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

В.О. Долгирев, аспирант каф. СВЧиКР,

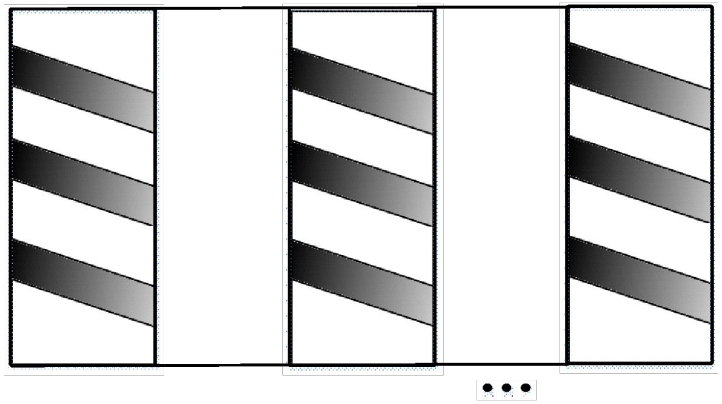
С.Н. Шарангович, профессор, к.ф.-м.н.

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:

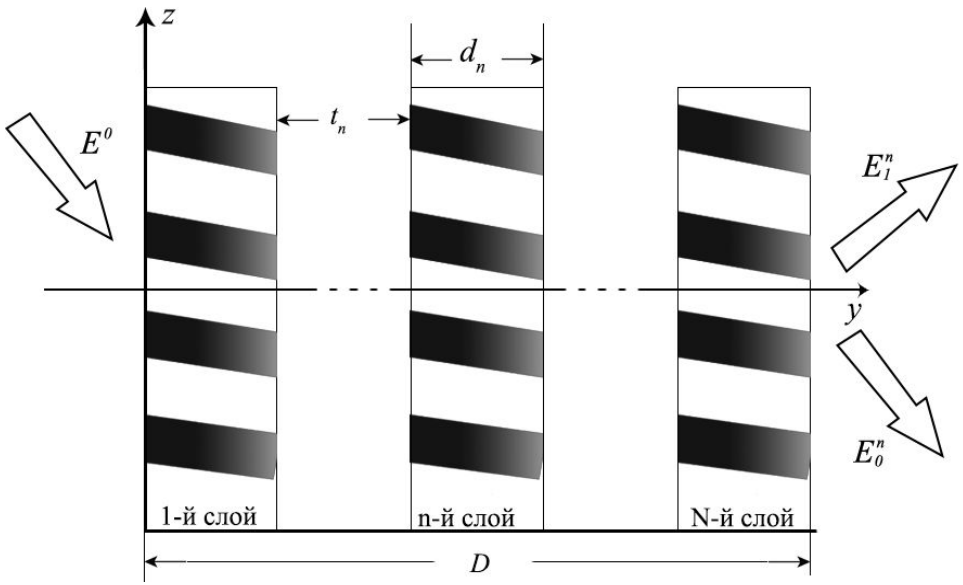


Рис. 1 – Схема дифракции на МНГДС

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.

[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:

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

где ω_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:

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

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 $\boldsymbol{K}_j=j\cdot\boldsymbol{K}_1$.

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:

$$C_0^m = \frac{1}{4}\frac{\omega}{c_c n_0^m}\mathbf{e}_1^m \cdot \Delta\varepsilon(\mathbf{r},t)\cdot \mathbf{e}_0^m \quad C_1^m = \frac{1}{4}\frac{\omega}{c_c n_1^m}\mathbf{e}_0^m \cdot \Delta\varepsilon(\mathbf{r},t)\cdot \mathbf{e}_1^m$$

– коэффициенты связи, входящие в уравнения связанных волн (3).

где ω – 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.

$$n_1(y,c,s,t) = ch^{-1}\left[c(sy-t)\right] \qquad (4)$$

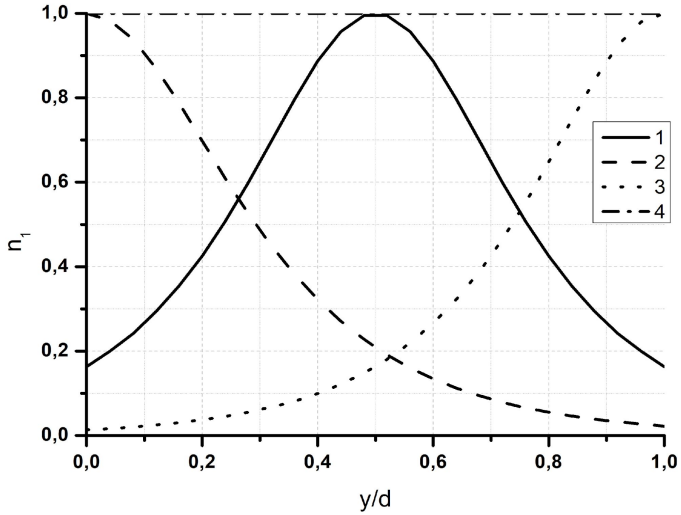


Рис. 2 – Характерные варианты неоднородностей профиля показателя преломления в одном слое МНГДС

[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:

$$\mathbf{E}^n = \mathbf{T}^n \times \mathbf{E}'^{n-1} \tag{5}$$

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

Компоненты матрицы перехода **T** определяются выражениями:

$$T_{00}(\omega,\theta) = 1 - \frac{b_0^{m2}}{2} A \int_{-1}^{+1} \exp\left[i \frac{\Delta K^m d_n}{2}(1-q) \right] \times \sinh\left[\frac{cs(1+q)}{2} \right] \cdot {}_2\mathrm{F}_1(1-\alpha, 1+\alpha; 2; w)\, dq \tag{6}$$

$$T_{01}(\omega,\theta) = -i \frac{b_0^m}{2} \sqrt{\frac{\nu_1}{\nu_0}} \int_{-1}^{+1} \exp\left[-i \frac{\Delta K^m d_n}{2}(1-q) \right] \times \cosh^{-1}\left[c(s(1-q)/2 - t) \right] \cdot {}_2\mathrm{F}_1(-\alpha, \alpha, 1; w)\, dq \tag{7}$$

$$T_{10}(\omega,\theta) = -i \frac{b_1^m}{2} \sqrt{\frac{\nu_0}{\nu_1}} \int_{-1}^{+1} \exp\left[-i \frac{\Delta K^m d_n}{2}(1-q) \right] \times \cosh^{-1}\left[c(s(1-q)/2 - t) \right] \cdot {}_2\mathrm{F}_1(-\alpha, \alpha, 1; w)\, dq \tag{8}$$

$$T_{11}(\omega,\theta) = 1 - \frac{b_1^{m2}}{2} A \int_{-1}^{+1} \exp\left[i \frac{\Delta K^m d_n}{2}(1-q) \right] \times \sinh\left[\frac{cs(1+q)}{2} \right] \cdot {}_2\mathrm{F}_1(1-\alpha, 1+\alpha; 2; w)\, dq \tag{9}$$

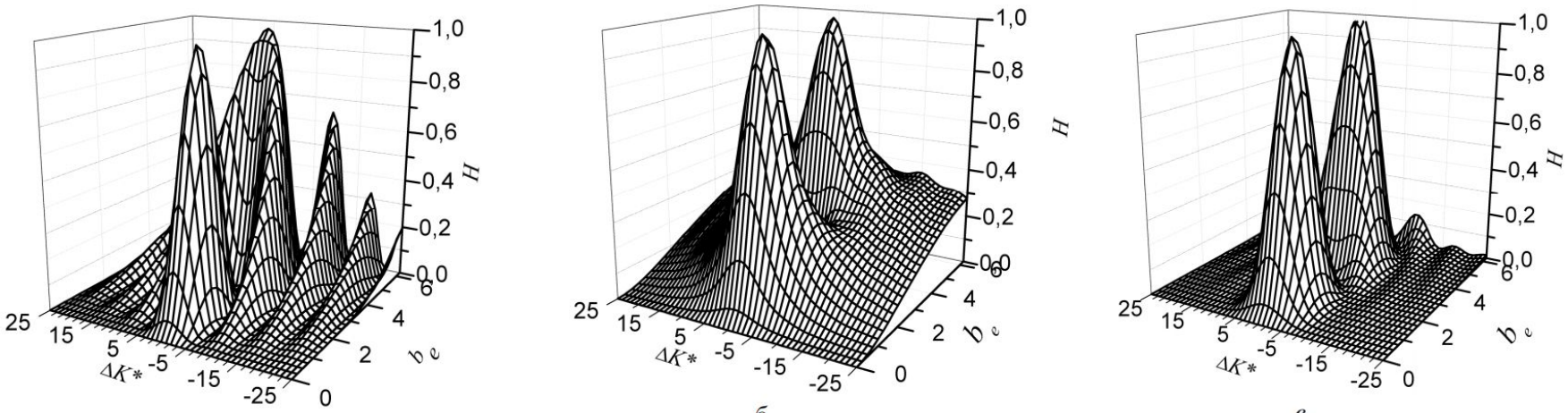
$$\mathbf{A}^n = \begin{bmatrix} \exp(-i(\mathbf{k}_1^n \cdot \mathbf{y}_0)t_n & 0 \\ 0 & \exp(-i(\mathbf{k}_0^n \cdot \mathbf{y}_0)t_n \end{bmatrix} \tag{10}$$

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: $\mathbf{E}^N = \mathbf{T} \times \mathbf{E}_0$, $\mathbf{T} = \mathbf{T}^N \times A^{N-1} \times \mathbf{T}^{N-1} \times \ldots \mathbf{A}^n \times \mathbf{T}^n \times \ldots \times \mathbf{A}^1 \times \mathbf{T}^1$

${}_2\mathrm{F}_1(a,b,c;z)$ – гипергеометрическая функция Гаусса; $w = \dfrac{\sinh[cs(1-q)/2]\sinh[cs(1+q)/2]}{\cosh[ct]\cosh[c(s-t)]}$; $A = \left(\mathrm{cs}\cdot\cosh[ct]\cosh[c(s-t)]\right)^{-1}$; $\alpha = b_j^m$; $b_j^m = \dfrac{d_n \cdot C_j^m}{\sqrt{\nu_0 \nu_1}}$; $\delta = d_n(\eta_1\nu_0 - \eta_0\nu_1 / 2\nu_1$; d_n – толщина n-го слоя; $\eta_j = \pm\sin\theta_{rj}$; $\nu_j = \cos\theta_{rj}$; θ_{rj} – углы между групповыми нормалями $\mathbf{N}_{rj}^m$ и осью y (рис1); C_j^m - коэффициенты связи; параметры c, s, t берутся для каждого слоя, согласно аппроксимирующей функции.

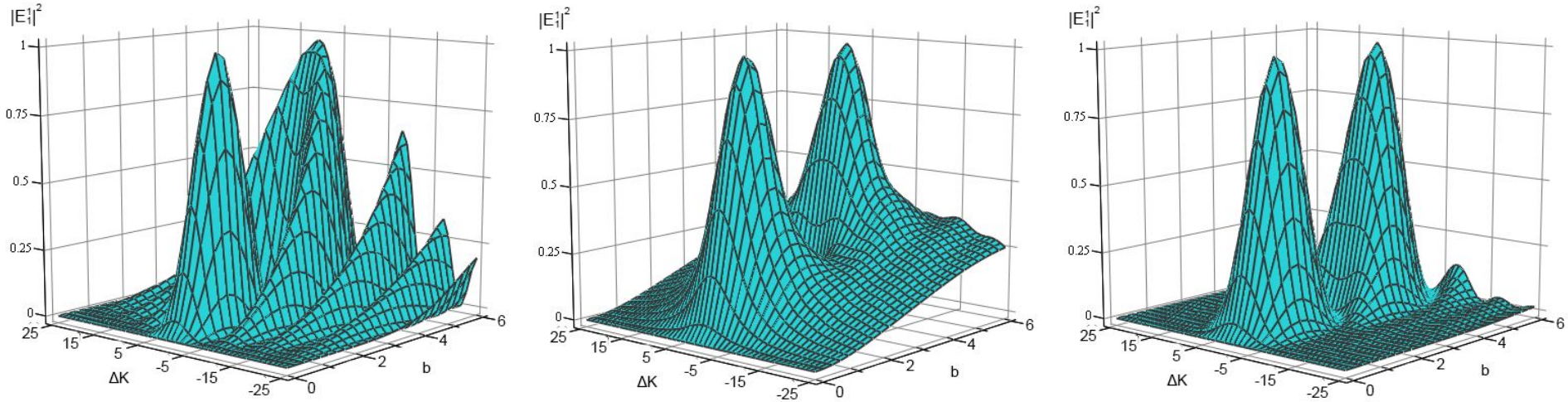
ТУСУР TUSUR UNIVERSITY

Численное моделирование:



а *б* *в*

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



а *б* *в*

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:

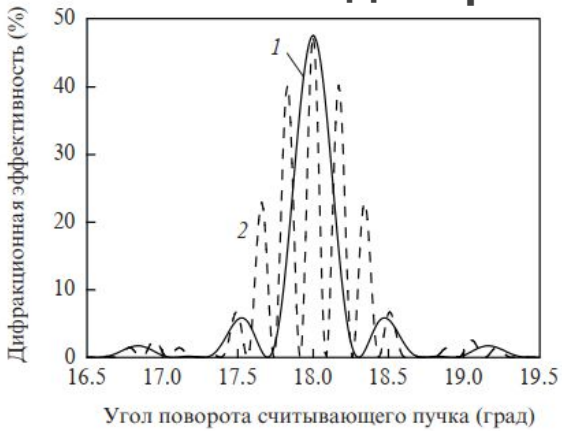


Рис.5. Угловая селективность однородной MVHG структуры при толщинах промежуточного слоя t = 10 мкм (*1*) и 175 мкм (*2*) [1]

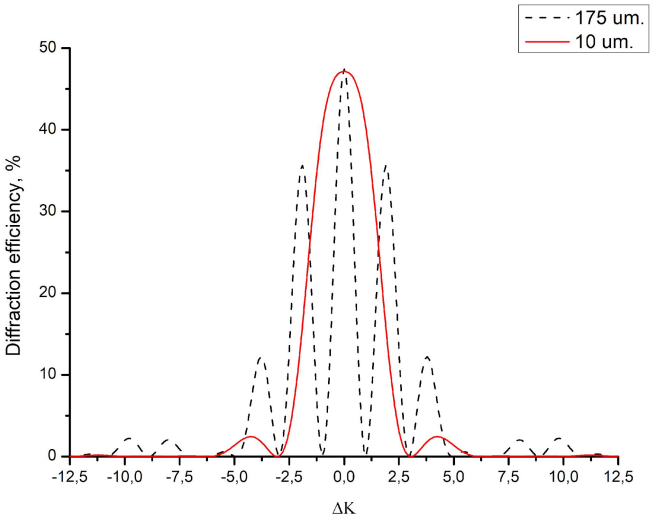


Рис.6. Селективность однородной двуслойной голографической дифракционной структуры при толщинах промежуточного слоя t = 10 мкм и 175 мкм

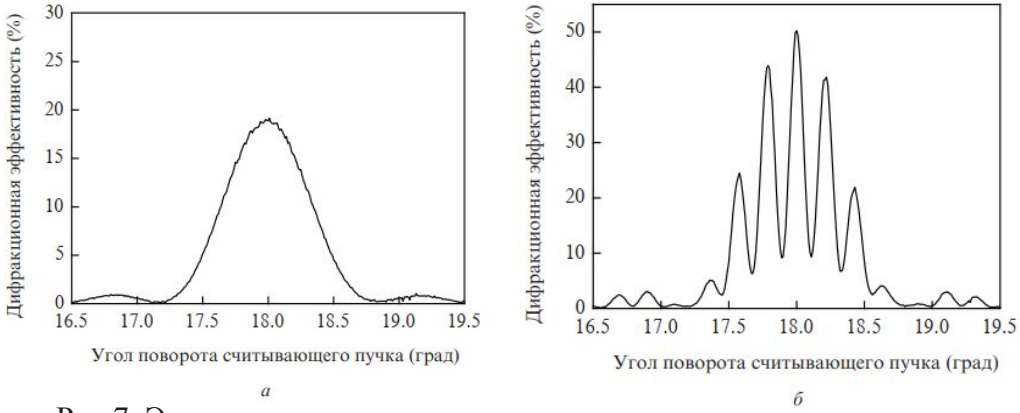


Рис.7. Экспериментально полученные угловые селективности одиночной голограммы (а), неоднородной MVHG структуры с симметричной геометрией пучков при записи (б) [1]

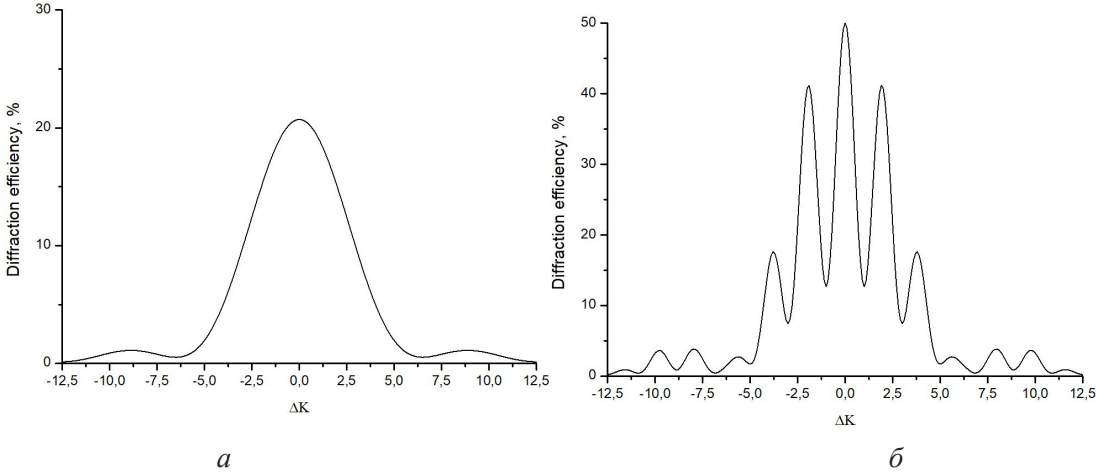
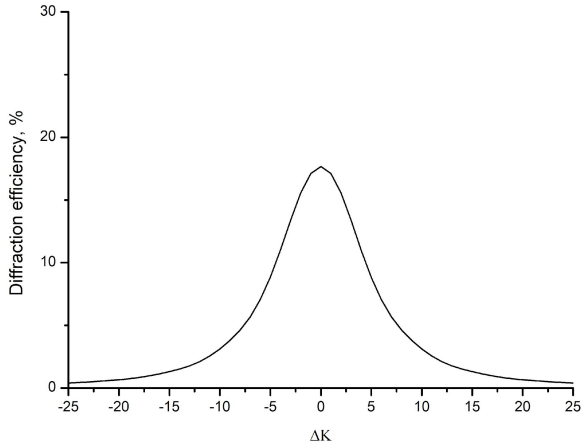


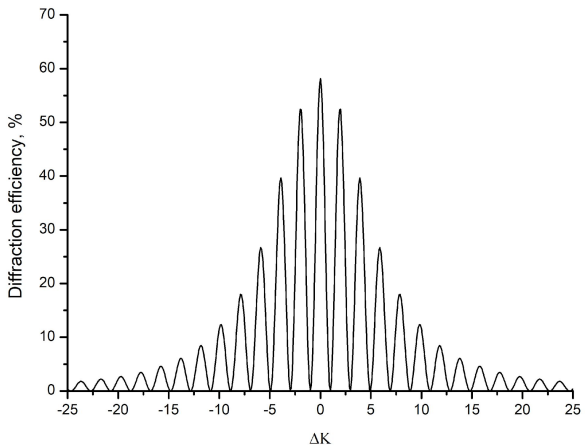
Рис.8. Рассчитанные селективности неоднородной одиночной голограммы (а) и двуслойной неоднородной голографической дифракционной структуры (б)

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

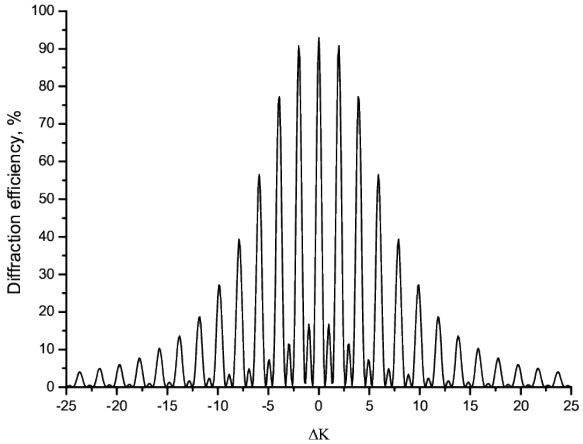
Численное моделирование:



Слой 1

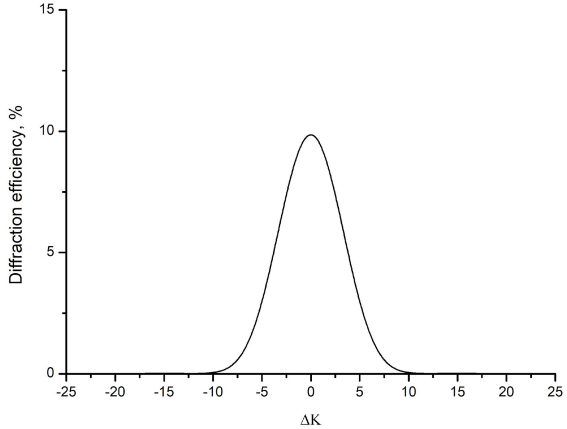


Слой 2

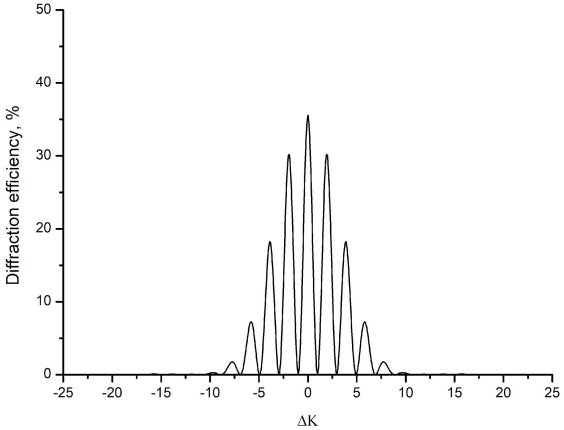


Слой 3

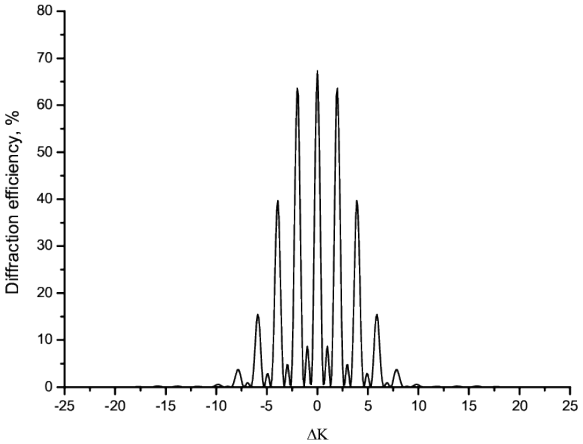
Рис.9. Селективности МНГДС со спадающим профилем показателя преломления на каждом слое



Слой 1



Слой 2



Слой 3

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** (дифрационную эффектитвность 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