

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего**  
**образования**

**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ**  
**УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»**  
**(ТУСУР)**

**С.Н. Шарангович**

**«ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ФОТОННЫЕ**  
**СТРУКТУРЫ В НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ**  
**МАТЕРИАЛАХ»**

**Учебное методическое пособие по практическим занятиям**  
**и самостоятельной работе**

**2018**

УДК 621.396.22.0297[621.315.2:621.39]

*Рецензенты:*

**Горлов Н.И.**, д-р техн. наук, проф., зав. каф. линий связи  
Сибирского гос. ун-та телекоммуникаций и информатики;

**Коханенко А.П.**, д-р физ.-мат. наук, проф. каф.  
квантовой электроники и оптоинформатики Том. гос. ун-та.

**Шарангович С.Н.**

Голографические фотонные структуры в наноструктурированных материалах. Учебное методическое пособие по практическим занятиям и самостоятельной работе. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2018. – 55 с.

Представлены методические материалы по проведению практических занятий и самостоятельной работе студентов по моделированию процессов формирования и дифракционных характеристик одномерных и двумерных голографических фотонных структур в фотополимерных материалах.

Предназначено для студентов технических вузов, обучающихся по направлению 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (дисциплина «Голографические фотонные структуры в наноструктурированных материалах»).

УДК 621.396.22.0297[621.315.2:621.39]

ББК

ISBN

© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2018

© Шарангович С.Н. 2018

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. Практическое занятие №1 Расчет кинетики формирования голографических фотонных структур в линейном режиме записи.....	5
2. Практическое занятие №2 Расчет амплитуд пространственных Фурье-гармоник голографических фотонных структур в нелинейном режиме записи.....	16
3. Практическое занятие №3 Расчет дифракционных характеристик одномерных голографических фотонных структур .....	35
4. Практическое занятие №4 Моделирование процессов формирования и дифракционных характеристик двумерных голографических фотонных структур.	44

## **ВВЕДЕНИЕ**

В данном учебном методическом пособии представлены методические материалы по проведению практических занятий и самостоятельной работе студентов по моделированию процессов формирования и дифракционных характеристик одномерных и двумерных голографических фотонных структур в фотополимерных материалах, которые дополняют материалы теоретической части курса «Голографические фотонные структуры в наноструктурированных материалах» [1].

Первый раздел пособия посвящен расчетам кинетик формирования голографических фотонных структур в линейном режиме записи. Второй раздел посвящен описанию расчетов амплитуд пространственных Фурье-гармоник голографических фотонных структур в фотополимерных материалах в нелинейном режиме записи. Третий раздел посвящен описанию расчетов дифракционных характеристик одномерных голографических фотонных структур. Четвертый раздел посвящен описанию моделирования процессов формирования и дифракционных характеристик двумерных голографических фотонных структур. В каждом разделе представлены задания и описаны методические рекомендации по выполнению расчетных работ, В конце каждого раздела приведен список использованной литературы.

Пособие предназначено для студентов очной формы обучения технических вузов старших курсов, обучающихся по направлению 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (дисциплина «Голографические фотонные структуры в наноструктурированных материалах»).

# **1. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1 РАСЧЕТ КИНЕТИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ СТРУКТУР В ЛИНЕЙНОМ РЕЖИМЕ ЗАПИСИ**

## **СОДЕРЖАНИЕ**

1. Исходные данные.....	6
2. Основные задачи на исследование .....	6
3. Порядок выполнения работы.....	7
4. Содержание отчета.....	15
5. Список литературы.....	15

## 1. Исходные данные

**Дано:** Фотополимерный материал с толщиной  $d$ , в котором записывается одномерная голографическая фотонная структура излучением с длиной волны  $\lambda = 633$  нм в линейном режиме.

В таблице 1.1 приведены исходные данные, заданные преподавателем.

Таблица 1.1 – Исходные данные для расчетного задания

№ варианта	Отношение времени полимеризации к времени диффузии $b = T_{ps}/T_m$	Время записи ГДС $t$ , с	Поглощение фотополимерного композита $\alpha$ , Неп	Толщина ФПМ $d$ , мкм	Число записываемых пучков $h$	Число учитываемых гармоник $N$
1	0,1; 1; 5	0 - 100	0	40	2	2
2	0,1; 1; 5	0 - 100	1	40	2	2
3	0,1; 1; 5	0 - 100	2	40	2	2
4	0,1; 1; 5	0 - 100	3	40	2	2
5	0,1; 1; 5	0 - 100	0	45	2	2
6	0,2; 2; 5	0 - 100	1	45	2	2
7	0,2; 2; 5	0 - 100	2	45	2	2
8	0,2; 2; 5	0 - 100	3	45	2	2
9	0,3; 1; 5	0 - 100	0	50	2	2
10	0,3; 1; 5	0 - 100	1	50	2	2
11	0,3; 1; 5	0 - 100	2	50	2	2
12	0,3; 1; 5	0 - 100	3	50	2	2
13	0,1; 1; 5	0 - 100	0	55	2	2
14	0,1; 1; 5	0 - 100	1	55	2	2
15	0,1; 1; 5	0 - 100	2	55	2	2

## 2. Основные задачи на исследование:

Основными задачами являются:

- исследование кинетику формирования нулевой и первой гармоник мономера от отношения времени полимеризации  $T_{ps}$  к времени диффузии  $T_m$ ;
- исследование кинетику формирования нулевой и первой гармоник показателя преломления от отношения времени полимеризации  $T_{ps}$  к времени диффузии  $T_m$ ;
- исследование влияние поглощения ФМП на кинетику формирования нулевой и первой гармоник показателя преломления при различных отношениях времени полимеризации  $T_{ps}$  к времени диффузии  $T_m$ ;
- исследование влияние  $\delta n_c$  на кинетику записи первой гармоники профиля показателя преломления.

### 3. Порядок выполнения работы

#### 3.1. Кинетика формирования гармоник

В ходе выполнения расчетного задания использовать результаты моделирования кинетики формирования голографических фотонных структур в среде MathCAD. Расчетные данные и графики взять из программы с результатами моделирования, пояснения и описание используемых величин находятся там же.

Решение для гармоник мономера имеет вид:[1]

$$M(j, t) = \sum_{i=0}^{2 \cdot 2} (A_{j,i} \cdot \exp(L_i \cdot t)).$$

На основе данного решения оценить влияние отношения времени полимеризации к времени диффузии  $b$  на нулевую  $M_0(t)$  и первую  $M_1(t)$  гармоники концентрации мономера в зависимости от времени  $t$ .

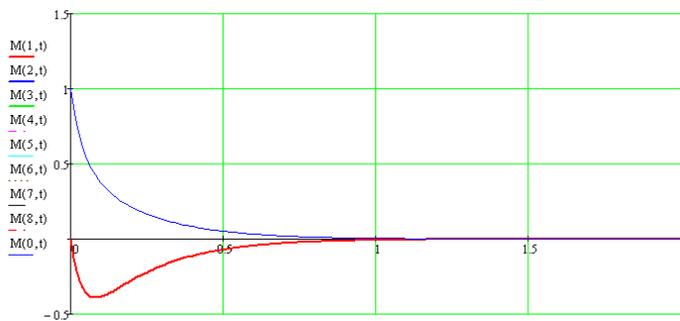


Рисунок 3.1 – Кинетика записи профилей гармоник концентрации мономера  $M_0(t)$  и  $M_1(t)$  при  $b = 0,1$

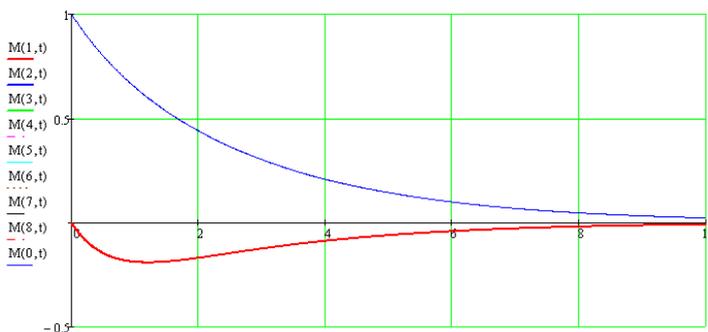


Рисунок 3.2 – Кинетика записи профилей гармоник концентрации мономера  $M_0(t)$  и  $M_1(t)$  при  $b = 3$

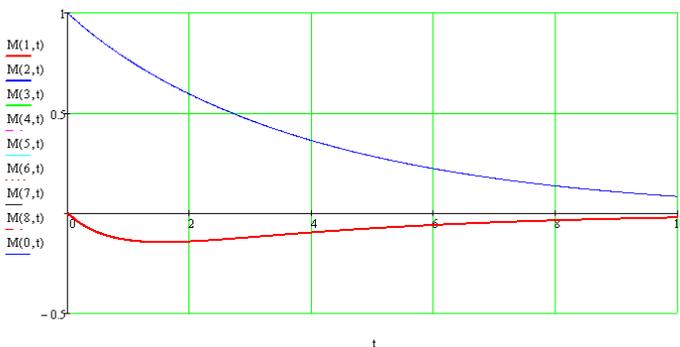


Рисунок 3.3 – Кинетика записи профилей гармоник концентрации мономера  $M_0(t)$  и  $M_1(t)$  при  $b = 5$

Решение для гармоник показателя преломления имеет вид:

$$n(j, t) = \delta n_p \cdot \sum_{i=0}^{2 \cdot 2} (b_{j,i} \cdot s(i, t)) + \delta n_c \cdot c_{j,j} \cdot s(j, t).$$

На основе данного решения оценить влияние отношения времени поли-

меризации к времени диффузии  $b$  на нулевую  $n_0(t)$  и первую  $n_1(t)$  гармоники показателя преломления в зависимости от времени  $t$ .

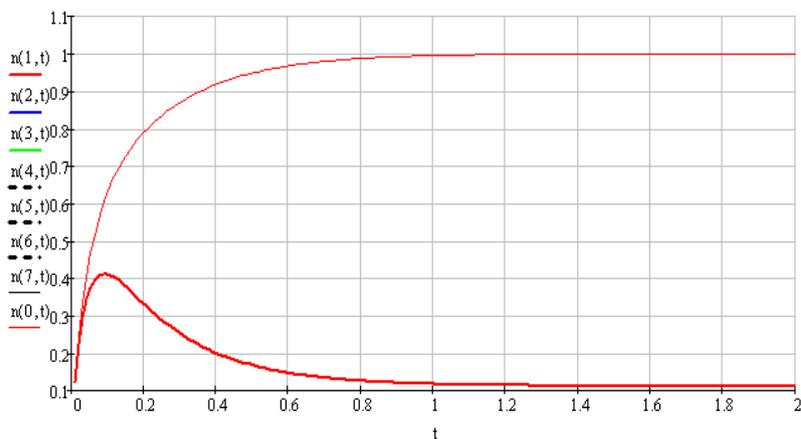


Рисунок 3.4 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления  $n_0(t)$  и  $n_1(t)$  при  $b = 0,1$

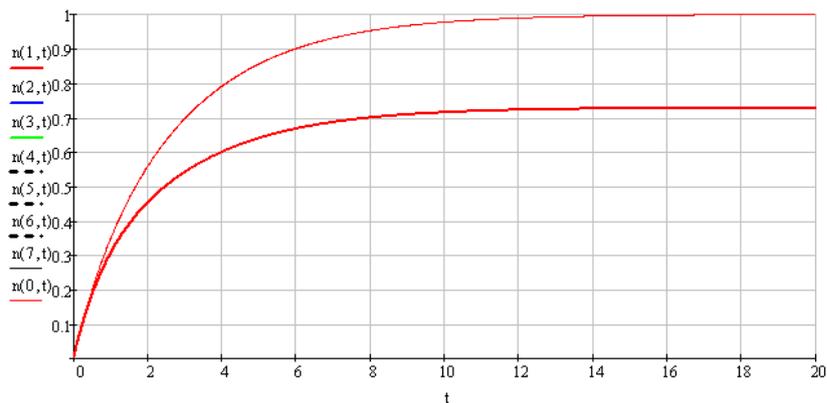


Рисунок 3.5 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления  $n_0(t)$  и  $n_1(t)$  при  $b = 3$

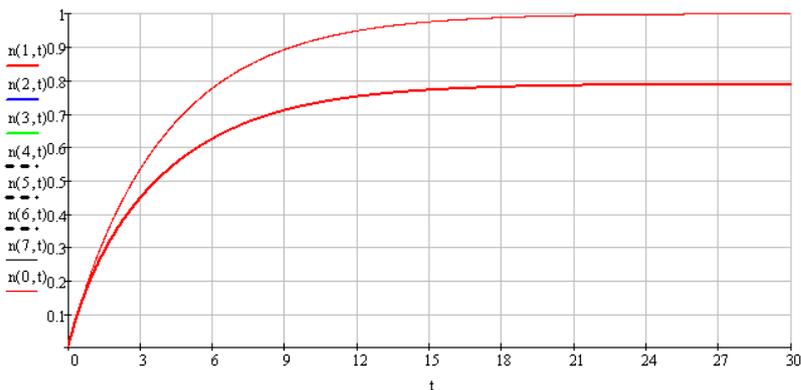


Рисунок 3.6 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления  $n_0(t)$  и  $n_1(t)$  при  $b = 5$

Промоделировать пространственное распределение показателя преломления при записи ГДС в ФПМ, при помощи выражения:

$$n(x, t) = n_1(t) \cdot \cos(k_1 x)$$

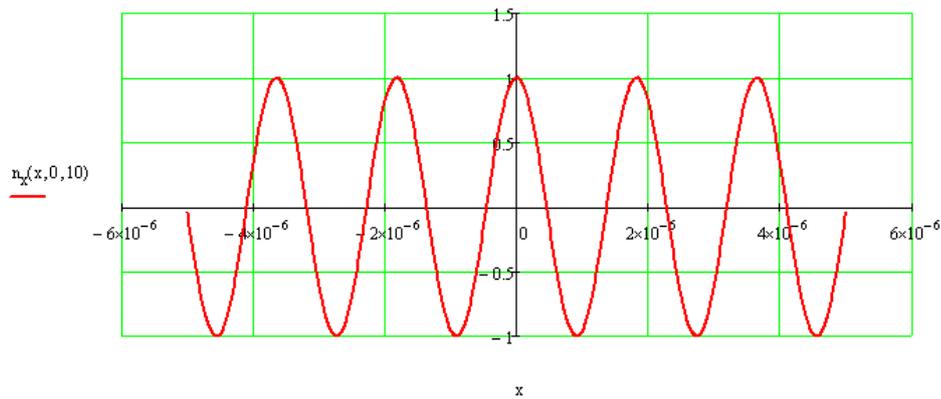


Рисунок 3.7 – Распределение показателя преломления  $n(x, t)$  при  $b = 0,1$

Стоит отметить, что при увеличении параметра  $b$  распределение показателя преломления будет иметь тот же вид.

Расчет влияния параметра  $b = 0,1 \dots 9.1$  на первую гармонику показателя преломления  $n_1(t = const)$  представлен на рис.3.8.

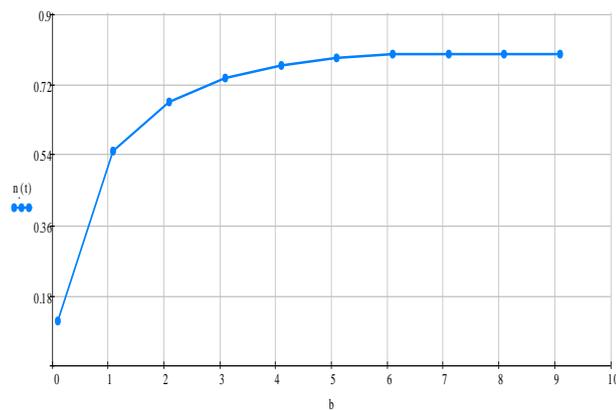


Рисунок 3.8 – Зависимость влияния параметра  $b = 0,1 \dots 9.1$  на первую гармонику показателя преломления  $n_1(t = const)$

Таким образом, оценив влияние параметра  $b$  на нулевую  $M_0(t)$  и первую  $M_1(t)$  гармоники концентрации мономера, из рисунков 2.1-2.3 видно, что с увеличением отношения времени полимеризации  $T_{ps}$  к времени диффузии  $T_m$ , уменьшается пиковое значение амплитуды первой гармоники, однако сам уровень амплитуды изменяется медленнее. Это значит, что концентрация мономера под действием излучения с  $\lambda = 633$  нм изменяется медленнее с увеличением параметра  $b$ . Также с увеличением отношения  $T_{ps}/T_m$ , время изменения амплитуды первой гармоники показателя преломления  $n_1(t)$  и ее максимальное значение увеличиваются (рисунки 2.4-2.6), что подтверждает график зависимости влияния параметра  $b$  на первую гармонику показателя преломления  $n_1(t = const)$  (рисунок 2.8). Увеличение максимального значения амплитуды первой гармоники говорит о том, что происходит вклад в диффузионный процесс.

### 3.2. Исследование влияние $\delta n_c$ на кинетику записи гармоник профиля показателя преломления

Оценить влияние  $\delta n_c$  на кинетику записи гармоник профиля показателя преломления, при его различных вариациях.

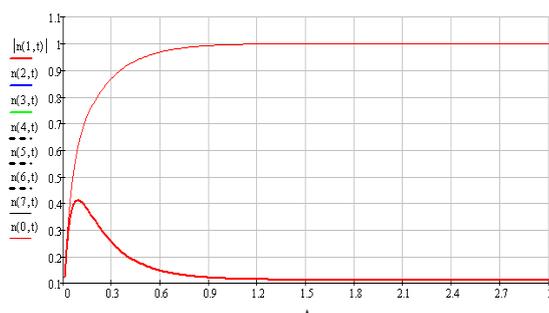


Рисунок 3.9 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления

$$n_0(t) \text{ и } n_1(t) \text{ при } \delta n_c = 0,1 \text{ и } b = 0,1$$

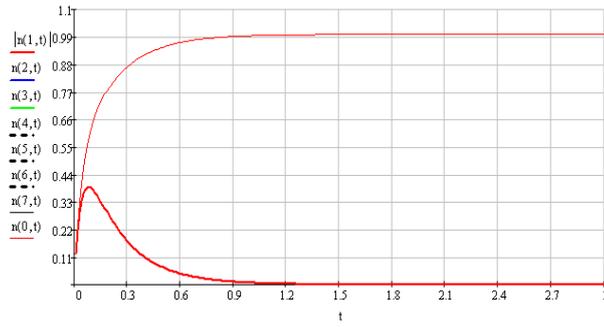


Рисунок 3.10 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления  $n_0(t)$  и  $n_1(t)$  при  $\delta n_c = 1$  и  $b = 0,1$

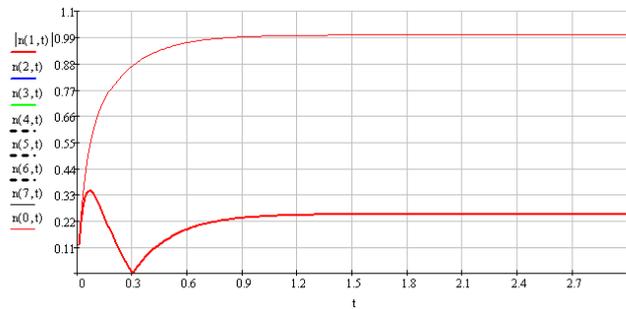


Рисунок 3.11 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления  $n_0(t)$  и  $n_1(t)$  при  $\delta n_c = 3$  и  $b = 0,1$

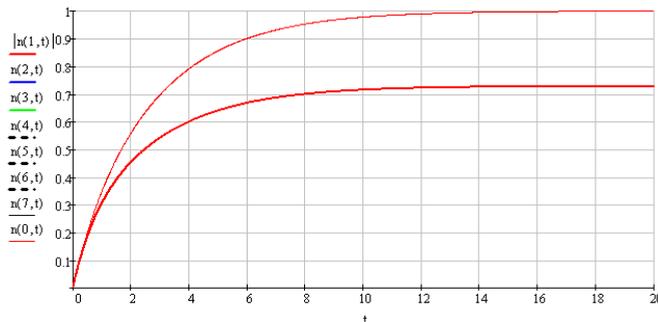


Рисунок 3.12 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления  $n_0(t)$  и  $n_1(t)$  при  $\delta n_c = 0,1$  и  $b = 3$

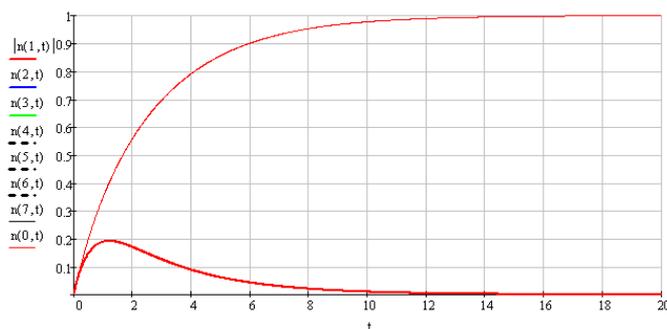


Рисунок 3.13 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления  $n_0(t)$  и  $n_1(t)$  при  $\delta n_c = 1$  и  $b = 3$

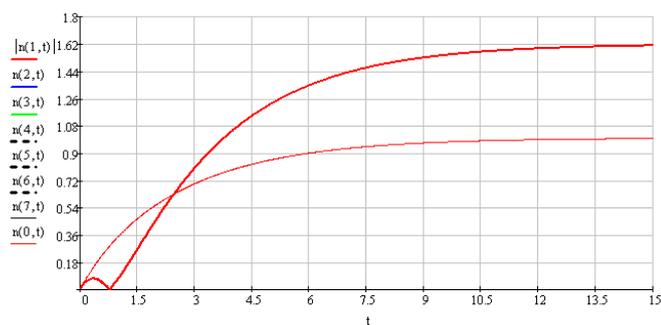


Рисунок 3.14 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления  $n_0(t)$  и  $n_1(t)$  при  $\delta n_c = 3$  и  $b = 3$

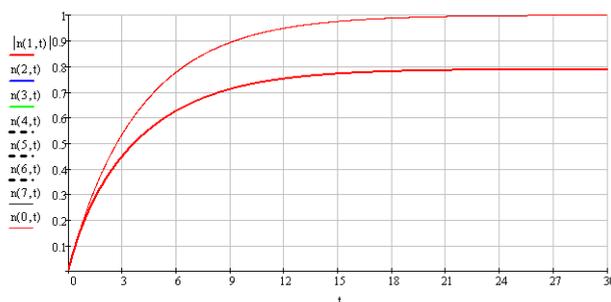


Рисунок 3.15 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления  $n_0(t)$  и  $n_1(t)$  при  $\delta n_c = 0,1$  и  $b = 5$

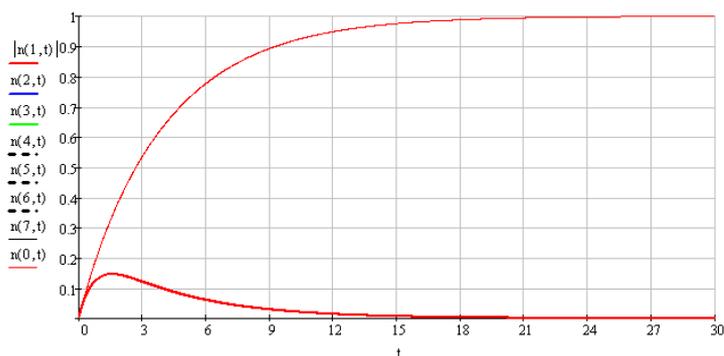


Рисунок 3.16 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления  $n_0(t)$  и  $n_1(t)$  при  $\delta n_c = 1$  и  $b = 5$

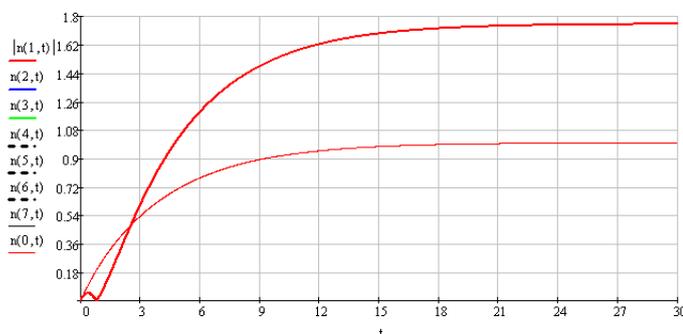


Рисунок 3.17 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления  $n_0(t)$  и  $n_1(t)$  при  $\delta n_c = 3$  и  $b = 5$

Таким образом, оценено влияние  $\delta n_c$  на изменение амплитуды нулевой и первой гармоник показателя преломления  $n_0(t)$  и  $n_1(t)$ . Можно заметить, что данный параметр не влияет на изменение амплитуды нулевой гармоники  $n_0(t)$ . При  $\delta n_c = 0,1$  и  $\delta n_c = 1$  амплитуда первой гармоники  $n_1(t)$  резко увеличивается, затем плавно спадает, однако при  $\delta n_c = 2$  наблюдается увеличение амплитуды при истечении 0,4 с. Данный эффект усиливается при повышении отношения времени полимеризации к времени диффузии.

### 3.3. Выводы

В данной работе проведено исследование кинетики формирования гармоник пространственного профиля решетки, показателя преломления и определить количество гармоник, которые необходимо принимать во внимание в за-

висимости от параметров материала и процесса записи.

В процессе записи амплитудный профиль гармоник концентрации мономера  $M_0(t)$  и  $M_1(t)$  является неоднородным и трансформируется во времени (рисунки 2.1-2.3). Также с увеличением отношения  $T_{ps}/T_m$ , время изменения амплитуды первой гармоники показателя преломления  $n_1(t)$  и ее максимальное значение увеличиваются (рисунки 2.4-2.6), это подтверждает график зависимости влияния параметра  $b$  на первую гармонику показателя преломления  $n_1(t = const)$  (рисунок 2.8). Таким образом, решение состоит из двух составляющих, каждая из которых описывает определенный механизм записи. Другими словами, кинетика изменения амплитуды решетки в каждой пространственной точке является различной (рисунок 2.7) и определяется вкладами в амплитуду голографической решетки процессов полимеризации и диффузии компонент материала. Также, можно сказать, что время записи ГФС увеличивается с повышением параметра  $b$ , т.к. показатель преломления при записи изменяется дольше с увеличением отношения  $T_{ps}/T_m$ .

#### 4. Содержание отчета

1. Название работы, цель работы,
2. Результаты расчетов и моделирования.
3. Анализ полученных результатов и заключение.

#### 5. Список литературы

1. Шарангович С.Н. Голографические фотонные структуры в фотополимерных материалах. [Электронный ресурс]: Учебное пособие / С.Н. Шарангович. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2015. – 191 с. Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/5608>

## **2. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2 РАСЧЕТ АМПЛИТУД ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ФУРЬЕ-ГАРМОНИК ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ СТРУКТУР В НЕЛИНЕЙНОМ РЕЖИМЕ ЗАПИСИ**

### **СОДЕРЖАНИЕ**

1. Исходные данные.....	17
2. Основные задачи на исследование .....	17
3. Порядок выполнения работы.....	18
4. Содержание отчета.....	35
5. Список литературы.....	35

## 1. Исходные данные

**Дано:** Фотополимерный материал с толщиной  $d$ , в котором записывается одномерная голографическая фотонная структура излучением с длиной волны  $\lambda = 633$  нм в нелинейном режиме.

Таблица 1.1 – Исходные данные для расчетного задания

№ варианта	Отношение времени полимеризации к времени диффузии $b = T_{ps}/T_m$	Время записи ГДС $t$ , с	Поглощение фотополимерного композита $\alpha$ , Неп	Толщина ФПМ $d$ , мкм	Число записываемых пучков $h$	Число учитываемых гармоник $N$
1	0,1; 1; 5	0 - 100	0	40	2	5
2	0,1; 1; 5	0 - 100	1	40	2	5
3	0,1; 1; 5	0 - 100	2	40	2	5
4	0,1; 1; 5	0 - 100	3	40	2	5
5	0,1; 1; 5	0 - 100	0	45	2	5
6	0,2; 2; 5	0 - 100	1	45	2	5
7	0,2; 2; 5	0 - 100	2	45	2	5
8	0,2; 2; 5	0 - 100	3	45	2	5
9	0,3; 1; 5	0 - 100	0	50	2	5
10	0,3; 1; 5	0 - 100	1	50	2	5
11	0,3; 1; 5	0 - 100	2	50	2	5
12	0,3; 1; 5	0 - 100	3	50	2	5
13	0,1; 1; 5	0 - 100	0	55	2	5
14	0,1; 1; 5	0 - 100	1	55	2	5
15	0,1; 1; 5	0 - 100	2	55	2	5

## 2. Основные задачи на исследование:

- исследовать кинетику формирования амплитуд пространственных фурье-гармоник мономера от отношения времени полимеризации  $T_{ps}$  к времени диффузии  $T_m$ ;
- исследовать кинетику формирования амплитуд пространственных фурье-гармоник показателя преломления от отношения времени полимеризации  $T_{ps}$  к времени диффузии  $T_m$ ;
- провести моделирование зависимости амплитуд гармоник концентрации мономера  $M_j$  и показателя преломления  $n_j$  от номера гармоники  $H$  и параметра  $b$ ;
- исследовать влияние параметра  $b$  на пространственные профили распределения показателя преломления

### 3. Порядок выполнения работы

#### 3.1. Кинетика формирования гармоник мономера

На основе решения (2.14) для гармоник мономера из [1] оценим влияние параметра  $b$  на гармоники концентрации мономера  $M_j$  в зависимости от времени  $t$  в нелинейном режиме записи.

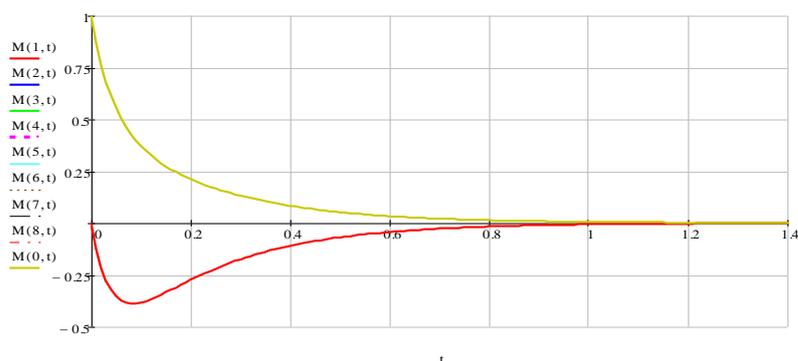


Рисунок 3.1 – Кинетика записи профилей гармоник концентрации мономера  $M_0(t)$  и  $M_1(t)$  при  $b = 0,1$

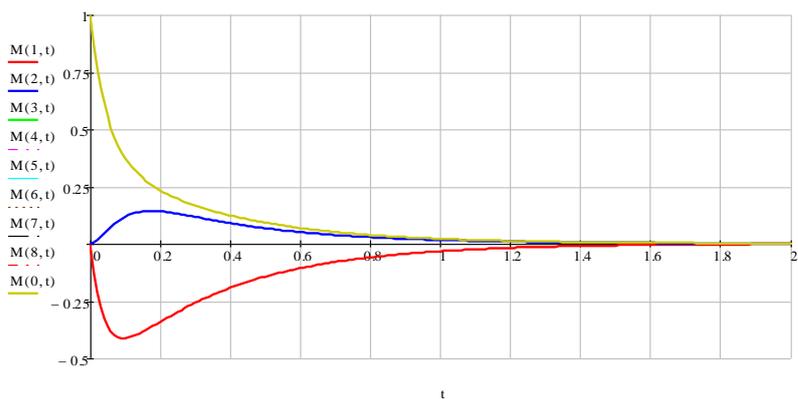


Рисунок 3.2 – Кинетика записи профилей гармоник концентрации мономера  $M_0(t)$ ,  $M_1(t)$  и  $M_2(t)$  при  $b = 0,1$

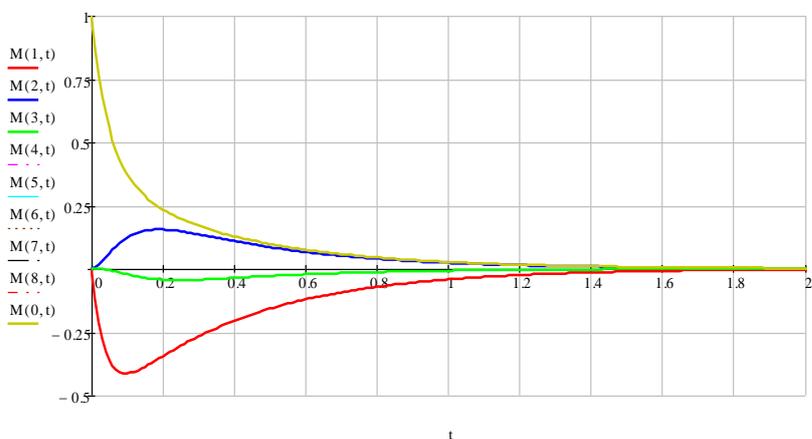


Рисунок 3.3 – Кинетика записи профилей гармоник концентрации мономера  $M_0(t)$ ,  $M_1(t)$ ,  $M_2(t)$  и  $M_3(t)$  при  $b = 0,1$

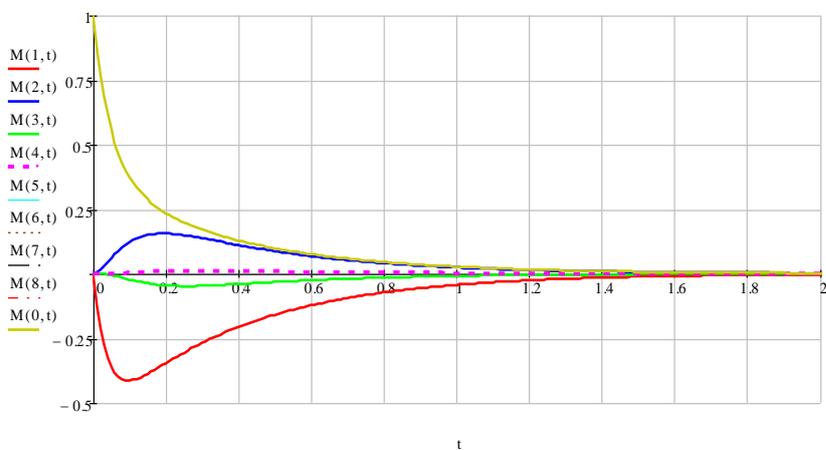


Рисунок 3.4 – Кинетика записи профилей гармоник концентрации мономера  $M_0(t)$ ,  $M_1(t)$ ,  $M_2(t)$ ,  $M_3(t)$  и  $M_4(t)$  при  $b = 0,1$

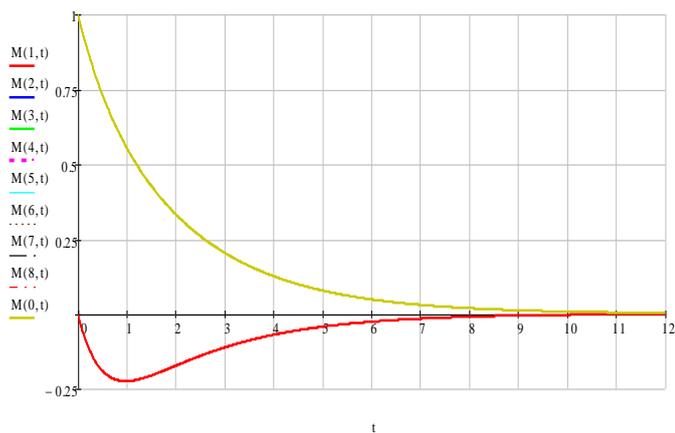


Рисунок 3.5 – Кинетика записи профилей гармоник концентрации мономера  $M_0(t)$  и  $M_1(t)$  при  $b = 2,1$

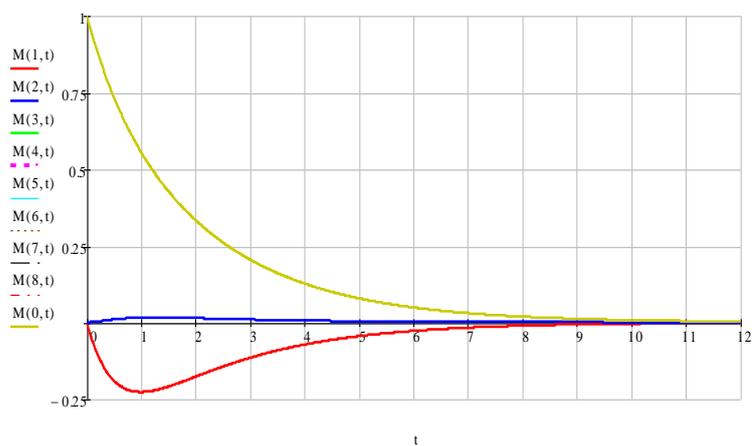


Рисунок 3.6 – Кинетика записи профилей гармоник концентрации мономера  $M_0(t)$ ,  $M_1(t)$  и  $M_2(t)$  при  $b = 2,1$

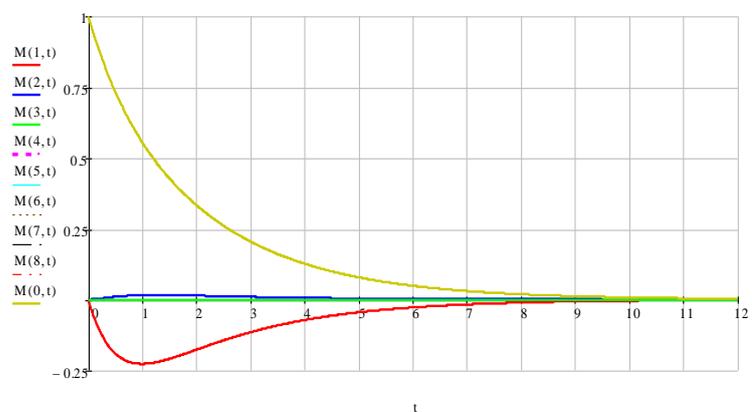


Рисунок 3.7 – Кинетика записи профилей гармоник концентрации мономера  $M_0(t)$ ,  $M_1(t)$ ,  $M_2(t)$  и  $M_3(t)$  при  $b = 2,1$

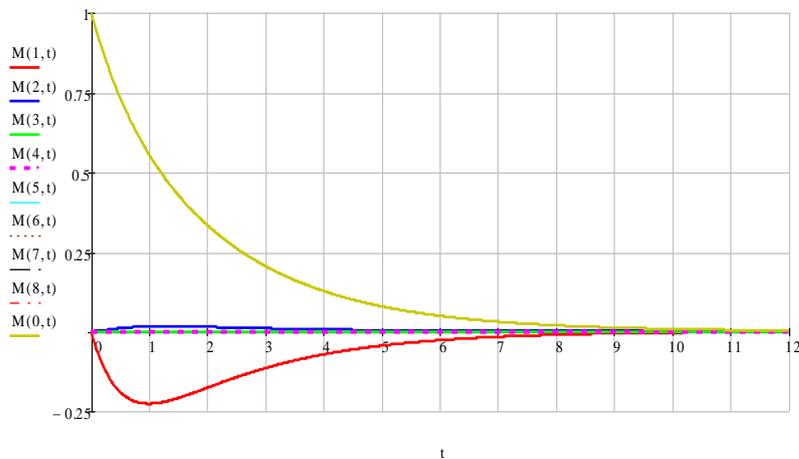


Рисунок 3.8 – Кинетика записи профилей гармоник концентрации мономера  $M_0(t)$ ,  $M_1(t)$ ,  $M_2(t)$ ,  $M_3(t)$  и  $M_4(t)$  при  $b = 2,1$

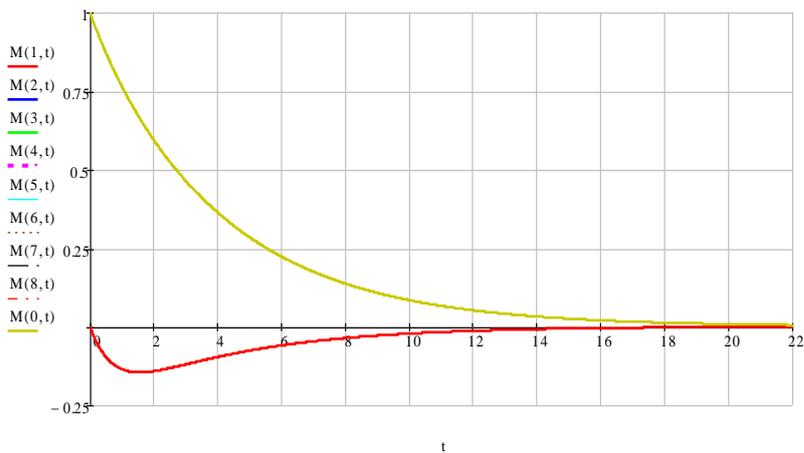


Рисунок 3.9 – Кинетика записи профилей гармоник концентрации мономера  $M_0(t)$  и  $M_1(t)$  при  $b = 5,1$

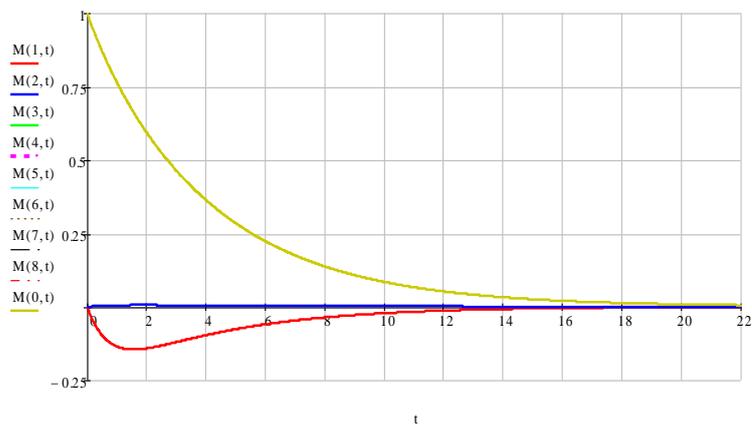


Рисунок 3.10 – Кинетика записи профилей гармоник концентрации мономера  $M_0(t)$ ,  $M_1(t)$  и  $M_2(t)$  при  $b = 5,1$

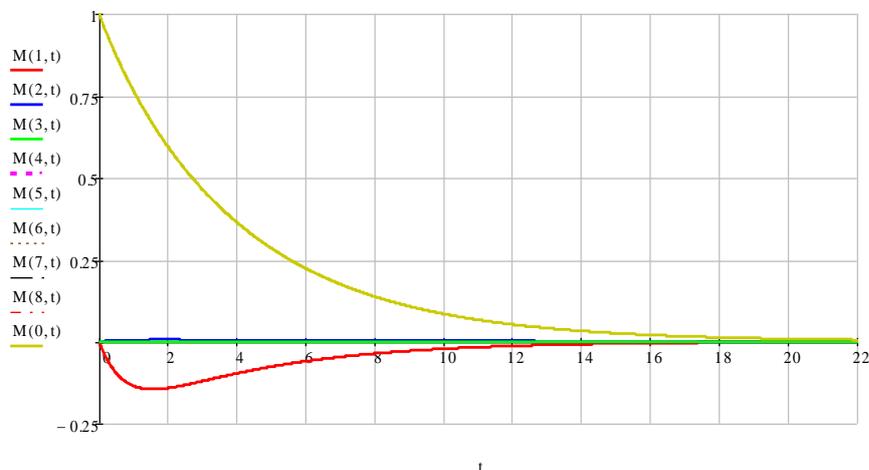


Рисунок 2.11 – Кинетика записи профилей гармоник концентрации мономера  $M_0(t)$ ,  $M_1(t)$ ,  $M_2(t)$  и  $M_3(t)$  при  $b = 5,1$

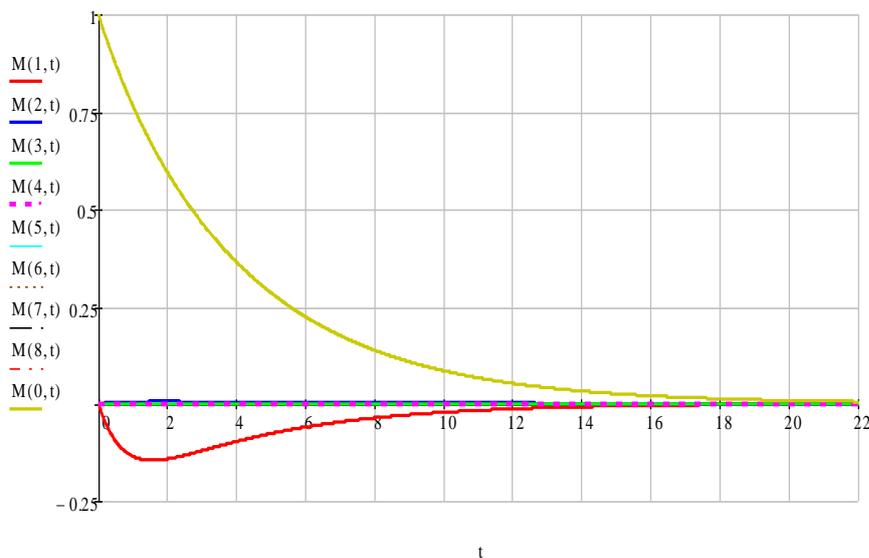


Рисунок 2.12 – Кинетика записи профилей гармоник концентрации мономера  $M_0(t)$ ,  $M_1(t)$ ,  $M_2(t)$ ,  $M_3(t)$  и  $M_4(t)$  при  $b = 5,1$

Таким образом, по графикам из рисунков 2.4, 2.8 и 2.12 видно, что с увеличением  $b$  уменьшается амплитуда гармоник, причем, чем выше порядок гармоники, тем меньше максимальный уровень ее амплитуды. Это подтверждается пунктом 2.3. Все это говорит о том, что с увеличением  $b$  влияние гармоник

наивысших порядков на диффузионный процесс снижается, т.к. скорость диффузии мономера становится меньше по отношению к скорости полимеризации.

### 3.2. Кинетика формирования гармоник показателя преломления

На основе решения (2.15) для гармоник показателя преломления из [1] оценим влияние параметра  $b$  гармоники показателя преломления  $n_j$  в зависимости от времени  $t$  в нелинейном режиме записи.

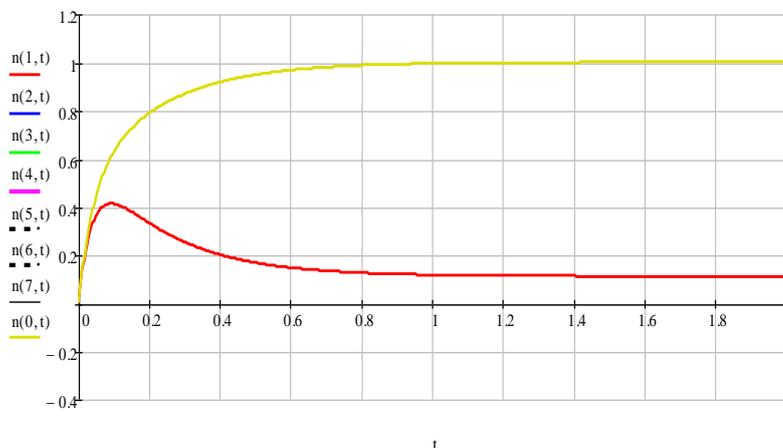


Рисунок 2.13 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления  $n_0(t)$  и  $n_1(t)$  при  $b = 0,1$

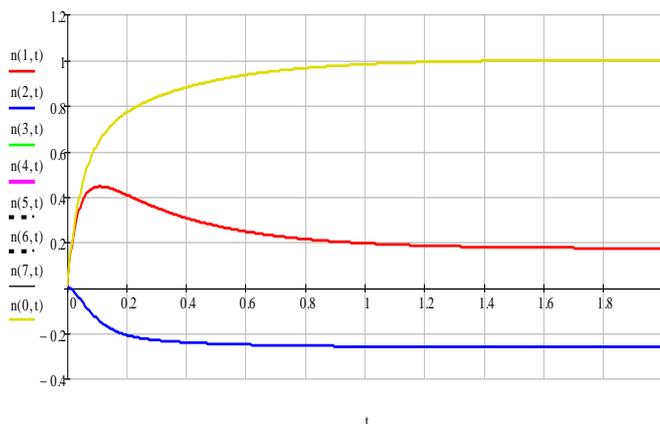


Рисунок 2.14 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления  $n_0(t)$ ,  $n_1(t)$  и  $n_2(t)$  при  $b = 0,1$

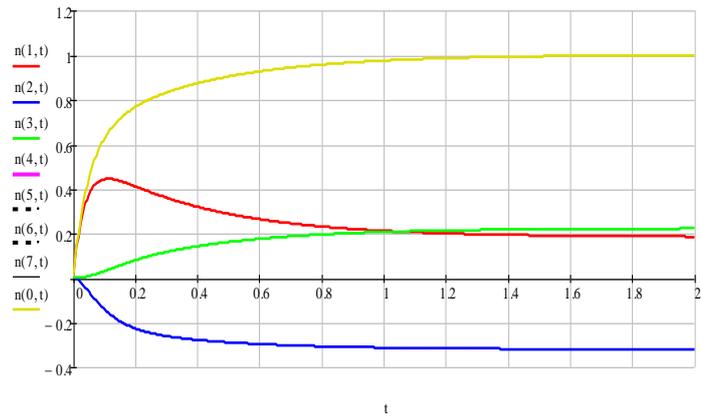


Рисунок 2.15 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления  $n_0(t)$ ,  $n_1(t)$ ,  $n_2(t)$  и  $n_3(t)$  при  $b = 0,1$

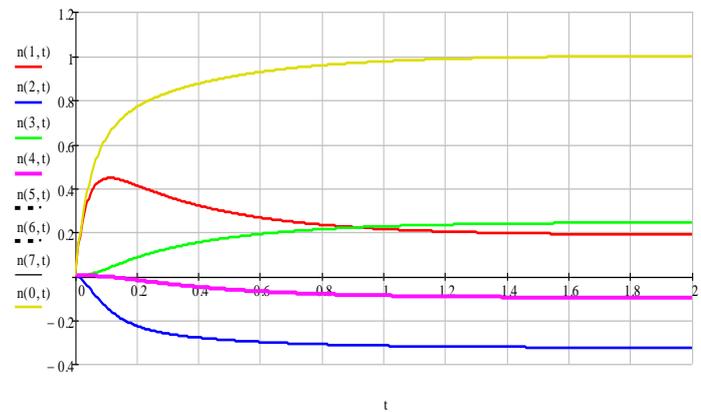


Рисунок 2.16 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления  $n_0(t)$ ,  $n_1(t)$ ,  $n_2(t)$ ,  $n_3(t)$  и  $n_4(t)$  при  $b = 0,1$

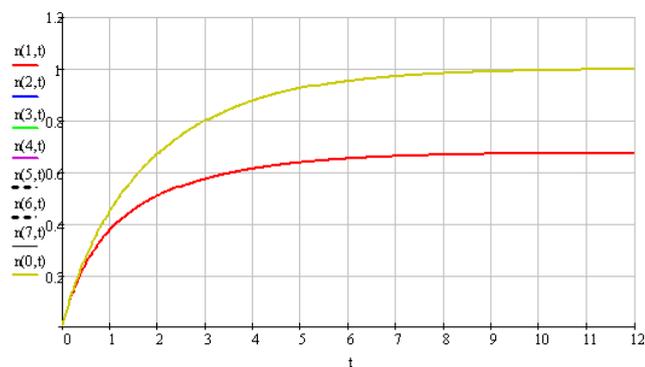


Рисунок 2.17 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления  $n_0(t)$  и  $n_1(t)$  при  $b = 2,1$

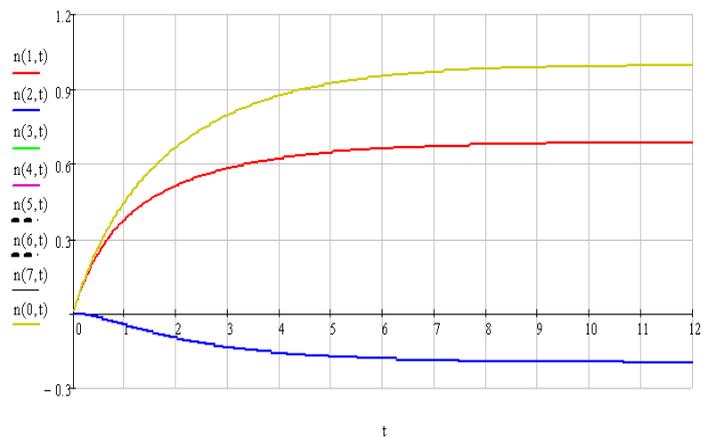


Рисунок 2.18 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления  $n_0(t)$ ,  $n_1(t)$  и  $n_2(t)$  при  $b = 2,1$

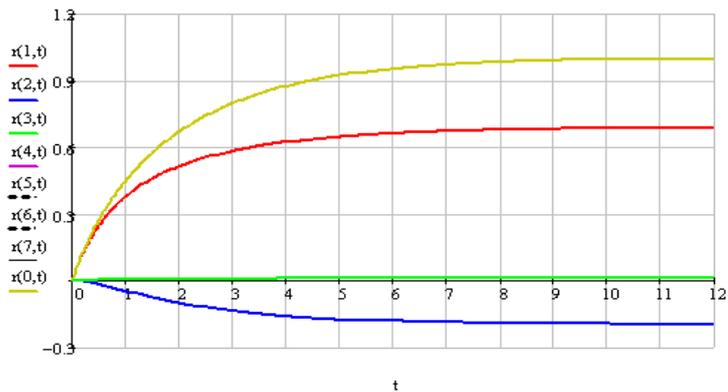


Рисунок 2.19 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления  $n_0(t)$ ,  $n_1(t)$ ,  $n_2(t)$  и  $n_4(t)$  при  $b = 2,1$

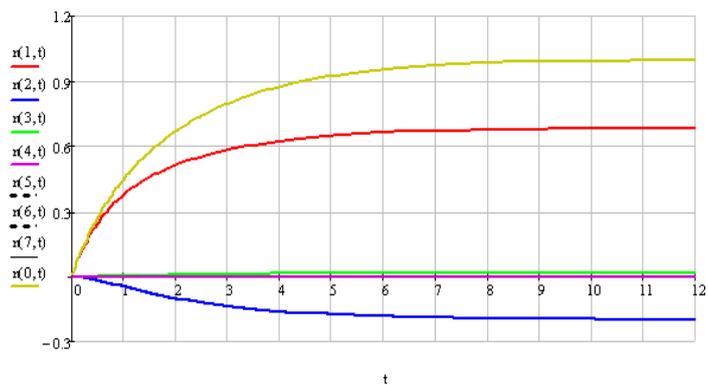


Рисунок 2.20 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления  $n_0(t)$ ,  $n_1(t)$ ,  $n_2(t)$ ,  $n_3(t)$  и  $n_4(t)$  при  $b = 2,1$

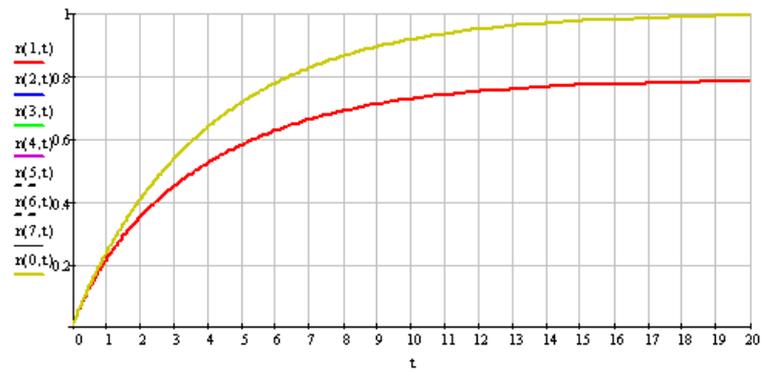


Рисунок 2.21 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления  $n_0(t)$  и  $n_1(t)$  при  $b = 5$ ,

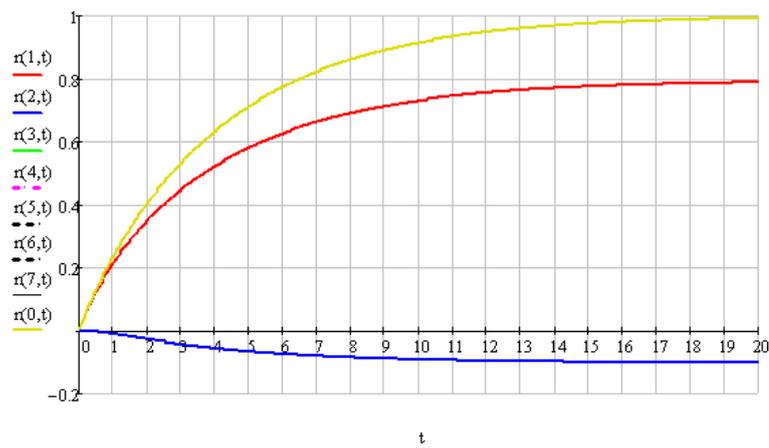


Рисунок 2.22 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления  $n_0(t)$ ,  $n_1(t)$  и  $n_2(t)$  при  $b = 5,1$

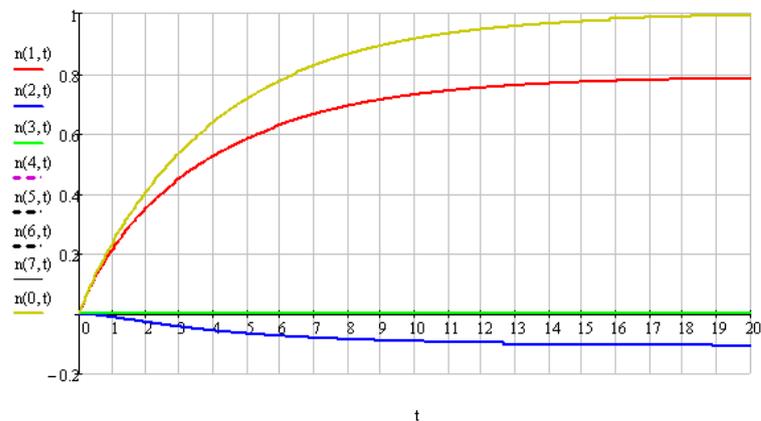


Рисунок 2.23 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления  $n_0(t)$ ,  $n_1(t)$ ,  $n_2(t)$  и  $n_3(t)$  при  $b = 5,1$

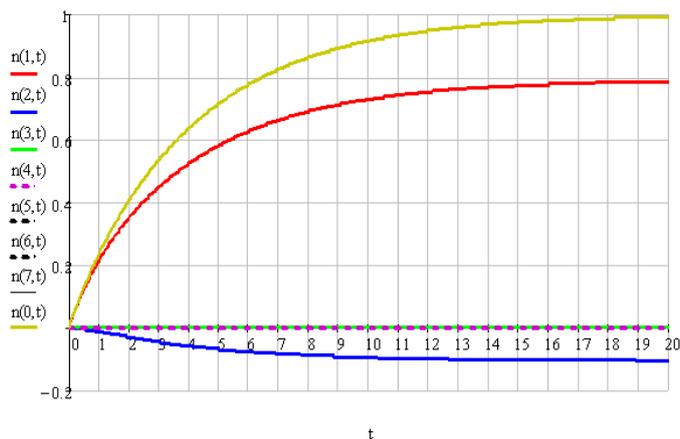


Рисунок 2.24 – Кинетика записи профилей гармоник показателя преломления  $n_0(t)$ ,  $n_1(t)$ ,  $n_2(t)$ ,  $n_3(t)$  и  $n_4(t)$  при  $b = 5,1$

По результатам моделирования можно сделать вывод, что увеличение параметра  $b$  приводит к спаду максимального значения амплитуды гармоник наивысших порядков, т.е. их линейризации. Все это хорошо видно по графикам из рисунков 2.16, 2.20 и 2.24. Так, при  $b \geq 2,1$  влияние на изменение показателя преломления могут оказывать только первые 3 гармоники, что хорошо будет заметно в пункте 2.4.

Моделирование распределения гармоник концентрации мономера  $M_j(t, H)$  и показателя преломления  $n_j(t, H)$  при различных  $b$ .

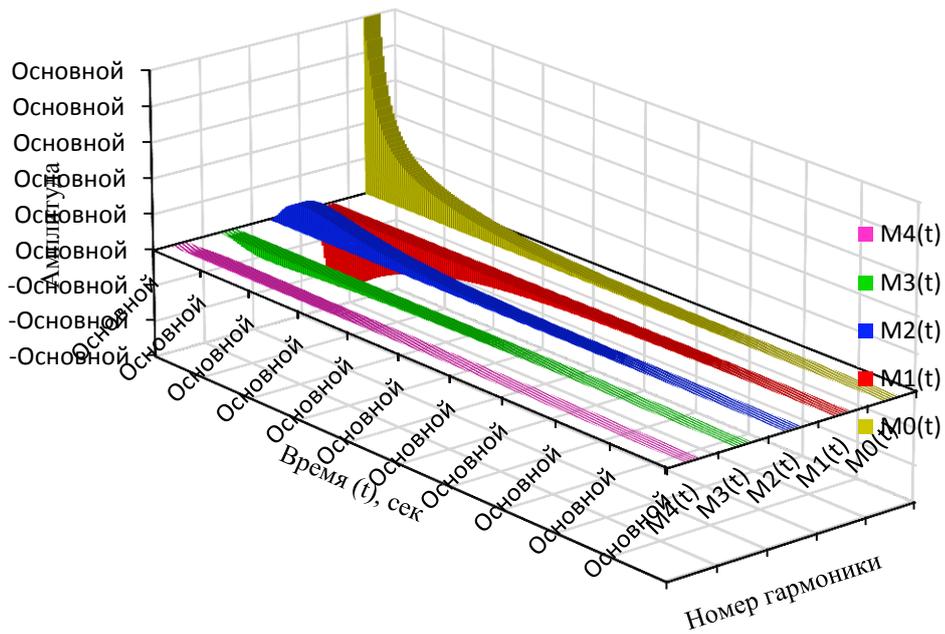


Рисунок 2.25 – Распределения гармоник концентрации мономера  $M_0(t, j)$ ,  $M_1(t, j)$ ,  $M_2(t, j)$ ,  $M_3(t, j)$  и  $M_4(t, j)$  при  $b = 0,1$

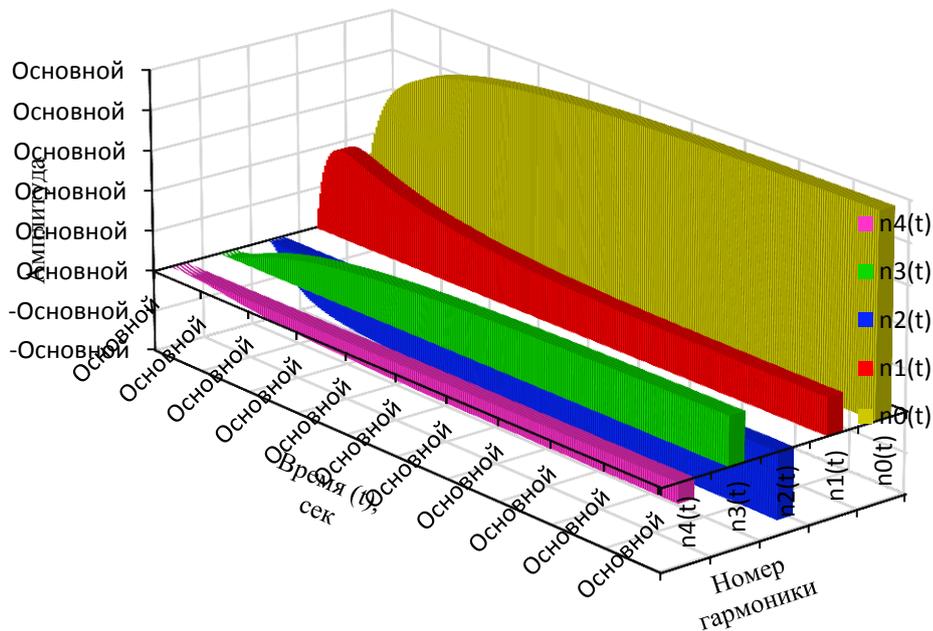


Рисунок 2.26 – Распределения гармоник показателя преломления  $n_0(t, j)$ ,  $n_1(t, j)$ ,  $n_2(t, j)$ ,  $n_3(t, j)$  и  $n_4(t, j)$  при  $b = 0,1$

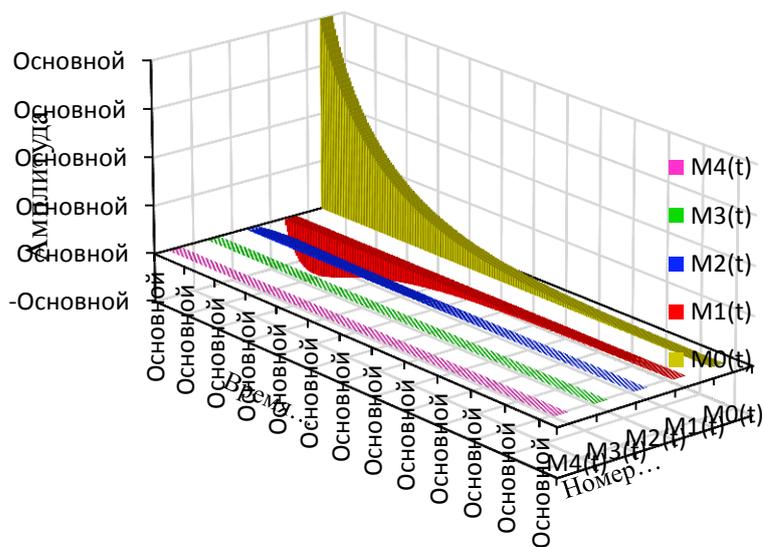


Рисунок 2.27 – Распределения гармоник концентрации мономера  $M_0(t, j)$ ,  $M_1(t, j)$ ,  $M_2(t, j)$ ,  $M_3(t, j)$  и  $M_4(t, j)$  при  $b = 2,1$

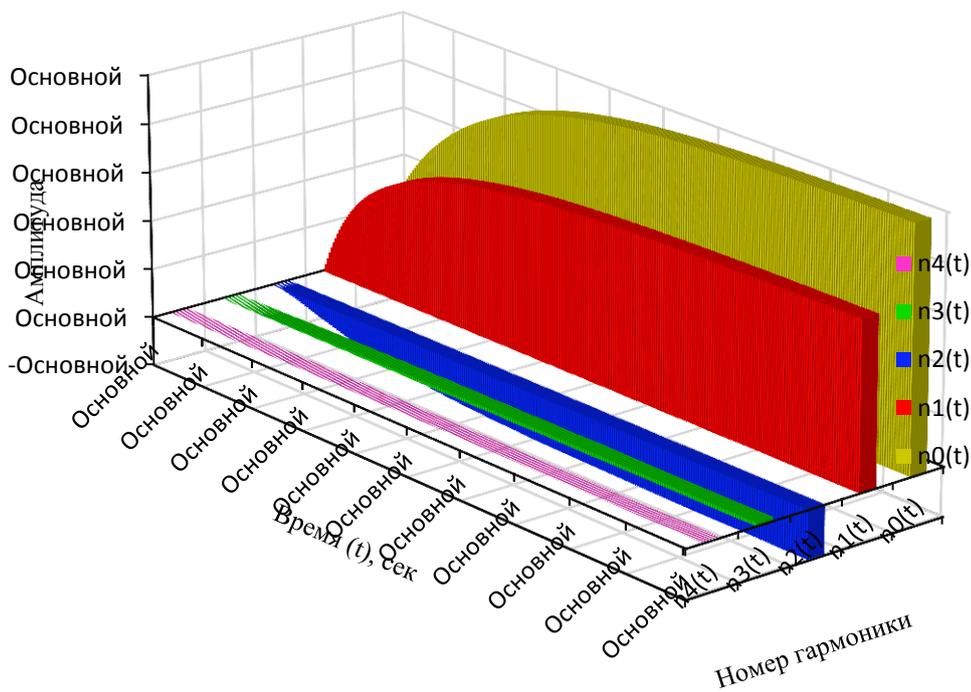


Рисунок 2.28 – Распределения гармоник показателя преломления  $n_0(t, j)$ ,  $n_1(t, j)$ ,  $n_2(t, j)$ ,  $n_3(t, j)$  и  $n_4(t, j)$  при  $b = 2,1$

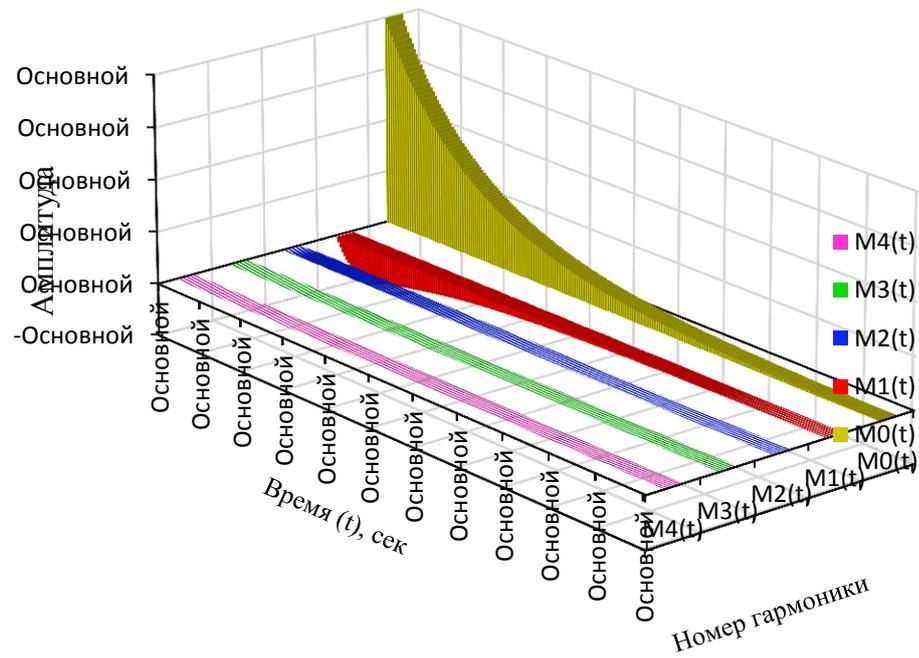


Рисунок 2.29 – Распределения гармоник концентрации мономера  $M_0(t, j)$ ,  $M_1(t, j)$ ,  $M_2(t, j)$ ,  $M_3(t, j)$  и  $M_4(t, j)$  при  $b = 5,1$

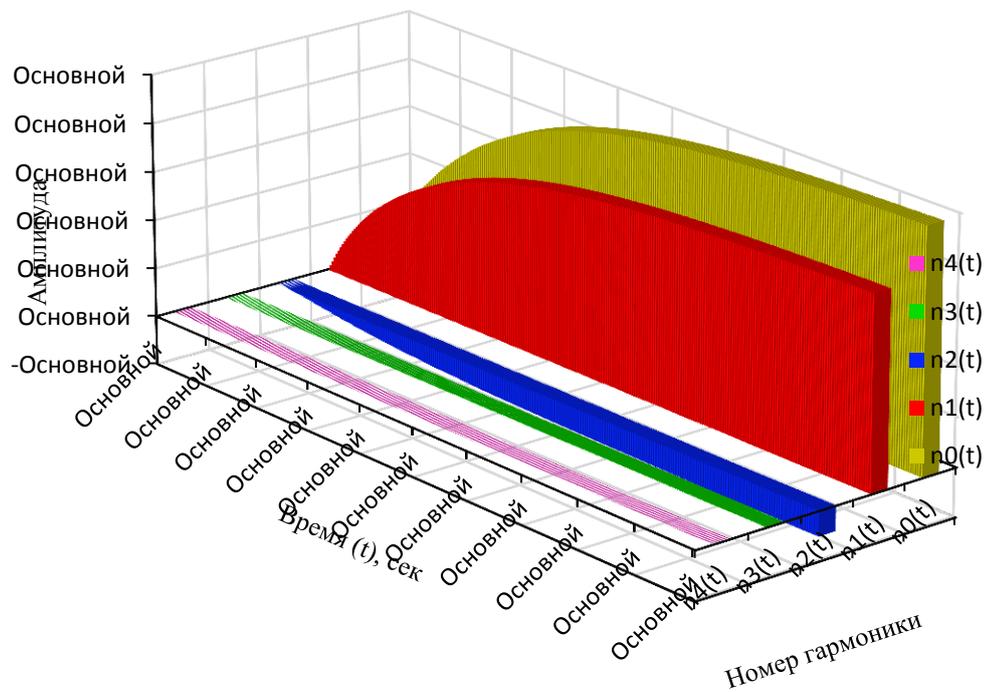


Рисунок 2.30 – Распределения гармоник показателя преломления  $n_0(t, j)$ ,

$n_1(t, j), n_2(t, j), n_3(t, j)$  и  $n_4(t, j)$  при  $b = 5,1$

### 3.3. Распределение гармоник концентраций мономера

Для проверки заключений, сделанных в пунктах 2.1 и 2.2 проведем моделирование зависимостей амплитуд гармоник концентрации мономера  $M_j$  и показателя преломления  $n_j$  от номера гармоники  $H$  и параметра  $b$ .

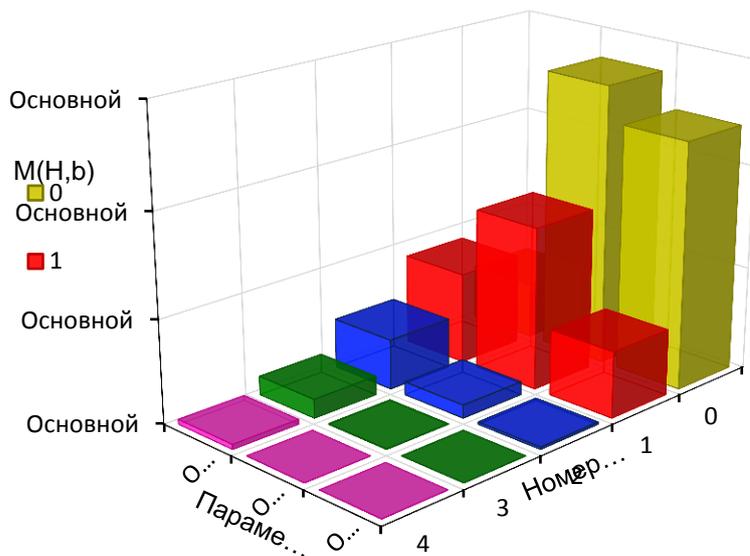


Рисунок 2.31 – Зависимости амплитуд гармоник концентрации мономера  $M_j$  от номера гармоники  $H$  и параметра  $b$

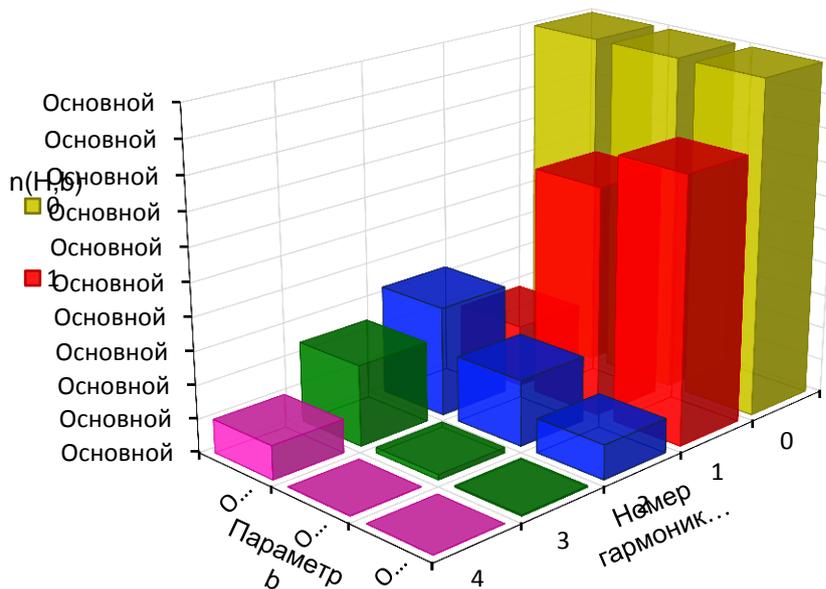


Рисунок 2.32 – Зависимости амплитуд гармоник показателя преломления  $n_j$  от номера гармоники  $H$  и параметра  $b$

Как мы можем заметить, выводы, написанные в пунктах 2.1 и 2.2 подтверждают графики рисунков 2.25-2.26.

### 3.4. Влияние параметра $b$ на пространственные профили распределения показателя преломления

Далее смоделируем пространственное распределение показателя преломления при записи ГДС в ФПМ.

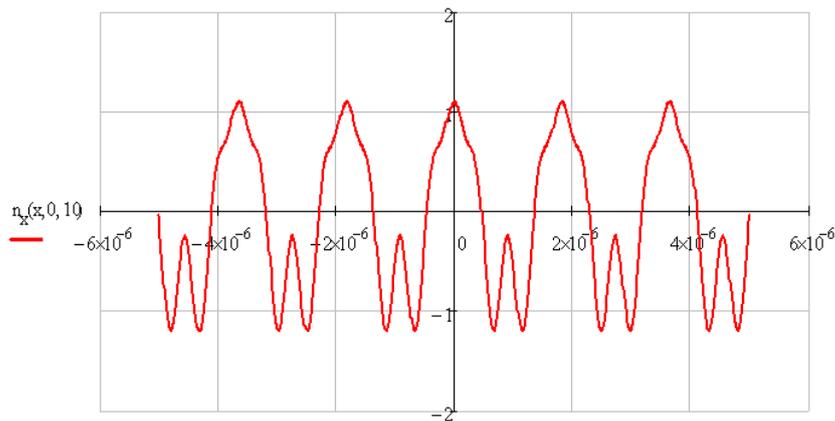


Рисунок 2.33 – Распределение показателя преломления  $n(x, t)$  при  $b = 0,1$

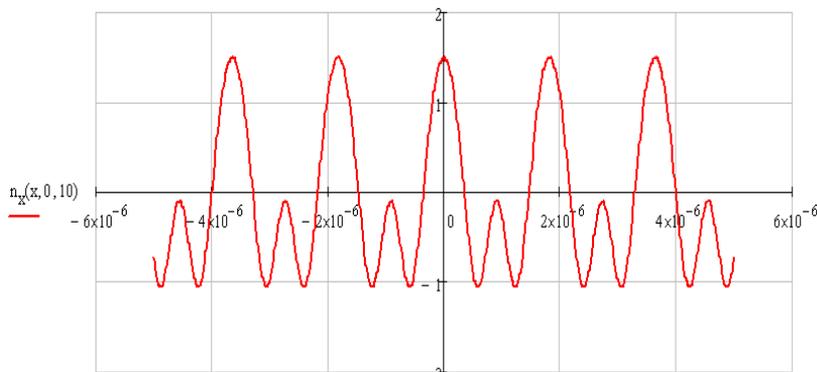


Рисунок 2.35 – Распределение показателя преломления  $n(x, t)$  при  $b = 2,1$

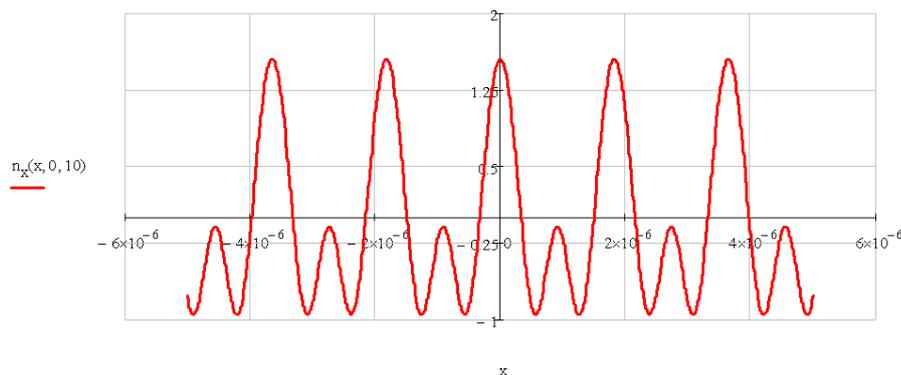


Рисунок 2.29 – Распределение показателя преломления  $n(x, t)$  при  $b = 5,1$

Как говорилось в заключении пункта 2.2, при  $b \geq 2,1$  влияние на пространственное распределение показателя преломления могут оказывать только первые 3 гармоники, что подтверждают рисунки 2.28-2.29. Это говорит о том, что увеличивать скорость полимеризации  $T_{ps}$  более чем в 2 раза по отношению к скорости диффузии мономера  $T_m$  на окажет влияние на пространственное распределение  $\Delta n$ .

### 3.5. Выводы

В данной работе проведены исследования:

- кинетики формирования гармоник мономера в зависимости от  $b$ , в результате, по графикам из рисунков 2.4, 2.8 и 2.12 видно, что с увеличением  $b$  уменьшается амплитуда гармоник, причем, чем выше порядок гармоники, тем меньше максимальный уровень ее амплитуды. Все это говорит о том, что с увеличением  $b$  влияние гармоник наивысших порядков на диффузионный процесс снижается, т.к. скорость диффузии мономера становится меньше по отношению к скорости полимеризации;
- кинетики формирования гармоник показателя преломления с учетом изменения коэффициента  $b$ , по результатам которо-

го сделан следующий вывод: увеличение параметра  $b$  приводит к спаду максимального значения амплитуды гармоник наивысших порядков, т.е. их линейзации. Все это хорошо видно по графикам из рисунков 2.16, 2.20 и 2.24;

– моделирование зависимости амплитуд гармоник концентрации мономера  $M_j$  и показателя преломления  $n_j$  от номера гармоники  $H$  и параметра  $b$ ;

– влияние параметра  $b$  на пространственные профили распределения показателя преломления, которое показало, что при  $b \geq 2,1$  влияние на пространственное распределение показателя преломления могут оказывать только первые 3 гармоники, что подтверждают рисунки 2.28-2.29. Это говорит о том, что увеличивать скорость полимеризации  $T_{ps}$  более чем в 2 раза по отношению к скорости диффузии мономера  $T_m$  не окажет влияние на пространственное распределение  $\Delta n$ .

#### 4. Содержание отчета

1. Название работы, цель работы,
2. Результаты расчетов и моделирования.
3. Анализ полученных результатов и заключение.

#### 5. Список литературы

1. Шарангович С.Н. Голографические фотонные структуры в фотополимерных материалах. [Электронный ресурс]: Учебное пособие / С.Н. Шарангович. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2015. – 191 с. Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/5608>

### **3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3 РАСЧЕТ ДИФРАКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОМЕРНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ СТРУКТУР**

#### **СОДЕРЖАНИЕ**

1. Исходные данные.....	37
2. Основные задачи на исследование .....	37
3. Порядок выполнения работы.....	38
4. Содержание отчета.....	44
5. Список литературы.....	44

## 1. Исходные данные

**Дано:** фотополимерный материал с толщиной  $d$ , на котором формируется одномерная голографическая фотонная структура излучением с длиной волны  $\lambda = 633$  нм методом двулучевой записи.

В таблице 1.1 приведены исходные данные, заданные преподавателем.

Таблица 1.1 – Исходные данные для расчетного задания

№ варианта	Угол Брэгга $\theta$ , град	Время формирования ГДС $t$ , с	Наклон ГФС $\varphi$ , град	Толщина ФПМ $d$ , мкм	Кэф. Поглощения $\alpha$ , Нп	$D_m$
1	5	0 - 100	0	50	0; 2	$10^{-12}$
2	6	0 - 100	1	60	0; 2	$10^{-12}$
3	7	0 - 100	2	70	0; 2	$10^{-12}$
4	8	0 - 100	3	80	0; 2	$10^{-12}$
5	9	0 - 100	0	45	0; 2	$10^{-12}$
6	10	0 - 100	1	50	0; 2	$10^{-12}$
7	5	0 - 100	2	60	0; 2	$10^{-12}$
8	6	0 - 100	3	70	0; 3	$10^{-12}$
9	7	0 - 100	0	50	0; 3	$10^{-12}$
10	8	0 - 100	1	50	0; 3	$10^{-12}$
11	3	0 - 100	2	50	0; 3	$10^{-12}$
12	4	0 - 100	0	60	0; 2	$10^{-12}$
13	5	0 - 100	1	70	0; 2	$10^{-12}$
14	6	0 - 100	2	80	0; 2	$10^{-12}$
15	7	0 - 100	3	70	0; 2	$10^{-12}$

## 2. Основные задачи на исследование:

- Провести моделирование кинетики дифракционной эффективности одномерной ГФС, сформированной методом двулучевой записи, оценить изменение показателя преломления  $\Delta n$ .
- Провести расчет угловой селективности дифракционной эффективности одномерной ГФС в зависимости от коэффициента поглощения на стационарном уровне,
- Определить угловую апертуру одномерной ГФС, положение и величину первых боковых лепестков передаточной функции ГФС в зависимости от коэффициента поглощения..
- Провести сравнение результатов моделирование с экспериментальными данными по исследованию дифракционных характеристик одномерной ГФС, полученными в лабораторной работе.

### 3. Порядок выполнения работы

Моделирование записи и считывания ГФС производится в программе «PolyGrating v1.0».

Задав параметры из таблицы 1.1, смоделируем запись ГФС. Поскольку толщина ФМП задана в промежутке  $50 \div 100$  мкм, примем значение  $d = 70$  мкм. На рисунке 3.1 представлена полученная в ходе эксперимента зависимость дифракционной эффективности от времени записи.

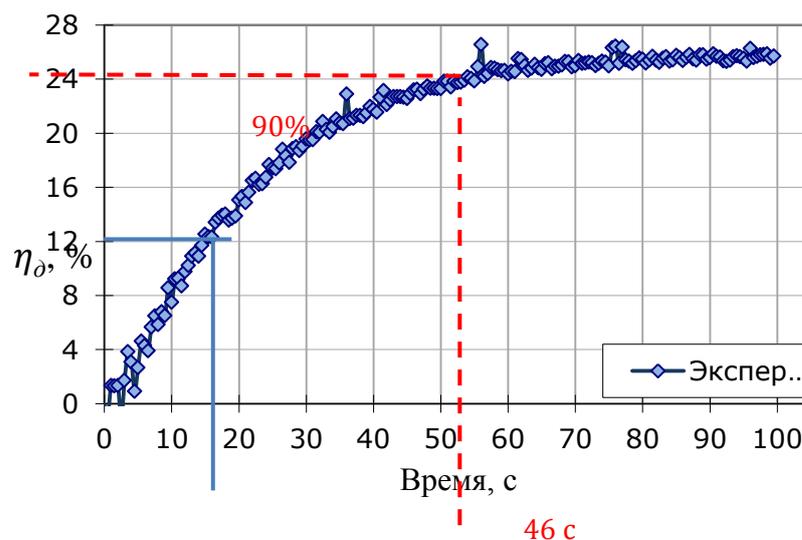


Рисунок 3.1 – Экспериментальная зависимость дифракционной эффективности  $\eta_d$  от времени записи  $t$  ГФС

Моделирование дифракционной эффективности кривой в программе «PolyGrating v1.0» представлена на рисунке 3.2.

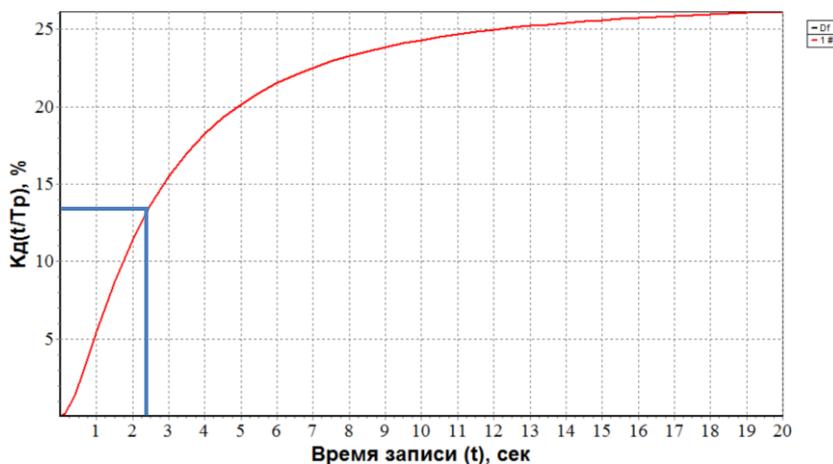


Рисунок 3.2 – Зависимость дифракционной эффективности одномерной решетки от времени записи

Сравнивая рисунки 3.1 и 3.2 видим, что масштаб по оси времени  $t$  не совпадает. Для выравнивания масштаба сравним значения времени по уровню 0,5 от максимальной эффективности для обоих графиков:

$$t(\eta_{d \text{ эксп}}) = 15;$$

$$t(\eta_d \text{ расч}) = 2,1.$$

Отношение полученных значений дает коэффициент:

$$K = \frac{15}{2,1} = 7,14.$$

Проведя вычисление, видно, что временные масштабы эксперимента превышают моделируемые в 7,14 раз.

Построим зависимости дифракционной эффективности  $\eta_d$ , используя данные моделирования и эксперимента, с учетом временного коэффициента  $K = 7,14$  (рисунок 3.3).

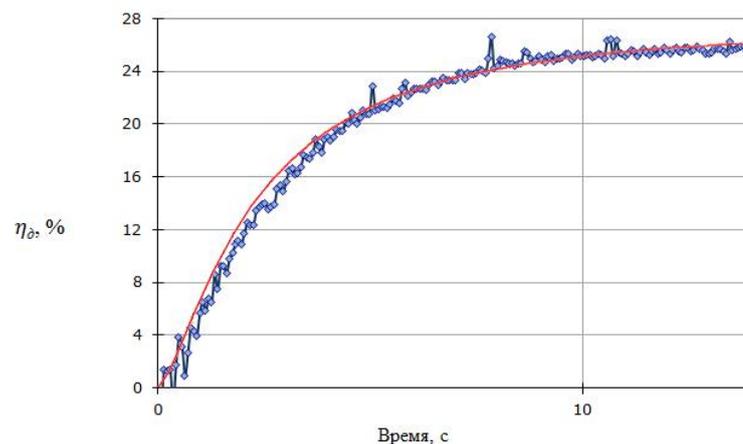


Рисунок 3.3 – Экспериментальная и моделируемая зависимости дифракционной эффективности  $\eta_d$  от времени записи  $t$  ГФС.

Как видно из рисунка 3.3, график моделирования с учетом  $\tau$  практически совпадает с графиком эксперимента. Таким образом, можно сделать вывод, что моделирование записи двумерной ГФС по заданным параметрам (таблица 1.1) выполнено верно. Соответственно, глубина проникновения ГФС внутри материала, исходя из результатов моделирования по заданным параметрам, составляет  $L = 70$  мкм.

Оценим изменение показателя преломления через формулу Когельника:

$$\eta = \sin^2 \left( \frac{\pi \cdot L \cdot \Delta n}{\lambda \cdot \cos(\theta)} \right) \Rightarrow \Delta n = \frac{\lambda \cdot \cos(\theta) \cdot \arcsin(\sqrt{\eta})}{\pi \cdot L},$$

тогда:

$$\Delta n = \frac{633 \cdot 10^{-9} \cdot \cos(8^\circ) \cdot \arcsin(\sqrt{0,26})}{\pi \cdot 70 \cdot 10^{-6}} = 1,52 \cdot 10^{-3}.$$

Далее приступим к считыванию ГФС, результаты которого изображены на рисунке 3.4.



Рисунок 2.4 – Изменение дифракционной эффективности решетки  $\eta_d$  при отклонении от условий Брэгга

При моделированном считывании выяснилось, что значения шкалы относительной Брэгговской расстройки также измеряются в относительных единицах  $\Delta k$ , которые необходимо перевести в градусы  $\Delta\theta$ .

$$\Delta k = \Delta\theta \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n \cdot \frac{\sin(\theta_0 + \theta_1)}{\cos \theta_1} \Rightarrow \Delta\theta = \frac{\Delta k \cdot \lambda \cdot \cos \theta_1}{n \cdot \sin(\theta_0 + \theta_1)}.$$

Определим  $\Delta k$  по половинному уровню  $\eta_d$ , как показано на рисунке 3.5.

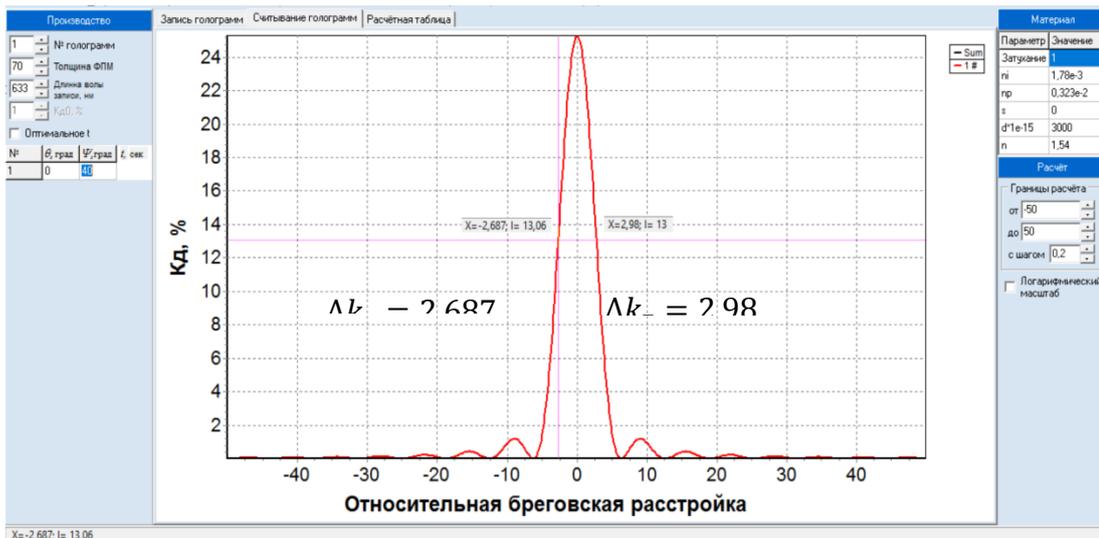


Рисунок 3.5 – Определение  $\Delta k$  по половинному уровню  $\eta_d$  при помощи курсора программы

Тогда:

$$\Delta\theta_{\text{л}} = \frac{\Delta k_{\text{л}} \cdot \lambda \cdot \cos \theta_1}{n \cdot \sin(\theta_0 + \theta_1)} = \frac{2,687 \cdot 633 \cdot 10^{-9} \cdot \cos(0,14)}{1,54 \cdot \sin(0,14 + 0,14)} = 0,2267^\circ,$$

$$\Delta\theta_{\text{п}} = \frac{\Delta k_{\text{п}} \cdot \lambda \cdot \cos \theta_1}{n \cdot \sin(\theta_0 + \theta_1)} = \frac{2,98 \cdot 633 \cdot 10^{-9} \cdot \cos(0,14)}{1,54 \cdot \sin(0,14 + 0,14)} = 0,2515^\circ$$

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{\text{л}} + \Delta\theta_{\text{п}} = 0,2267^\circ + 0,2515^\circ = 0,4782^\circ.$$

Из лабораторной работы №2 известно, что  $\Delta\theta = 0,54^\circ$  (рисунок 3.6).

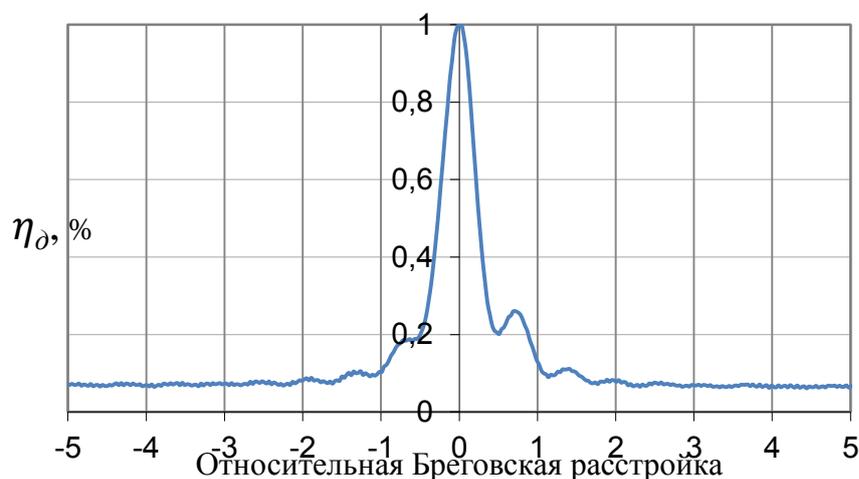


Рисунок 3.6 – Изменение дифракционной эффективности  $\eta_d$  (отн. ед.) при отклонении от условий Брэгга

Таким образом, переведя шкалу относительной Брэгговской расстройки в градусы, стало известно, что  $\Delta\theta = 0,4782^\circ$  из моделирования близко к экспериментальному  $\Delta\theta = 0,54^\circ$ .

Пронормируем значения  $\eta_d$  и совместим график моделирования с экспериментальным (рисунок 3.7).

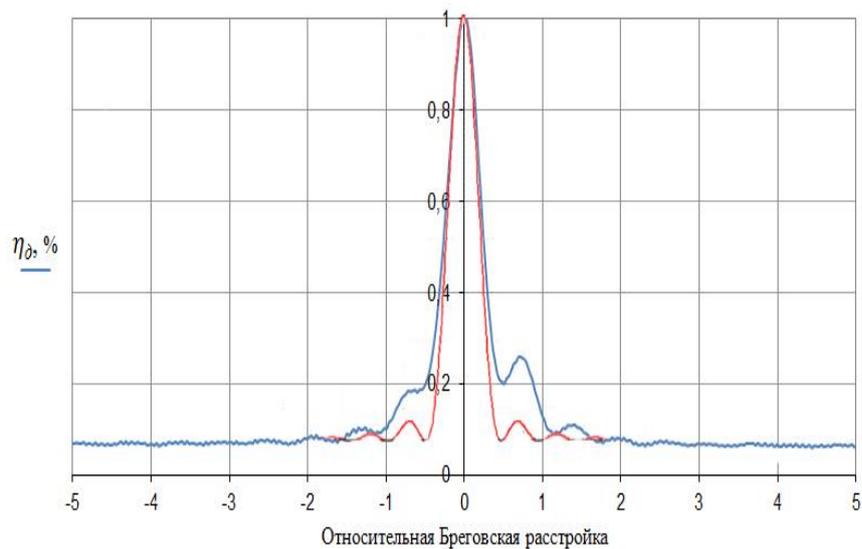


Рисунок 3.7 – Моделированная и экспериментальная зависимости дифракционной эффективности решетки  $\eta_d$  при отклонении от условий Брэгга

Как мы видим, график моделирования практически схож с графиком эксперимента. Следовательно, данный пункт расчетного задания выполнен верно.

### Выводы

В данной работе расчет дифракционной эффективности одномерной ГФС, сформированной методом двулучевой записи.

В процессе выполнения работы стало известно, что временные масштабы моделирования для заданных параметров из таблицы 1.1 ограничиваются 20 с

(рисунок 3.1). Приняв во внимание временной коэффициент  $\tau$ , соотнесены временные масштабы эксперимента и моделирования. После чего стало известно, что график моделирования практически совпадает с графиком эксперимента. Таким образом, можно сделать вывод, что моделирование записи двумерной ГФС по заданным параметрам (таблица 1.1) выполнено верно. А глубина проникновения ГФС внутри материала по исходным данным составила  $L = 70$  мкм.

Также, через формулу Когельника оценено изменение показателя преломления  $\Delta n = 1,525 \cdot 10^{-3}$ .

Далее проведено моделирование считывания ГФС и оценено  $\Delta\theta$ . В результате значения моделирования  $\Delta\theta = 0,464^\circ$  и эксперимента  $\Delta\theta = 0,54^\circ$  практически совпадают.

Таким образом, можно сделать вывод, что каждый пункт в данной работе выполнен верно.

#### **4. Содержание отчета**

1. Название работы, цель работы,
2. Результаты расчетов и моделирования.
3. Анализ полученных результатов и заключение.

#### **5. Список литературы**

1. Шарангович С.Н. Голографические фотонные структуры в фотополимерных материалах. [Электронный ресурс]: Учебное пособие / С.Н. Шарангович. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2015. – 191 с. Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/5608>

#### **4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ И ДИФРАКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУМЕРНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ СТРУКТУР**

### **СОДЕРЖАНИЕ**

1. Исходные данные.....	46
2. Основные задачи на исследование .....	46
3. Порядок выполнения работы.....	47
4. Содержание отчета.....	55
5. Список литературы.....	55

## 1. Исходные данные

**Дано:** фотополимерный материал с толщиной  $d$ , в котором методом углового мультиплексирования при двухпучковой записи формируется голографическая двумерная фотонная структура. Оптическое излучение имеет длину волны  $\lambda = 633$  нм.

В таблице 1.1 приведены исходные данные, заданные преподавателем.

Таблица 1.1 – Исходные данные для расчетного задания

№ варианта	Угол Брэгга $\theta$ , град	Время формирования ГДС $t$ , с	Наклон ГФС $\varphi$ , град	Толщина ФПМ $d$ , мкм	Кэф. Поглощения $\alpha$ , Нп	$D_m$
1	5	0 - 100	-3 0 3	50	0; 2	$10^{-12}$
2	6	0 - 100	-4 0 4	60	0; 2	$10^{-12}$
3	7	0 - 100	-5 0 5	70	0; 2	$10^{-12}$
4	8	0 - 100	-6 0 6	80	0; 2	$10^{-12}$
5	9	0 - 100	-7 0 7	45	0; 2	$10^{-12}$
6	10	0 - 100	-8 0 8	50	0; 2	$10^{-12}$
7	5	0 - 100	-3 0 3	60	0; 2	$10^{-12}$
8	6	0 - 100	-4 0 4	70	0; 3	$10^{-12}$
9	7	0 - 100	-5 0 5	50	0; 3	$10^{-12}$
10	8	0 - 100	-6 0 6	50	0; 3	$10^{-12}$
11	3	0 - 100	-3 0 3	50	0; 3	$10^{-12}$
12	4	0 - 100	-4 0 4	60	0; 2	$10^{-12}$
13	5	0 - 100	-5 0 5	70	0; 2	$10^{-12}$
14	6	0 - 100	-5 0 5	80	0; 2	$10^{-12}$
15	7	0 - 100	-6 0 6	70	0; 2	$10^{-12}$

## 2. Основные задачи на исследование

- Провести моделирование кинетик дифракционной эффективности двумерной ГФС, сформированной методом двухпучковой записи при угловом мультиплексировании.
- Провести расчет угловой селективности дифракционной эффективности двумерной ГФС,
- Определить угловые апертуры наложенных ГФС, положение и величину первых боковых лепестков передаточной функции ГФС..
- Провести сравнение результатов моделирование с экспериментальными данными по исследованию дифракционных характеристик двумерной ГФС, полученными в лабораторной работе.
- Смоделировать двумерные распределения интенсивности записывающих пучков и показателя преломления двумерной ГФС

### 3. Порядок выполнения работы

Проведем моделирование, используя программу «PolyGrating v1.0», задав параметры из таблицы 1.1. Толщина ФМП по исходным данным, варьируется в пределах  $50 \div 100$  мкм, поэтому примем значение  $d = 50$  мкм. Результат моделирования записи представлен на рисунке 3.1.

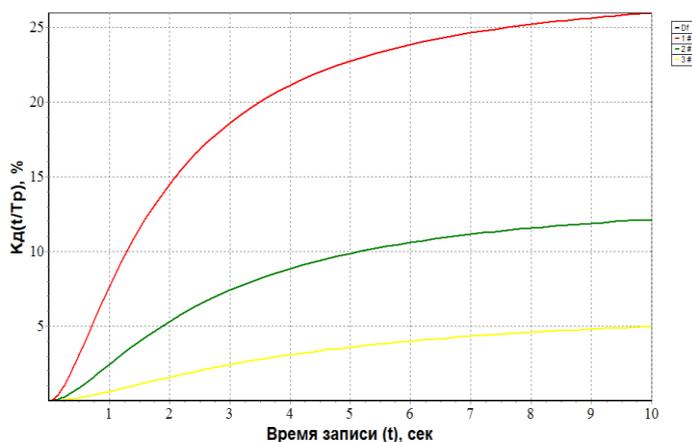


Рисунок 3.1 – Зависимость дифракционной эффективности каждой решетки от времени записи при последовательном угловом мультиплексировании

Возможности программы не позволяют провести моделирование последовательного углового мультиплексирования с разнесением по времени, поэтому на рисунке 2.1 изображены изменение дифракционных эффективностей решеток, имеющих одинаковый начальный момент времени. Также выяснилось, что время записи ограничивается 10 секундами, несмотря на заданные параметры. Время записи в данном случае ограничивается параметром  $D_m$ , предел которого для исходных данных наступает при значении  $D_m = 10^{-10}$ .

Проведем моделирование считывания ГФС, результаты которого изображены на рисунке 3.2.

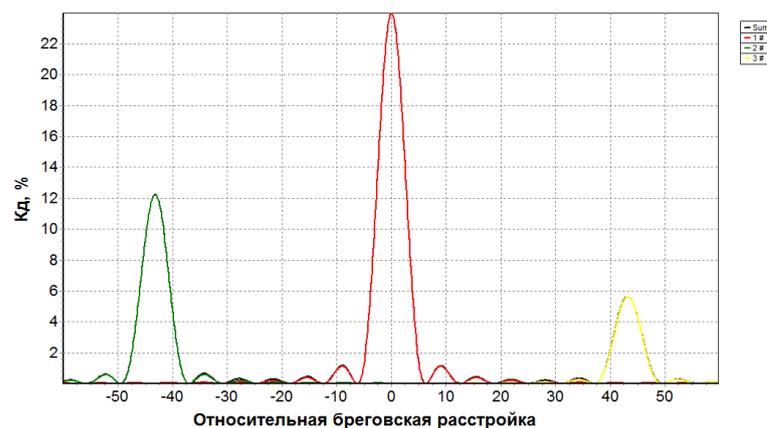


Рисунок 3.2 – Изменение дифракционной эффективности  $\eta_d$  решетки при отклонении от условий Брэгга

Как мы видим, максимальное значение  $\eta_d$  для каждой решетки имеет разное значение, что говорит о необходимости проведения оптимизации дифракционной эффективности двумерной ГДР. Данную задачу возможно решить, установив функцию «Оптимальное  $t$ » для записи каждой одномерной ГФС (рисунок 2.3).

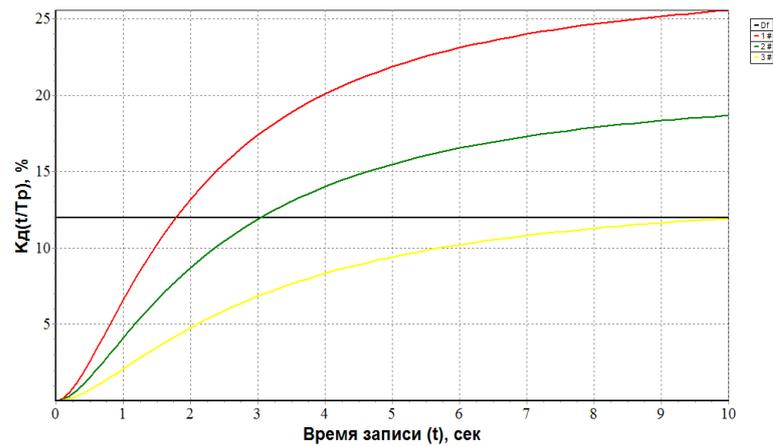


Рисунок 3.3 – Зависимость дифракционной эффективности каждой решетки от времени записи при последовательном угловом мультиплексировании при автоматической оптимизации

Автоматическая оптимизация времени записи для 3-х одномерных решеток при заданных параметрах выполняется только при  $\eta_d \leq 12 \%$ . При  $\eta_d > 12 \%$  автоматическая оптимизация времени записи для 3-й решетки не выполняется. Таким образом, оптимизация дифракционной эффективности двумерной ГФС выполнена, а оптимальное значение  $\eta_d = 12 \%$ .

Проведем считывание двумерной ГФС, сформированной последовательным угловым мультиплексированием, с учетом автоматической оптимизации времени записи (рисунок 3.4).

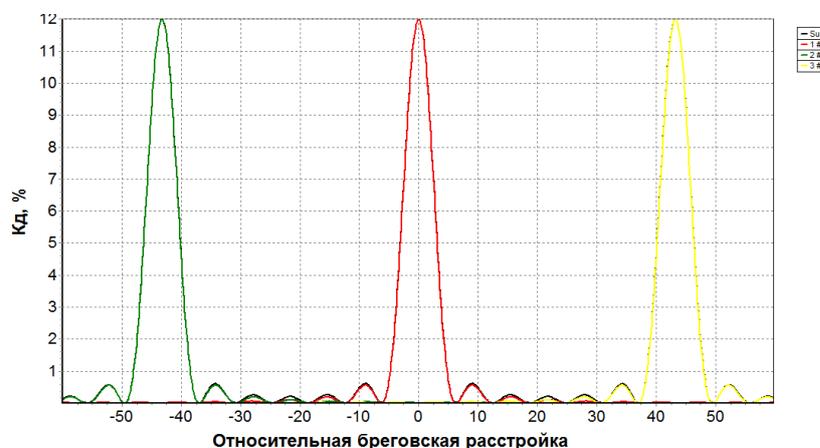


Рисунок 3.4 – Изменение дифракционной эффективности  $\eta_d$  решетки при отклонении от условий Брэгга с учетом автоматической оптимизации времени

Определим время записи каждой одномерной решетки при оптимальном значении  $\eta_d = 12\%$ , используя результат моделирования при автоматической оптимизации по времени (рисунок 3.5).

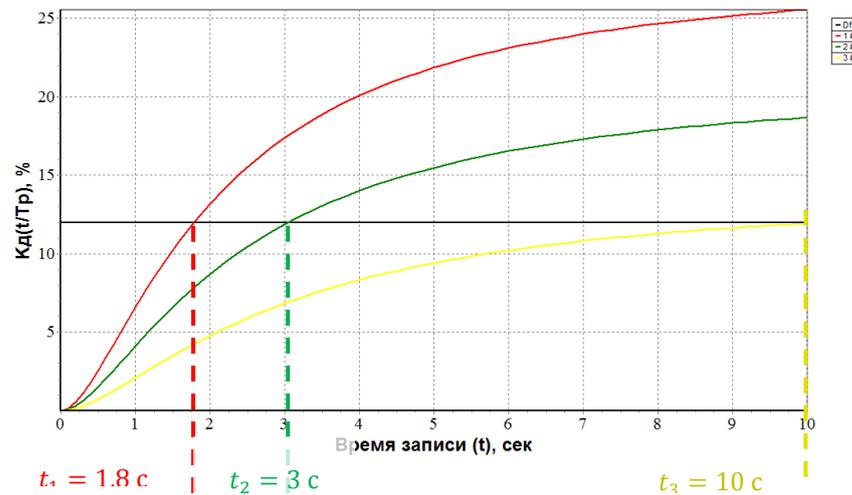


Рисунок 3.5 – Зависимость дифракционной эффективности каждой решетки от времени записи при последовательном угловом мультиплексировании с учетом автоматической оптимизации  $t$

По графику из рисунка 2.5 определено время записи для каждой одномерной ГФС:

- для первой решетки  $t_1 = 1,8$  с;
- для второй решетки  $t_2 = 3$  с;
- для третьей решетки  $t_3 = 10$  с.

Проведем считывание двумерной ГФС, сформированной последовательным угловым мультиплексированием, задав время записи вручную при оптимальном значении  $\eta_d$

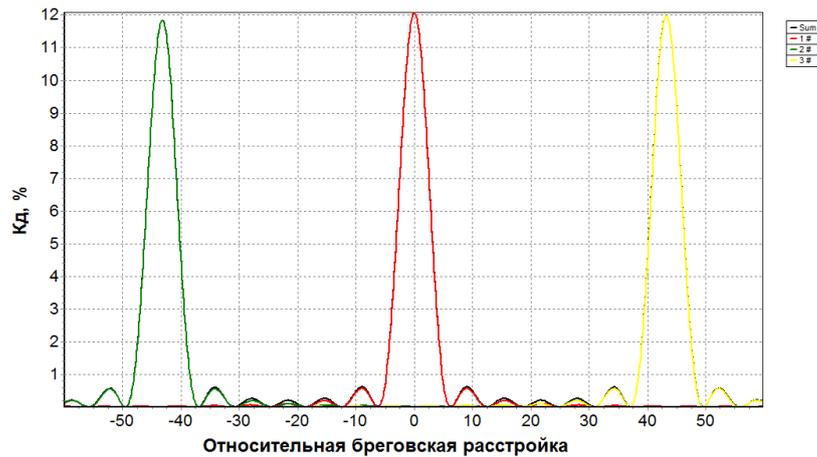


Рисунок 3.6 – Изменение дифракционной эффективности  $\eta_d$  решетки при отклонении от условий Брэгга с учетом оптимального времени, заданного вручную

При моделированном считывании выяснилось, что значения шкалы относительной Брэгговской расстройки также измеряются в относительных единицах  $\Delta k$ , которые необходимо перевести в градусы  $\Delta\theta$ .

$$\Delta k = \Delta\theta \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n \cdot \frac{\sin(\theta_0 + \theta_1)}{\cos \theta_1} \Rightarrow \Delta\theta = \frac{\Delta k \cdot \lambda \cdot \cos \theta_1}{n \cdot \sin(\theta_0 + \theta_1)}$$

Определим  $\Delta k$  по половинному уровню  $\eta_d$  для каждой решетки, как показано на рисунке 3.7.

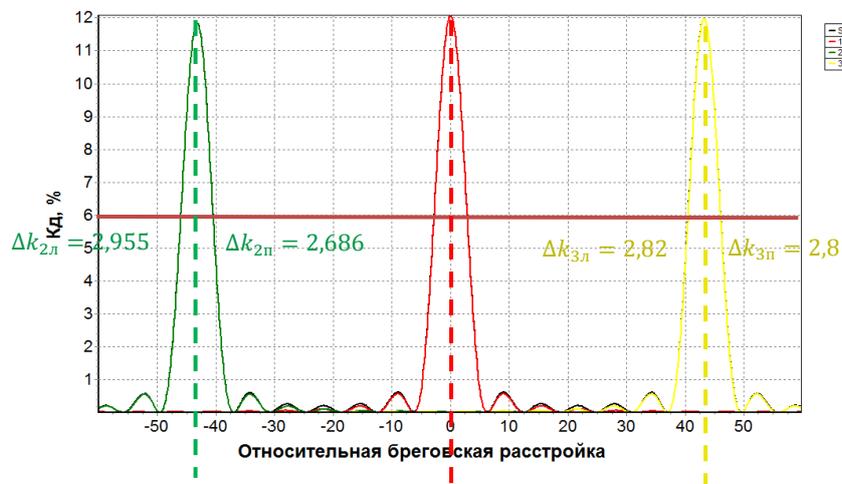


Рисунок 3.7 – Определение  $\Delta k$  по половинному уровню  $\eta_d$  при помощи курсора программы

Тогда:

– для первой решетки:

$$\Delta\theta_{1л} = \frac{\Delta k_{1л} \cdot \lambda \cdot \cos \theta_1}{n \cdot \sin(\theta_0 + \theta_1)} = \frac{2,786 \cdot 633 \cdot 10^{-9} \cdot \cos(0,14)}{1,54 \cdot \sin(0,14 + 0,14)} = 4,114 \text{ мрад} = 0,242^\circ,$$

$$\Delta\theta_{1п} = \frac{\Delta k_{1п} \cdot \lambda \cdot \cos \theta_1}{n \cdot \sin(\theta_0 + \theta_1)} = \frac{2,855 \cdot 633 \cdot 10^{-9} \cdot \cos(0,14)}{1,54 \cdot \sin(0,14 + 0,14)} = 4,216 \text{ мрад} = 0,245^\circ$$

$$\Delta\theta_1 = \Delta\theta_{1л} + \Delta\theta_{1п} = 0,242^\circ + 0,245^\circ = 0,487^\circ;$$

– для второй решетки:

$$\Delta\theta_{2л} = \frac{\Delta k_{2л} \cdot \lambda \cdot \cos \theta_1}{n \cdot \sin(\theta_0 + \theta_1)} = \frac{2,955 \cdot 633 \cdot 10^{-9} \cdot \cos(0,14)}{1,54 \cdot \sin(0,14 + 0,14)} = 4,364 \text{ мрад} = 0,251^\circ,$$

$$\Delta\theta_{2п} = \frac{\Delta k_{2п} \cdot \lambda \cdot \cos \theta_1}{n \cdot \sin(\theta_0 + \theta_1)} = \frac{2,686 \cdot 633 \cdot 10^{-9} \cdot \cos(0,14)}{1,54 \cdot \sin(0,14 + 0,14)} = 3,966 \text{ мрад} = 0,227^\circ$$

$$\Delta\theta_2 = \Delta\theta_{2л} + \Delta\theta_{2п} = 0,251^\circ + 0,227^\circ = 0,478^\circ;$$

– для третьей решетки:

$$\Delta\theta_{3л} = \frac{\Delta k_{3л} \cdot \lambda \cdot \cos \theta_1}{n \cdot \sin(\theta_0 + \theta_1)} = \frac{2,82 \cdot 633 \cdot 10^{-9} \cdot \cos(0,14)}{1,54 \cdot \sin(0,14 + 0,14)} = 4,164 \text{ мрад} = 0,238^\circ$$

$$\Delta\theta_{3п} = \frac{\Delta k_{3п} \cdot \lambda \cdot \cos \theta_1}{n \cdot \sin(\theta_0 + \theta_1)} = \frac{2,8 \cdot 633 \cdot 10^{-9} \cdot \cos(0,14)}{1,54 \cdot \sin(0,14 + 0,14)} = 4,135 \text{ мрад} = 0,237^\circ$$

$$\Delta\theta_3 = \Delta\theta_{3л} + \Delta\theta_{3п} = 0,238^\circ + 0,237^\circ = 0,475^\circ.$$

Оценив угловую селективность для каждой решетки, переведем шкалу графика из рисунка 3.7 в градусы (рисунок 3.8).

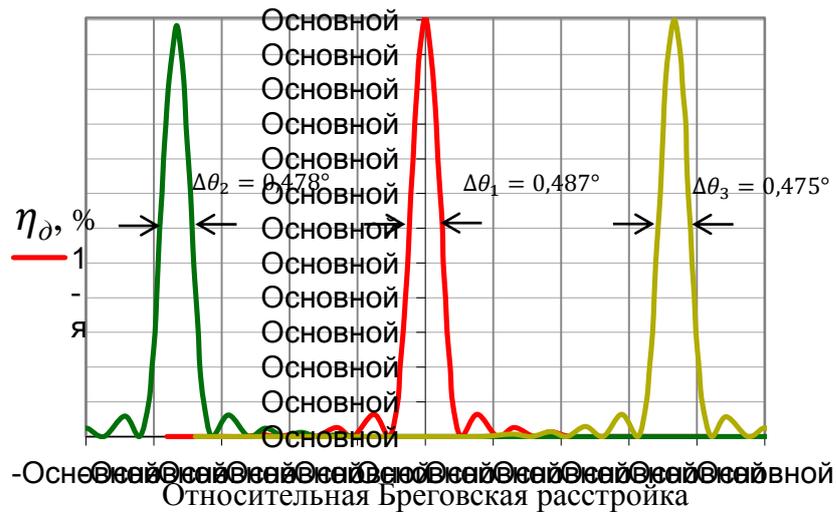


Рисунок 3.8 – Изменение дифракционной эффективности  $\eta_d$  решетки при отклонении от условий Брэгга с учетом перерасчета шкалы

Выполнив оптимизацию дифракционной эффективности  $\eta_d$  двумерной ГДР, установлено, исходя из заданных параметров, что глубина проникновения структуры в материале  $L = 50$  мкм.

Определим через формулу Когельника изменение показателя преломления  $\Delta n$  для двумерной ГДР с учетом оптимизации дифракционной эффективности  $\eta_d$ .

$$\eta = \sin^2 \left( \frac{\pi \cdot L \cdot \Delta n}{\lambda \cdot \cos(\theta)} \right) \Rightarrow \Delta n = \frac{\lambda \cdot \cos(\theta) \cdot \arcsin(\sqrt{\eta})}{\pi \cdot L},$$

тогда:

$$\Delta n = \frac{633 \cdot 10^{-9} \cdot \cos(8^\circ) \cdot \arcsin(\sqrt{0,12})}{\pi \cdot 50 \cdot 10^{-6}} = 1,412 \cdot 10^{-3}.$$

Моделирование двумерных распределений интенсивности записывающих пучков и показателя преломления двумерной ГФС провести на основе программы **Multygarmonic.14.05.17.xmcd** при числе записывающих пучков  $h=2$ .

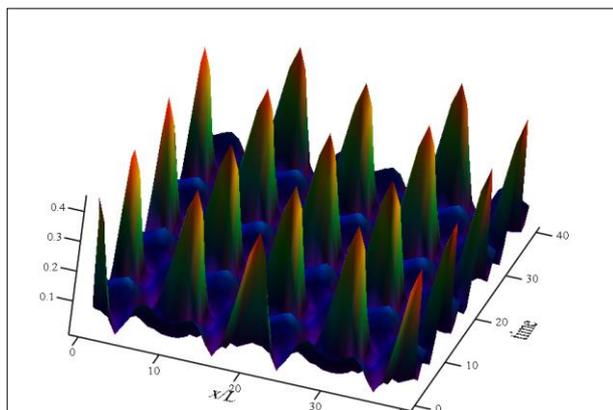
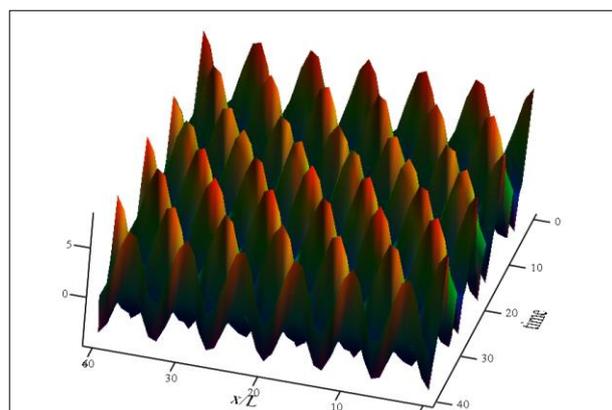
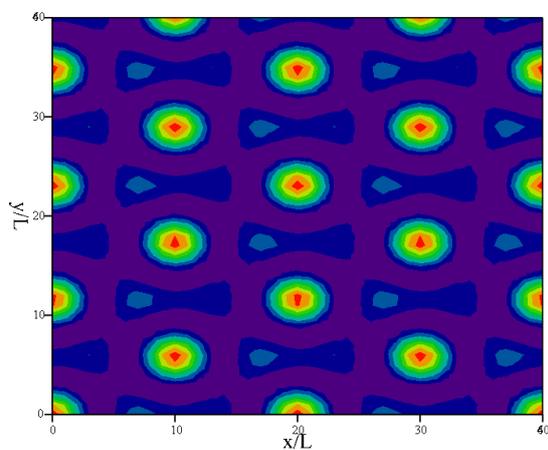
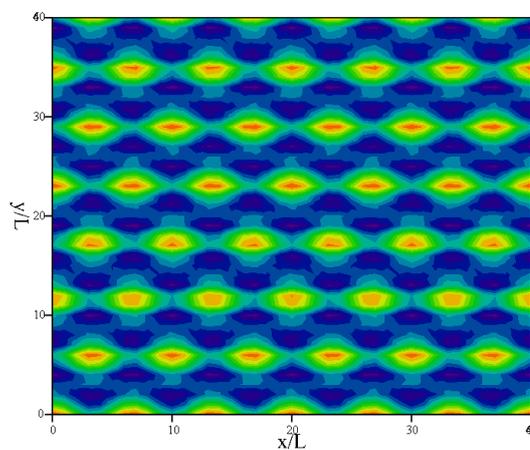
I<sub>2d</sub>n<sub>2d</sub>I<sub>2d</sub>n<sub>2d</sub>

Рисунок 3.9 – Двумерные распределения интенсивности записывающих пучков и показателя преломления двумерной ГФС

### Выводы

В данной работе проведена оптимизация дифракционной характеристики двумерной голографической фотонной структуры, сформированной путем последовательного углового мультиплексирования (рисунки 2.5-2.6).

В процессе выполнения работы выяснилось, что возможности программы не позволяют провести моделирование последовательного углового мультиплексирования с разнесением по времени, поэтому изменение дифракционной эффективности каждой решетки учитывается при начальном

момента времени  $t = 0$  с (рисунок 2.1). Также выяснилось, что время записи ограничивается 10 секундами, несмотря на заданные параметры. Время записи в данном случае ограничивается параметром  $D_m$ , предел которого для исходных данных наступает при значении  $D_m = 10^{-10}$ .

Также выяснилось, что оптимизация времени записи для 3-х одномерных решеток при заданных параметрах выполняется только при  $\eta_d \leq 12\%$ . Таким образом, оптимизация дифракционной эффективности составляет  $\eta_d = 12\%$  (рисунок 2.5).

Также определена глубина проникновения ГФС в ФПМ  $L = 50$  мкм, а изменение показателя преломления при оптимальном  $\eta_d$  составляет  $\Delta n = 1,412 \cdot 10^{-3}$ .

Таким образом, можно сделать вывод, что каждый пункт в данной работе выполнен верно.

#### **4. Содержание отчета**

1. Название работы, цель работы,
2. Результаты расчетов и моделирования.
3. Анализ полученных результатов и заключение.

#### **5. Список литературы**

1. Шарангович С.Н. Голографические фотонные структуры в фотополимерных материалах. [Электронный ресурс]: Учебное пособие / С.Н. Шарангович. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2015. – 191 с. Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/5608>

**Учебное издание**

**Шарангович** Сергей Николаевич

**«ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ФОТОННЫЕ СТРУКТУРЫ В  
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛАХ»**

Учебно-методическое пособие по практическим занятиям  
и самостоятельной работе

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л.-----.

Тираж --- экз. Заказ-----.

Отпечатано в Томском государственном университете  
систем управления и радиоэлектроники.

634050, Томск, пр. Ленина, 40. Тел. (3822) 533018.