

# Электрически управляемые оптические спектральные фильтры для WDM сетей связи на основе многослойных неоднородных голографических дифракционных структур

В.О. Долгирев

Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники  
Томск, Россия  
vital2@mail.ru

С.Н. Шарангович

Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники  
Томск, Россия  
shr@tusur.ru

**Аннотация** — В данной работе представлены дифракционные характеристики электрически управляемых многослойных неоднородных голографических дифракционных структур, сформированных в фотополимерных материалах с высокой долей содержания нематических жидких кристаллов. Полученные результаты демонстрируют возможность использования многослойных голографических дифракционных структур в качестве основного элемента для электрически управляемых оптических спектральных фильтров для WDM сетей связи.

**Ключевые слова** — МНГДС, ФПМ-ЖК, дифракция, ДОЭ

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время оптические системы связи стремительно развиваются и, следовательно, для ученых стоит задача поиска не только новых, но и эффективно-экономичных с точки зрения производства элементов для таких систем. Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) на основе многослойных неоднородных голографических дифракционных структур (МНГДС), сформированных в тонких пленках (10-100 мкм), содержащих фотополимеризующиеся композиции с нематическими жидкими кристаллами (ФПМ-ЖК) [1], могли бы найти широкое применение в оптических сетях связи, например, в качестве оптических спектральных фильтров [2, 3].

Основная идея для реализации спектральной фильтрации оптического излучения заключается в использовании некоторого набора тонких ФПМ-ЖК пленок с записанными дифракционными решетками, которые разделены однородными буферными слоями. Угловая селективность МНГДС представляет из себя набор локальных максимумов, при этом огибающая контура селективности соответствует одиночной голографической дифракционной структуре (ГДС). Количество и ширина локальных максимумов напрямую зависит как от количества дифракционных слоев, так и от соотношения ширины дифракционного и буферного слоя. Интерпретируя локальные максимумы как полосу пропускания для определенных длин волн при отклонении от условий дифракции Брэгга, можно использовать данные свойства для спектральной фильтрации оптического излучения, а используя внешнее электрическое поле, возможно еще и управлять дифракционными характеристиками таких структур.

Таким образом, ДОЭ на базе МНГДС с ФПМ-ЖК могут быть применены в качестве основного элемента

для электрически управляемых оптических спектральных фильтров для WDM сетей связи.

## 2. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА МНГДС С ФПМ-ЖК

Рассмотрим схему построения ДОЭ на основе МНГДС. В качестве дифракционных слоёв используются тонкие пленки с ФПМ-ЖК, в которых записаны голографическим методом дифракционные структуры. Буферный слой представляет из себя однородный слой, показатель преломления которого приблизительно равен показателю преломления голограммы. Схема дифракции света на МНГДС с ФПМ-ЖК представлена на рис. 1.

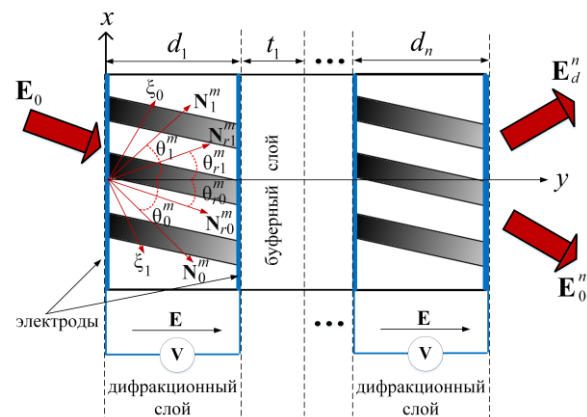


Рис. 1. Схема дифракции света на МНГДС с ФПМ-ЖК

При большой концентрации молекул ЖК в процессе формирования ГДС их ориентация определяется границами образца и описывается уравнением Фредерикса [3]. При воздействии электрического поля на такие структуры угол поворота директора ЖК различен по глубине дифракционного слоя, что в итоге обуславливает оптическую неоднородность среды [3].

При рассмотрении случая брэгговской дифракции световых пучков на МНГДС амплитуды взаимодействующих волн определяются системами уравнений связанных волн в частных производных [3]. Для решения системы уравнений производится аппроксимация параметра интегральной фазовой расстройки  $\Theta$  вследствие ее сложной зависимости [3].

Вместе с тем, для описания преобразования плоских световых волн в многослойных средах используется матричный метод. В этом случае происходит переход от амплитудных распределений частотных Фурье-

компонент дифрагирующих пучков к их угловым спектрам. В результате процесс преобразования частотно-угловых спектров взаимодействующих световых пучков для необыкновенных волн на выходе МНГДС представляется в виде [3]:

$$\mathbf{E}^{e,n} = \mathbf{T}^n \cdot \mathbf{E}_0,$$

где  $\mathbf{T}^n = \mathbf{T}^{e,n} \cdot \mathbf{A}^{e,n-1} \cdot \mathbf{T}^{e,n-1} \cdot \dots \cdot \mathbf{A}^{e,1} \cdot \mathbf{T}^{e,1}$  – матричная передаточная функция всей МНГДС;  $\mathbf{E}^{e,n}$  – световое поле на выходе  $n$ -го слоя;  $\mathbf{T}^{e,n}$  – матричная передаточная функция  $n$ -го слоя;  $\mathbf{E}_0$  – входное световое поле;  $\mathbf{A}^{e,n}$  – матрица перехода для буферного слоя. Все элементы математической модели подробно представлены в [3].

### 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

При численном моделировании поляризацию падающего излучения будем считать совпадающей с поляризацией собственных необыкновенных волн для каждого дифракционного слоя. Также, при численном расчете будет использована двухслойная ГДС с однородными профилями показателя преломления, записанная на длине волны  $\lambda_0 = 633$  нм и углами между пучками  $2\theta = 40$  градусов. Параметры для моделирования:  $\lambda_{\text{read}} = 1310$  нм – длина считывающей волны;  $d_n = 15$  мкм;  $t_n = 4,75d_n = 71,25$  мкм;  $n_{lc}^o = 1,535$  и  $n_{lc}^e = 1,68$  являются обыкновенными и необыкновенными показателями преломления для ЖК соответственно;  $n_p = 1,535$  – показатель преломления для полимера; угол Брэгга для считывающей волны ( $\lambda_{\text{read}}$ ) составляет  $\theta_b = 45,057$  градусов.

На рис. 2 приведена зависимость дифракционной эффективности двухслойной ГДС от фазовой расстройки и приложенного электрического поля на все слои.

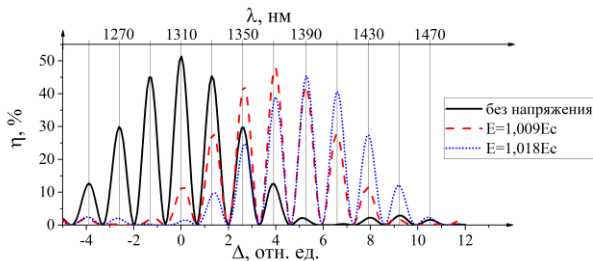


Рис. 2. Зависимость дифракционной эффективности двухслойной ГДС при управлении внешним электрическим полем

Из рис. 2 видно, что при напряженности электрического поля выше значения критической напряженности Фредерикса, угловая селективность претерпевает существенное смещение. Данное смещение обусловлено оптической неоднородностью ФПМ-ЖК слоев. При этом, чем больше этих слоев и шире их толщина, тем смещение более существенное. Подтверждению тому на рис. 3 приведены зависимости дифракционной эффективности (рис. 3а) и коэффициента смещения угловой селективности (рис. 3б) при внешнем электрическом воздействии на двухслойную ГДС при толщинах дифракционных слоев 15 и 20 мкм.

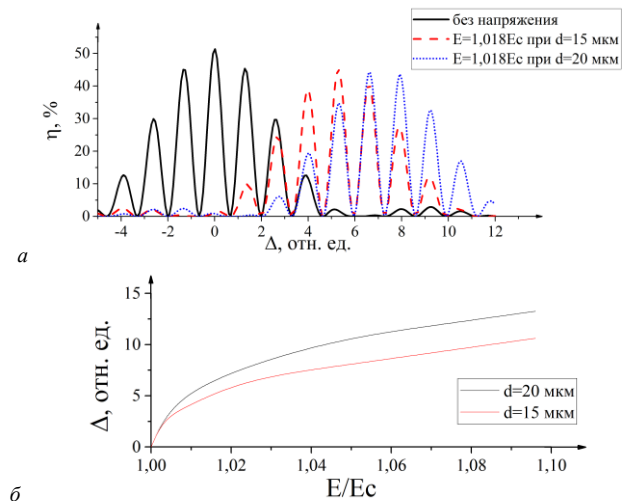


Рис. 3. Зависимость (а) дифракционной эффективности и (б) коэффициента смещения угловой селективности двухслойной ГДС при управлении внешним электрическим полем

Как видно из рис. 3, при увеличении ширины дифракционного слоя также растет и коэффициент смещения угловой селективности на выходе всей МНГДС. Это обусловлено ростом значения интегральной фазовой расстройки для каждого дифракционного слоя. Следовательно, увеличение числа дифракционных слоев приведет также к увеличению коэффициента смещения угловой селективности.

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленные в данной работе дифракционные характеристики электрически управляемых многослойных неоднородных голографических дифракционных структур, сформированных в фотополимерных материалах с высокой долей содержания нематических жидких кристаллов, демонстрируют возможность реализации на их основе управляемых оптических спектральных фильтров для WDM сетей связи.

### БЛАГОДАРНОСТИ

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

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Стрельцов, С.А. Спектральные характеристики отражательных голограмм, сформированных в жидкокристаллических композитах / Стрельцов С.А. // Известия Вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 5. – С. 71–76.
- [2] Пен, Е.Ф. Спектральные свойства каскада голографических отражательных решёток, разделённых однородным слоем / Е.Ф. Пен, М.Ю. Родионов, П.А. Чубаков // Автоматика. – 2017. – Т. 53, № 1. – С. 73–82. DOI: 10.15372/AUT20170109.
- [3] Dolgirev, V.O. Study of light diffraction on electrically controlled multilayer inhomogeneous structures with smooth optical inhomogeneity based on photopolymerizing compositions with nematic liquid crystals / V.O. Dolgirev, S.N. Sharangovich // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2022. – Vol. 86(1). – P. 46-49. DOI: 0.3103/S106287382270037X.