

# **Дифракционные характеристики мультиплексированных чирпированных многослойных неоднородных голографических структур с КПЖК**

**Ю. А. Алтухов, Д. А. Проскуряков, Д. М. Чубаров, Д. С. Растрыгин,  
В. О. Долгирев, С. Н. Шарангович**

*Томский Государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия;  
e-mail: dm-proskuryakov@mail.ru*

В данной работе представлены дифракционные характеристики мультиплексированных чирпированных многослойных неоднородных голографических фотонных структур с капсулированными полимером нематическими жидкими кристаллами. Полученные дифракционные характеристики демонстрируют возможность увеличения угловой (спектральной) селективности по сравнению с обычными многослойными дифракционными структурами в несколько раз. Также продемонстрирована нормированная зависимость изменения ширины локальных максимумов и уровня дифракционной эффективности от квадратичного коэффициента изменения фазового профиля формируемого светового поля.

**Ключевые слова:** дифракция; чирпирование; мультиплексирование; МНГДС; КПЖК

## **Diffraction characteristics of multiplexed chirped multilayer inhomogeneous holographic structures with PDLC**

**Yu. A. Altukhov, D. A. Proskuryakov, D. M. Chubarov, D. S. Rastrygin,  
V. O. Dolgirev, S. N. Sharangovich**

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia;  
e-mail: dm-proskuryakov@mail.ru*

This work presents the diffraction characteristics of multiplexed chirped multilayer inhomogeneous holographic photonic structures with polymer-dispersed nematic liquid crystals. The obtained diffraction characteristics demonstrate the possibility of increasing the angular (spectral) selectivity several times compared to conventional multilayer diffraction structures. A normalized dependence of the change in the width of local maxima and the level of diffraction efficiency on the quadratic coefficient of change in the phase profile of the generated light field is also demonstrated.

**Keywords:** diffraction; chirping; multiplexing; MIHDS; PDLC

### **Введение**

Современные требования в фотонике и оптоэлектронике требуют разработки новых технологических материалов с управляемыми оптическими свойствами. Особый интерес представляют голографические дифракционные структуры (ГДС) на основе фотополимеризующихся материалах с жидкими кристаллами, обладающими возможностями управления при воздействии внешнего электрического поля. Кроме того, значительное внимание уделяется многослойным неоднородным голографическим дифракционным структурам (МНГДС) [1, 2], в частности, на основе капсулированных полимером нематических жидких кристаллов (КПЖК) [3, 4], в которых молекулы жидких кристаллов организованы в капсулы. Однако,

данные структуры имеют узкие угловые и спектральные характеристики. Основными методами уширения селективных свойств являются чирпирование и мультиплексирование, но ранее проводимые исследования не рассматривали оба случая одновременно.

Чирпированные (изменяющиеся по периоду [5]) мультиплексированные дифракционные структуры могут быть применены для создания устройств с расширенными оптическими свойствами. Такие МНГДС позволяют реализовать управляемые оптические дифракционные элементы с большей шириной селективного отклика, что критически важно для разработки современных голографических дисплеев, адаптивных оптических элементов и систем оптической обработки информации.

Ранее в работе [6] проводилось исследование селективных характеристик электрически управляемых чирпированных многослойных неоднородных ФПМ-ЖК дифракционных структур, которое продемонстрировало, что при использовании метода чирпирования возможно кратно уширить угловые и спектральные характеристики МНГДС с ФПМ-ЖК. Однако, недостаточно внимания было уделено структурам на основе КПЖК, для которых нехарактерно сильное сцепление ЖК с ограничивающими поверхностями, обуславливающие плавную оптическую неоднородность, как было в случае с высокой концентрацией ЖК (ФПМ-ЖК).

Таким образом, целью данной работы является исследование дифракционных характеристик электрически управляемых чирпированных мультиплексированных МНГДС на основе КПЖК.

## 1. Математическая модель

Опираясь на ранее представленную математическую модель из [7] была разработана новая математическая модель, описывающая процесс дифракции света на чирпированных мультиплексированных МНГДС с КПЖК.

Схема дифракции света на чирпированных мультиплексированных МНГДС с КПЖК показана на рис. 1.

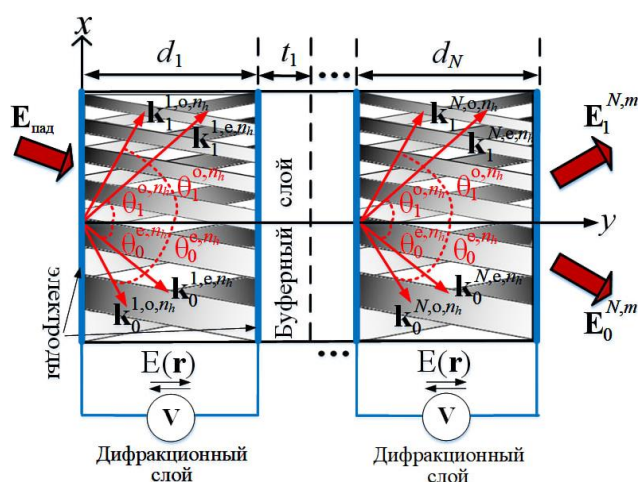


Рис. 1. Схема дифракции света на чирпированных мультиплексированных МНГДС с КПЖК

В модели учитывается фазовый профиль  $\varphi_c^n(\mathbf{r})$  записывающего поля, который описывается выражением [7]:

$$\varphi_c^n(\mathbf{r}) = \varphi_0^n + \nabla \varphi^n \cdot \mathbf{r} + 0.5 \nabla^2 \varphi^n \cdot \mathbf{r}^2, \quad (1)$$

где  $0.5 \nabla^2 \varphi^n$  является квадратичным коэффициентом изменения модуля фазового профиля записывающего излучения, а  $\nabla \varphi^n = K_0^n$  средней величиной вектора решетки  $\mathbf{K}$ .

Математическая модель основана на уравнении связанных волн в частотных производных [7]. С помощью этих уравнений можно вычислить амплитудные профили световых пучков  $E_j^{n,m,n_h}$ , которые взаимодействуют с каждой дифракционной структурой:

$$\begin{cases} \mathbf{N}_{r0}^{n,m,n_h} \cdot \nabla E_0^{n,m,n_h}(\mathbf{r}) = -i C_1^{n,m,n_h} E_1^{n,m,n_h} n_n^{n,m,n_h}(\mathbf{r}) \exp(i \nabla \mathbf{K}^{n,m,n_h} \cdot \mathbf{r}) \\ \mathbf{N}_{r1}^{n,m,n_h} \cdot \nabla E_1^{n,m,n_h}(\mathbf{r}) = -i C_0^{n,m,n_h} E_0^{n,m,n_h} n_n^{n,m,n_h}(\mathbf{r}) \exp(i \nabla \mathbf{K}^{n,m,n_h} \cdot \mathbf{r}) \end{cases}, \quad (2)$$

где  $E_j^{n,m,n_h}$  – амплитудное распределение профиля световых пучков,  $\mathbf{N}_{rj}^{n,m,n_h}$  – вектор групповых нормалей,  $C_j^{n,m,n_h}$  – значение амплитудных коэффициентов связи,  $n_n^{n,m,n_h}$  – значение нормированного амплитудного профиля показателя преломления структуры,  $\nabla \mathbf{K}^{n,m,n_h} = \mathbf{K}^{n,m,n_h} + \mathbf{k}_0^{n,m,n_h} - \mathbf{k}_1^{n,m,n_h}$  – вектор фазовой расстройки,  $n_h$  – номер записанной ГДС.

Используя матричный метод, можно описать процесс преобразования частотно-угловых спектров взаимодействующих плоских световых волн через всю чирпированную мультиплексированную МНГДС:

$$\mathbf{E}^{m,N} = (\mathbf{T}_h^{N,m,1} + \dots \mathbf{T}_h^{N,m,n_h} + \dots + \mathbf{T}_h^{N,m,N_h}) \cdot \mathbf{E}_0, \quad (3)$$

где  $\mathbf{E}^{N,m} = \begin{bmatrix} E_0^{m,n}(E, \Delta K) \\ E_1^{m,n}(E, \Delta K) \end{bmatrix}$  – определяет выходное оптическое поле;

$\mathbf{T}_h^{N,m,1} = \mathbf{T}^{N,m,n_h} \cdot \mathbf{A}^{N-1,m} \cdot \mathbf{T}^{N-1,m,n_h} \cdot \dots \cdot \mathbf{A}^{1,m} \cdot \mathbf{T}^{1,m,n_h}$  – матричная передаточная функция

для всей голограммы;  $\mathbf{T}^{n,m,n_h} = \begin{bmatrix} T_{00}^{n,m,n_h}(E, \Delta K) & T_{10}^{n,m,n_h}(E, \Delta K) \\ T_{01}^{n,m,n_h}(E, \Delta K) & T_{11}^{n,m,n_h}(E, \Delta K) \end{bmatrix}$  – матричная передаточная функция для  $n$ -го слоя и  $n_h$  голограммы;  $N_h$  – количество записанных голограмм;  $\mathbf{A}^{n,m} = \exp[-i(\mathbf{k}_1^{n,m,n_h} \cdot \mathbf{y}_0)t_n] \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp\left[\frac{-i \nabla \mathbf{K}^{n,m,n_h} \cdot \mathbf{t}_n}{d_n}\right] \end{bmatrix}$  – матрица перехода;  $n_h$  –

число записанных решеток;  $m = 0, e$  – индекс, соответствующий обыкновенным и необыкновенным волнам;  $n$  – номер дифракционного слоя.

## 2. Численное моделирование

В качестве основных параметров для численного моделирования использовалась ГДС толщиной 20 мкм для дифракционного ( $d_n$ ) и 294 мкм для буферного ( $t_n$ ) слоя. Длина считывающей световой волны  $\lambda_{read} = 1500$  нм. Длина записывающей световой волны  $\lambda_0 = 633$  нм, количество дифракционных слоев  $N = 2$ , количество записанных решеток  $n_h = 2$ . Углы поворота образца при последовательной записи для записи мультиплексированной chirпированной ГДС  $\psi = \{-11; 11\}$  градусов и углы между записывающими пучками  $2\theta_b = 20$  градусов.  $\theta_b$  – угол Брэгга. Значение квадратичного коэффициента  $0.5\nabla^2\varphi^n = 3 \cdot 10^5$ .

На рис. 2 приведена зависимость изменения ширины локальных максимумов и уровня дифракционной эффективности от квадратичного коэффициента изменения фазового профиля формируемого светового поля.

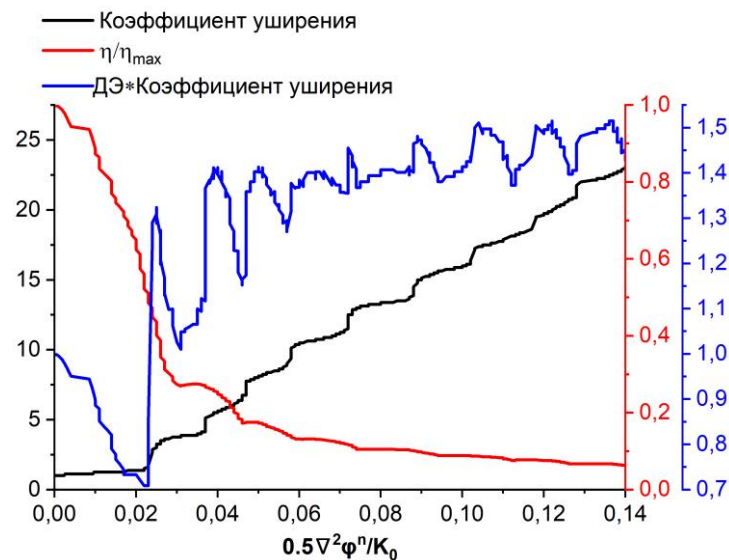


Рис. 2. Зависимость изменения ширины локальных максимумов и уровня дифракционной эффективности от  $0.5\nabla^2\varphi^n$

Как видно из рис. 2, при увеличении соотношения  $0.5\nabla^2\varphi^n / K_0$  от 0 до 0,022 коэффициент уширения изменяется незначительно, однако, дифракционная эффективность снижается экспоненциально. При линейном росте значения соотношения  $0.5\nabla^2\varphi^n / K_0$ , начиная с 0,022, коэффициент уширения также изменяется практически линейно, но ступенчато. Таким образом, эффективное уширение угловой селективности относительно изменения дифракционной эффективности, за счет метода chirпирования происходит лишь при соотношении  $0.5\nabla^2\varphi^n / K_0$ , равного не менее 0,022.

Коэффициент эффективности, который представляется как перемножение ДЭ и коэффициента уширения, периодически изменяется по уровню при изменении

$0.5V^2\varphi^n$ . Так при изменении  $0.5V^2\varphi^n$  от 0 до 0,022 коэффициент эффективности снижается, однако, при  $0.5V^2\varphi^n / K_0$  больше 0,022 коэффициент эффективности резко возрастает, стремясь к более статичному состоянию. Наличие осцилляций на кривой коэффициента эффективности при этом обусловлен ступенчатым характером коэффициента уширения при изменении  $0.5V^2\varphi^n$ .

### **Заключение**

Таким образом, в результате проведённого теоретического исследования дифракционных характеристик chirпированных мультиплексированных многослойных неоднородных голографических дифракционных структур с капсулированным полимером нематическими жидкими кристаллами было установлено, что эффективность метода chirпирования происходит лишь при соотношении  $0.5V^2\varphi^n / K_0$  равного не менее 0,022, как и рост значения коэффициента уширения угловой селективности.

### **Благодарности**

Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

### **Библиографические ссылки**

1. Single- and Double-Beam Optical Formation of Relief-Phase Diffraction Microstructures in Carbazole-Containing Azopolymer Films / N. A. Ivliev [et al.] // Opt. Spectrosc. 2021. Vol. 129(4). P. 489–494.
2. Pen E. F., Rodionov M. Y. Properties of multilayer nonuniform holographic structures // Quantum Electron. 2010. Vol. 40. P. 919–924.
3. Light transmission of polymer-dispersed liquid crystal layer composed of droplets with inhomogeneous surface anchoring / V. A. Loiko [et al.] // Opt. Spectrosc. 2016. Vol. 120, № 1. P. 143–152.
4. Sutherland R. L. Polarization and switching properties of holographic polymer-dispersed liquid-crystal gratings. I. Theoretical model // JOSA B. 2002. Vol. 19, No. 12. P. 2995–3003.
5. Rastrygin D. S. Diffraction of light on multiplexed multilayer holographic diffraction structures with varying periods / D. S. Rastrygin, V. O. Dolgirev, S. N. Sharangovich // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2024. V. 88, No. S3. P. S408–S412.
6. Долгирев В. О., Шарангович С. Н. Передаточные функции пропускающих многослойных неоднородных голографических фотополимерных жидкокристаллических дифракционных структур // Известия РАН. Серия физическая. 2023. Т. 87, № 1. С. 12–18.
7. Dolgirev V. O., Sharangovich S. N. Multilayer inhomogeneous holographic diffraction structures in photopolymerizing compositions with liquid crystals // Russ. Phys. J. 2022. V. 65. P. 1246.