DOI: 10.17117/na.2015.12.02.446

<http://ucom.ru/doc/na.2015.12.02.446.pdf>

Поступила (Received): 30.12.2015

**Конин Ю.А., Гаранин А.И.,
Кривошеев А.И., Перминов А.В.
Определение профиля показателя преломления
оптических волокон методом цифровой
голографической интерферометрии**

**Konin Yu.A., Garanin A.I., Krivosheev A.I., Perminov A.V.
Determination of the refractive index profile of optical
fibers by digital holographic interferometry**

В данной статье рассматривается метод цифровой голографической интерферометрии как средство для анализа оптических свойств и внутренней структуры оптических волокон. В работе приводится математический аппарат для дешифровки цифровых голограмм и определения показателя преломления цилиндрических прозрачных объектов. На основании экспериментальных данных изучены возможности метода и обоснована возможность его применения

In this article we describe a method of digital holographic interferometry, as a means of analysis of optical fibers, provide an overview of literature sources. The paper presents a mathematical apparatus for decoding digital holograms and determining the refractive index of the cylindrical transparent objects. Results of the experiment and the possibilities of this method have been presented

Ключевые слова: голография, неразрушающий контроль, оптические волокна, голографическая интерферометрия

Key words: holography, non-destructive testing, optical fibers, holographic interferometry

Конин Юрий Александрович

Бакалавр

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
г. Пермь, Комсомольский пр., 29

Konin Yuri Alexandrovich

Bachelor

Perm national research polytechnic university
Perm, Komsomolsky ave., 29

Гаранин Андрей Иванович

Бакалавр

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
г. Пермь, Комсомольский пр., 29

Garanin Andrey Ivanovich

Bachelor

Perm national research polytechnic university
Perm, Komsomolsky ave., 29

Кривошеев Антон Иванович

Бакалавр

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
г. Пермь, Комсомольский пр., 29

Krivosheev Anton Ivanovich

Bachelor

Perm national research polytechnic university
Perm, Komsomolsky ave., 29

Перминов Анатолий Викторович

Кандидат физико-математических наук, доцент
Пермский национальный исследовательский
политехнический университет
г. Пермь, Комсомольский пр., 29

Perminov Anatoly Viktorovich

Candidate of Physico-mathematical Sciences,
Associate Professor
Perm national research polytechnic university
Perm, Komsomolsky ave., 29

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Пермского края и Пермской научно-производственной приборостроительной компании в рамках научного проекта № 14-42-08009 p_офи_м.

Цифровая голография. Основные принципы.

Процесс цифровой реконструкции голограмм состоит в расчете обратного распространения света от голограммы до плоскости реконструкции.

При восстановлении голограмм мнимое изображение находится там, где находился реальный объект, а действительное формируется на расстоянии d , но с другой стороны цифровой матрицы (рис.1б). Данный процесс эквивалентен восстановлению голограммы в опорном пучке [1].

Рис. 1. Цифровая голография: (а) запись, (б) реконструкция

Для восстановления объектного пучка света можно воспользоваться интегралом Френеля-Кирхгофа[2]:

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} h(x, y) R(x, y) \frac{\exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho)}{\rho} \times \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \theta \right) dx dy,$$

где ξ, η – координатная система в плоскости реконструкции, x, y – координатная система в плоскости голограммы, $\Gamma(\xi, \eta)$ – распределение (или поля) интенсивности восстановленного изображения в плоскости реконструкции, $h(x, y)$ – функция голограммы, $R(x, y)$ – распределение интенсивности опорной

волны, ρ – расстояние между точкой в плоскости голограммы и плоскости реконструкции, θ – угол между оптической осью и вектором соединяющим точки (x, y) и (ξ, η) , λ – длина волны источника света, d – расстояние между голограммой и плоскостью реконструкции (см. рисунок 2).

Расстояние между точкой в плоскости голограмм и точкой в плоскости реконструкции определяется как:

$$\rho = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + d^2}.$$

Рис. 2. Система координат

Восстановление интенсивности объектного пучка из голограммы может быть эффективно произведено с помощью Фурье- преобразования. Используя быстрое Фурье- преобразование интеграл Френеля-Кирхгофа можно привести к следующему виду[3]:

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{\exp\left(\frac{i2\pi}{\lambda}d\right)}{i\lambda d} FFT^{-1}[FFT\{E(x, y)\}FFT\{h(x, y)\}],$$

где FFT^{-1} и FFT это обратное и прямое преобразования Фурье.

Функция голограммы в данном случае примет вид:

$$h(x, y) = \exp\left(\frac{i\pi}{\lambda z}x^2\right),$$

а расстояние до плоскости реконструкции d будет определяться как:

$$d = \frac{N\Delta x^2}{\lambda},$$

где N – количество пикселей в цифровой матрице по горизонтали, Δx – физический размер пикселя матрицы, на которую регистрируется интерферограмма.

Фаза вычисляется как:

$$\varphi(y, z) = \tan^{-1} \frac{Im(\Gamma(\xi, \eta))}{Re(\Gamma(\xi, \eta))},$$

где Re и Im действительная и мнимая часть комплексного числа соответственно.

Определение показателя преломления:

Для восстановления профиля показателя преломления $n(r, z)$ можно воспользоваться следующим интегралом[4]:

$$n(r, z) - n_0 = -\frac{n_0}{\pi} \int_0^r \frac{\varphi(y, z)}{\sqrt{y^2 - r^2}} dy,$$

Данный интеграл представляет собой обратное интегральное преобразование Абеля.

$$n(r, z) = n_0 - \frac{n_0}{\pi} \int_0^r \frac{\varphi(y, z)}{\sqrt{y^2 - r^2}} dy,$$

где n_0 – показатель преломления окружающей среды, $\varphi(y, z)$ – фаза восстановленного изображения, r – радиус волокна или преформы, y – форма измеряемого объекта.

Результаты

На рисунке 3.а изображена цифровая интерферограмма-голограмма одномодового волокна с диаметром сердцевинки и оболочки 10 и 125 мкм соответственно. Интерферограмма данного волокна была получена на схеме Лейта [1]. Данная интерферограмма обрабатывается цифровым алгоритмом, на выходе рассчитывается фазовый контраст снятого объекта, см. рисунок 3.б.

Рис. 3. а – интерферограмма одномодового волокна, б – фазовый контраст

Рис. 4. Профиль показателя преломления волокна АН007, рассчитанный из интерферограммы

Профиль фазового контраста, см. рис. 3б, несет в себе информацию о распределении показателя преломления. Для определения ПП необходимо применить преобразование Абеля над фазой.

В результате на рисунке 4 имеем ступенчатый ППП, Δn составляет $0,0054 \pm 0,0008$. Данный метод позволяет измерять показатель преломления волокон с точностью до 16%.

Заключение

В данной работе представлена реализация метода цифровой голографической интерферометрии для определения профиля показателя преломления оптического волокна.

Данная методика позволяет быстро, но с невысокой точностью оценить показатель преломления цилиндрических оптических элементов. Точность метода можно повысить, используя иммерсионную жидкость и более совершенную матрицу.

Однако стоит отметить, что невысокая точность измерения и расчетов обуславливается не самим методом измерения, а точностью и качеством снятия голограммы исследуемого объекта.

Список используемых источников:

1. Конин Ю.А., Гаранин А.И., Перминов А.В. Дефектоскопия оптических волокон и заготовок методом голографической интерферометрии // Прикладная фотоника. 2015. Т. 2. № 2.
2. Cody Jenkins. Digital holography and applications in Microscopic interferometry. California Polytechnic State University.
3. Nicolas Verrier, Michael Atlan. Off-axis digital hologram reconstruction: some practical considerations. Applied optics // Optical Society of America. 2011. 50(34). P. 136.
4. Chu P.L., Whitbread T., Chen Y.P. Noise analysis of refractive index profile measurements of an optical fibre and preform by deflection function techniques // Applied Scientific Research. 41 (1984). P. 289-300.

© 2015, Конин Ю.А., Гаранин А.И., Кривошеев А.И., Перминов А.В.

Определение профиля показателя преломления оптических волокон методом цифровой голографической интерферометрии

© 2015, Konin Yu.A., Garanin A.I., Krivosheev A.I., Perminov A.V.

Determination of the refractive index profile of optical fibers by digital holographic interferometry