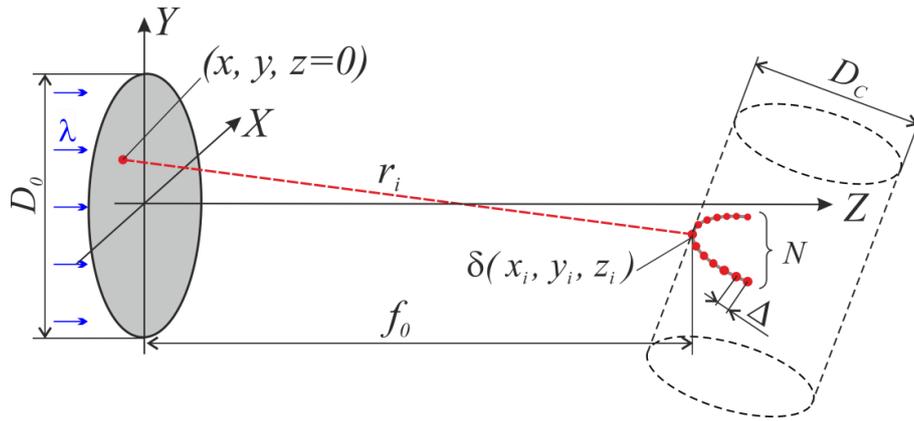


Рис. 11. Расчет ДОЭ на основе преобразования Френеля – Кирхгофа

Поле в каждой точке ДОЭ описывается суперпозицией N импульсных откликов:

$$E(x, y) = \sum_{i=1}^N \sqrt{I_i} \cdot h_i(x, y), \quad (3)$$

где I_i – относительные интенсивности точек; $h_i(x, y)$ – импульсный отклик свободного пространства.

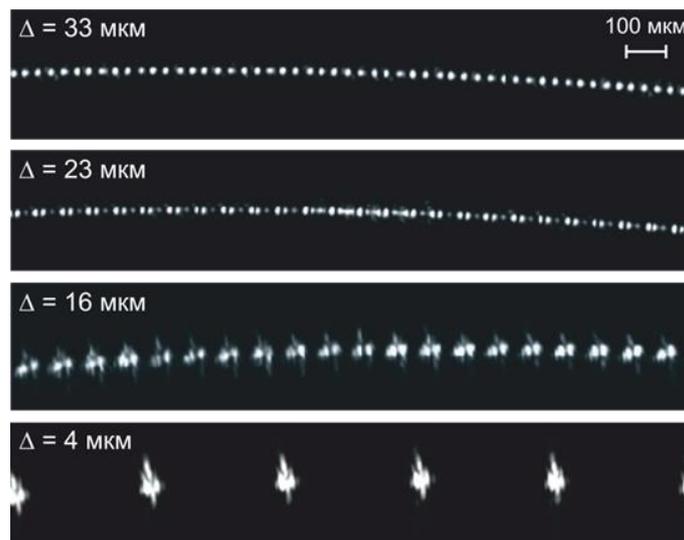


Рис. 12. Изображения световых дуг, сформированных изготовленными ДОЭ с разным шагом дискретизации Δ

Высокая производительность метода достигается за счет регистрации и обработки малоразмерных кадров изображений (750×24 пикселей), содержащих информацию о форме и глубине дефектов. Частота кадров – около 5000 в секунду. Обработка кадров с субпиксельной точностью производится в реальном времени, аппаратно в устройстве обработки камеры на базе программируемой логики. По интерфейсу USB 2.0 в промышленный компьютер передается готовая информация о глубине и амплитуде сигнала в каждой точке регистрируемого профиля поверхности. На рис. 13 приведены фрагменты результатов работы блока светового сечения.

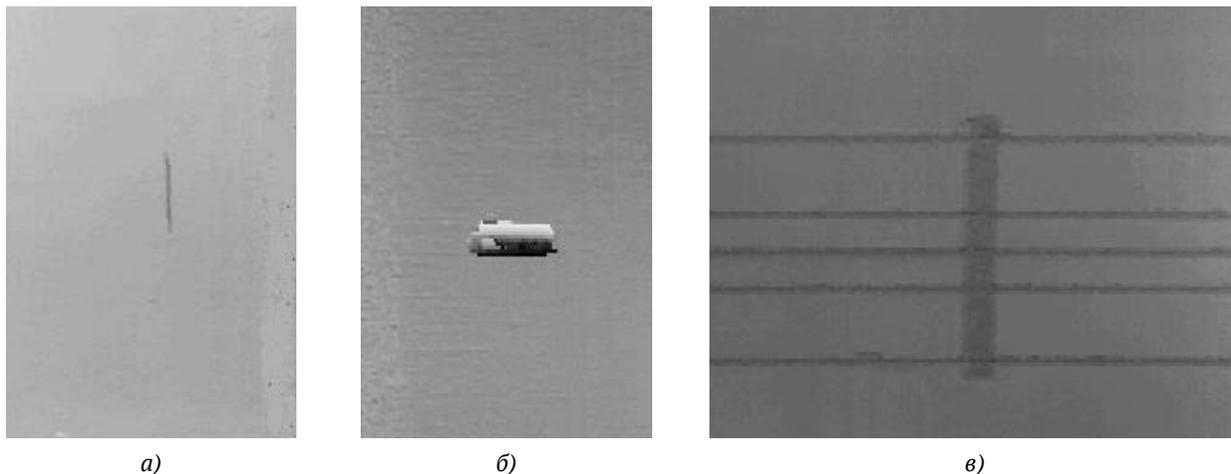


Рис. 13. Фрагменты изображений поверхности оболочек с дефектами, полученные блоком светового сечения: (а) царапина; (б) глубокий накол; (в) нанесенная лазером маркировка.

Далее отдельные профили складываются в общую двухмерную карту поверхности трубы, по которой производится поиск участков с отклонениями высот, превышающими установленные допусковые значения. В случае обнаружения подобных участков установка передает в систему управления технологической линии сигнал «Брак» или «Условный брак» (в зависимости от указанных в базе данных требований по разбраковке дефектов). Если не зафиксировано выхода высот профиля за установленные пределы, то передается сигнал «Годен».

Контроль профиля поверхности

Также ДОЭ широко используется в разрабатываемых в КТИ НП СО РАН (г. Новосибирск) волоконных конфокальных датчиках на основе хроматического кодирования для измерения малых расстояний. Ключевой особенностью таких датчиков 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 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 определенным цветом.

Как правило, источники света с повышенными энергетическими характеристиками имеют ширину спектра около $\Delta\lambda = 20 - 40$ нм, поэтому применение дифракционной оптики для таких источников света является практически единственным вариантом создания гиперхроматических объективов (ГХО) с протяженным хроматическим участком Δz .

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

$$\frac{\Delta z}{f'} \approx \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \quad (4)$$

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 всего конфокального датчика. Поэтому совместно с ДОЭ можно использовать одиночные линзы с разными фокусными расстояниями $f'_л$. 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:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_{\text{ДОЭ}}} + \frac{1}{f'_л} \quad (5)$$

Существенно, что расчет ДОЭ для гибридного объектива может осуществляться с учетом сферической аберрации одиночной линзы. На этапе проведения расчетов в фазовую функцию ДОЭ вносится добавка, компенсирующая сферическую аберрацию линзы ΔW_s .

На основе рассчитанных и изготовленных ГХО созданы волоконные конфокальные датчики на основе хроматического кодирования, чувствительность которых к смещениям контролируемых объектов составляет 0,1 мкм и менее [17,18].

Заключение

Предложен и исследован ряд методов структурного освещения и измерения малых расстояний до объектов на основе дифракционных оптических элементов. Применение ДОЭ, фокусирующих лазерное излучение в геометрические фигуры определенной конфигурации (кольца, дуги, линии), позволяет оптимальным образом согласовать характеристики структурного освещения с геометрией контролируемого объекта. Кроме того, показано, что использование ДОЭ, изготовленных на прецизионных лазерных записывающих системах [15], позволяет существенно увеличить точность измерений. Погрешность измерения геометрических параметров может при этом достигать от 4 до 10 мкм, расстояний – менее 0,1 мкм.

На основе разработанных методов контроля на базе ДОЭ созданы и внедрены в производство ряд оптико-электронных систем: система контроля прямолинейности каналов стволов «Струна» для ОАО «Завод им. В. А. Дегтярёва», системы контроля геометрических параметров дистанционирующих решёток («Решетка-Н») для ПАО «НЗХК», установка для бесконтактного контроля геометрических параметров и измерений наружных дефектов труб для АО «ЧМЗ» и ряд других.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки России в части проекта АААА-А21-121011490030-4 и проекта АААА-А20-120102190007-5.

Список источников

- [1] **Geng, J.** Structured-light 3D surface imaging: a tutorial //Advances in optics and photonics. – 2011. – Т. 3. – №. 2. – С. 128-160. DOI:10.1364/AOP.3.000128.
- [2] **Grosse, M.** Fast data acquisition for three-dimensional shape measurement using fixed-pattern projection and temporal coding /M. Grosse, M. Schaffer, B. Harendt, R. Kowarschik // Opt. Eng. – 2011. – Vol. 50(10). – P. 100503-1 - 100503-3.– DOI:10.1117/1.3646100.
- [3] **Zhao, Y.** 3D mouse shape reconstruction based on phase shifting algorithm for fluorescence molecular tomography imaging system / Y. Zhao, D. Zhu, R. Baikejiang, C. Li // Appl. Opt. – 2015. – Vol. 54(32). – P. 9573-9582. – DOI:10.1364/AO.54.009573
- [4] **Steckenrider, J.J.** High-resolution moiré interferometry for quantitative low-cost, real-time surface profilometry / J.J. Steckenrider, J.S. Steckenrider // Appl. Opt. – 2015. – Vol. 54(28). – P. 8298-8305. – DOI:10.1364/AO.54.008298
- [5] **Патент № 2245516** РФ. Устройство контроля отверстий деталей / Ю. В. Чугуй, Л. В. Финогенов, П. С. Завьялов, В. Г. Никитин, А. Р. Саметов. – Оpubл. 10.10.2004.
- [6] **Zavyalov, P. S.** et al. Using diffractive optical elements for industrial products geometrical parameters inspection //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1096. – №. 1. – С. 012009. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1096/1/012009>.
- [7] **Сойфер, В.А.** Методы компьютерной оптики / Ред. В. А. Сойфер. – Москва: Физматлит, 2000. – 688 с.
- [8] **Zavyalov, P. S.** Light section method of alignment control for weapon barrels / P. S. Zavyalov, D. R. Khakimov, A. A. Gushchina, A. V. Ermolenko, D. V. Skokov, V. Yu. Sartakov // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2020. – V. 56. – No. 4 – P. 375-385. – DOI: <https://doi.org/10.3103/S8756699020040160>.
- [9] Патент № 2721716 РФ. Устройство для контроля отверстий деталей / Л. В. Финогенов, П. С. Завьялов А.В. Белобородов, А.В. Ермоленко, Д.В. Скоков, Д.Р. Хакимов. – Оpubл. 21.05.2020.
- [10] **Zavyalov, P.** 3D Hole Inspection Using Lens with High Field Curvature / P. Zavyalov // Measurement science review. – 2015. – Vol. 15(1). – P. 52 -57. – DOI:10.1515/msr-2015-0008.
- [11] **Завьялов, П.С.** Трехмерный контроль дистанционирующих решеток тепловыделяющих сборок атомных реакторов на основе дифракционных оптических элементов / П. С. Завьялов, Ю. А. Лемешко, Л. В. Финогенов, Ю. В. Чугуй // Автометрия. – 2008. – Т.44, № 2. – С. 23–31.
- [14] Завьялов, П. С. и др. Применение дифракционных элементов для повышения производительности систем контроля цилиндрических поверхностей //Автометрия. – 2017. – Т. 53. – №. 5. – С. 40-47. – DOI: 10.15372/AUT20170504.
- [15] Golub M. A. et al. Computational experiment for computer-generated optical elements //Innovative Optics and Phase Conjugate Optics. – SPIE, 1991. – Т. 1500. – С. 194-206.
- [16] **Верхогляд, А. Г.** Круговая лазерная записывающая система для формирования фазовых и амплитудных микроструктур на сферических поверхностях / А. Г. Верхогляд, М. А. Завьялова, А. Е. Каличкин, С. А. Кокарев, В. П. Корольков// Датчики и системы. – 2015. – Т. 9–10. – С. 45–52.
- [17] **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
- [18] **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. – № 5 (65). – 2017 г. – стр. 80-90. – DOI: 10.22184/1993-7296.2017.65.5.80.90

Use of diffractive optical elements for control of industrial products

P. S. Zavyalov^{1,2}, M. S. Kravchenko¹, M. V. Savchenko¹, E. V. Vlasov¹, 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 use of optical diffractive elements (DOE) as part of industrial optoelectronic complexes makes it possible to increase the accuracy, reliability and performance of monitoring critical parts and assemblies and eliminate the "human factor". As a rule, such DOEs are focused into sets of rings, strips, and arcs, which, when used in conjunction with special lenses, make it possible to obtain an image of the surface of a controlled sample (internal or external) and determine dimensions, defects, deviations from straightness and flatness. The paper presents the results on the calculation, manufacture and application of such DOEs in the implementation of projection, shadow, television methods, as well as the structured light method with achieved measurement errors (0.1 - 10) μm and high speed (1 pc/s).

Keywords: Diffraction optical elements, Focusers, Structured light method, Light section method, Confocal sensor.