

На правах рукописи



Семкин Артем Олегович

**НЕОДНОРОДНЫЕ ФАЗОВЫЕ И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ
ДИФРАКЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ФОТОПОЛИМЕРНО-
ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ**

01.04.03 – Радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» на кафедре Сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Шарангович Сергей Николаевич

Официальные оппоненты:

Гейко Павел Пантелеевич, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория экологического приборостроения, ведущий научный сотрудник

Волошинов Виталий Борисович, кандидат физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», кафедра физики колебаний, доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук

Защита состоится 23 марта 2017 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.04, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (Главный корпус ТГУ, аудитория 119).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ:
<http://www.ams.tsu.ru/TSU/QualificationDep/co-searchers.nsf/newpublicationn/SemkinAO23032017.html>

Автореферат разослан « ____ » января 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Пойзнер Борис Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования определяется повсеместным внедрением оптических систем передачи, хранения и обработки информации. Рост объемов передаваемых данных и скорости их передачи и обработки требует разработки полностью оптических устройств, не предусматривающих оптоэлектронных и электрооптических преобразований сигналов. Таким образом, перед исследователями стоят задачи по выявлению новых и развитию известных фундаментальных принципов взаимодействия оптического излучения со статическими и динамическими структурами, сформированными в неоднородных и нелинейных средах.

С этой точки зрения перспективными представляются фотополимерные композиции, в том числе содержащие жидкие кристаллы. В них возможно формирование голографических фазовых дифракционных структур (ГФДС), а также поляризационных структур (ППДС). Голографический метод позволяет заранее определить параметры формируемых структур, т.к. они полностью определяются составом материала и условиями формирования.

Принято выделять два основных типа фотополимерных композиций с жидкими кристаллами: фотополимерно-жидкокристаллические материалы (ФПМ-ЖК), для которых характерно полное разделение фотополимера и жидкого кристалла при формировании структуры, и капсулированные полимером жидкие кристаллы (КПЖК), для которых характерно объединение молекул жидкого кристалла (ЖК) в капли («капсулы»).

Проведен широкий ряд экспериментальных и теоретических исследований по формированию различных дифракционных структур в указанных материалах и дифракции на них электромагнитных волн различных частотных диапазонов, однако до сих пор не решен ряд задач, в частности:

- не разработаны теоретические модели голографического формирования дифракционных структур, учитывающие как нелинейность процесса записи, так и амплитудно-фазовую неоднородность формирующего поля;
- не разработаны теоретические модели голографического формирования и поляризационных дифракционных структур и дифракции излучения на них;
- не описаны методы аподизации дифракционных структур, не связанные с изменением условий записи и их состава.

Таким образом, создание теоретических моделей формирования структур и дифракции волн на них, которые учтут произвольные характеристики формирующего поля, динамическое изменение параметров материала в процессе формирования, а также произвольный характер внешнего воздействия, представляется актуальной задачей.

Объектом исследования являются композиционные фотополимерно-жидкокристаллические материалы различного качественного и количественного состава. **Предметом исследования** являются модели сформированных в данных материалах методами голографии (в том числе поляризационной) дифракционных структур для оптического диапазона частот электромагнитных волн.

Целью диссертационной работы является установление закономерностей взаимодействия оптического излучения с фотополимерно-жидкокристаллическими композициями в процессе голографического формирования в них неоднородных фазовых и поляризационных дифракционных структур, а также в процессе дифракции электромагнитных волн на данных структурах в условиях воздействия пространственно-неоднородного внешнего электрического поля.

Для достижения цели в работе решались **следующие задачи:**

– разработка аналитической модели голографического формирования фазовых дифракционных структур в фотополимерно-жидкокристаллических композициях с учетом фотоиндуцированного изменения коэффициента поглощения материала, нелинейности процесса формирования, а также амплитудной и фазовой неоднородности формирующего поля;

– разработка аналитической модели голографического формирования поляризационных дифракционных структур в фотополимерно-жидкокристаллических композициях с учетом фотоиндуцированного изменения коэффициента поглощения материала, амплитудной и фазовой неоднородности формирующего поля, условий сцепления молекул и капсул жидкого кристалла с ограничивающими поверхностями и окружающей полимерной средой;

– на основе разработанных моделей исследование кинетик формирования фазовых и поляризационных дифракционных структур в фотополимерно-жидкокристаллических композициях с учетом всех перечисленных факторов;

– разработка аналитических моделей дифракции световых пучков на фазовых и поляризационных дифракционных структурах в фотополимерно-жидкокристаллических композициях в условиях амплитудной и фазовой неоднородностей профиля структуры, а также в условиях воздействия пространственно-неоднородного внешнего электрического поля;

– на основе разработанных моделей исследование зависимостей дифракционных и поляризационных характеристик фазовых и поляризационных структур от внешнего электрического поля, а именно от его величины и от формы его пространственной неоднородности.

Методы исследований. В качестве основы теоретического анализа формирования фазовых дифракционных структур в рассматриваемых композитах использовалась теория радикальной фотополимеризации. Для решения задач формирования использовались векторно-матричные методы решения систем дифференциальных уравнений. При разработке моделей формирования поляризационных структур для описания состояния поляризации формирующего поля использовался формализм Джонса. Дифракционные задачи описывались уравнениями связанных волн, поиск их решения выполнялся методом медленноменяющихся амплитуд, а также методом Римана для поиска самосогласованных решений.

Для численного исследования кинетики и вида пространственных амплитудно-фазовых распределений дифракционных структур, а также расчета их характеристик использовались методы компьютерного моделирования.

В работе также используются: теория диффузии, элементы геометрической и волновой оптики, преобразование Фурье.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. В процессе голографического формирования фазовой дифракционной структуры в фотополимерно-жидкокристаллической композиции пространственно амплитудно- и/или фазово-неоднородным полем в условиях нестационарного коэффициента поглощения материала (его фотоиндуцированного изменения) и соотношения характерных времен фотополимеризации и диффузии $T_P/T_M < 1$ величина вклада высших пространственных гармоник показателя преломления формируемой структуры в изменение ее профиля соразмерна с вкладом основной пространственной гармоники. Здесь изменение показателя преломления структуры $\Delta n(\mathbf{r}, t) = \sum_{i=0}^H n_i(\mathbf{r}, t) \cos(i \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{r})$, где $\mathbf{K} = \mathbf{v} \cdot 2\pi/\Lambda$, Λ – период структуры, \mathbf{v} – единичный вектор вдоль $grad[\Delta n(\mathbf{r}, t)]$, $i = 0..H$ – номер пространственной гармоники показателя преломления, $n_i(\mathbf{r}, t)$ – ее амплитуда.

2. При голографическом формировании дифракционной структуры в фотополимеризующейся композиции, содержащей нематические жидкие кристаллы, пучками оптического излучения произвольной поляризации, отдельный вклад в возмущение диэлектрической проницаемости материала вносит фотоиндуцированный переход Фредерикса. Для интенсивности формирующего поля, превышающей критическую (по Б.Я. Зельдовичу и Н.В. Табиряну), величина этого вклада соразмерна с вкладом фотополимеризационно-диффузионных процессов.

3. Индуцированный воздействием биполярного (скачкообразно меняющего свою полярность) электрического поля фазовый сдвиг дифракционной структуры, сформированной в фотополимерно-жидкокристаллической композиции в условиях сильного (по А.С. Сонину) поверхностного сцепления молекул жидкого кристалла с ограничивающими поверхностями, приводит к более быстрому снижению дифракционной эффективности структуры (для слабо расходящихся световых пучков), чем при воздействии униполярного поля (различие в 1,6 раза).

4. Для фотополимерно-жидкокристаллической дифракционной структуры с неоднородным амплитудно-фазовым профилем, в силу различия амплитуды изменения показателя преломления вдоль вектора решетки, характерна асимметрия ее дифракционной характеристики $\eta(\Delta)$ относительно прямой $\Delta=0$, где η – дифракционная эффективность, Δ – относительная расстройка от условий дифракции Брэгга (является функцией угла падения и частоты считывающего излучения). Степень данной асимметрии зависит от формы пространственной неоднородности и величины внешнего электрического поля.

Достоверность научных положений и результатов работы. Представленные в работе результаты получены численно-аналитическими методами. Их достоверность основывается на корректности постановки задач, использовании апробированных теоретических методов решения и физически-

обоснованных приближений. Кроме этого, в пользу достоверности и обоснованности полученных результатов свидетельствует следующее:

- достоверность первого защищаемого положения обеспечивается переходом разработанной модели к подтвержденным экспериментально теоретическим моделям других авторов [1, 2, 3, 4] при следующих условиях: формирование дифракционных структур однородным полем, учет только первой пространственной гармоники формируемой структуры;

- достоверность второго защищаемого положения обеспечивается качественным соответствием полученных теоретических зависимостей экспериментальным результатам других авторов, в частности [5, 6], при учете только ориентационного механизма формирования (за счет фотоиндуцированного перехода Фредерикса), а также результатам работ [7, 8] при учете только фотополимеризационно-диффузионного механизма;

- достоверность третьего и четвертого защищаемых положений подтверждается переходом полученных аналитических моделей к результатам теоретических работ [9, 10, 11, 12, 13, 14] и экспериментальных исследований [15, 16] других авторов при воздействии на дифракционные структуры пространственно-однородного электрического поля.

Новизна научных положений и результатов работы. Новизна первого защищаемого положения и соответствующих результатов (2016 г.) основана на сформированном в 2015 году предложении разработать трехмерную аналитическую модель формирования ГФДС, которая, в отличие от известных моделей, одновременно учтет:

- фотоиндуцированное изменение коэффициента поглощения;
- неоднородность формирующего поля;
- нелинейный характер процесса формирования, обусловленный произвольным соотношением времен полимеризации и диффузии компонент материала.

Новизна второго защищаемого положения и соответствующих результатов (2014-2015 гг.) основана на предложении (2013 г.) впервые теоретически обосновать экспериментальные результаты других авторов по формированию ГПДС в ФПМ-ЖК и КПЖК, а также разработать аналитическую модель формирования поляризационных структур, которая одновременно учтет:

- произвольное состояние поляризации формирующих пучков;
- фотоиндуцированное изменение коэффициента поглощения материала;
- сильное сцепление молекул ЖК с ограничивающими поверхностями.

Новизна третьего и четвертого защищаемых положений и соответствующих результатов (2013-2016 гг.) обусловлена отсутствием в литературных источниках сведений о влиянии пространственно-неоднородного электрического поля на дифракционные характеристики ГФДС и ГПДС в ФПМ-ЖК и КПЖК, в том числе в условиях неоднородности структур. Таким образом, в 2012 году было предложено впервые разработать аналитические модели дифракции световых пучков на данных структурах при воздействии на них электрического поля, имеющего пространственную неоднородность различной формы.

На основе полученных в рамках научных положений 1-4 аналитических моделей разработано программное обеспечение для моделирования характеристик устройств на основе описанных дифракционных структур. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ №2015610165 от 12.01.20115; №2015662631 от 27.11.15; №2015663325 от 15.12.15.

На основе полученных в рамках третьего научного положения результатов разработан дифракционный оптический элемент с более эффективной (по сравнению с известными аналогами) характеристикой управления. Патент на полезную модель №161905 от 20.04.2016 (приоритет с 29.10.15).

Научная значимость работы. Подход к описанию процесса голографического формирования дифракционных структур в первом научном положении позволяет увеличить предсказательную способность аналитических моделей формирования, что позволяет более точно обосновывать экспериментальные результаты.

Разработанные в рамках второго научного положения аналитические модели формирования поляризационных дифракционных структур позволяют, во-первых обосновать экспериментальные результаты, а во-вторых позволяют прогнозировать характеристики данных структур с учетом условий формирования и материальных параметров веществ, входящих в композицию, до проведения эксперимента.

Разработанные в рамках третьего и четвертого научных положений аналитические модели дифракции позволяют прогнозировать дифракционные и поляризационные характеристики исследуемых структур при воздействии на них пространственно-неоднородного электрического поля. Кроме этого, разработанные модели позволяют до проведения эксперимента подобрать форму пространственной неоднородности внешнего воздействия для получения заданных характеристик структуры.

Работа выполнялась в рамках фундаментальных исследований кафедры СВЧиКР ТУСУР и была поддержана государственными фондами и организациями, в том числе:

– по проекту 3.878.2014/К «Исследование физических явлений в фоторефрактивных кристаллах, фотополимерных нанокompозитных материалах, фотонных решетках и сверхрешетках в электрооптических кристаллах, в элементах энергонезависимой памяти, пленках ИТО и диоксида кремния, модифицированного углеродом» в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации;

– по проекту 2014/225 «Нелинейно-оптические и дифракционные явления в слоистых и волноводно-оптических структурах на основе микроструктурированных сегнетоэлектрических и полупроводниковых нитридных монокристаллов, пленок и жидкокристаллических сред» в рамках базовой части государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации;

– грантом РФФИ 14-32-50205 мол_нр «Разработка теоретической модели дифракции световых пучков на голографических поляризационных дифракционных структурах, сформированных в композитных фотополимерно-жидкокристаллических материалах».

Практическая значимость работы. В рамках третьего защищаемого положения методом численного моделирования показано, что воздействие знакопеременного поля на ГФДС в ФПМ-ЖК в условиях сильного поверхностного сцепления молекул жидкого кристалла (ЖК) с ограничивающими поверхностями позволяет снизить величину управляющего напряжения по сравнению с аналогичной структурой при воздействии пространственно-однородного электрического поля.

В рамках четвертого защищаемого положения методом численного моделирования показано, что плавная пространственная неоднородность управляющего электрического поля, воздействующего на дифракционную структуру с неоднородным амплитудно-фазовым профилем, позволяет снизить асимметрию изменения дифракционной характеристики структуры под действием поля до уровня не более 5%.

Работа поддерживалась грантом У.М.Н.И.К., фонда содействия развитию МФП в НТС, по проекту № УМНИК-1-13-1 000120, по теме «Разработка управляемых оптических делителей для реконфигурируемых оптических сетей нового поколения (PON)».

Личный вклад автора. Большинство результатов получено автором лично. Постановка задач исследования обработка и интерпретация полученных результатов выполнялась совместно с научным руководителем, к.ф.-м.н., с.н.с. С.Н. Шаранговичем, выступающим основным соавтором опубликованных работ. Кроме этого, математические выкладки при выводе самосогласованных решений дифракционных задач проводились при непосредственном участии научного руководителя.

Апробация работы и публикации. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях: Всероссийские школы-семинары «Физика и применение микроволн» и «Волновые явления в неоднородных средах» (Москва, МГУ, 2013, 2015, 2016 гг.); Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, ТГУ, 2013, 2015 гг.); Международная научно-техническая конференция «Квантовая электроника» (Минск, Беларусь, БГУ, 2013, 2015 гг.); International conference-school Foundations & Advances in Nonlinear Science and International Symposium Advances in Nonlinear Photonics (Minsk, Belarus, 2014); ICU International Congress on Ultrasonics (Metz, France, 2015); International Conference on Photorefractive Photonics PR-2015 (Villars, Switzerland, 2015); Asia-Pacific conference on «Fundamental Problems of Opto-and Micro-electronics (APCOM)» (Harbin, P.R. China, Heilongjiang University, 2013, Tokyo, Japan, Kokushikan University, 2014); International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL'13) (Sudak, Crimea, Ukraine, 2013); Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика» (Санкт-

Петербург, НИУ ИТМО, 2013, 2015 гг.); Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики – 2014», Санкт-Петербург (НИУ ИТМО 2014 г.); Международная конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, НИЯУ МИФИ, 2015, 2016 гг.); Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (Томск, ТУСУР, 2013, 2014, 2015 гг.).

По результатам диссертационной работы получено 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, 1 патент на полезную модель, опубликована 21 работа. Из них публикаций в научных журналах, которые включены в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук – 7, статей в зарубежных научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus – 4, статей в нерцензируемых научных журналах – 4, статей в сборниках материалов международных научных и научно-практических конференций – 6.

Внедрение. Результаты работы использованы на кафедре СВЧиКР ТУСУРа, при выполнении НИР, а также в учебном процессе в виде компьютерных программ при проведении практических и лабораторных работ. Кроме этого, результаты работы (теоретические модели и результаты численного моделирования) использовались в НИОХ СО РАН при интерпретации результатов экспериментальных исследований.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 138 наименований и четырех приложений. Работа содержит 177 страниц машинописного текста, включая 50 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, приведены цель и задачи работы, сформулированы выносимые на защиту научные положения, определены новизна, научная и практическая значимость научных положений и полученных результатов.

В первой главе приведен обзор литературы, посвященной формированию голографических дифракционных структур (ГДС) в фотополимеризующихся композициях различного состава, а также дифракции волн оптического диапазона на данных структурах. Рассмотрены композиционные фотополимерные материалы, содержащие жидкие кристаллы.

В разделе 1.1 описан компонентный состав фотополимерных композиций, а также процесс формирования ГДС. Введены основные понятия и характеристики дифракционных структур. Описаны наиболее известные композиции и характеристики ГДС на их основе.

Раздел 1.2 посвящен фотополимерным композициям, содержащим жидкие кристаллы (ЖК). Сформулирован тезис о рассмотрении в рамках работы двух типов композиций. Это капсулированные полимером жидкие кристаллы (КПЖК) и фотополимерно-жидкокристаллические материалы ФПМ-ЖК.

В разделе 1.3 проведен обзор известных на данный момент результатов исследований фотополимеризационно-диффузионного процесса формирования голографических фазовых дифракционных структур.

Раздел 1.4 посвящен ориентационным электрооптическим эффектам, характерным для содержащих жидкие кристаллы композиций. В том числе описан фотоиндуцированный переход Фредерикса – процесс изменения ориентации молекул (капсул) жидкого кристалла под действием электрического поля волн оптического диапазона частот. Описаны известные результаты экспериментов по основанному на данном эффекте формированию голографических поляризационных дифракционных структур.

В разделе 1.5 проведен обзор результатов исследований дифракционных характеристик структур, а также их электрооптических свойств. Описаны основные теоретические модели дифракции света на исследуемых структурах.

В разделе 1.6 рассмотрены известные методы аподизации исследуемых дифракционных структур.

Раздел 1.7 посвящен основным областям применения голографических дифракционных структур в фотополимерно-жидкокристаллических композициях.

Во второй главе разработана трехмерная негармоническая теоретическая модель голографического формирования фазовых дифракционных структур (ГФДС) в фотополимерных композициях, содержащих жидкие кристаллы.

В разделе 2.1 описаны исследуемые материалы и их оптические свойства.

В разделе 2.2 разработана теоретическая модель формирования ГФДС, учитывающая как нелинейность процесса записи, так и амплитудно-фазовую неоднородность формирующего поля.

Геометрия формирования ГФДС и векторная диаграмма приведены на рис. 1.

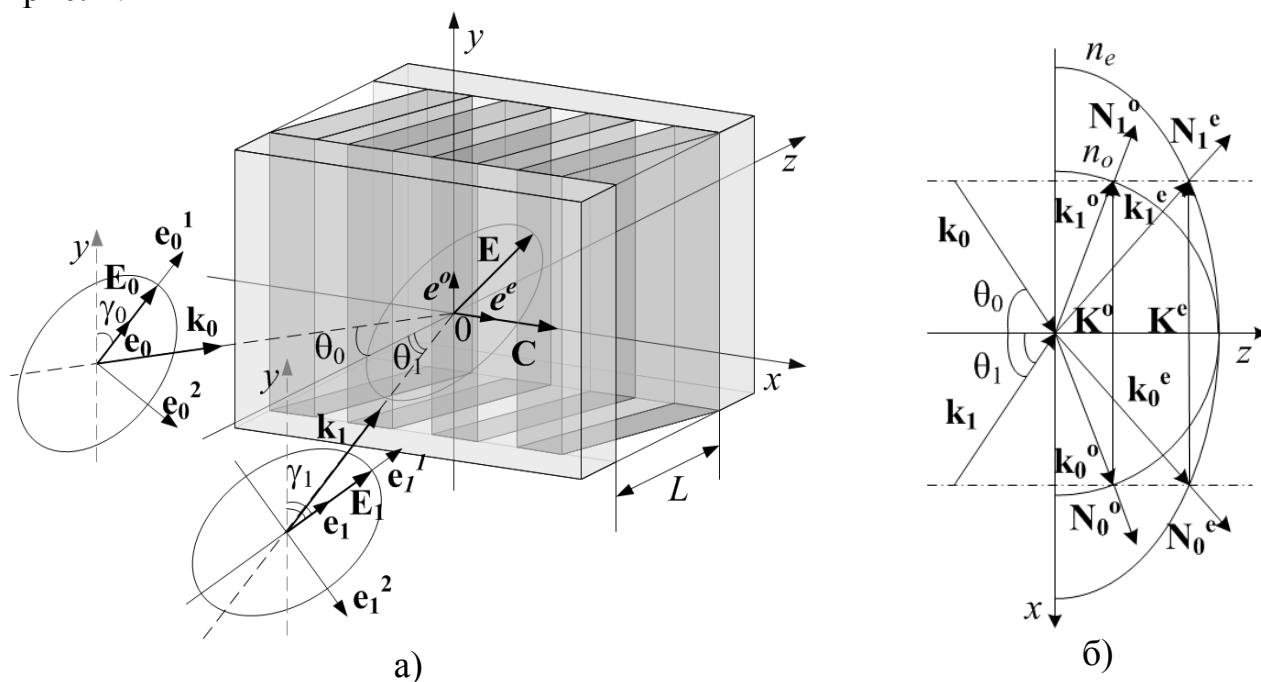


Рисунок 1 – Голографическое формирование фазовых дифракционных структур:
 а) геометрия формирования; б) векторная диаграмма

На рис. 1 $\mathbf{E}_j(\mathbf{r}) = A_j(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{e}_j \cdot \exp[i \cdot \varphi_j(\mathbf{r})]$ – векторы электрической напряженности падающих пучков; \mathbf{k}_j – волновые векторы; $A_j(\mathbf{r})$, $\varphi_j(\mathbf{r})$ – пространственные амплитудные и фазовые профили формирующих пучков соответственно; $\mathbf{e}_j = (\mathbf{e}_j^1 + i \cdot \rho_j \cdot \mathbf{e}_j^2) / \sqrt{1 + \rho_j^2}$ – единичные комплексные векторы поляризации в собственных поляризационных базисах; $\mathbf{e}_j^1, \mathbf{e}_j^2$ – орты собственных поляризационных базисов; ρ_j – эллиптичности эллипсов поляризации; $j = 0, 1$; θ_j, γ_j – углы падения и поляризации падающих пучков; \mathbf{N}_j^m – волновые нормали (см. рис. 1б); $m = o$ соответствует собственной обыкновенной волне в образце, $m = e$ соответствует собственной необыкновенной волне в образце.

С учетом анизотропии материала записывающие волны внутри образца:

$$\mathbf{E}_j^m(\mathbf{r}, t) = A_j(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{e}_j^m \cdot \exp[i \cdot \varphi_j(\mathbf{r})] \cdot \exp[\alpha(\mathbf{r}, t) \cdot (\mathbf{N}_j^m \cdot \mathbf{r})], \quad (1)$$

где $\alpha(\mathbf{r}, t)$ – коэффициент поглощения с учетом его фотоиндуцированного изменения; \mathbf{N}_j^m – волновые нормали (см. рис. 1б); $m = o$ соответствует собственной обыкновенной волне в образце, $m = e$ соответствует собственной необыкновенной волне в образце.

Формируемая в образце интерференционная картина описывается выражением для пространственно-временного распределения интенсивности:

$$I(\mathbf{r}, t) = \sum_{m=o,e} (I_0^m(\mathbf{r}, t) + I_1^m(\mathbf{r}, t)) \cdot [1 + m^m(\mathbf{r}) \cos(\mathbf{K}^m \cdot \mathbf{r})], \quad (2)$$

где $m^m(\mathbf{r}, t) = 2\sqrt{I_0^m(\mathbf{r}, t) \cdot I_1^m(\mathbf{r}, t)} \cdot (\mathbf{e}_0^m \cdot \mathbf{e}_1^m) / (I_0^m(\mathbf{r}, t) + I_1^m(\mathbf{r}, t))$ – локальный контраст; $I_j^m(\mathbf{r}, t) = |\mathbf{E}_j^m(\mathbf{r}, t)|^2$; $\mathbf{K}^m = \mathbf{k}_1^m - \mathbf{k}_0^m$ – вектор решетки (см. рис. 1б).

В основу развиваемой модели формирования положены кинетические уравнения фотополимеризационно-диффузионного формирования, расширенные для случая материала, содержащего жидкие кристаллы [7]:

$$\frac{\partial M^m(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \text{div} [D_M^m(\mathbf{r}, t) \text{grad} M^m(\mathbf{r}, t)] - [P \cdot I^m(\mathbf{r}, t)]^k (M^m(\mathbf{r}, t))^h, \quad (3)$$

$$\frac{\partial n^m(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \delta n_p \cdot [P \cdot I^m(\mathbf{r}, t)]^k \frac{(M^m(\mathbf{r}, t))^h}{M_n} + \delta n_{lc} \text{div} \left[D_{LC}^m(\mathbf{r}, t) \text{grad} \frac{M^m(\mathbf{r}, t)}{M_n} \right], \quad (4)$$

где $M^m(\mathbf{r}, t)$, $n^m(\mathbf{r}, t)$ – концентрация мономера и показатель преломления соответственно; M_n – начальная концентрация мономера; P – коэффициент, определяемый параметрами и составом материала; $I^m(\mathbf{r}, t)$ – интерференционная картина (2); $D_M^m(\mathbf{r}, t)$, $D_{LC}^m(\mathbf{r}, t)$ – коэффициенты диффузии мономера и ЖК; δn_p , δn_{lc} – коэффициенты вклада процессов фотополимеризации и диффузии жидкого кристалла; k, h характеризуют степень нелинейности процесса формирования.

Решение уравнений (3), (4) найдено в виде суммы пространственных гармоник:

$$M^m(\mathbf{r}, t) = \sum_{i=0}^H M_i^m(\mathbf{r}, t) \cos(i \cdot \mathbf{K}^m \mathbf{r}), \quad (5)$$

$$n^m(\mathbf{r}, t) = n_{st} + \sum_{i=0}^H n_i^m(\mathbf{r}, t) \cos(i \cdot \mathbf{K}^m \mathbf{r}). \quad (6)$$

Решение для амплитуды i -ой гармоники показателя преломления получено в виде:

$$n_i^m(\mathbf{r}, \tau) = n_i^m(\mathbf{r}, \tau) \Big|_p + n_i^m(\mathbf{r}, \tau) \Big|_{lc}, \quad (7)$$

где $n_i^m(\mathbf{r}, \tau) \Big|_p$ характеризует вклад в амплитуду гармоники фотополимеризационного процесса, $n_i^m(\mathbf{r}, \tau) \Big|_{lc}$ характеризует диффузионный процесс, $\tau = t/T_M^m$ – относительное время; T_M^m – характерное время диффузии мономера

При этом полученное решение (в отличие от известных моделей) учитывает пространственную неоднородность амплитудных и фазовых распределений формирующего поля через внутренний параметр $b^m(\mathbf{r}, \tau) = T_P^m(\mathbf{r}, \tau)/T_M^m(\mathbf{r})$, характеризующий соотношение характерных времен фотополимеризационного $T_P^m(\mathbf{r}, \tau)$ и диффузионного $T_M^m(\mathbf{r})$ процессов.

В разделе 2.3 на основе результатов численного моделирования показано, что гармонический состав ГФДС определяется величиной параметра b^m , который в свою очередь неоднороден и нестационарен. Таким образом, расчет параметра b^m в каждой точке образца позволяет описать профиль показателя преломления структуры в данной точке. Вклад высших пространственных гармоник в профиль показателя преломления ГФДС при различных b^m можно оценить из графика зависимостей $|n_i^e(b^e)|$ (расчет производился только для структуры, формируемой необыкновенными волнами в материале) (рис. 2а). Количественную оценку соотношения вкладов гармоник в изменение показателя преломления ГФДС можно провести путем анализа зависимостей отношения амплитуд $|n_i^e(b^e)|/|n_1^e(b^e)|$ (рис. 2б).

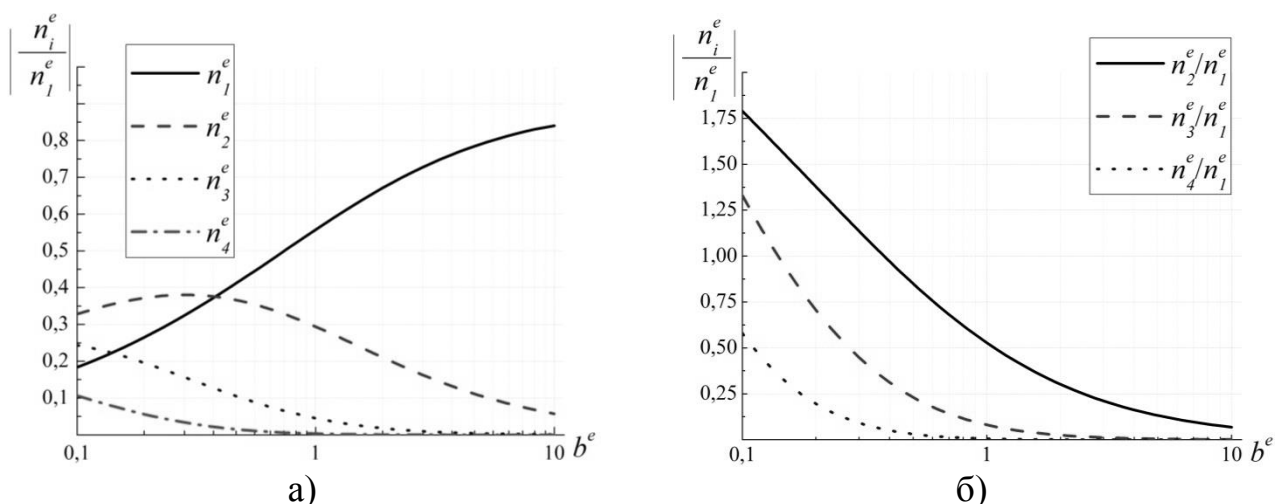


Рисунок 2 – Амплитуды гармоник показателя преломления в зависимости от соотношения характерных времен фотополимеризации и диффузии

При $b^m < 1$ величина вклада высших пространственных гармоник показателя преломления формируемой структуры в изменение ее профиля соразмерна с вкладом основной пространственной гармоники (или превышает его) (рис. 2). Поскольку изменения профиля структуры, обусловленные затуханием и амплитудно-фазовой неоднородностью формирующего поля, могут быть выражены через изменение b^e , закономерности, проиллюстрированные рис. 2, характерны для любой пространственной точки образца в любой момент процесса формирования.

Таким образом, в разделе показано, что при описании процесса формирования ГФДС неоднородным полем в фотополимерных композитах, содержащих жидкие кристаллы, необходимо учитывать, в том числе и высшие пространственные гармоники. Точное определение пространственного распределения показателя преломления позволит повысить точность теоретического предсказания дифракционных свойств сформированной структуры.

В третьей главе разработана теоретическая модель голографического формирования поляризационных дифракционных структур (ГПДС) произвольно поляризованными пучками света с учетом фотоиндуцированного изменения коэффициента поглощения материала и сильного поверхностного сцепления молекул жидкого кристалла с ограничивающими поверхностями.

Раздел 3.1 содержит описание исследуемых материалов и выражения для соответствующих тензоров диэлектрической проницаемости.

В разделе 3.2 разработана теоретическая модель формирования ГПДС методами поляризационной голографии.

Геометрия формирования ГПДС в общем случае совпадает с описанной выше для ГФДС. Однако для рассмотрения записи только поляризационных структур необходимо принять, что формирующие пучки имеют ортогональные состояния поляризации. Тогда разность фаз между интерферирующими волнами приводит к изменению состояния поляризации результирующего поля, но не к

модуляции интенсивности. Благодаря способности ЖК изменять свою ориентацию вдоль направления вектора напряженности электрического поля под действием фотоиндуцированного перехода Фредерикса, в образце ФПМ-ЖК (КПЖК) формируется решетка с периодически повторяющейся ориентацией молекул (капсул) ЖК. Стабилизация данной ориентации происходит вследствие процесса фотополимеризации. После завершения процессов формирования в образце наблюдается периодическая пространственная неоднородность анизотропии оптических свойств.

Для описания поляризационных характеристик оптического поля используется формализм Джонса с учетом фазовой и амплитудной неоднородности формирующих пучков:

$$J_j(\mathbf{r}, t) = A_j(\mathbf{r}) \cdot \exp[-\alpha(\mathbf{N}_j \cdot \mathbf{r}, t)] \exp[i \cdot \varphi_j(\mathbf{r})] \cdot M_j \cdot R_j \cdot D_j, \quad (8)$$

где D_j – векторы Джонса произвольно поляризованных пучков в собственных поляризационных базисах; R_j , M_j – матрицы обратного поворота координатных осей.

Тогда вектор Джонса результирующей волны будет иметь вид:

$$J(\mathbf{r}, t) = \sum_{j=0,1} J_j(\mathbf{r}, t). \quad (9)$$

Распределение азимута $\psi(\mathbf{r})$ и эллиптичности $\rho(\mathbf{r})$ поляризационного эллипса результирующего поля можно определить путем введения фазора $\mu(\mathbf{r}, t) = J^o(\mathbf{r}, t) / J^e(\mathbf{r}, t)$, $J^e(\mathbf{r}, t)$ – составляющие вектора Джонса результирующей волны (9), соответствующие собственным волнам в образце [17]:

$$\psi(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2} \cdot \arctg \left(\frac{2 \cdot \text{Re}[\mu(\mathbf{r}, t)]}{1 - |\mu(\mathbf{r}, t)|^2} \right), \quad (10)$$

$$\rho(\mathbf{r}, t)^2 = \frac{1 - \left[1 + 4 \cdot \text{Im}^2[\mu(\mathbf{r}, t)] / (1 - |\mu(\mathbf{r}, t)|^2)^2 \right]^{0.5}}{1 + \left[1 + 4 \cdot \text{Im}^2[\mu(\mathbf{r}, t)] / (1 - |\mu(\mathbf{r}, t)|^2)^2 \right]^{0.5}}. \quad (11)$$

Зависимость угла поворота директора от напряженности внешнего электрического поля $\varphi_E(\mathbf{r}, t)$ для ФПМ-ЖК определяется из решения уравнения Фредерикса [18], которое в общем случае может быть решено только численно.

Для КПЖК, в отличие от ФПМ-ЖК, угол поворота директора капсул ЖК определяется их размерами, а также энергией их сцепления с окружающим фотополимером, а не с ограничивающими поверхностями.

Периодическое изменение ориентации директора молекул (капсул) ЖК, характерное для записанной в ФПМ-ЖК (КПЖК) ГПДС, обуславливает возмущение тензора диэлектрической проницаемости для ФПМ-ЖК, которое так же имеет периодический характер. Соответственно, по аналогии с ГФДС, оно может быть представлено в виде ряда Фурье по пространственным гармоникам тензора диэлектрической проницаемости $\Delta \hat{\epsilon}_i(\mathbf{r}, t) \Big|_{lc}$.

В разделе 3.3 на основе результатов численного моделирования амплитуд гармоник диэлектрического тензора ФПМ-ЖК (КПЖК) для двух характерных случаев линейной и круговой ортогональной поляризации формирующих пучков показано, что в составе формируемых ГПДС преобладают четные пространственные гармоники. При этом формирование двумя волнами с ортогональной круговой поляризацией приводит к более выраженному гармоническому характеру ГПДС по сравнению со структурой, сформированной линейно поляризованными волнами, в виду отсутствия модуляции эллиптичности. Распределение углов поворота молекул ЖК приведено на рис. 3. Рассчитанные амплитуды пространственных гармоник диэлектрического тензора приведены на рис. 4. На рис. 3, 4 E_c – критическая напряженность электрического поля перехода Фредерикса [18].

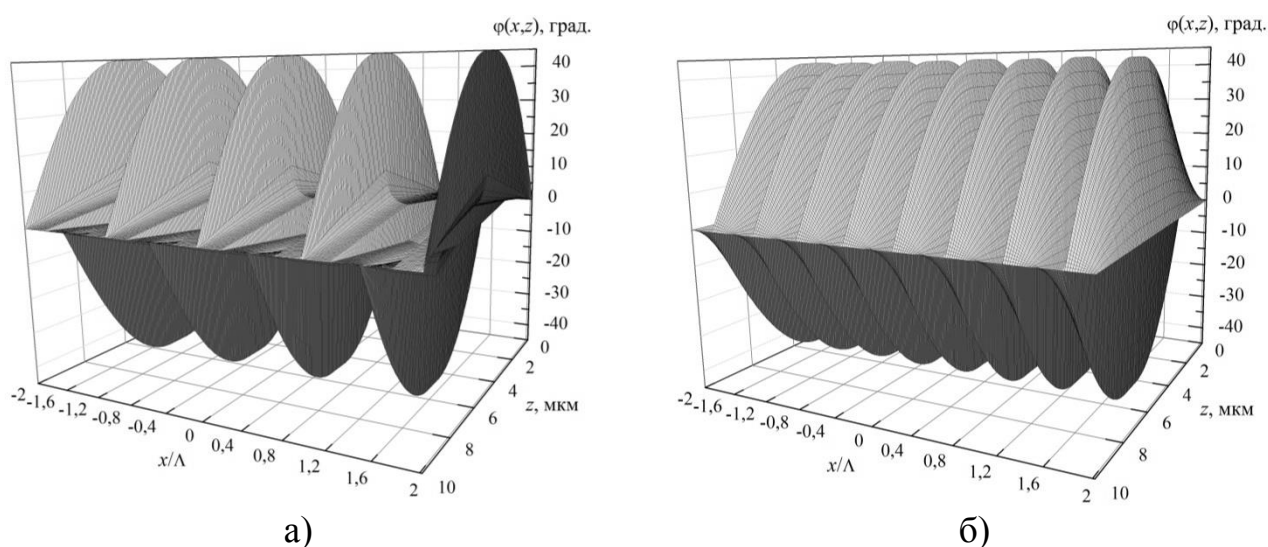


Рисунок 3 – Пространственные распределения угла поворота директора ЖК: а) $|\mathbf{E}| = 1.5E_c$, $t = 50$ сек., линейная поляризация; б) $|\mathbf{E}| = 1.5E_c$, $t = 50$ сек., круговая поляризация

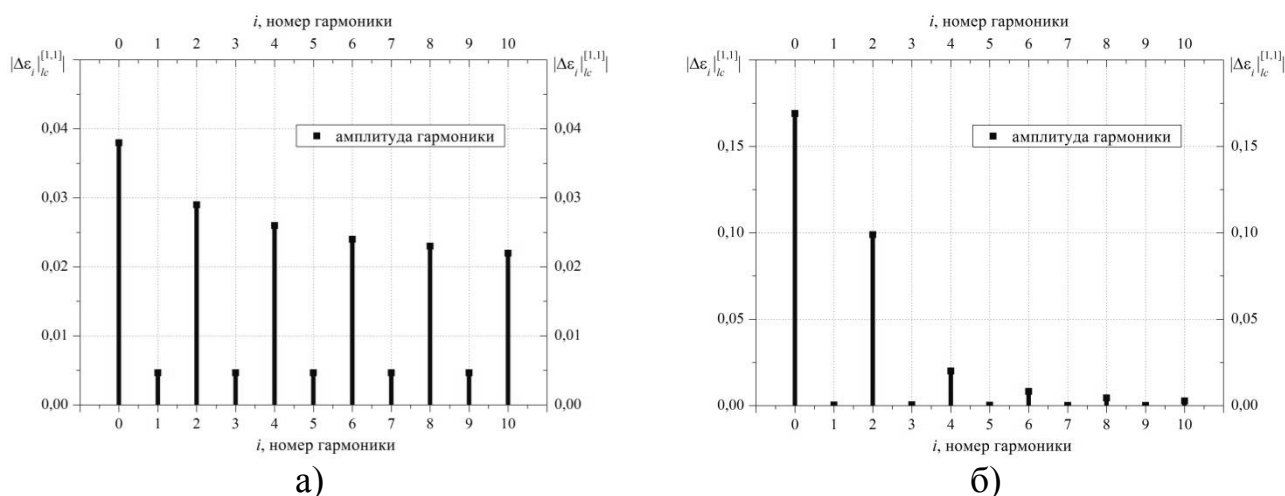


Рисунок 4 – Гармоники диагонального элемента [1,1] диэлектрического тензора ФПМ-ЖК в центре образца ($z = 5$ мкм): а) $|\mathbf{E}| = 1.5E_c$, $t = 50$ сек., линейная поляризация; б) $|\mathbf{E}| = 1.5E_c$, $t = 50$ сек., круговая поляризация

Преобладание четных гармоник (в частности второй) в структуре ГПДС физически можно объяснить симметричностью молекул ЖК относительно оси их вращения. Поэтому изменение диэлектрической проницаемости при повороте молекулы на положительный угол будет аналогичным изменению при повороте на отрицательный угол, и таким образом, период изменения $\Delta\hat{\epsilon}_{lc}(\mathbf{r}, t)$ удваивается.

Рисунки 3, 4 показывают, что в условиях интенсивности записывающего поля, превышающей E_c , возмущение тензора диэлектрической проницаемости и, следовательно, показателя преломления, вызванное процессами формирования ГПДС, может быть соизмеримо с возмущением, вызванным процессами формирования ГФДС в этом же образце. Особенно ярко данный эффект будет проявляться при состояниях поляризации записывающих пучков, близких к ортогональным.

Для подтверждения данного вывода произведена количественная оценка амплитуды второй гармоники диэлектрической проницаемости полимера при формировании ГФДС, исходя из следующих условий: средний показатель преломления композиции $n = 1.54$; $\delta n_p \approx 0.004$ (определена из экспериментов [19]); $\delta n_{lc} = 10 \cdot \delta n_p$ (характерно для ФПМ-ЖК); амплитуда второй гармоники показателя преломления $n_2^e = 0.35$ (рис. 2а). Тогда $\Delta\hat{\epsilon}_2^{ГФДС} \approx 2 \cdot 1.54 \cdot 10 \cdot 0.004 \cdot 0.35 = 0.043$. При этом амплитуда второй гармоники ГПДС (см. рис. 4) находится в пределах $\Delta\hat{\epsilon}_2^{ГПДС} = 0.03 \div 0.1$. Произведенная оценка показывает справедливость вывода о соразмерности вкладов двух механизмов формирования.

В разделе также показано, что для ГПДС в КПЖК справедливы те же выводы, что и для ФПМ-ЖК с учетом отсутствия сцепления капсул ЖК с ограничивающими поверхностями.

В разделе 3.4 приведена аналитическая модель многопучкового формирования сложных неоднородных поляризационных структур методом углового мультиплексирования.

В четвертой главе разработаны теоретические модели дифракции Брэгга световых пучков на неоднородных голографических дифракционных структурах. Рассмотрены дифракционные и поляризационные характеристики данных структур. В основе полученных моделей лежат уравнения связанных волн, записанные для амплитуд прошедшего и дифрагировавшего в первый порядок пучков. Энергообмен между ними происходит вследствие периодического изменения диэлектрической проницаемости материала. Поскольку процесс записи как ГФДС, так и ГПДС приводит именно к периодическому изменению диэлектрической проницаемости, полученные в данном разделе выражения справедливы как для фазовых, так и для поляризационных неоднородных структур.

Также, в данной главе рассмотрено влияние внешнего электрического поля (в том числе пространственно неоднородного) на характеристики структур с учетом сильного сцепления молекул ЖК с опорными поверхностями.

Раздел 4.1 посвящен формулировке дифракционной задачи. В нем приведены геометрия дифракции и введены основные понятия и обозначения.

В разделе 4.2 записаны исходные уравнения связанных волн (УСВ) [10] Также определены входящие в них параметры и характеристики.

В разделе 4.3 исходные уравнения УСВ дополнены зависимостью амплитудных распределений дифрагировавших пучков от величины внешнего электрического поля и формы его пространственной неоднородности. В наиболее общем случае УСВ имеют вид:

$$\mathbf{N}_{r_0}^m(\mathbf{r}, E) \cdot \nabla E_0^m(\mathbf{r}, E) = -iC_1^m(\mathbf{r}, E)E_1^m(\mathbf{r}, E)n_n(\mathbf{r}) \exp[+i\Theta^m(\mathbf{r}, E)], \quad (12)$$

$$\mathbf{N}_{r_1}^m(\mathbf{r}, E) \cdot \nabla E_1^m(\mathbf{r}, E) = -iC_0^m(\mathbf{r}, E)E_0^m(\mathbf{r}, E)n_n(\mathbf{r}) \exp[-i\Theta^m(\mathbf{r}, E)], \quad (13)$$

где $E_j^m(\mathbf{r}, E)$ – амплитудные профили пучков; $\mathbf{N}_{r_{0,1}}^m$ – групповые нормали;

$\mathbf{E}_j(\mathbf{r}, E) = \mathbf{N}_{r_{0,1}}^m \cdot E_j^m(\mathbf{r}, E)$; $C_j^m(\mathbf{r}, E)$ – амплитудные коэффициенты связи; $n_n(\mathbf{r})$ – нормированный амплитудный профиль показателя преломления структуры;

$\Theta^m(\mathbf{r}, E) = \int_0^z \Delta K^m(\mathbf{r}, E) dz'$ – параметр интегральной фазовой расстройки;

$\Delta K^m(\mathbf{r}, E)$ – модуль вектора фазовой расстройки.

Раздел 4.4 посвящен поиску общего вида решения дифракционных задач для всех рассматриваемых структур. Приведены выражения для амплитудных профилей дифрагировавших пучков в ближней зоне, полученные решением расширенных УСВ в приближении заданного поля. Кроме этого, приведены самосогласованные решения задач дифракции на ГФДС и ГПДС для ФПМ-ЖК (аналогично [10]) и для КПЖК (аналогично [13]) при воздействии на них однородного электрического поля.

Определение амплитудных профилей дифрагировавших пучков в дальней зоне выполнено через представление пучков в виде их угловых спектров (УС):

$$E_j^m(\theta, E) = T_j^m(\Delta, E) \cdot E_{inc}^m(\theta), \quad (14)$$

где $E_{inc}^m(\theta)$ – УС падающего пучка; $T_j^m(\Delta, E)$ – соответствующие передаточные функции (ПФ), описывающие Брэгговское взаимодействие падающего пучка с дифракционной структурой; E – напряженность внешнего электрического поля; $\Delta = \Delta K(\omega, \theta)$ – изменение модуля вектора фазовой расстройки, характеризующее отклонение частоты и угла падения от условий дифракции Брэгга и не связанное с воздействием внешнего электрического поля.

Раздел 4.5 посвящен решению дифракционных задач для различной формы пространственной неоднородности внешнего электрического поля. Отдельно рассмотрено биполярное (знакопеременное) поле, скачком меняющее свою полярность на апертуре падающего пучка.

Для данного случая решение найдено в виде суммы амплитудных распределений пучков, дифрагировавших на областях воздействия электрического поля разной полярности:

$$E_0^m(\theta, E) = E_{inc0}^m(\theta)T_{00}^m(\Delta, E) + E_{inc1}^m(\theta)T_{01}^m(\Delta, E),$$

$$E_1^m(\theta, E) = E_{inc0}^m(\theta)T_{10}^m(\Delta, E) + E_{inc1}^m(\theta)T_{11}^m(\Delta, E),$$
(15)

где введенные парциальные передаточные функции $T_{ij}^m(\Delta, E)$ описывают дифракцию на каждой области.

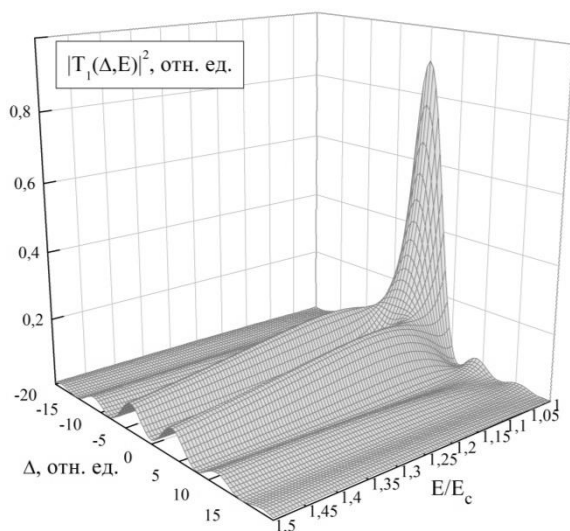


Рисунок 5 – Результаты численного моделирования $|T_1^e(\Delta, E)|^2$

В разделе 4.6 на основе результатов численного моделирования показано, что для знакопеременного поля зависимость модуля суммарной передаточной функции $|T_1^e(\Delta, E)|^2$ от относительной фазовой расстройки Δ и величины внешнего электрического поля имеет неоднородный характер (рис. 5).

Показано, что скорость спада величины дифракционной эффективности при воздействии знакопеременного поля в 1,6

раза выше, чем при воздействии пространственно однородного поля. Этот эффект можно объяснить интерференцией волн, дифрагировавших на областях разной полярности внешнего поля. Разность фаз между ними растет от 0 до π с увеличением напряженности электрического поля. Таким образом, путем изменения условий фазового синхронизма можно повысить эффективность управления дифракционными характеристиками структуры электрическим полем.

В разделе также показано, что поляризационные характеристики дифрагировавшего на поляризационной структуре (ГПДС) пучка зависят от состояния поляризации падающего излучения. Дифрагировавший пучок остается ортогонально поляризованным по отношению к падающему. Этот факт подтверждает принцип поляризационной голографии – восстановление поляризации формирующего излучения. Кроме этого, внешнее электрическое поле $E > E_c$ может изменять состояние поляризации дифракционного поля.

В разделе 4.7 приведено описание управляемого знакопеременным полем дифракционного элемента.

Раздел 4.8 посвящен дифракционным характеристикам амплитудно-фазово неоднородных дифракционных структур под воздействием пространственно-неоднородного электрического поля. В качестве примера в разделе рассмотрены чирпированные голографические дифракционные структуры (ЧГДС), для них получено решение системы УСВ в приближении заданного поля в виде амплитудного распределения дифрагировавшей в первый порядок волны (рис. 6).

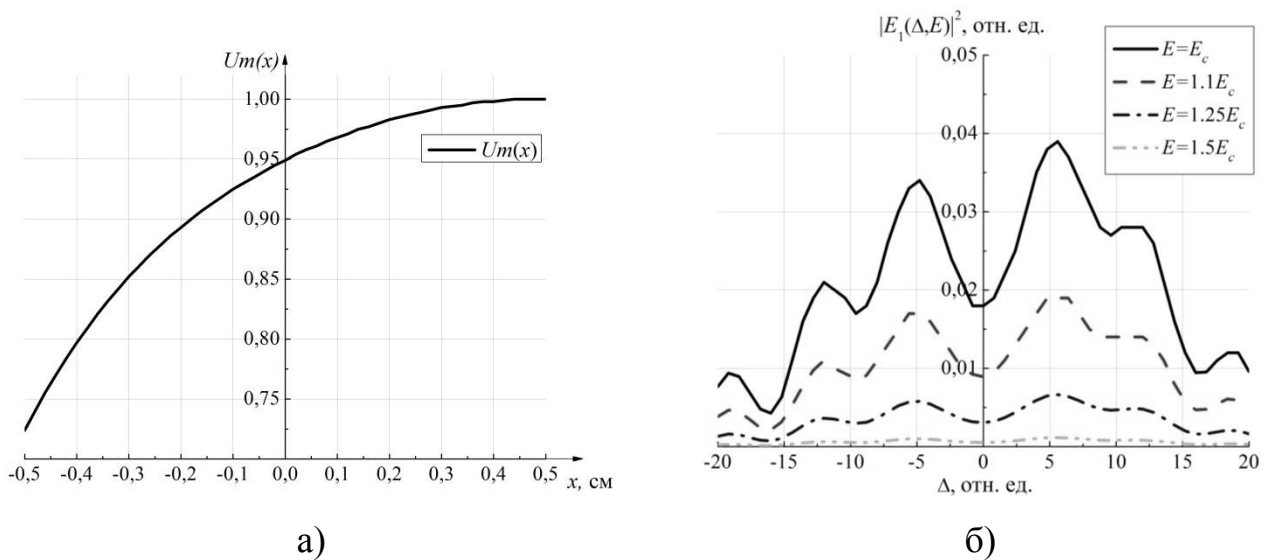


Рисунок 6 – Амплитудный профиль ГФДС (а) и результаты численного моделирования амплитудного распределения дифракционного поля (б)

Неоднородность амплитудно-фазового профиля искажает дифракционную характеристику ЧГДС (рис. 6). Внешнее однородное электрическое поле снижает амплитуду характеристики, а также вносит дополнительные искажения.

В разделе показано, что применение пространственно-неоднородного внешнего воздействия может частично компенсировать искажение формы дифракционной характеристики. Количественная оценка компенсации асимметрии внешним воздействием различной формы (рис. 7а), произведена путем определения симметрии зависимости $|E_1(\Delta, E)|^2$ относительно прямой $\Delta = 0$ (рис. 7б) по следующему выражению:

$$\delta(E) = \left(\int_{-20}^0 |E_1(\Delta, E)|^2 d\Delta - \int_0^{20} |E_1(\Delta, E)|^2 d\Delta \right) \cdot \left(\int_{-20}^0 |E_1(\Delta, E)|^2 d\Delta \right)^{-1} \cdot 100\% . \quad (16)$$

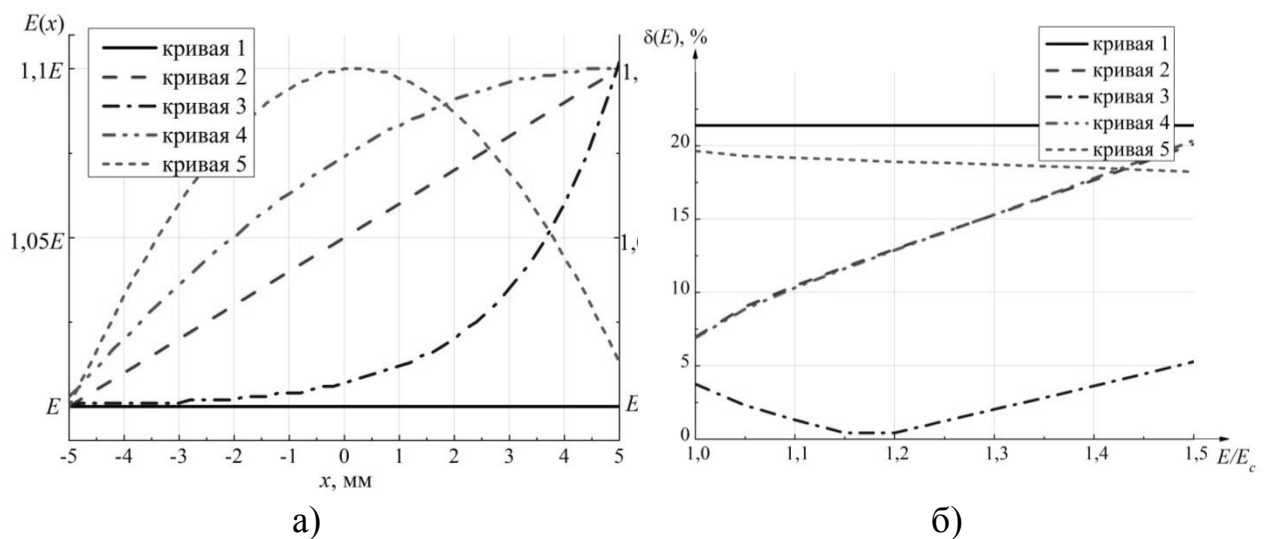


Рисунок 7 – Результаты численного моделирования: а) – вид функции неоднородности внешнего воздействия; б) – степень асимметрии характеристики при разных видах внешнего воздействия

Для принятого амплитудного профиля ГФДС (рис. 6а) однородное воздействие различной величины (кривая 1) обуславливает асимметрию характеристики на уровне около 21% (рис. 7б). Компенсацию асимметрии характеристики до уровня не более 5% во всей области значений $E = 1 \div 1.5E_c$ обеспечивает возрастающая, выпуклая вниз функция (кривая 3). Очевидно, это связано с соответствием вида функции неоднородности $E(x)$ и амплитудного профиля структуры $U_m(\mathbf{r})$ (рис. 6а). Однако, максимальный эффект компенсации асимметрии характеристики наблюдается только в области $E = 1.15 \div 1.2E_c$, что связано с нелинейностью зависимостей $C_0^e(\mathbf{r}, E)$ и $\Delta K(\mathbf{r}, E)$ от величины внешнего воздействия.

Таким образом, для максимальной компенсации асимметрии дифракционной характеристики структуры необходимо выполнять подбор функции $E(\mathbf{r})$ не только для заданного вида амплитудно-фазового профиля ГФДС, но и для заданной величины внешнего воздействия.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Впервые разработана трехмерная аналитическая модель формирования ГФДС в ФПМ-ЖК и КПЖК, одновременно учитывающая фотоиндуцированное изменение коэффициента поглощения, неоднородность записывающего поля и нелинейный характер процесса формирования.

2. Впервые разработана аналитическая модель формирования ГПДС в ФПМ-ЖК и КПЖК, одновременно учитывающая произвольное состояние поляризации формирующих пучков, фотоиндуцированное изменение коэффициента поглощения материала, а также условия сцепления молекул и капсул ЖК с ограничивающими поверхностями.

3. Исследованы кинетики формирования и формы пространственных профилей ГФДС в ФПМ-ЖК и КПЖК. Показано, что в процессе формирования ГФДС в условиях амплитудной и фазовой неоднородности записывающего поля, высокой степени нелинейности процесса записи, а также фотоиндуцированного изменения поглощения оптического излучения материалом в каждой пространственной точке образца в каждый момент времени формируемая структура будет иметь различный гармонический состав.

4. Исследованы формы пространственных профилей ГПДС в ФПМ-ЖК и КПЖК. Основной вклад в возмущение диэлектрического тензора материала вносят четные гармоники структуры (в частности, вторая). Показано, что возмущение диэлектрической проницаемости материала в процессе записи ГПДС сравнимо по величине с возмущением, обусловленным записью ГФДС в данном материале, что говорит о необходимости учета поляризационного механизма формирования дифракционной структуры при голографическом формировании произвольно поляризованными пучками.

5. Впервые разработаны аналитические модели дифракции световых пучков на ГФДС и ГПДС в ФПМ-ЖК и КПЖК в условиях амплитудной и фазовой неоднородности структуры, при воздействии электрического поля, имеющего пространственную неоднородность. Показано, что воздействие неоднородного

электрического поля различных форм на дифракционные структуры позволяет их динамически аподизировать, при этом подбор функции неоднородности электрического поля позволит получить характеристику требуемого вида.

6. Методом численного моделирования показано, что в условиях сильного поверхностного сцепления молекул ЖК с ограничивающими поверхностями скорость спада величины дифракционной эффективности ГФДС в ФПМ-ЖК при воздействии знакопеременного поля в 1,6 раза выше, чем при воздействии пространственно однородного поля.

7. Методом численного моделирования показано, что воздействие плавно пространственно неоднородного поля на неоднородные дифракционные структуры позволяет снизить асимметрию их дифракционной характеристики.

В приложениях приведены свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, патент на полезную модель, а также документы об использовании результатов работы.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dovolnov E.A., Sharangovich S.N., Sheridan J.T. Inharmonic theoretical models for photopolymers gratings formation // OSA Trends in Optics and Photonics. Washington. 2005. Vol. 99. pp. 469-474.
2. Dovolnov E.A., Sharangovich S.N., Sheridan J.T. Theoretical and experimental investigation of photopolymer chirped gratings formation // OSA Trends in Optics and Photonics (TOPS). Washington. 2005. Vol. 99. pp. 337-342.
3. Довольнов Е.А., Шарангович С.Н. Теоретическое и экспериментальное исследование записи и считывания амплитудно-неоднородных голографических решеток с изменяющимся периодом в фотополимерном материале // Известия вузов. Физика. 2005. Т. 48. № 6. С. 79-80.
4. Довольнов Е.А., Шарангович С.Н. Нелинейная модель записи и считывания голографических дифракционных решеток пропускающего типа в поглощающих фотополимерах. 1. Теоретический анализ // Известия вузов. Физика. 2005. Т. 48. № 5. С. 56-63.
5. Жаркова Г.М., Петров А.П., Стрельцов С.А., Хачатурян В.М. Поляризационные голографические решетки в жидкокристаллических композитах // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2012. Т. 7. № 2. С. 5-14.
6. Жаркова Г.М., Стрельцов С.А., Хачатурян В.М. Электрооптические и динамические свойства поляризационных голографических решеток, сформированных в жидкокристаллических композитах // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2013. № 1(43). С. 28-35.
7. Dovolnov E.A., Sharangovich S.N. Analysis of dynamics of holographic grating formation with inharmonic spatial distribution in photopolymer + liquid crystal compounds // Proc. of SPIE. 2005. Vol. 6023. pp. 602301-1-602301-8.
8. Довольнов Е.А. Голографические дифракционные структуры для оптических систем связи на основе фотополимерных материалов: дис. кан. тех. наук. Томск. 2005. 196 с.

9. Sutherland R.L. Polarization and switching properties of holographic polymer-dispersed liquid-crystal gratings. I. Theoretical model // JOSA B. 2002. Vol. 19. No. 12. pp. 2995-3003.
10. Ноздреватых Б.Ф., Устюжанин С.В., Шарангович С.Н. Векторная модель дифракции света на электрически управляемых неоднородных дифракционных структурах в фотополимеризующихся жидкокристаллических композиционных материалах // Доклады ТУСУРа. 2007. № 2(16). С. 192-197.
11. Устюжанин С.В., Шарангович С.Н. Дифракция световых пучков на неоднородной ФПМ-ЖК голографической структуре с учетом статистики ЖК-молекул // Известия вузов. Физика. 2008. Т. 51. № 9/3. С. 171-172.
12. Устюжанин С.В., Шарангович С.Н. Преобразование амплитудных и поляризационных характеристик световых пучков электрически управляемыми неоднородными ФПМ-ЖК голографическими фотонными структурами // Доклады ТУСУРа. 2010. № 2(22). С. 88-92.
13. Ноздреватых Б.Ф., Устюжанин С.В., Шарангович С.Н. Дифракционные характеристики пропускающих неоднородных фотонных структур в фотополимеризующихся жидкокристаллических композиционных материалах // Доклады ТУСУРа. 2010. № 1(21). С. 109-117.
14. Устюжанин С.В. Динамически управляемые дифракционные структуры на основе фотополимерных жидкокристаллических материалов для оптических систем связи: дис. кан. физ.-мат. наук. Томск. 2013. 176 с.
15. Sutherland R.L. Optical limiters, switches, and filters based on polymer dispersed liquid crystals // OE/LASE'89 – International Society for Optics and Photonics. Los Angeles. 1989. pp. 83-90.
16. Sutherland R.L. Polarization and switching properties of holographic polymer-dispersed liquid-crystal gratings. II. Experimental investigations // JOSA B. 2002. Vol. 19. No. 12. pp. 3004-3012.
17. Федоров Ф.И. Оптика анизотропных сред. 2-е испр.-е изд. Москва: Едиториал УРСС, 2004. 384 с.
18. Сонин А.С. Введение в физику жидких кристаллов. Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. 320 с.
19. Довольнов Е.А., Миргород В.Г., Пен Е.Ф., Шарангович С.Н., Шелковников В.В. Импульсная запись пропускающих и отражающих голографических дифракционных решеток в поглощающих фотополимерах. 2. Численное моделирование и эксперимент // Известия вузов. Физика. 2007. Т. 50. № 4. С. 34-39.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в том числе в журналах, индексируемых Web of Science и/или Scopus:

1. Семкин А. О. Взаимодействие световых пучков с голографическими фотонными ФПМ-ЖК-структурами при неоднородном управляющем электрическом поле / А. О. Семкин, С. Н. Шарангович // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 9/2. – С. 21–24. – 0,18 / 0,1 п.л.

2. Семкин А. О. Дифракционные характеристики ФПМ-ЖК фотонных структур при воздействии знакопеременного электрического поля / А. О. Семкин, С. Н. Шарангович // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2013. – Т. 77, № 12. – С. 1723–1726. – DOI: 10.7868/S0367676513120211. – 0,27 / 0,18 п.л.

в переводной версии журнала:

Semkin A. O. Diffraction Characteristics of the PDLA Photonic Structures under the Influence of Alternating Electric Fields / A. O. Semkin, S. N. Sharangovich // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. – 2013. – Vol. 77, № 12. – P. 1416–1419. – DOI: 10.3103/S1062873813120125.

3. Семкин А. О. Дифракционные характеристики фотонных ФПМ-ЖК структур при сложной дискретной пространственной неоднородности управляющего поля / А. О. Семкин, С. Н. Шарангович // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 1(31). – С. 136–140. – 0,32 / 0,26 п.л.

4. Семкин А. О. Голографическое формирование поляризационных фотонных структур в капсулированных полимером жидких кристаллах / А. О. Семкин, С. Н. Шарангович, Д. И. Малышева, О. В. Незнанова, Д. И. Сон, С. И. Сон // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 11/3. – С. 35–39. – 0,21 / 0,17 п.л.

5. Семкин А. О. Приближенное аналитическое решение задачи голографического формирования поляризационных фотонных ФПМ-ЖК-структур при малой интенсивности записывающих пучков / А. О. Семкин, С. Н. Шарангович, Д. И. Малышева, О. В. Незнанова, Д. И. Сон, С. И. Сон // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 11/3. – С. 83–87. – 0,27 / 0,2 п.л.

6. Семкин А. О. Дифракция света на фотонных ФПМ-ЖК структурах при воздействии плавно пространственно неоднородного электрического поля / А. О. Семкин, С. Н. Шарангович, К. В. Волченко, В. О. Долгирев, А. В. Куркин // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 11/3. – С. 88–91. – 0,22 / 0,14 п.л.

7. Семкин А. О. Дифракция световых пучков на голографических поляризационных фотонных ФПМ-ЖК-структурах при воздействии пространственно неоднородного электрического поля / А. О. Семкин, С. Н. Шарангович // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 8/3. – С. 239–244. – 0,34 / 0,27 п.л.

8. **Semkin A. O.** Multibeam holographic formation of the polarization photonic structures in polymer-dispersed liquid crystals / A. O. Semkin, S. N. Sharangovich // *Physics Procedia*. – 2015. – Vol. 70. – P. 791–794. – DOI: 10.1016/j.phpro.2015.08.269. – 0,2 / 0,16 п.л.

9. **Semkin A. O.** Analytical model of light beam diffraction on holographic polarization spatially inhomogeneous photonic PDLC structures / A. O. Semkin, S. N. Sharangovich // *Physics Procedia*. – 2015. – Vol. 73. – P. 41–48. – DOI: 10.1016/j.phpro.2015.09.119. – 0,3 / 0,25 п.л.

10. **Semkin A. O.** Light beam diffraction on inhomogeneous holographic photonic PDLC structures under the influence of spatially non-uniform electric field / A. O. Semkin, S. N. Sharangovich // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – Vol. 735, is. 1. – 012030. – DOI: 10.1088/1742-6596/735/1/012030. – 0,25 / 0,2 п.л.

11. **Semkin A. O.** Compensation of asymmetry of diffraction characteristics of holographic chirped photonic structures in PDLC by the impact of spatially non-uniform electric field / A. O. Semkin, S. N. Sharangovich // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – Vol. 737, is. 1. – 012010. – DOI: 10.1088/1742-6596/737/1/012010. – 0,27 / 0,21 п.л.

Патент Российской Федерации:

12. Пат. 161905 U1 Российская Федерация, МПК G02F 1/1334, G02B /18. Управляемый электрическим полем дифракционный оптический элемент / Семкин А.О., Шарангович С.Н.; патентообладатель – Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) (RU). – № 2015146760/28; заявл. 29.10.2015; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 13. – 6 с.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015610165 «Программа для моделирования дифракционных характеристик голографических фотонных ФПМ-ЖК структур, управляемых пространственно-неоднородным электрическим полем» / Семкин А. О., Волченко К. В., Шарангович С. Н.; правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (RU) Заявка № 2014661434, заявл. 12.11.2014, дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 12.01.2015.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015662631 «Программа для моделирования взаимодействия светового излучения с голографическими поляризационными ФПМ-ЖК дифракционными структурами» / Малышева Д. И., Семкин А. О., Шарангович С. Н., Перин А. С.; правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) (RU) Заявка № 2015618041; заявл. 02.09.2015; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 27.11.2015.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015663325. «Программа для моделирования голографического формирования поляризационных фотонных структур в ФПМ-ЖК» / Незнанова О. В., Семкин А. О., Шарангович С. Н., Перин А. С.; правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (RU) Заявка № 2015618063; заявл. 02.09.2015; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 15.12.2015.

Публикации в других научных изданиях, в том числе статья в сборнике материалов конференции, индексируемом Web of Science:

16. **Semkin A. O.** The PDLC photonic structures diffraction characteristics managing by the spatially non-uniform electric field / A. O. Semkin, S. N. Sharangovich // Proceedings of the International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL 2013). Sudak, Ukrain, September 09–13, 2013. – Sudak, 2013. – P. 48–49. – DOI: 10.1109/CAOL.2013.6657522. – 0,16 / 0,11 п.л.

17. **Semkin A. O.** The Analytical Model of Light Beams Diffraction on the Holographic Photonic PDLC Structure under the Influence of a Spatially Non-uniform Electric Field / A. O. Semkin, S. N. Sharangovich // Pacific Science Review. – 2013. – Vol. 15, A, no 3. – P. 118–124. – 0,31 / 0,23 п.л.

18. **Semkin A. O.** Holographic formation of the polarization gratings in PDLCs under light-induced absorption / A. O. Semkin, S. N. Sharangovich // Pacific Science Review. – 2014. – Vol. 16, no 4. – P. 68–72. – 0,21 / 0,17 п.л.

19. **Semkin A. O.** Model of the formation of holographic polarization gratings in PDLC taking into account light-induced absorption changes and strong surface adhesion / A. O. Semkin, S. N. Sharangovich // Pacific Science Review A: Natural Science and Engineering. – 2015. – Vol. 17, is. 1. – P. 1–6. – 0,32 / 0,26 п.л. DOI: 10.1016/j.psra.2015.08.001.

20. **Семкин А. О.** Управление дифракционными характеристиками фотонных ФПМ-ЖК-структур пространственно неоднородным электрическим полем / А. О. Семкин, С. Н. Шарангович // Оптика – 2013 : сборник трудов VIII Международной конференции молодых ученых и специалистов. Санкт-Петербург, 14–18 октября 2013 г. – С. 129–132. – 0,17 / 0,11 п.л.

21. **Семкин А. О.** Голографическое формирование поляризационных дифракционных структур в композитных фотополимерно-жидкокристаллических материалах / А. О. Семкин, С. Н. Шарангович, А. С. Перин, С. А. Стрельцов // Фундаментальные проблемы оптики – 2014 (ФПО-2014): сборник трудов VIII Международной конференции. Санкт-Петербург, 20–24 октября 2014 г. – Санкт-Петербург, 2014. – С. 164–167. – 0,21 / 0,17 п.л.

22. **Семкин А. О.** Голографическое формирование неоднородных дифракционных структур в ФПМ-ЖК с учетом фотополимеризационно-диффузионного и поляризационного механизмов записи / А. О. Семкин, С. Н. Шарангович // Электронные средства и системы управления : материалы докладов X Международной научно-практической конференции. Томск, 12–14 ноября 2014 г. – Томск, 2014. – Ч. 1. – С. 180–189. – 0,43 / 0,35 п.л.

23. Семкин А. О. Дифракция света на неоднородных голографических фотонных КПЖК-структурах при воздействии пространственно неоднородного электрического поля / А. О. Семкин, С. Н. Шарангович // Оптика – 2015 : сборник трудов IX Международной конференции молодых ученых и специалистов. Санкт-Петербург, 12–16 октября 2015 г. – С. 245–248. – 0,21 / 0,16 п.л.

24. Семкин А. О. Компенсация асимметрии дифракционных характеристик чирпированных голографических фотонных КПЖК структур путем воздействия пространственно неоднородного электрического поля / А. О. Семкин, С. Н. Шарангович // Электронные средства и системы управления : материалы докладов XI Международной научно-практической конференции. Томск, 25–27 ноября 2015 г. – Томск, 2015. – Ч. 1. – С. 171–177. – 0,37 / 0,3 п.л.

25. Семкин А. О. Трехмерная негармоническая модель формирования неоднородных голографических дифракционных структур в фотополимерно-жидкокристаллических композициях [Электронный ресурс] / А. О. Семкин, С. Н. Шарангович // Ученые записки физического факультета МГУ. – 2016. – № 5. – 165306. – 4 с. – URL: <http://uzmu.phys.sunmarket.com/file/2016/5/165306.pdf> (дата обращения: 28.09.2016). – 0,15 / 0,12 п.л.

Тираж 100 экз. Заказ 859.
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники.
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.
Тел. (3822) 533018