

УДК 535.421:773.93

Д.И. Малышева, А.О. Семкин, С.Н. Шарангович

Дифракционные характеристики голографических поляризационных ФПМ-ЖК-структур с неоднородным фазовым профилем

Разработана аналитическая модель дифракции оптического излучения на фазово-неоднородных голографических поляризационных дифракционных структурах в фотополимерно-жидкокристаллических материалах. Численное моделирование, проведенное на основе разработанной модели для дифракционных структур с однородным амплитудным и квазиквадратичным фазовым профилем, показало, что неоднородность структуры приводит к изменению ее угловой селективности.

Ключевые слова: фотополимерно-жидкокристаллические материалы, голография, дифракционные структуры, фазовый профиль.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-1-26-28

В настоящее время подавляющее большинство высокоскоростных и протяженных кабельных линий связи организованы на основе оптического волокна. Данные системы обладают огромным потенциалом с точки зрения информационной емкости и скорости передачи данных, однако существует множество ограничивающих факторов, не позволяющих его реализовать. Одним из таких факторов является использование электронных средств управления световым потоком. Созданию полностью оптических селективных по длине волны, углу падения и поляризации элементов для систем связи посвящено множество научных работ по всему миру. Одним из наиболее перспективных направлений [1–6] является создание и исследование голографических дифракционных структур (ДС) в фоточувствительных средах.

Голографический метод создания дифракционных структур (ДС) в указанных материалах является наиболее технически простым и экономически выгодным. В настоящее время исследования голографической записи в фотополимерно-жидкокристаллических материалах (ФПМ-ЖК) все больше переходят в плоскость применения, благодаря возможности создания в таких материалах наноразмерных матриц, фотонных кристаллов и управляемых периодических дифракционных структур, которые также широко используются в области оптической связи и обработки информации [7]. На основе отражательных дифракционных структур (ДС) для оптических систем связи возможно создавать селективные устройства, а на основе пропускающих ДС – широкополосные.

Помимо указанных достоинств, перспективность ФПМ-ЖК также обусловлена высокой разрешающей способностью, высокой дифракционной эффективностью, возможностью управления селективными и дифракционными свойствами, относительной дешевизной материала, отсутствием необходимости дополнительной химической обработки голограмм после записи [7].

Сравнительно недавно [8, 9] экспериментально была показана возможность формирования в таких материалах поляризационных голографических ДС. Были разработаны теоретические модели формирования подобных структур с учетом различных факторов [10, 11]. Кроме этого, в [12] разработана модель дифракции световых пучков на подобных структурах. Однако данная модель не учитывает неоднородность амплитудного и фазового профилей структуры.

Целью данной работы является разработка теоретической модели дифракции света на голографических поляризационных ФПМ-ЖК дифракционных структурах с неоднородным фазовым профилем.

Под «фазовым профилем» структуры будем понимать функцию изменения модуля вектора решетки вдоль его направления.

Теоретическая модель

Будем рассматривать двумерную дифракцию Брэгга квазимонохроматического пучка $E_p(\mathbf{r})$, поляризованного в плоскости главного сечения образца ФПМ-ЖК (необыкновенная волна), на неоднородной ДС (рис. 1). Направление периодического возмущения диэлектрической проницаемости задается вектором \mathbf{K} , который в силу неоднородности ДС представляется функцией от координат $\mathbf{K} = \mathbf{K}(\mathbf{r})$.

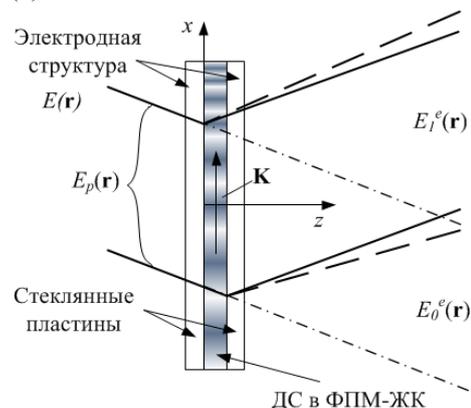


Рис. 1. Геометрия дифракции на ФПМ-ЖК

Формирование неоднородной поляризационной ДС в образце ФПМ-ЖК приводит к периодическому изменению ориентации директора молекул жидкого кристалла (ЖК) в объеме образца. Таким образом, пространственное распределение возмущенного тензора диэлектрической проницаемости ФПМ-ЖК может быть представлено в виде [10–12]:

$$\hat{\epsilon}(\mathbf{r}) = (1-\rho) \cdot \epsilon_p \cdot \hat{I} + \rho \cdot \sum_{j=0}^N \hat{\epsilon}_j^{lc} \cos(\mathbf{K}_j \cdot \mathbf{r}), \quad (1)$$

где ϵ_p – диэлектрическая проницаемость полимера; \hat{I} – единичный тензор; ρ – объемная доля жидкого кристалла; $\mathbf{K}_j = j\mathbf{K}$, $\hat{\epsilon}_j^{lc}$ – вектор решетки и амплитуды пространственных гармоник, \mathbf{K} – вектор решетки, $\hat{\epsilon}_j^{lc} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \hat{\epsilon}^{lc}(\mathbf{r}) \cos(\mathbf{K}_j \cdot \mathbf{r}) d(\mathbf{K} \cdot \mathbf{r})$.

Возмущение диэлектрической проницаемости образца может быть определено из выражения [10]

$$\hat{\epsilon}^{lc}(\mathbf{r}) = \epsilon_o \cdot \hat{I} + (\epsilon_e - \epsilon_o) [\mathbf{C}(\mathbf{r})\mathbf{C}(\mathbf{r})], \quad (2)$$

где $\mathbf{C}(\mathbf{r})$ – пространственное распределение ориентации директора ЖК; ϵ_o , ϵ_e – компоненты невозмущенного тензора диэлектрической проницаемости, соответствующие обыкновенной и необыкновенной волнам в материале. Запись $[\mathbf{C}(\mathbf{r})\mathbf{C}(\mathbf{r})]$ в выражении (2) означает тензорное произведение (диаду) двух векторов $\mathbf{C}(\mathbf{r})$.

Будем исследовать считывание неоднородной ДС плоской оптической волной. Амплитудные распределения дифрагировавших пучков $E_{0,1}^e(\mathbf{r})$ могут быть найдены из решения системы уравнений связанных волн (УСВ) [12]:

$$\begin{aligned} \mathbf{N}_{r0} \cdot \nabla E_0(\mathbf{r}) &= -iC_1(\mathbf{r})n^1(\mathbf{r})E_1(\mathbf{r}) \times \exp[i(\Delta K(\mathbf{r}) - \varphi(\mathbf{r}))], \\ \mathbf{N}_{r1} \cdot \nabla E_1(\mathbf{r}) &= -iC_0(\mathbf{r})n^1(\mathbf{r})E_0(\mathbf{r}) \times \exp[-i(\Delta K(\mathbf{r}) - \varphi(\mathbf{r}))], \end{aligned} \quad (3)$$

где $C_i^e(\mathbf{r})$ – амплитудные коэффициенты связи; $n^1(\mathbf{r})$ – нормированный амплитудный профиль ДС; $\varphi(\mathbf{r})$ – фазовый профиль ДС; $\mathbf{N}_{r0,1}$ – групповые нормали; $\Delta K(\mathbf{r})$ – модуль пространственно-неоднородного локального вектора фазовой расстройки $\Delta \mathbf{K}(\mathbf{r})$, характеризующей изменение геометрии дифракции вследствие изменения периода неоднородной ДС.

Решение задачи дифракции будем искать для однородного амплитудного профиля $n^1(\mathbf{r})=1$ и квадрикватричного фазового профиля $\varphi(\mathbf{r})$. Рассмотрим случай, когда $\nabla \varphi(\mathbf{r})$ направлен вдоль вектора решетки \mathbf{K} (см. рис. 1), что соответствует наклонной ДС. Представим фазовый профиль в виде ряда Тейлора, ограничившись квадратичным членом:

$$\varphi^m(\mathbf{r}) = \varphi + \varphi' \cdot x + 0,5\varphi'' \cdot x^2, \quad (4)$$

где $\varphi' = K_0$ – среднее значение модуля вектора \mathbf{K} ; $0,5\varphi''$ – отклонение модуля вектора \mathbf{K} от среднего значения, обусловленное неоднородностью фазового профиля ДС.

Переходя к угловым спектрам дифрагировавших пучков, получим решение системы уравнений связанных волн (УСВ) (3) в приближении заданного поля, тогда амплитудное распределение дифрагировавшего в первый порядок пучка

$$E_1(\theta) = E_p(\theta)T_1(\Delta), \quad (5)$$

где введена передаточная функция

$$T_1(\Delta) = \int_0^r C(\mathbf{r}) \cdot n^1(\mathbf{r}) \cdot \exp[i \cdot (\Delta(\delta\theta) \cdot \mathbf{r} + \Delta K(\mathbf{r}))] dr, \quad (6)$$

где $E_p(\theta)$ – угловой спектр светового поля; $C(\mathbf{r})$ – амплитудный коэффициент связи; $\Delta(\delta\theta)$ – относительная фазовая расстройка, характеризующая изменение передаточной функции вследствие отклонения угла падения плосковолнового компонента считывающей волны от угла Брэгга θ_B ; $\delta\theta = \theta - \theta_B$.

Численное моделирование

На рис. 2 представлены результаты численного моделирования передаточной функции (6) для различных соотношений $0,5\varphi''/\varphi'$.

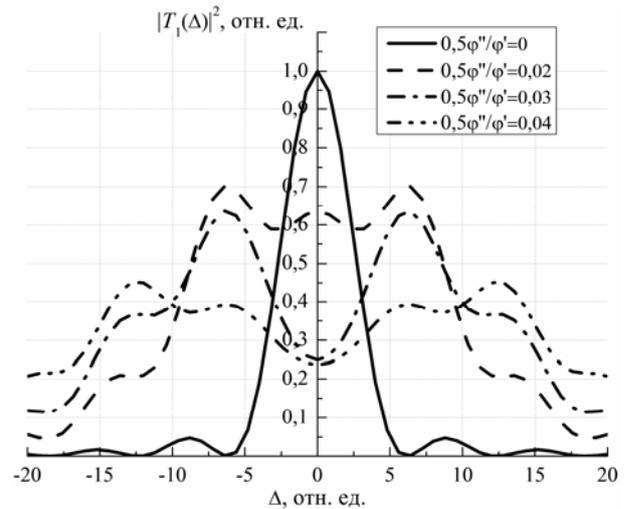


Рис. 2. Дифракционная характеристика

Анализ рис. 2 показывает, что фазовая неоднородность ДС обуславливает изменение формы ее передаточной функции, которая может быть интерпретирована как угловая селективность структуры.

Учет амплитудной неоднородности структуры приведет к дополнительному изменению зависимости $T_1(\Delta)$ аналогично [13].

Заключение

Таким образом, в данной работе разработана теоретическая модель дифракции света на неоднородных поляризационных дифракционных ФПМ-ЖК структурах.

Показано, что фазовая неоднородность структур приводит к уширению основного лепестка ее угловой селективности, что соответствует результатам [13], полученным для фазовых дифракционных структур в фотополимерных материалах, не содержащих жидкие кристаллы.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках Госзадания на 2017 г. (проект № 3.1110.2017/4.6).

Литература

1. Шибаев В. П. Жидкокристаллические полимеры // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – №6. – С. 40–48.
2. Довольнов Е.А., Шарангович С.Н. Нелинейная модель записи и считывания голографических дифракционных решеток пропускающего типа в поглощающих фотополимерах. – 2: Численное моделирование и эксперимент // Изв. вузов. Физика. – 2005. – Т. 48, № 7. – С. 85–92.
3. Семкин А.О., Шарангович С.Н. Взаимодействие световых пучков с голографическими фотонными ФПМ-ЖК структурами при неоднородном управляющем электрическом поле // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 9-2. – С. 21–24.
4. Ноздревых Б.Ф. Векторная модель дифракции света на электрически-управляемых неоднородных дифракционных структурах в фотополимеризующихся жидкокристаллических композиционных материалах / Б.Ф. Ноздревых, С.В. Устюжанин, С.Н. Шарангович // Доклады ТУСУРа. – 2007. – Т. 2. – С. 192–197.
5. Ноздревых Б.Ф. Дифракционные характеристики пропускающих неоднородных фотонных структур в фотополимеризующихся жидкокристаллических композиционных материалах / Б.Ф. Ноздревых, С.В. Устюжанин, С.Н. Шарангович // Доклады ТУСУРа. – 2010. – Т. 1, № 2. – С. 109–117.
6. Семкин А.О., Шарангович С.Н. Дифракционные характеристики фотонных ФПМ-ЖК структур при сложной дискретной пространственной неоднородности управляющего поля // Доклады ТУСУРа. – 2014. – № 1 (31). – С. 136–142.
7. Евтихийев Н.Н. Информационная оптика: учеб. пособие. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 612 с.
8. Дифракция света на поляризационных голографических решетках, записанных в жидкокристаллических композитах / Г.М. Жаркова, А.П. Петров, С.А. Стрельцов, В.М. Хачатурян // Жидкие кристаллы и их практическое использование. – 2011. – №1(35). – С. 36–43.
9. Жаркова Г.М. Электрооптические и динамические свойства поляризационных голографических решеток, сформированных в жидкокристаллических композитах / Г.М. Жаркова, С.А. Стрельцов, В.М. Хачатурян // Жидкие кристаллы и их практическое использование. – 2013. – №1(43) – С. 28–35.
10. 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. – №17. – PP. 1–6.
11. 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. – № 70. – PP. 791–794.
12. 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. – № 73. – PP. 41–48.
13. Довольнов Е.А. Теоретическое и экспериментальное исследование записи и считывания амплитудно-неоднородных голографических решеток с изменяющимся периодом в фотополимерном материале / Е.А. Довольнов, С.Н. Шарангович // Известия вузов. Физика. – 2005. – Т. 48, №6. – С. 79–80.

Малышева Диана Игоревна

Студентка магистратуры каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧиКР) ТУСУРа
Тел.: +7-953-922-65-97
Эл. почта: di.1992_92@mail.ru

Семкин Артем Олегович

Ассистент каф. СВЧиКР ТУСУРа
Тел.: +7-923-427-59-95
Эл. почта: a.o.semkin@gmail.com

Шарангович Сергей Николаевич

Канд. физ.-мат. наук, профессор,
зав. каф. СВЧиКР ТУСУРа
Тел.: +7-913-822-86-44
Эл. почта: shr@tusur.ru

Malisheva D.I., Semkin A.O., Sharangovich S.N.

Diffraction characteristics of holographic polarization PDLC structures with non-uniform phase profile

In this work we have developed the analytical model of light beam diffraction on phase-inhomogeneous polarization diffraction structures in polymer-dispersed liquid crystals. Numerical simulations, made on the basis of developed model for structure with uniform amplitude and quasi quadratic profiles, show that the structure's non-uniformity leads to its angular selectivity changes.

Keywords: polymer-dispersed liquid crystals, holography, diffraction structures, phase profile.