

7. Исследование твердых прозрачных объектов методом оптической томографии

Г. Г. Левин, В. Л. Минаев, К. Н. Миньков, М. М. Ермаков

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений», Москва, Россия

В работе описаны микроинтерферометр, реализующий метод оптической томографии для исследования твердых прозрачных объектов, а также приведены результаты экспериментальных исследований по определению распределения показателя преломления и его количественных значений для оптических диэлектрических микрорезонаторов с модами типа «шепчущей галереи».

Ключевые слова: Оптическая томография, Интерферометрия, Микроинтерферометр, Распределение показателя преломления, Иммерсия, Микрорезонатор, Моды типа «шепчущей галереи», аддитивные технологии.

Цитирование: Левин, Г. Г. Исследование твердых прозрачных объектов методом оптической томографии / Г. Г. Левин, В. Л. Минаев, К. Н. Миньков, М. М. Ермаков // HOLOEXPO 2018 : XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 27–28.

Введение

Развитие новых технологий создания изделий с заранее заданными свойствами требует новых систем диагностики и измерений различных характеристик данных изделий, в том числе и описывающих внутреннюю структуру. Например, при изготовлении объектов с использованием аддитивных технологий необходимо не только измерять форму и структуру поверхности, но также и однородность материала внутри изделия. В последнее время методы создания оптических деталей с использованием аддитивных технологий получили развитие, что позволило создавать элементы произвольной формы с переменным показателем преломления внутри. Аналогичные задачи возникают при изготовлении объектов из растворов и расплавов различных веществ. В частности, при создании волокон с переменным профилем показателя преломления необходимо контролировать распределение последнего, как в готовых изделиях, так и в заготовках. При этом важным является получение количественных данных как о локальных значениях показателя преломления внутри объекта, так и о пространственном распределении неоднородностей. Поэтому разработка метода измерений указанных характеристик представляется актуальной задачей. Во всех случаях, когда в качестве исходного сырья используется прозрачный материал, для исследования распределения показателя преломления и определения его локальных количественных значений наиболее перспективно использовать методы оптической томографии.

Метод

Для реконструкции пространственного распределения показателя преломления внутри прозрачного объекта необходимо, во-первых, разработать оптическую систему, позволяющую получать число проекций достаточное для восстановления функции, которая описывает распределение показателя преломления в зависимости от числа неоднородностей внутри объекта и их градиента, и, во-вторых, разработать схему интерференционного прибора, позволяющего восстанавливать из интерферограмм распределение фазы, которое

описывает проекционные данные, с точностью необходимой для решения обратной задачи томографии.

При разработке оптического томографа, который позволил бы решить задачу реконструкции распределения показателя преломления внутри объекта необходимо разработать такую схему зондирования, при которой распространение излучения через исследуемый объект описывалось преобразованием Радона. В случае исследования твердых тел, какими и являются изделия аддитивных технологий, волокон, микрорезонаторов и другие прозрачные объекты, особое влияние оказывает преломление на границе объекта. Поэтому при измерении характеристик внутренней структуры таких объектов методами оптической томографии важную роль играет показатель преломления среды, в которую помещается объект. Как правило, в качестве такой среды выбирается иммерсия с показателем преломления близким к показателю преломления исследуемого объекта. Однако, практически невозможно подобрать иммерсию, полностью исключающую преломление света на границе объекта. В настоящей работе мы рассматриваем влияние преломления света на границе исследуемого объекта для конкретной схемы микроинтерферометра.

В микроинтерферометре измеряется распределение фазы излучения, прошедшего через объект, которое связано с распределением показателя преломления следующим выражением.

$$\varphi(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} \left(n_u l - n_u (l - L(x, y)) + \int_{L(x, y)} n(x, y, z) dz \right),$$

где 4π объясняется двойным прохождением излучения через исследуемый объект (схема на отражение), n_u — показатель преломления иммерсии, l — вертикальный размер кюветы с иммерсией, в которую помещен объект, $n(x, y, z)$ — искомое распределение показателя преломления объекта, $L(x, y)$ — размер объекта вдоль оси z (направление зондирования).

В данном выражении последнее слагаемое должно представлять собой преобразование Радона, чтобы можно было применять методы реконструкции томограмм, основанные на инверсном преобразовании

Радона. Для этого необходимо, чтобы выполнялись два требования.

Во-первых, поперечное смещение луча, вдоль которого происходит интегрирование показателя преломления, в плоскости (X , Y), возникающее из-за преломления лучей на разделе сред объект-иммерсия, должно быть в пределах одного вокселя проекции. При нарушении данного условия траектория луча зондирования, вдоль которого интегрируется искомая функция, интерпретируется неверно. Это приводит к возникновению артефактов в реконструированной томограмме. Необходимо отметить, что когда объект мал и количество отсчетов в проекции много больше количества разрешаемых элементов в его изображении, условие смягчается и смещение луча не должно превосходить пятна Эйри.

Второе требование связано с детерминированным изменением значения измеряемой фазы, вызванным преломлением света на границе объект-иммерсия и, как следствие, увеличением оптической длины пути внутри объекта. Если изменение фазы, вызванное отклонением траектории луча от направления зондирования, превышает погрешность ее измерения, то в реконструированной томограмме также могут возникать артефакты.

Выполнить указанные требования, можно выбрав такую иммерсию, которая бы компенсировала эти погрешности измерения фазы в проекционных данных.

Установка и описание эксперимента

В докладе приводятся результаты экспериментальных исследований внутренней структуры объектов на примере оптического микрорезонатора. Оптические диэлектрические микрорезонаторы с модами типа «шепчущей галереи» сочетают в себе уникальные характеристики: высокая добротность и стабильность частот этих мод, высокая концентрация поля в малом

объеме внутри резонатора и у его поверхности. Одним из ключевых параметров микрорезонатора, является добротность моды шепчущей галереи. В значительной степени, добротность определяется рассеянием оптического излучения на различных дефектах, с которыми может взаимодействовать излучение моды. Рассеяние оптического излучения происходит на любых локальных неоднородностях показателя преломления. При этом важно определять не только расположение его флуктуаций, но и абсолютное значение. Такие неоднородности невозможно зарегистрировать стандартными методами оптической или зондовой микроскопии.

Интерференционный томограф, используемый в данной работе, собран по схеме микроскопа Линника. Волновой фронт восстанавливался по методу фазовых шагов, механическое вращение позволило получить 15–20 проекций, по которым были восстановлены томограммы пространственного распределения показателя преломления внутри микрорезонатора.

Заключение

Разработан и собран микроинтерферометр, реализующий метод оптической томографии. Приведены результаты экспериментальных исследований по определению распределения показателя преломления и его локальных количественных значений для оптических диэлектрических микрорезонаторов с модами типа «шепчущей галереи». Описаны особенности подбора иммерсии для исследования твёрдых прозрачных объектов методом оптической томографии.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения соглашения № 14.625.21.0041 от 26.09.2017 г. (уникальный идентификатор RFMEFI62517X0041).

Research of solid transparent objects by optical tomography

G. G. Levin, V. L. Minaev, K. N. Minkov, M. M. Ermakov

FSUE "Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements", Moscow, Russia

This paper describes a microinterferometer, that realizes the method of optical tomography for the research of solid transparent objects, and gives the results of experimental researches on the determination of the distribution of the refractive index and its quantitative values for optical dielectric microcavities with "whispering gallery".

Keywords: Optical tomography, Interferometry, Microinterferometer, Distribution of the refractive index, Immersion, Microcavity with "whispering gallery", additive manufacturing.