

УДК 004.31:004.22:534:621.382

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ГОЛОГРАММЫ В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ

К. т. н. А. Н. Рудякова, к. т. н. А. Ю. Липинский, д. т. н. В. В. Данилов

Донецкий национальный университет
Украина, г. Донецк
lipinskii@mail.ru

В работе рассмотрена нестационарная математическая модель фоторефрактивной регистрирующей среды на основе кристалла ниобата лития в составе голографического коррелятора. Расчет передаточной характеристики Фурье-голограммы с использованием такой модели позволит повысить точность сравнения эталонного и объектного изображений за счет минимизации погрешности, вносимой величиной дифракционной эффективности.

Ключевые слова: голограмма, коррелятор, фоторефрактивный кристалл.

Формирование голограмм в фоторефрактивных кристаллах в результате записи интерференционной картины, образованной сигнальной и опорной волнами, перспективно с точки зрения их использования в системах голографической памяти, узкополосных голографических фильтрах и интегрально-оптических частотных модуляторах [1].

Кристалл LiNbO_3 отличается хорошим оптическим качеством, высокой температурой Кюри (1100°C), низкой темновой удельной электропроводностью, обладает сильным фотоэлектрическим эффектом, что делает его привлекательной фоторефрактивной средой для записи голограмм. Для фазовых голограмм, записываемых на этих кристаллах, характерны высокая разрешающая способность, реверсивность, достаточно длительное время сохранения глубины модуляции [1, 2].

Механизм записи голограмм в LiNbO_3 обусловлен диффузионным, фотовольтаическим и тепловым эффектами [2, 3]. Моделирование стационарных процессов записи дифракционных решеток в кристалле ниобата лития на основе решения связанной системы упрощенных уравнений Кухтарева выполнено в [3].

Применение фоторефрактивных материалов в оптических вычислительных устройствах предполагает моделирование процесса формирования голограмм в них для нестационарного случая. Математическая модель режима записи может быть построена на основе стандартной модели фоторефрактивного кристалла (Standard Photorefractive Model, SPM), расширенной с учетом фотовольтаической составляющей тока для кристалла ниобата лития [2]. Если пренебречь темновой проводимостью, то система уравнений, описывающая процесс записи, примет вид

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} - \frac{\nabla j}{e} = sIN - \gamma n_e N^+, \quad j = e\mu n_e E + k_B T \mu \nabla n_e + p_n NI,$$

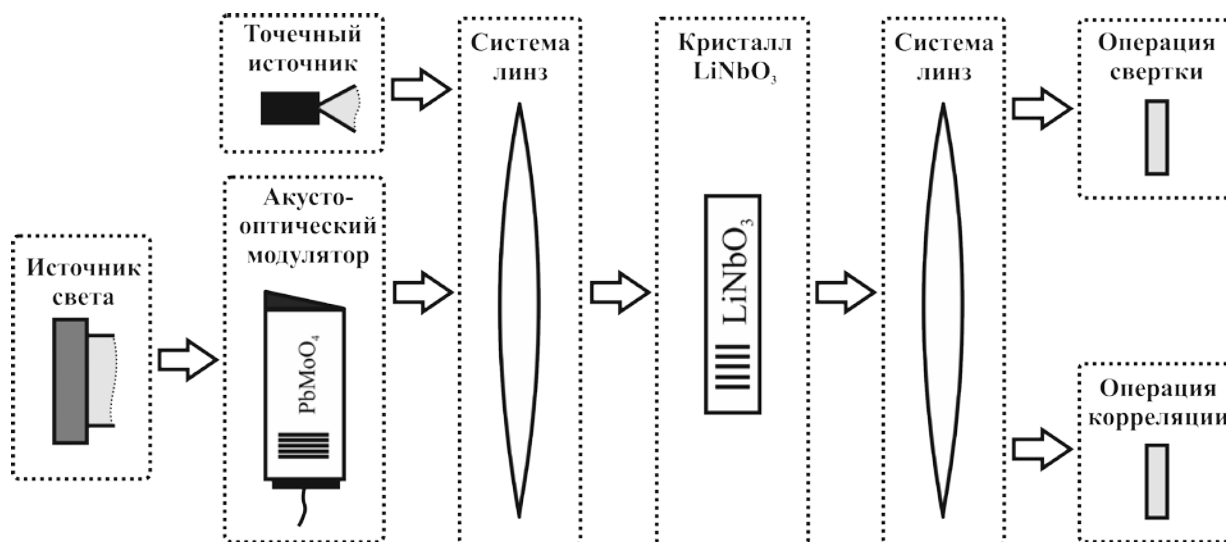
$$\frac{\partial (n_e - N^+)}{\partial t} = \frac{\nabla j}{e}, \quad \nabla E = -\frac{e(n_e + N_A - N^+)}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad N_D = N + N^+,$$

где n_e , N_D , N и N^+ — концентрации электронов, доноров, неионизированных и ионизированных доноров, соответственно; I — интенсивность света; s и γ — константы фотоионизации и рекомбинации; j — плотность тока; E — электрическое поле; e — заряд электрона; μ — подвижность фотоэлектронов; k_B — постоянная Больцмана; T — температура; p_n — фотовольтаическая константа; ε — диэлектрическая проницаемость среды; ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; N_A — концентрация акцепторов.

Система содержит кинетическое уравнение генерации фотоэлектронов, закон Ома, учитывающий дрейфовую, диффузионную и фотовольтаическую составляющие тока, уравнение непрерывно-

сти, уравнение Пуассона и уравнение баланса частиц. В ходе математического моделирования изменения показателя преломления кристалла LiNbO_3 , определяются n_e и E исключением N , N^+ и j из приведенной системы уравнений.

На основе полученной таким образом нелинейной системы уравнений выполняется моделирование процесса формирования голограмм в голографическом корреляторе, реализующем принципы «мягких» вычислений, основанных на теории нечетких множеств [4], блок-схема которого приведена на рисунке.



Устройство содержит источники света с формирователями световых потоков, акустооптический модулятор, систему линз, в фокальных плоскостях которых размещены: точечный источник света, источник эталонного/объектного изображения (акустооптический модулятор), регистрирующая среда (кристалл LiNbO_3), фотоэлектрические преобразователи.

Нестационарная математическая модель регистрирующей среды (LiNbO_3) делает возможным учет изменения интенсивности выходного светового потока для режима формирования (записи) голограммы эталонного сигнала и режима сравнения (чтения) эталонного сигнала с объектным, и, соответственно, учет погрешности, вносимой в значение дифракционной эффективности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Брунов В. С., Варжель С. В., Никоноров Н. В., Стригалева В. Е. Создание фотоиндуцированных брэгговских дифракционных структур в кристалле ниобата лития с помощью ультрафиолетового наносекундного эксимерного импульсного лазера // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО.— 2011.— № 4.— С. 27–31.
2. Yu F.T.S., Yin S. Photorefractive Optics: Materials, Properties, and Applications.— San Diego, CA: Academic Press, 2000. — 570 p.
3. Липинский А.Ю., Рудякова А.Н. Моделирование фоторефрактивного изменения показателя преломления в кристалле LiNbO_3 // Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. «Радиотехника».— 2011.— №164.— С. 150–154.
4. Васильев В.Н., Павлов А.В. Оптические технологии искусственного интеллекта.— СПб: СПбГУ ИТМО, 2008.— Т.1.— 81 с.

A.N. Rudiakova, A.Y. Lipinskii, V.V. Danilov

Mathematical model for hologram formation process in photorefractive crystal.

The nonstationary mathematical model of photorefractive recording media is considered in the paper. The lithium niobate crystal is used for hologram registration, which is the part of the holographic correlator. The Fourier hologram transfer characteristic design based on this model allows increasing the precision of etalon and object images comparison by minimizing the error introduced by the value of the diffraction efficiency.

Keywords: hologram, correlator, photorefractive crystal.