

**Исследование дифракции света на многослойных неоднородных голографических ФПМ-ЖК дифракционных структурах**

**В.О. Долгирев**, аспирант каф. СВЧиКР,

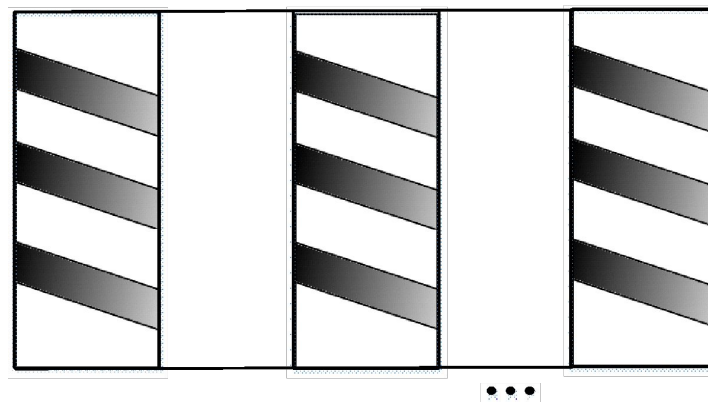
**С.Н. Шарангович**, профессор, к.ф.-м.н.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия  
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 40, 634050

# Введение

Многослойные структуры представляют собой несколько объемных решеток, разделенных оптически однородными промежуточными слоями. Такие структуры характеризуются особыми свойствами, обусловленными интерференцией волн, восстановленных из каждой решетки, и предоставляют возможность управления видом селективного отклика.

Многослойные голографические структуры имеют перспективу найти широкое применение в качестве элементов спектральных фильтров, сенсоров, межсоединений, мультиплексоров/демультиплексоров в оптических линиях связи.



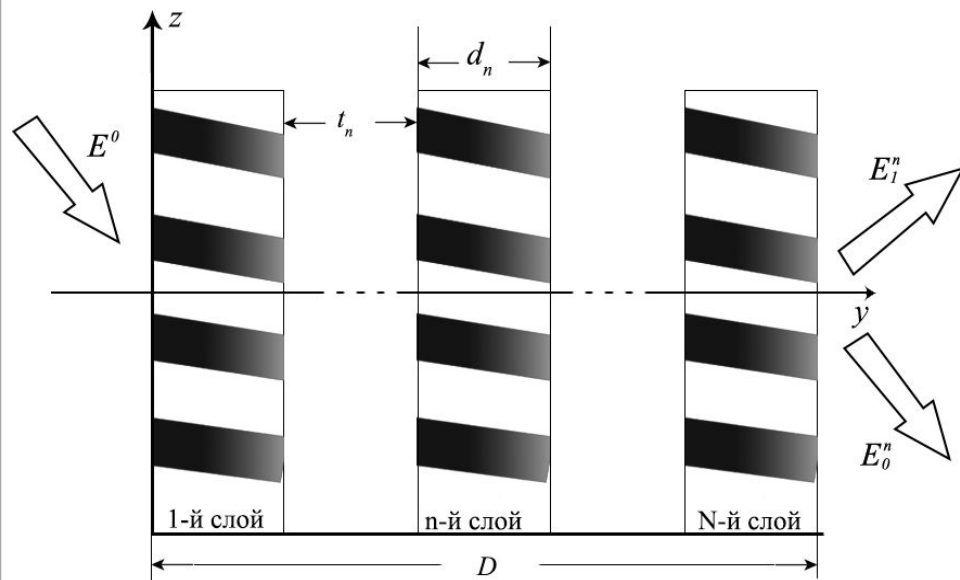
# Исследование многослойных структур в фотополимерных материалах

Многослойные структуры представляют собой несколько объемных решеток,

# ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы – исследование дифракции света на многослойных неоднородных голографических дифракционных структурах, сформированных в ФПМ-ЖК.

## Теоретическая модель:



$E^0$  – произвольно поляризованный монохроматический световой пучок;  
 $d_n$  – толщина одного слоя структуры;  
 $t_n$  – толщина промежуточного слоя;  
 $D$  – толщина МНГДС;  
 $E_1^n$  – дифрагировавший на n-ом слое пучок;  
 $E_0^n$  – прошедший пучок.

Рис. 1 – Схема дифракции на МНГДС

- [1] E.F. Pen, M.Yu. Rodionov. Properties of multilayer nonuniform holographic structures // Quantum Electronics. 2010. Vol. 40. N 10. P. 919 – 92.
- [2] Malallah R., Li H., Qi Y., Cassidy D., Muniraj I., Al-Attar N., Sheridan J.T., Cassidy. Improving the uniformity of holographic recording using multilayer photopolymer. Part I. Theoretical analysis // Journal of the Optical Society of America A. 2019. V. 36. N. 3. pp. 320-334.
- [3] Y. Aimin, L. Liren, Z. Yanan, S. Jianfeng. Bragg diffraction of multilayer volume holographic gratings under ultrashort laser pulse readout // Journal of the Optical Society of America A. – 2008. – Vol. 26, N.1. – P. 135-141

# Теоретическая модель:

Падающая (считывающая) световая волна:

$$\mathbf{E}^0(\mathbf{r}, k) \Leftarrow \frac{1}{2} \left[ \sum_{m=s, p} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{e}_0^m E_0^m(\omega, \mathbf{r}) \cdot \exp[i((\omega_0 + \omega)t - \mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r})] d\omega + \dots \right] \quad (1)$$

где  $\omega_0$  – центральная частота;

$\mathbf{e}_0^m$  – единичный вектор поляризации;

$m=s, p$ , индекс  $s$  соответствует волне поляризованной перпендикулярно плоскости дифракции, индекс  $p$  соответствует волне поляризованной в плоскости дифракции;

$E_0^m(\omega, \mathbf{r}) = (\mathbf{e}^0 \cdot \mathbf{e}_0^m) E^0(\omega, \mathbf{r})$  – пространственное распределение комплексной амплитуды частотной Фурье-компоненты.

Световое поле в каждом слое ДС:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, k) \Leftarrow \sum_{j=0,1} \mathbf{E}_j = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{m=s, p} \sum_j^{0,1} \int \mathbf{e}_j^m E_j^m(\omega, \mathbf{r}) \cdot \exp[i((\omega_0 + \omega)t - \mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r})] d\omega + \dots \right\} \quad (2)$$

Здесь  $E_j^m(\omega, \mathbf{r})$  – медленно меняющиеся функции координат и находятся из уравнений первого приближения ММА.  $j=0$  соответствует проходящему пучку,  $j=1$  – дифрагированному пучку на решетке с  $\mathbf{K}_j = j \cdot \mathbf{K}_1$ .

Уравнения связанных волн для определения амплитуды  $E_j^m$

$$\begin{cases} \mathbf{N}_{r0}^m \cdot \nabla E_0^m(\mathbf{r}) = -iC_1^m E_1^m(\mathbf{r}) n_n(\mathbf{r}) \exp(+i\Delta\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}) \\ \mathbf{N}_{r1}^m \cdot \nabla E_1^m(\mathbf{r}) = -iC_0^m E_0^m(\mathbf{r}) n_n(\mathbf{r}) \exp(-i\Delta\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}) \end{cases} \quad (3)$$

где  $E_j^m(\mathbf{r})$  – амплитудные профили пучков;  $\mathbf{N}_{r0,1}^m$  – групповые нормали;  $\mathbf{E}_j(\mathbf{r}) = \mathbf{N}_{r0,1}^m \cdot E_j^m(\mathbf{r})$ ;  $C_j^m$  – амплитудные коэффициенты связи;  $n_n(\mathbf{r})$  – нормированный амплитудный профиль показателя преломления структуры;  $\Delta\mathbf{K}$  – вектор фазовой расстройки.

## Теоретическая модель:

$$C_0^m = \frac{1}{4} \frac{\omega}{c_c n_0^m} \mathbf{e}_1^m \cdot \Delta \varepsilon(\mathbf{r}, t) \cdot \mathbf{e}_0^m \quad C_1^m = \frac{1}{4} \frac{\omega}{c_c n_1^m} \mathbf{e}_0^m \cdot \Delta \varepsilon(\mathbf{r}, t) \cdot \mathbf{e}_1^m \quad - \text{коэффициенты связи, входящие в уравнения связанных волн (3).}$$

где  $\omega$  – угловая частота световых волн;  $n_j^m$  – показатели преломления;  $\mathbf{e}_j^m$  – единичные векторы поляризации пучков;  $\Delta \varepsilon(\mathbf{r}, t)$  – амплитуда основной гармоники возмущения тензора диэлектрической проницаемости, обусловленного записью.

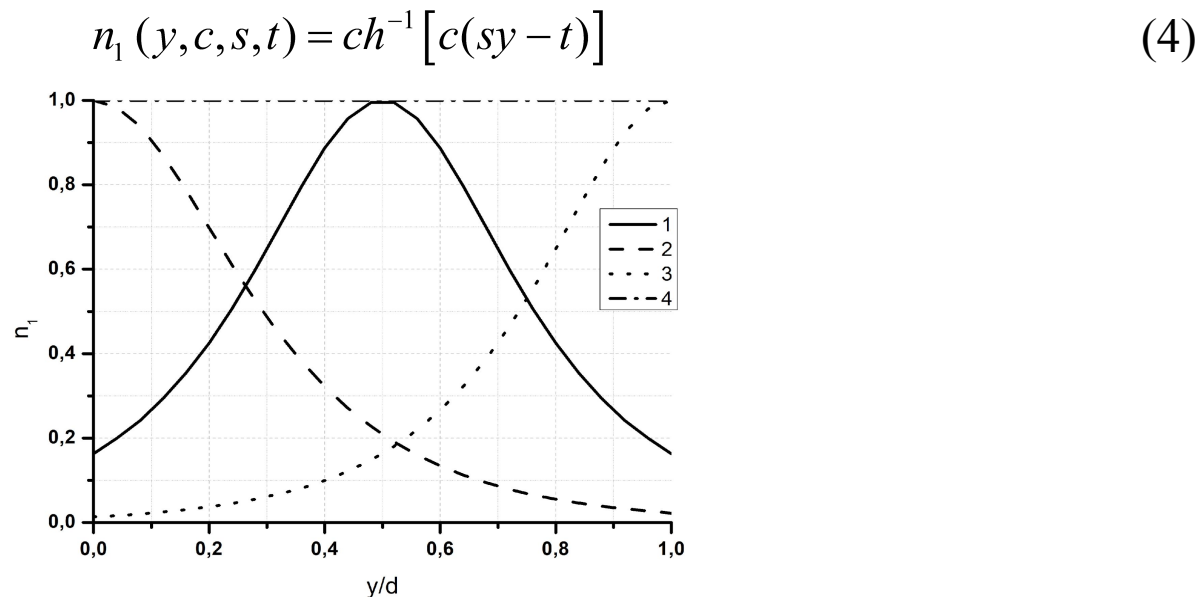


Рис. 2 – Характерные варианты неоднородностей профиля показателя преломления в одном слое МНГДС

[4] S.N. Sharangovich, E.A. Dovolnov. Models of holographic record of reflection and transmitted diffraction gratings in optical absorbent photopolymeric materials // Proceedings of SPIE. 2004. Vol. 5464. P. 399-410/

[5] Д.И. Дудник, С.Н. Шарангович. Влияние фотоиндуцированного изменения оптического поглощения на формирование многослойных неоднородных голографических дифракционных структур на основе фотополимерных материалов // Квантовая электроника : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., – Минск: РИВШ, 2019. – С.26-27.

## Теоретическая модель:

$$\mathbf{E}^n = \mathbf{T}^n \times \mathbf{E}'^{n-1} \quad (5)$$

$$\mathbf{E}^n = \begin{bmatrix} E_0^n(\omega, \theta) \\ E_1^n(\omega, \theta) \end{bmatrix} \quad \mathbf{E}'^{n-1} = \begin{bmatrix} E_0'^{n-1}(\omega, \theta) \\ E_1'^{n-1}(\omega, \theta) \end{bmatrix} \quad \mathbf{T}^n = \begin{bmatrix} T_{00}^n(\omega, \theta) & T_{10}^n(\omega, \theta) \\ T_{01}^n(\omega, \theta) & T_{11}^n(\omega, \theta) \end{bmatrix}$$

Компоненты матрицы перехода  $\mathbf{T}$  определяются выражениями:

$$T_{00}(\omega, \theta) = 1 - \frac{b_0^{m2}}{2} A \int_{-1}^{+1} \exp \left[ i \frac{\Delta K^m d_n}{2} (1-q) \right] \times \sinh \left[ \frac{cs(1+q)}{2} \right] \cdot {}_2F_1(1-\alpha, 1+\alpha; 2; w) dq \quad (6)$$

$$T_{01}(\omega, \theta) = -i \frac{b_0^m}{2} \sqrt{\frac{v_1}{v_0}} \int_{-1}^{+1} \exp \left[ -i \frac{\Delta K^m d_n}{2} (1-q) \right] \times \cosh^{-1} [c(s(1-q)/2-t)] \cdot {}_2F_1(-\alpha, \alpha, 1; w) dq \quad (7)$$

$$T_{10}(\omega, \theta) = -i \frac{b_1^m}{2} \sqrt{\frac{v_0}{v_1}} \int_{-1}^{+1} \exp \left[ -i \frac{\Delta K^m d_n}{2} (1-q) \right] \times \cosh^{-1} [c(s(1-q)/2-t)] \cdot {}_2F_1(-\alpha, \alpha, 1; w) dq \quad (8)$$

$$T_{11}(\omega, \theta) = 1 - \frac{b_1^{m2}}{2} A \int_{-1}^{+1} \exp \left[ i \frac{\Delta K^m d_n}{2} (1-q) \right] \times \sinh \left[ \frac{cs(1+q)}{2} \right] \cdot {}_2F_1(1-\alpha, 1+\alpha; 2; w) dq \quad (9)$$

$$\mathbf{A}^n = \begin{bmatrix} \exp(-i(\mathbf{k}_1^n \cdot \mathbf{y}_0)t_n) & 0 \\ 0 & \exp(-i(\mathbf{k}_0^n \cdot \mathbf{y}_0)t_n) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Перемножив матрицы перехода всех слоев, можно получить связь между входным полем  $\mathbf{E}_0$  и дифракционным полем  $\mathbf{E}^N$  на выходе МНГДС толщиной  $D$ :  $\mathbf{E}^N = \mathbf{T} \times \mathbf{E}_0$ ,  $\mathbf{T} = \mathbf{T}^N \times \mathbf{A}^{N-1} \times \mathbf{T}^{N-1} \times \dots \times \mathbf{A}^n \times \mathbf{T}^n \times \dots \times \mathbf{A}^1 \times \mathbf{T}^1$

${}_2F_1(a, b, c; z)$  – гипергеометрическая функция Гаусса;  $w = \frac{\sinh[cs(1-q)/2] \sinh[cs(1+q)/2]}{\cosh[ct] \cosh[c(s-t)]}$ ;  $A = (cs \cdot \cosh[ct] \cosh[c(s-t)])^{-1}$ ;  $\alpha = b_j^m$ ;  $b_j^m = \frac{d_n \cdot C_j^m}{\sqrt{v_0 v_1}}$ ;

$\delta = d_n(\eta_1 v_0 - \eta_0 v_1 / 2v_1)$ ;  $d_n$  – толщина  $n$ -го слоя;  $\eta_j = \pm \sin \theta_{vj}$ ;  $v_j = \cos \theta_{vj}$ ;  $\theta_{vj}$  – углы между групповыми нормальными  $\mathbf{N}_{vj}^m$  и осью  $y$  (рис1);  $C_j^m$  – коэффициенты связи; параметры  $c, s, t$  берутся для каждого слоя, согласно аппроксимирующей функции.



# Численное моделирование:

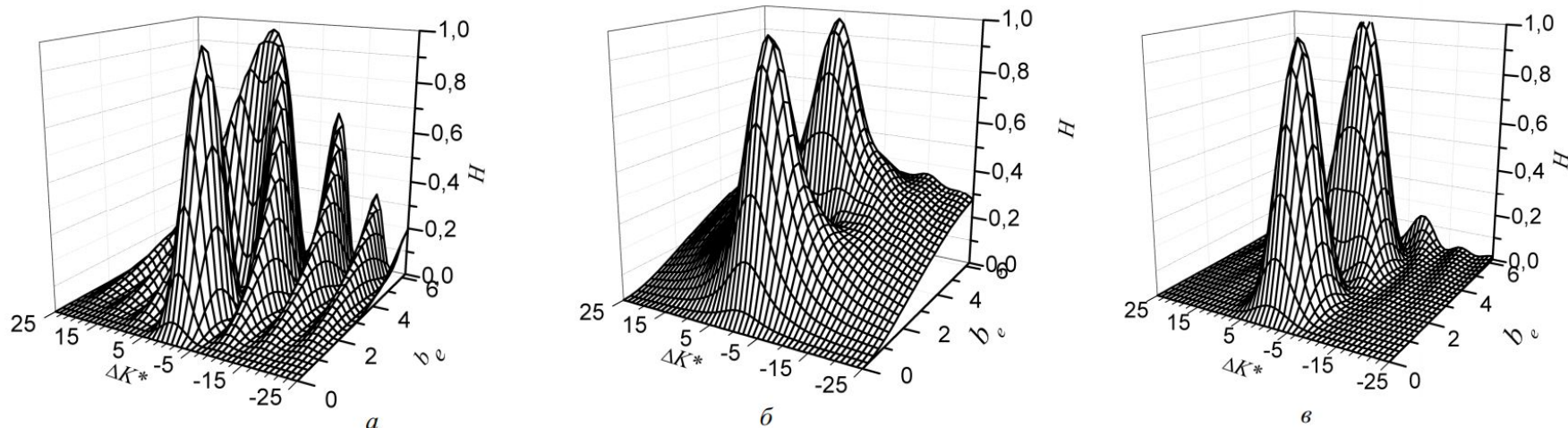


Рис. 3. Решение ПФ для однородного (а), спадающего (б), куполообразного (в) профиля ПП [6]

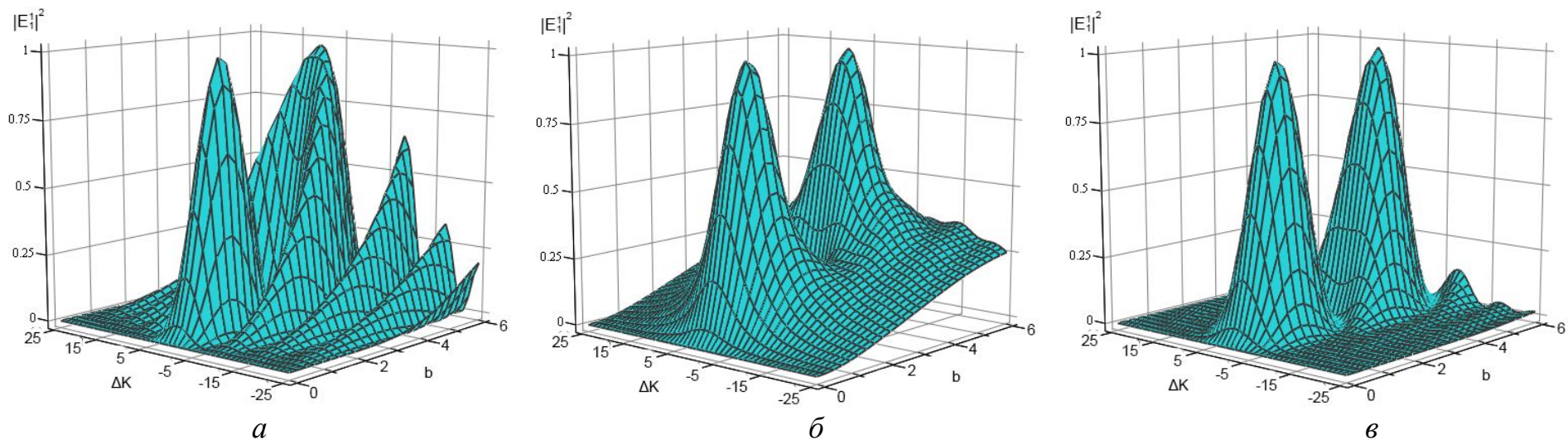


Рис. 4. Решение ПФ для однородного (а), спадающего (б), куполообразного (в) профиля ПП [6]

[6] Ноздреватых Б.Ф., Устюжанин С.В., Шарангович С.Н. Дифракционные характеристики пропускающих неоднородных фотонных структур в фотополимеризующихся жидкокристаллических композиционных материалах // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 8(1). – С. 109–117.

# Численное моделирование:

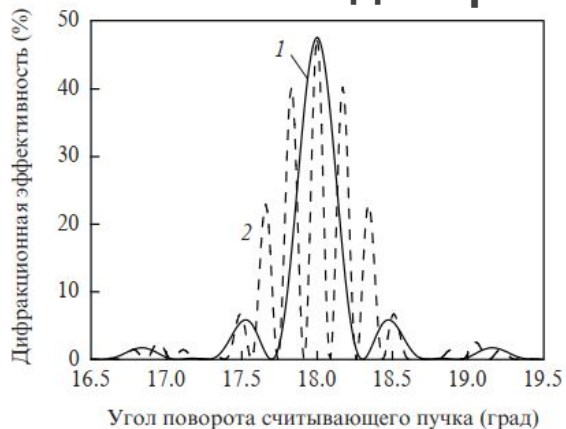


Рис.5. Угловая селективность однородной MVHG структуры при толщинах промежуточного слоя  $t = 10$  мкм (1) и 175 мкм (2) [1]

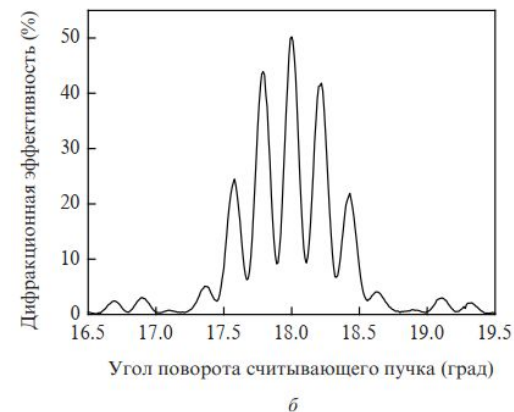
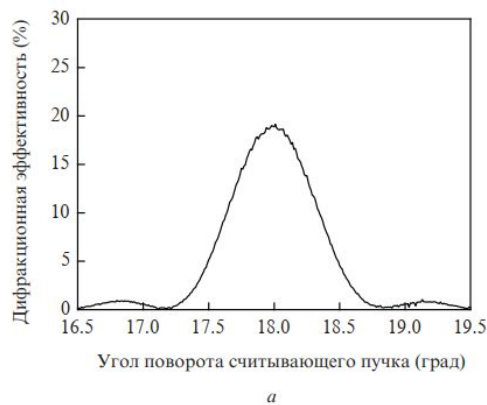


Рис.7. Экспериментально полученные угловые селективности одиночной голограммы (а), неоднородной MVHG структуры с симметричной геометрией пучков при записи (б) [1]

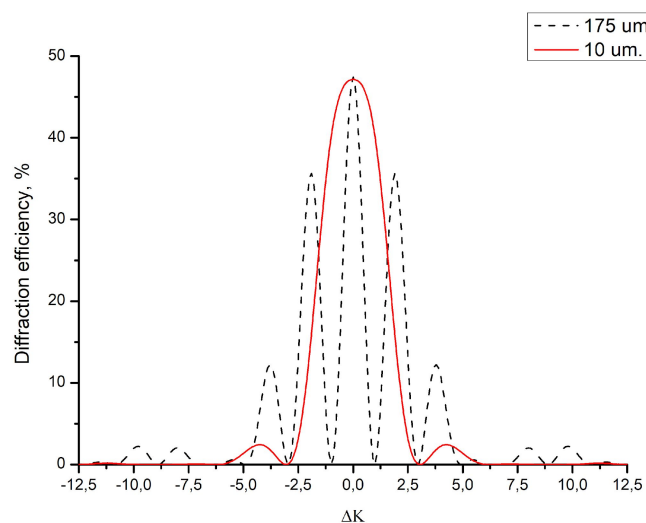


Рис.6. Селективность однородной двуслойной голографической дифракционной структуры при толщинах промежуточного слоя  $t = 10$  мкм и 175 мкм

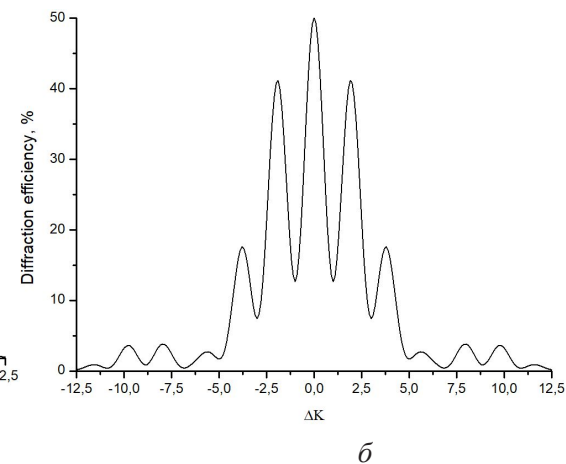
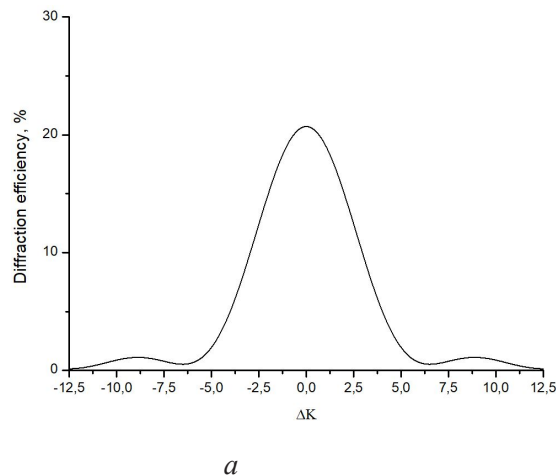


Рис.8. Рассчитанные селективности неоднородной одиночной голограммы (а) и двуслойной неоднородной голографической дифракционной структуры (б)

[1] E.F. Pen, M.Yu. Rodionov. Properties of multilayer nonuniform holographic structures // Quantum Electronics. 2010. Vol. 40. N 10. P. 919 – 92.

# Численное моделирование:

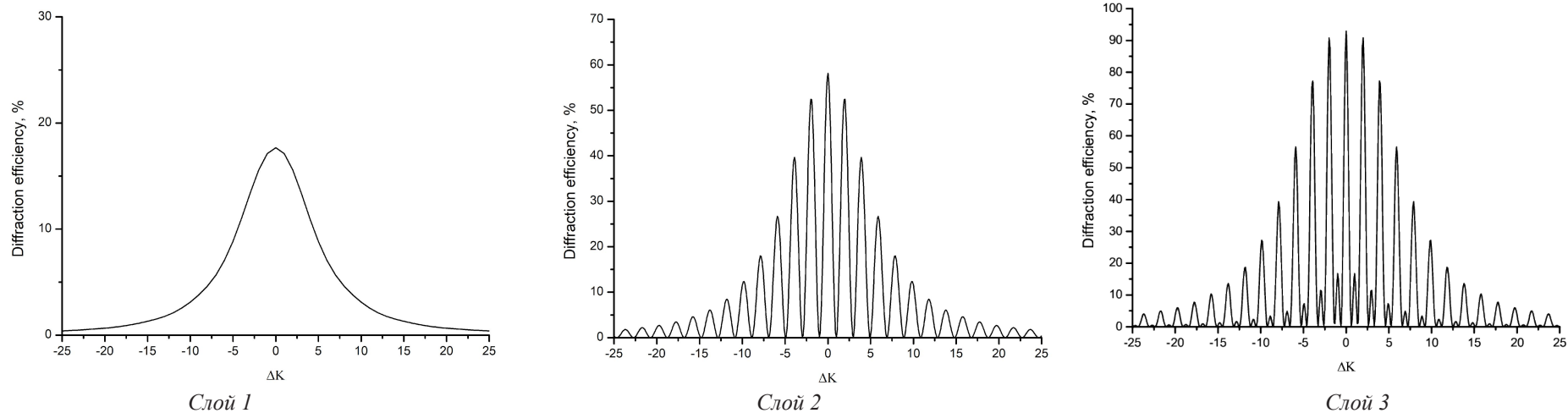


Рис.9. Селективности МНГДС со спадающим профилем показателя преломления на каждом слое

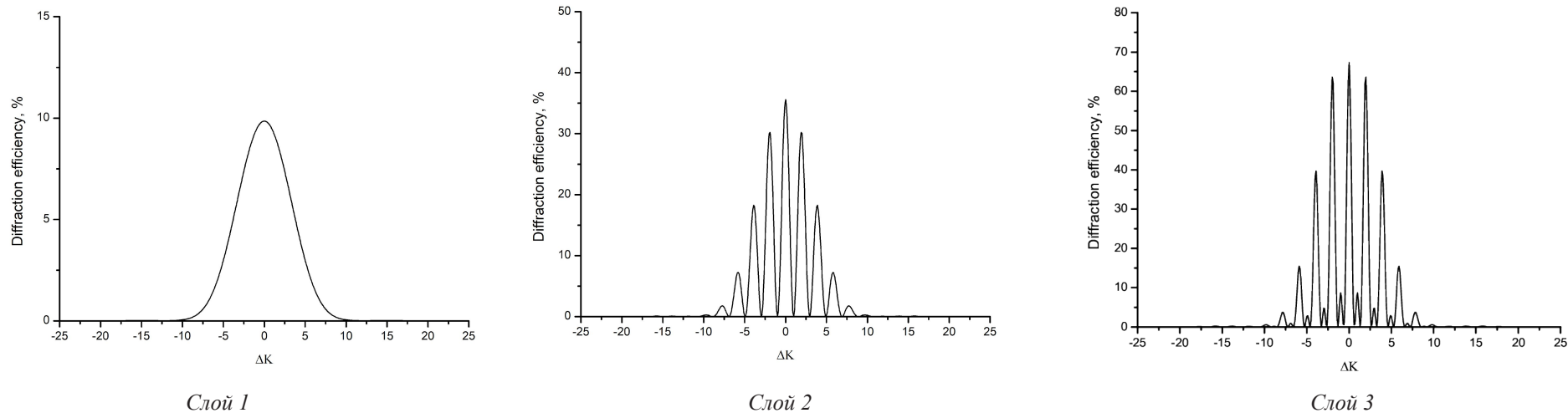


Рис.10. Селективности МНГДС с куполообразным профилем показателя преломления на каждом слое

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена теоретическая модель дифракции квазимонохроматических световых пучков на пропускающих МНГДС с учетом пространственной неоднородности амплитудного профиля первой гармоники показателя преломления, возникающей в процессе голографического формирования решеток в фотополимерном материале. Представленные аналитические решения описывают эволюцию пространственных профилей световых пучков и их частотно-угловых спектров при дифракции на МНГДС. Полученные решения позволяют рассчитать **поляризационные и дифракционные характеристики** (дифракционную эффективность и селективные свойства) МНГДС, состоящей из разделенных промежуточными слоями объемных неоднородных пропускающих голограмм.

# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
г. Томск