

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)
Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧиКР)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР,
УПРАВЛЯЕМЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ
ПОЛЕМ, В ФОТОПОЛИМЕРНО-ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ**

Томск 2017 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)
Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧиКР)

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой СВЧ и КР
_____С.Н. Шарангович
" ____ " _____ 2017 г.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР,
УПРАВЛЯЕМЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ
ПОЛЕМ, В ФОТОПОЛИМЕРНО-ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ**

Методические указания к лабораторной работе для магистров направления подготовки
11.04.02 – Инфокоммуникационные технологии и системы связи, дисциплина
«Голографические фотонные структуры в наноструктурированных материалах»

Разработчики:
Студент группы 153
_____Волченко К.В.
Ассистент каф. СВЧиКР
_____Семкин А.О.
Заведующий каф. СВЧиКР
_____Шарангович С.Н.

Содержание

1. Цель работы	4
2. Введение	5
3. Теоретический материал по голографическим дифракционным структурам в фотополимерно-жидкокристаллических материалах	6
3.1 Теоретические и экспериментальные исследования голографических дифракционных структур в фотополимерно-жидкокристаллических материалах	6
3.2 Математические модели дифракции световых пучков на управляемых неоднородным электрическим полем голографических дифракционных структурах	8
3.2.1 Математическая модель дифракции при воздействии знакопеременного поля	8
3.2.2 Математическая модель дифракции при воздействии плавно пространственно- неоднородного поля	11
4. Рекомендации по выполнению работы	14
5. Содержание отчета	21
6. Контрольные вопросы	22
Список литературы	23

1. Цель работы

Целью данной работы является теоретическое и экспериментальное исследование управляемых пространственно-неоднородным электрическим полем голографических дифракционных структур в фотополимерно-жидкокристаллических материалах.

Работа включает в себя проведение численного моделирования характеристик голографических дифракционных структур (ГДС) в фотополимерно-жидкокристаллических материалах (ФПМ-ЖК) и проведение экспериментов по записи ГДС в образце ФПМ-ЖК и считыванию ее дифракционной характеристики (угловой селективности). А также сопоставление результатов математического моделирования с результатами, полученными экспериментально.

2. Введение

Программный комплекс, с помощью которого следует выполнять данную лабораторную работу, обеспечивает возможность проведения численного моделирования интегральной фазовой расстройки, пространственного профиля показателя преломления (ППП), угловой селективности голографических дифракционных структур (ГДС) в зависимости от параметров композиции, дифракции и внешних условий, в частности от характера воздействия внешнего электрического поля.

В комплексе реализована возможность проведения экспериментов записи и считывания ГДС в фотополимерно-жидкокристаллических материалах (ФПМ-ЖК) с необходимыми параметрами, а также возможность представлять графически результаты и зависимости, полученные в ходе экспериментов.

3. Теоретический материал по голографическим дифракционным структурам в фотополимерно-жидкокристаллических материалах

3.1 Теоретические и экспериментальные исследования голографических дифракционных структур в фотополимерно-жидкокристаллических материалах

В теории голографические дифракционные структуры (ГДС) формируется путем воздействия на композицию формирующего излучения, характеризующегося периодическим распределением освещенных и неосвещенных областей. В освещенных областях под действием излучения протекает процесс фотополимеризации. Поскольку до воздействия композиция представляла собой гомогенную смесь компонентов, в объеме образца формируется градиент концентраций полимера и мономера, что приводит к диффузии мономера в освещенные области и вытеснению не участвующих в реакции компонент в неосвещенные области.

Основными параметрами голографических дифракционных структур принято считать их дифракционную эффективность (ДЭ) и угловую (спектральную) селективность, т.е. зависимость ДЭ от угла падения (длины волны) считывающего излучения. Под дифракционной эффективностью принято понимать отношение интенсивности дифрагировавшего излучения к суммарной интенсивности дифрагировавшего и прошедшего:

$$\eta = \frac{I_d}{[I_d + I_{tr}]}, \quad (3.1)$$

где η – дифракционная эффективность ГДС; I_d , I_{tr} – интенсивность дифрагировавшего и прошедшего излучений соответственно.

Иногда используют понятие контраста структуры, т.е. амплитуды модуляции показателя преломления материала, обусловленной формированием ГДС. Н. Kogelnik в [1] связал ДЭ структуры с ее контрастом следующим образом:

$$\eta = \sin^2 \left(\frac{\pi \cdot d \cdot \Delta n}{\lambda \cdot \cos \theta} \right), \quad (3.2)$$

где d – толщина образца фотополимеризующейся композиции (ФПК); Δn – контраст ГДС; θ , λ соответствуют условиям дифракции Брэгга (угол и длина волны соответственно).

В основе всех известных теоретических моделей формирования дифракционных структур в ФПК различного состава лежат кинетические уравнения изменения концентраций фотоиницирующей системы (ФИС), мономера и инертных компонент, обусловленного процессами фотополимеризации и взаимной диффузии компонент [2, 3].

Наиболее современная трехмерная теоретическая модель формирования ГДС в ФПК плоскими волнами, учитывающая нелинейность процесса формирования (наличие высших

пространственных гармоник), поглощение излучения материалом, фотохимические реакции инициирования и полимеризации, процессы взаимной диффузии компонент, а так же нелокальный эффект приведена в работах [4, 5]. Кроме этого, нелинейная трехмерная модель формирования ГДС, учитывающая поглощение излучения материалом и его фотоиндуцированное изменение в процессе формирования получена ранее в работах [6, 7].

Отдельный интерес представляет процесс импульсного формирования ГДС, который позволяет на порядок увеличить соотношение сигнал/шум за счет устранения динамического усиления шумовых решеток. Данный способ формирования ГДС исследован группой ученых из Новосибирских институтов СО РАН совместно с учеными ТУСУРа в работах [8, 9, 10].

Во всех рассмотренных теоретических моделях, помимо исходных концентраций компонент, ключевыми параметрами, определяющими кинетику процесса записи ГДС, являются:

- коэффициент поглощения материала [4] и параметры его фотоиндуцированного изменения [11];
- коэффициенты диффузии компонент и параметры их изменения в процессе записи [9];
- амплитудные коэффициенты, определяющие вклад в изменение показателя преломления фотополимеризационного и диффузионного процессов [4, 5]
- соотношение характерных времен фотополимеризации и диффузии, которое определяет линейность процесса записи [5, 6].

Все известные теоретические модели дифракции электромагнитных волн на ГДС в фотополимерно-жидкокристаллических материалах (ФПМ-ЖК) построены на основе теории связанных волн для прошедшего и дифрагировавшего излучений [1]. Данные модели связывают амплитуды волн дифракционного поля на выходе структуры с амплитудой изменения тензора диэлектрической проницаемости (показателя преломления) через систему дифференциальных уравнений связанных волн (УСВ). Решая систему УСВ, получив выражения для амплитуд дифрагировавших волн, можно определить дифракционную эффективность, угловую (спектральную) селективность структуры, а так же ее поляризационные характеристики.

Наиболее часто для описания дифракционных свойств ГДС используется модель, разработанная Н. Kogelnik [1]. Для ФПК, не содержащих жидкие кристаллы, группой испанских ученых был проведен анализ применимости модели [1] в сравнении с более общей теорией связанных волн [12]. Показано, что модель [1] подходит для описания ненаклонных ГДС пропускающей геометрии с пространственным периодом более 500 мм^{-1} даже при высоком контрасте структуры и в диапазоне толщин от 0 до 90 мкм. При данных параметрах структуры в процессе ее записи превалирует фотополимеризационный механизм, что

обеспечивает формирование одной пространственной гармоники показателя преломления. Таким образом, модель [1] не позволяет учесть нелинейность процесса записи (формирование нескольких пространственных гармоник показателя преломления). В случае исследования ГДС с параметрами, выходящими за указанные пределы, авторы [12] рекомендуют использовать более точные модели связанных волн.

Кроме указанных ограничений, модель [1] не учитывает амплитудно-фазовую неоднородность ГДС. В случае ее применения к описанию дифракции на ГДС на основе ФПМ-ЖК, она так же не позволяет учесть анизотропию материала.

Отдельный интерес представляет эффект фазового сдвига дифракционной характеристики (угловой селективности) под действием электрического поля на ГДС в ФПМ-ЖК при сильном поверхностном сцеплении молекул ЖК с ограничивающими поверхностями, описанный в работе [13]. Сильное поверхностное сцепление ЖК с подложками обуславливает плавную электрически наведенную неоднородность изменения диэлектрической проницаемости материала, что приводит к изменению условий фазового синхронизма для дифрагирующих волн. Данный эффект потенциально может быть использован для улучшения электрооптических характеристик ГДС (снижения критической напряженности и увеличения скорости переключения).

3.2 Математические модели дифракции световых пучков на управляемых неоднородным электрическим полем голографических дифракционных структурах

3.2.1 Математическая модель дифракции при воздействии знакопеременного поля

При исследовании дифракционных характеристик управляемых неоднородным электрическим полем голографических дифракционных структур на основе ФПМ-ЖК материалов была использована теоретическая модель дифракции света на голографических дифракционных ФПМ-ЖК структурах, приведенная в [14, 15]. Приведем здесь краткие математические выкладки из этой модели.

Рассмотрим двумерную дифракцию Брэгга необыкновенных волн на голографической дифракционной структуре, сформированной в ФПМ-ЖК при воздействии внешнего пространственно-неоднородного электрического поля (рисунок 3.1).

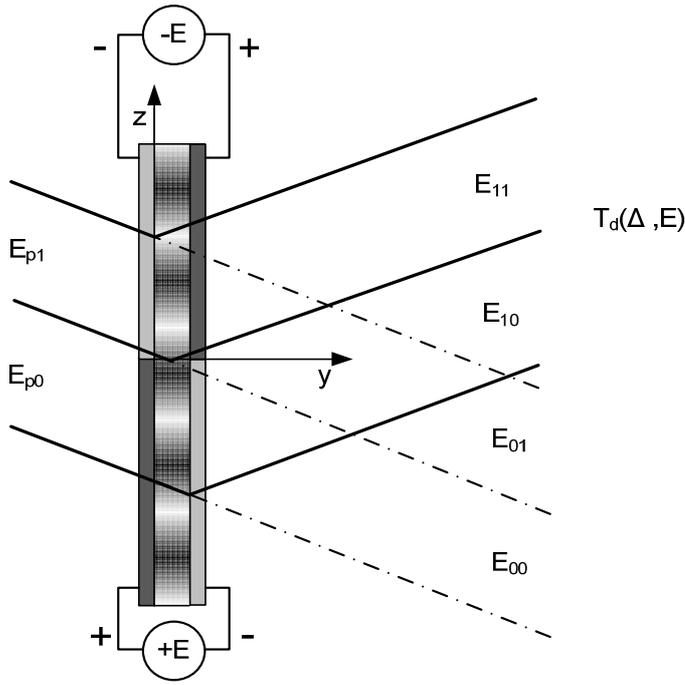


Рисунок 3.1 – Схема дифракции световых пучков на ГДС в ФПМ-ЖК

Как видно из рисунка 3.1 на ГДС в ФПМ-ЖК воздействует знакопеременное электрическое поле, полученное путем формирования неоднородной топологии электродной структуры. Приняты следующие обозначения: $E_p(\mathbf{r})$ – падающий пучок, здесь и далее для простоты анализа разделенный на два $E_{p0}(\mathbf{r})$ и $E_{p1}(\mathbf{r})$, дифрагирующие на областях воздействия электрических полей разной полярности; соответствующие им $E_{00}(\mathbf{r})$ и $E_{01}(\mathbf{r})$ – прошедшие и $E_{10}(\mathbf{r})$ и $E_{11}(\mathbf{r})$ – дифрагировавшие в

первый порядок пучки; $T_d(\Delta, E)$ – результирующая передаточная функция для пучка первого порядка дифракции, которая будет определена ниже; параметры $+E$ и $-E$ обозначают поля противоположной полярности; \mathbf{r} – радиус-вектор.

Примем также, что изменение полярности управляющего напряжения приводит к повороту оси жидкого кристалла в противоположную сторону. Тогда локальные векторные диаграммы дифракции световых пучков будут иметь следующий вид (рисунок 3.2).

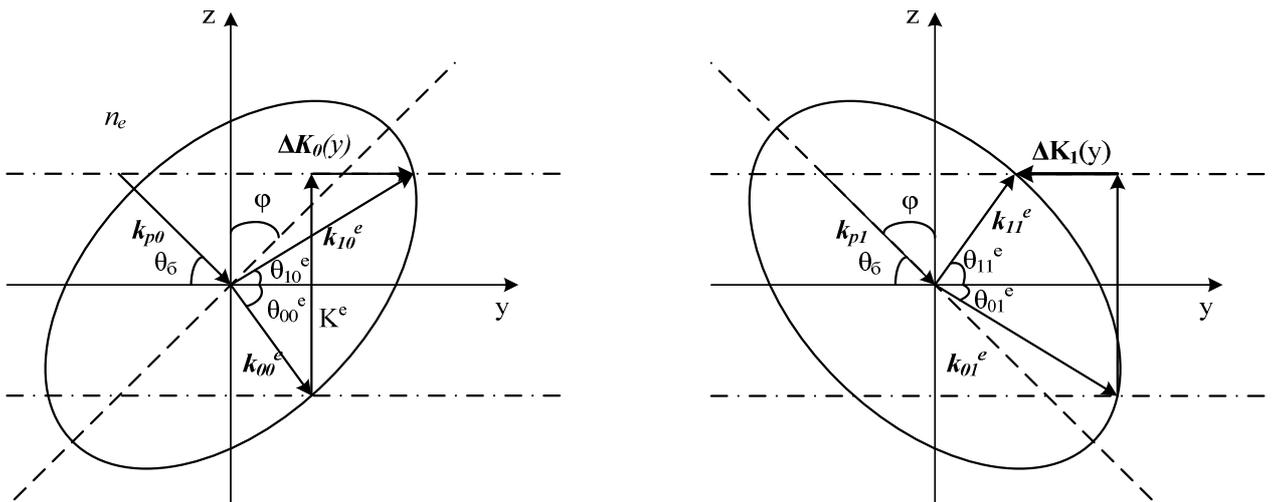


Рисунок 3.2 – Локальные векторные диаграммы дифракции необыкновенных волн при воздействии электрических полей противоположной полярности

На рисунке 3.2 $\mathbf{k}_{p0,p1}$ – волновые векторы падающих пучков; $\mathbf{k}_{i,j}^e(\mathbf{r}, E) = (\omega/c)n_{i,j}^e\mathbf{N}_{i,j}^e$ – волновые векторы дифрагирующих пучков; $i = 0,1$ – порядок дифракции; j – номер пучка согласно рисунку 3.1; $n_{i,j}^e$ – показатели преломления, $\mathbf{N}_{i,j}^e$ – волновые нормали; e соответствует необыкновенной волне; \mathbf{K} – вектор решетки; $\Delta\mathbf{K}_j(\mathbf{r}, E)$ – векторы локальной фазовой расстройки, φ – угол поворота оси директора ЖК.

Амплитуды взаимодействующих необыкновенных волн будем искать решением системы уравнений связанных волн (УСВ) [14, 15]:

$$\mathbf{N}_{r0,j}^e \cdot \nabla E_{0,j}^e(\mathbf{r}) = -iC_{1,j}^e(\mathbf{r})E_{1,j}^e(\mathbf{r}) \exp(+i\Theta_j(\mathbf{r})), \quad (3.3)$$

$$\mathbf{N}_{r1,j}^e \cdot \nabla E_{1,j}^e(\mathbf{r}) = -iC_{0,j}^e(\mathbf{r})E_{0,j}^e(\mathbf{r}) \exp(-i\Theta_j(\mathbf{r})), \quad (3.4)$$

где $C_{0,j}^e(\bar{r}) = \frac{1}{4} \frac{\omega}{c_c n_{0,j}^e} \mathbf{e}_{1,j}^e(\mathbf{r}) \cdot \Delta \hat{\epsilon} \cdot \mathbf{e}_{0,j}^e(\mathbf{r})$ – локальные коэффициенты связи; $\mathbf{e}_{i,j}^e(\mathbf{r})$ – векторы поляризации; $\Delta \hat{\epsilon}$ – возмущение диэлектрической проницаемости образца, характеризующее периодическую неоднородность оптических свойств ГДС; $\mathbf{N}_{r0,1}^e$ – групповые нормали; c_c – скорость света.

В уравнениях (3.3), (3.4) введен параметр интегральной фазовой расстройки для количественной оценки степени влияния пространственной неоднородности $\Delta\mathbf{K}_i(\mathbf{r}, E)$ на условия дифракции световых волн:

$$\Theta_i(y, E) = \int_0^y \Delta K_i(y', E) dy', \quad (3.5)$$

где $\Delta K_j(y, E)$ – модуль пространственно-неоднородного вектора фазовой расстройки $\Delta\mathbf{K}_j(\mathbf{r}, E) = \mathbf{k}_0(\mathbf{r}, E) - \mathbf{k}_1(\mathbf{r}, E) + \mathbf{K}$, характеризующей изменение геометрии дифракции (рисунок 3.2) вследствие воздействия электрического поля. Величина $\Delta K_j(y, E)$ определяется выражением:

$$\Delta K_i(\mathbf{r}, E) = k \left[n_{0i}^e(\mathbf{r}, E)(\mathbf{N}_{0i}^e \cdot \mathbf{y}_0) - n_{1i}^e(\mathbf{r}, E)(\mathbf{N}_{1i}^e \cdot \mathbf{y}_0) \right] + \mathbf{K} \cdot \mathbf{y}_0. \quad (3.6)$$

Входящие в (3.6) зависимости $\mathbf{N}_{i,j}^e(\mathbf{r}, E)$ находятся из уравнений эйконала. Согласно рисунку 3.2 показатели преломления $n_{i,j}^e(\mathbf{r}, E)$ для световых пучков, дифрагирующих на областях воздействия электрических полей разной полярности определяются:

$$n_{i,0}^e = n_o n_e \left[n_e^2 \cdot \sin^2(\varphi(\mathbf{r}, E) \pm \theta_{i,0}^e) + n_o^2 \cdot \cos^2(\varphi(\mathbf{r}, E) \pm \theta_{i,0}^e) \right]^{-1/2}, \quad (3.7)$$

$$n_{i,1}^e = n_o n_e \left[n_e^2 \cdot \sin^2(\pi - \varphi(\mathbf{r}, E) \pm \theta_{i,1}^e) + n_o^2 \cdot \cos^2(\pi - \varphi(\mathbf{r}, E) \pm \theta_{i,1}^e) \right]^{-1/2}, \quad (3.8)$$

где $\theta_{i,j}^e$ – углы падения и дифракции необыкновенных волн (рисунок 3.1), а зависимость

$\varphi(\mathbf{r}, E)$ определяется из уравнения Фредерикса [14, 15]:

$$\frac{1}{\xi_E(E)} \left(\frac{d}{2} + y \right) = \int_0^{\varphi} \left(\sin^2 \varphi_m(\mathbf{r}, E) - \sin^2 \varphi \right)^{-1/2} d\varphi, \quad (3.9)$$

где $\xi_E(E)$ – оптическая когерентная длина, d – толщина образца, φ_m – максимальный угол поворота директора ЖК.

Воспользуемся решением УСВ (3.3),(3.4) в оптически неоднородной среде в приближении заданного поля [14, 15]. В этом случае распределение амплитуды дифракционного светового поля по угловому спектру (УС) можно представить в виде:

$$E_d(\theta, E) = E_{p0}(\theta)T_{d,0}(\Delta, E) + E_{p1}(\theta)T_{d,1}(\Delta, E), \quad (3.10)$$

где введены парциальные передаточные функции (ПФ) ГДС:

$$T_{d,j}(\Delta, E) = \frac{1}{d} \cdot \int_0^d C(y, E) \cdot \exp \left[i \cdot \left(\Delta \frac{y}{d} + \Theta_j(y, E) \right) \right] dy, \quad (3.11)$$

$E_{pj}(\theta)$ – УС падающего светового поля; $C(y, E)$ – амплитудный коэффициент связи [14, 15]; $\Delta = (\delta\theta)$ – относительная фазовая расстройка, $\delta\theta = \theta - \theta_\sigma$ – отклонение от угла Брэгга θ_σ , угол θ характеризует направление плосковолновых компонент УС $E_{d,j}(\theta, E)$ относительно волновых нормалей $\mathbf{N}_{d,j}$ световых пучков.

Полагая $E_{p0}(\theta) = E_{p1}(\theta)$, из (3.10) получим, что для анализа воздействия знакопеременного управляющего напряжения на дифракционные характеристики можно ввести результирующую ПФ (рисунок 3.1):

$$T_d(\Delta, E) = T_{d0}(\Delta, E) + T_{d1}(\Delta, E). \quad (3.12)$$

3.2.2 Математическая модель дифракции при воздействии плавно пространственно-неоднородного поля

Также рассматриваются изменения характеристик ГДС в зависимости от плавно изменяющегося поля. Была рассмотрена двумерная дифракцию Брэгга необыкновенных волн на структуре при воздействии на нее линейно изменяющегося внешнего поля, это можно пронаблюдать на рисунке 3.3.

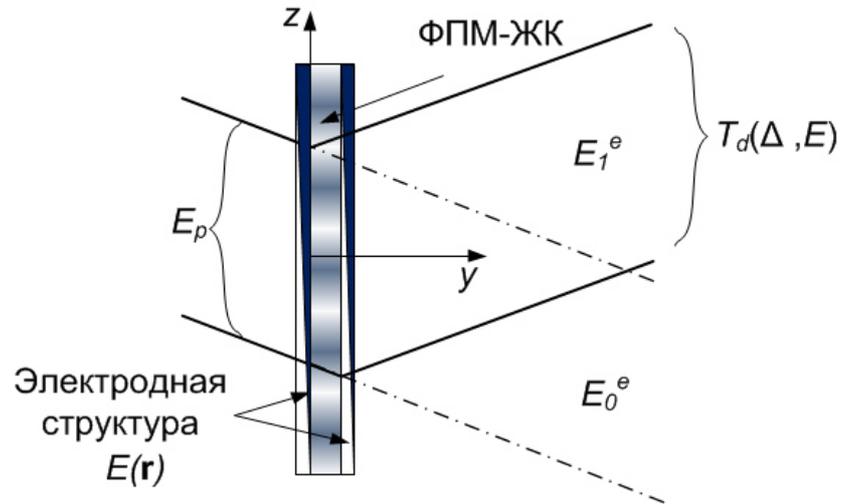


Рисунок 3.3 - Двумерная дифракция Брэгга необыкновенных волн на структуре при воздействии на нее линейно изменяющегося внешнего поля

На рисунке 3.3 E_p – падающий пучок, $E_{0,1}$ – прошедший и дифрагировавший в первый порядок пучки.

В работе было рассмотрено воздействие линейно меняющегося по координате z электрического поля [16, 17]. Зависимость приведена на рисунке 3.4.

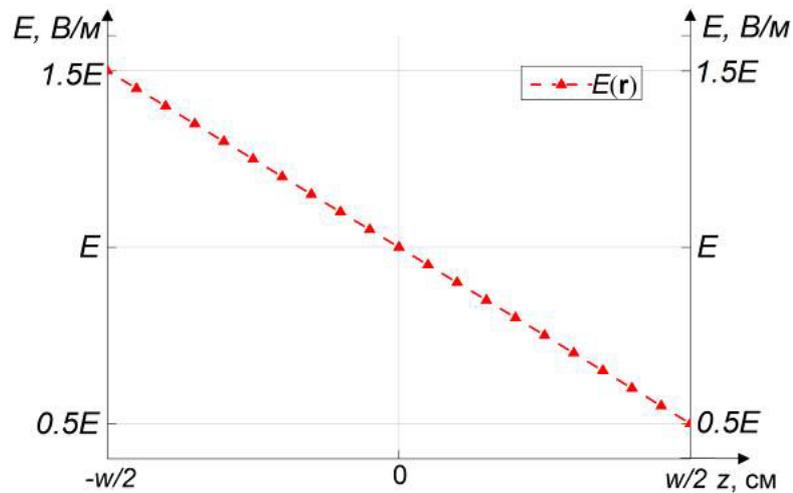


Рисунок 3.4 - Линейно меняющееся по координате z электрическое поле

Выражение (3.13) описывает изменение электрического поля математически:

$$E(z) = E \cdot \left(1.5 - \frac{1}{w} \cdot z\right). \quad (3.13)$$

Для решения поставленной техническим заданием задачи [16, 17] необходимо было решить систему уравнений связанных волн (3.14), (3.15).

$$N_{r0}^e \cdot \nabla E_0^e(r) = -i(C_1^e(r)E_1^e(r) \exp(+i\Theta(r))), \quad (3.14)$$

$$N_{r_1}^e \cdot \nabla E_1^e(r) = -i(C_0^e(r)E_0^e(r)\exp(-i\Theta(r))), \quad (3.15)$$

где $C_0^e(r) = \frac{1}{4} \frac{\omega}{c_c n_0^e} e_1^e(r) \cdot \Delta \bar{\varepsilon} \cdot e_0^e(r)$ – локальные коэффициенты связи, $e_i^e(r)$ – векторы поляризации, $i = 0, 1$ – порядок дифракции, $\Delta \bar{\varepsilon}$ – возмущение диэлектрической проницаемости образца, характеризующее периодическую неоднородность оптических свойств структуры, $N_{r_{0,1}}^e$ – групповые нормали, C_c – скорость света.

В уравнения входят амплитудные коэффициенты связи [16, 17], определяющие изменение величины дифракционной характеристики под воздействием электрического поля и параметр интегральной фазовой расстройки, который учитывает нарушение условий дифракции. И коэффициенты связи, и фазовая расстройка будут иметь пространственную неоднородность, в силу воздействия неоднородного электрического поля.

Далее приведено выражение (3.16) для параметра интегральной фазовой расстройки, которое показывает, что неоднородность электрического поля определяет неоднородность поворота директора ЖК (3.17), (3.18). Угол поворота находится численным решением уравнения Фредерикса (3.19).

$$\Theta(r) = \int_0^r \Delta K(r) dr, \quad (3.16)$$

$$\Delta K(r) = k[n_0^e(r)(N_0^e \cdot y_0) - n_1^e(r)(N_1^e \cdot y_0)] + K \cdot y_0, \quad (3.17)$$

$$n_i^e(r) = n_o n_e [n_e^2 \cdot \sin^2(\varphi(r) \pm \theta_i^e) + n_o^2 \cdot \cos^2(\varphi(r) \pm \theta_i^e)]^{-1/2}, \quad (3.18)$$

$$\frac{1}{\xi_E[E(z)]} \left(\frac{d}{2} + y \right) = \int_0^{\varphi} (\sin^2 \varphi_m(\mathbf{r}) - \sin^2 \varphi)^{-1/2} d\varphi. \quad (3.19)$$

Решение УСВ [16, 17] удобно представить в виде распределения (3.20) амплитуды дифракционного светового поля по угловому спектру.

$$E_d(\theta, E) = E_p(\theta) T_d(\Delta, E), \quad (3.20)$$

$$T_d(\Delta, E) = \frac{1}{d} \cdot \int_0^d C(r) \cdot \exp \left[i \cdot \left(\Delta \frac{y}{d} + \Theta(r) \right) \right] dy. \quad (3.21)$$

Под выражением (3.21) приведена передаточная функция. Квадрат модуля ПФ будет отвечать дифракционной эффективности дифракционной структуры. Дельта (Δ) – относительная расстройка, которая может быть пересчитана в отклонение по углу или по длине волны.

4. Рекомендации по выполнению работы

Выполнение лабораторной работы производится согласно блок-схеме, изображенной на рисунке 4.1.

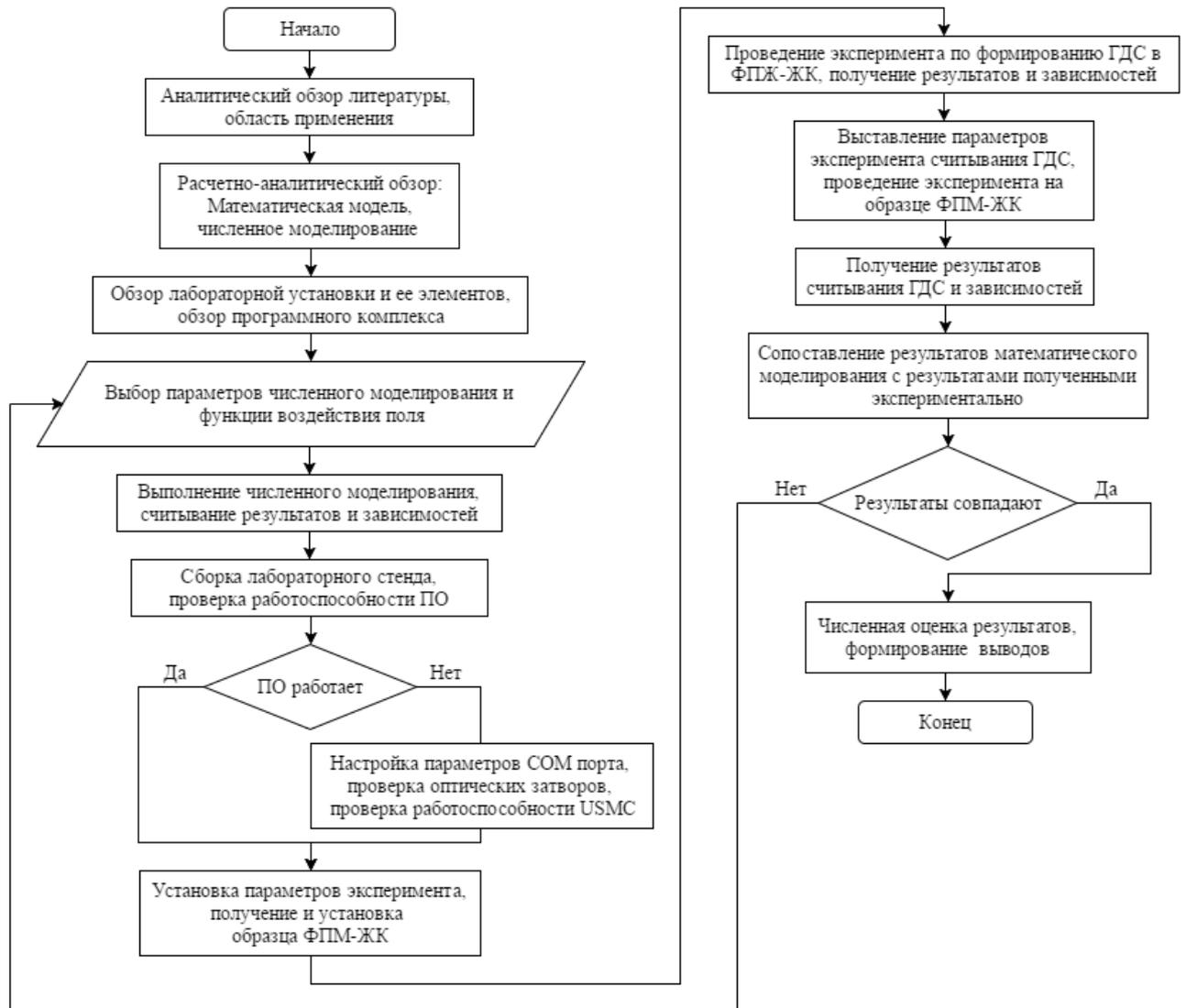


Рисунок 4.1 – Блок-схема выполнения лабораторной работы

Для начала студенту, выполняющему разработанную лабораторную работу, предлагается провести обзор теории, представленной в данном методическом пособии в пункте 3.1.

Дополнительно следует разобраться с расчетно-аналитической частью, которая представлена в пункте 3.2 для того чтобы понять как в дальнейшем выполнять численное моделирование описываемой лабораторной работы.

Непосредственно перед выполнением лабораторной работы студенту требуется разобраться со схемой лабораторной установки и ее элементами, изображенными на рисунке 4.2.

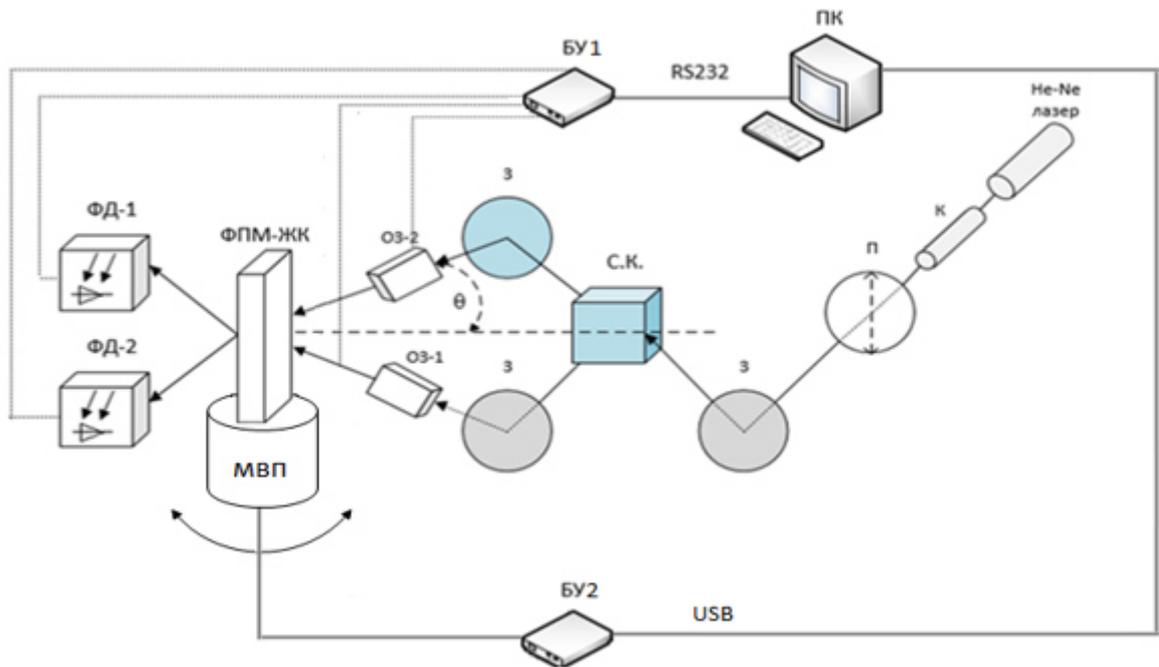


Рисунок 4.2 – Схема экспериментальной установки

На рисунке 4.2 изображена экспериментальная установка, используемая для записи ГДС, состоящая из гелий-неонового лазера, коллиматора, поляризатора, светоделительного кубика, который делит пучок света на два в соотношении 50/50, двух зеркал, позволяющих направить полученные пучки света в нужном направлении, двух затворов, позволяющих перекрывать излучение в требуемые промежутки времени, двух фотоприемников, а также блоков управления затворами и моторизованным поворотным столиком с помощью ПК.

На рисунке 4.2 введены следующие обозначения: БУ – блок управления; С.К. – светоделительный кубик; ПК – персональный компьютер; ОЗ – оптический затвор; К – коллиматор; З – зеркало; ФД – фотоприемник; П – поляризатор; МВП – моторизованный вращающийся столик, БУ1 – блок управления фотоприемниками и оптическими затворами, БУ2 – блок управления моторизованным поворотным столиком.

Первым шагом в ходе выполнения лабораторной работы по заданию преподавателя студент получает параметры численного моделирования ГДС, функцию воздействия внешнего электрического поля, и ее период (см. рисунок 4.3), а также образец ФПМ-ЖК. Затем студент выполняет численное моделирование (см. рисунок 4.4), выгружает из программного комплекса полученные данные и делает скриншоты полученных зависимостей.

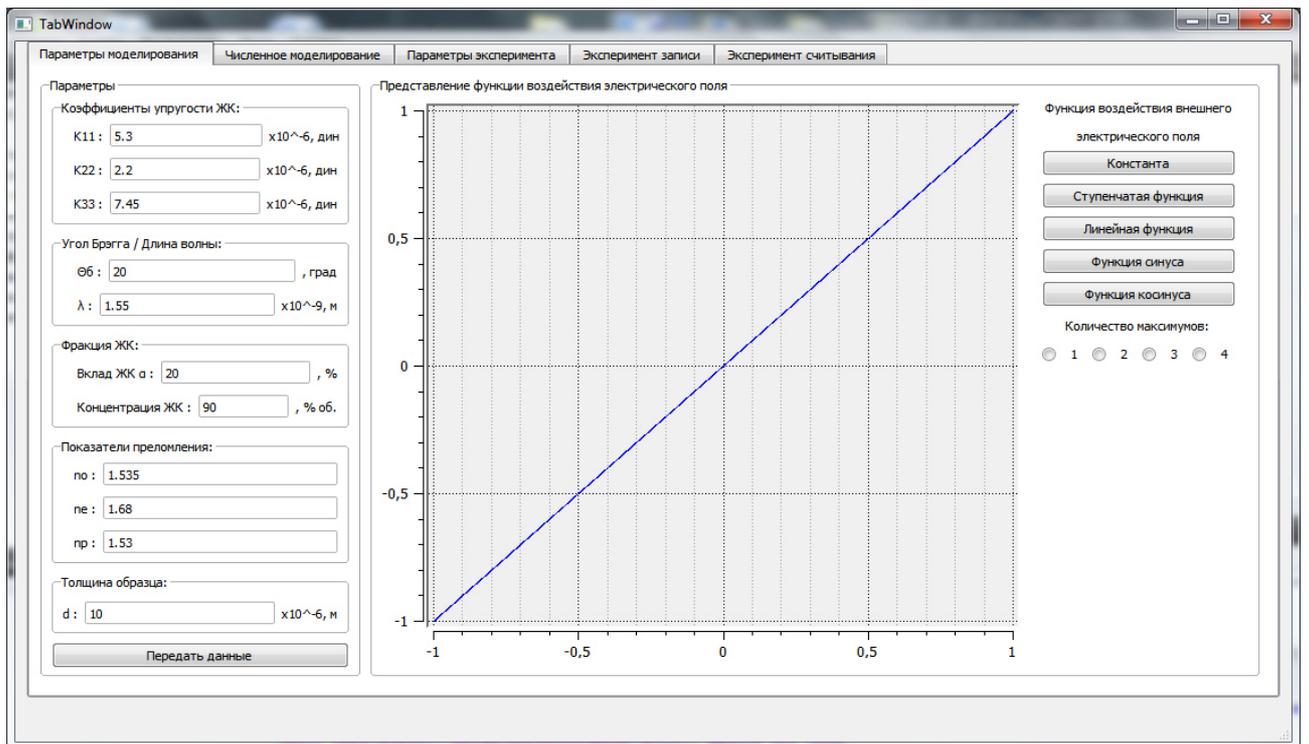


Рисунок 4.3 – Параметры моделирования

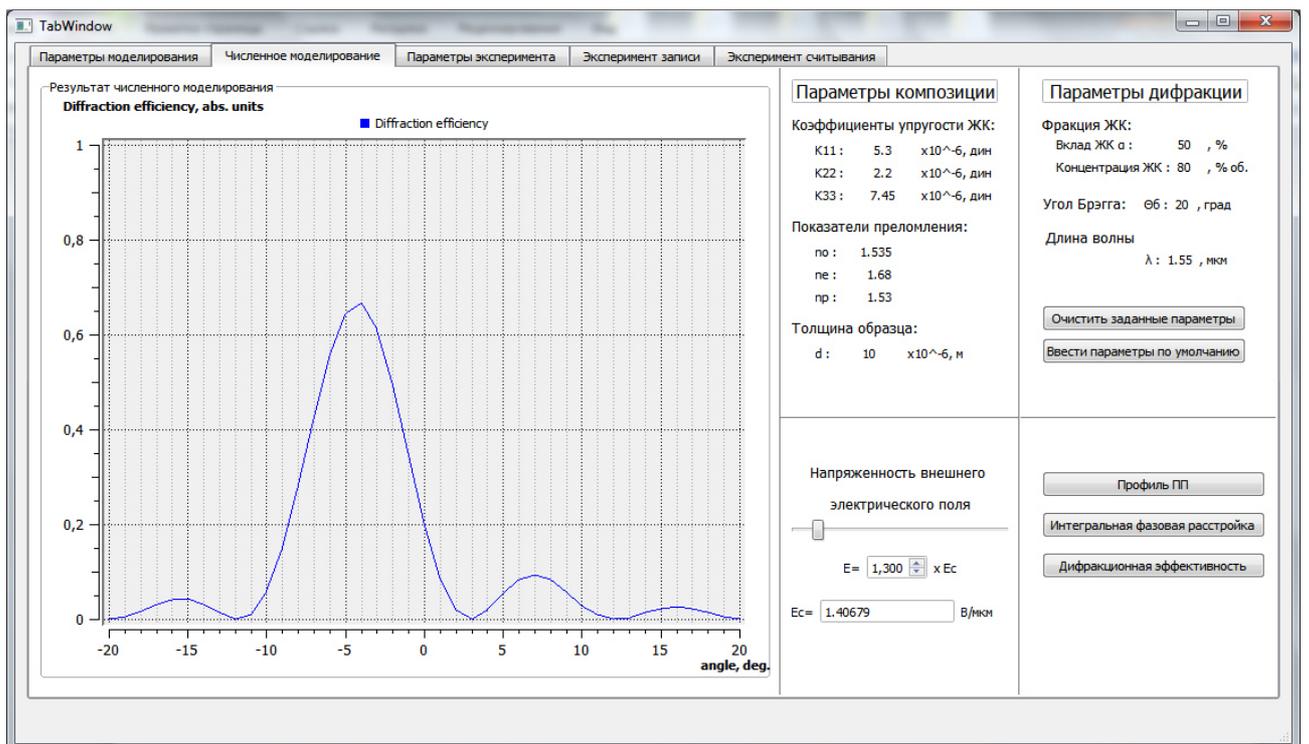


Рисунок 4.4 – Численное моделирование

Далее студенту необходимо собрать лабораторный стенд в соответствии с рисунком 4.2, удостовериться, что угол схождения не превышает условий дифракции Брэгга, а также проверить работоспособность программного обеспечения путем снятия пробных значений с

фотоприемников, так как это показано в нижней части рисунка 4.5. Если возникнут трудности или проблемы со снятием тестовых значений, студенту следует обратить внимание на параметры СОМ порта изображенные в верхней части рисунка 4.5, а также проверить работоспособность оптических затворов.

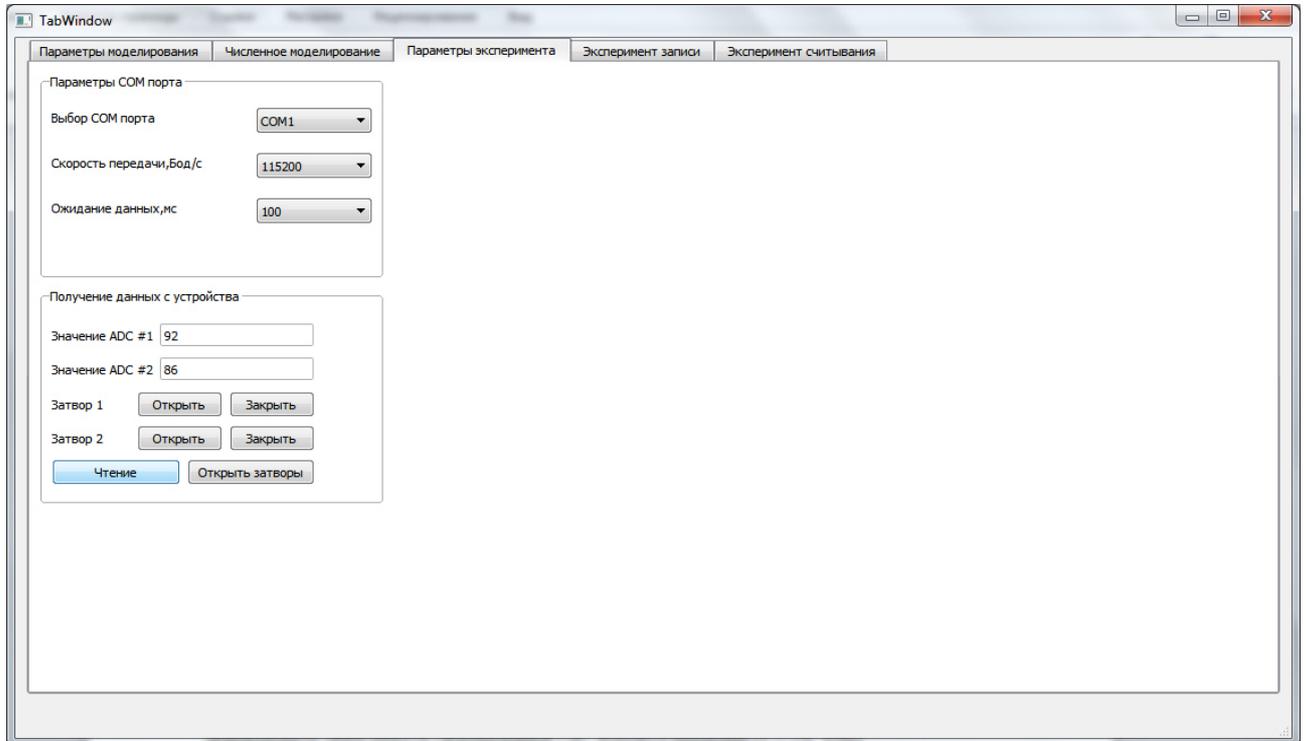


Рисунок 4.5 – Параметры СОМ порта и тестовые значения с фотоприемников

Следующим шагом выполнения лабораторной работы является проведение эксперимента по формированию ГДС в ФПМ-ЖК. Для этого студент устанавливает полученный от преподавателя образец ФПМ-ЖК на моторизированный вращающийся столик (МВС), установить параметры эксперимента в соответствии с рисунком 4.6 и нажать кнопку «Начать эксперимент». После проведения эксперимента записи необходимо оценить дифракционную эффективность сформированной ГДС, используя выражение (3.1) (см. пункт 3.1), а также сделать скриншот зависимости дифракционной эффективности ГДС от времени проведения эксперимента (см. рисунок 4.6) путем нажатия на кнопку «Построить график».

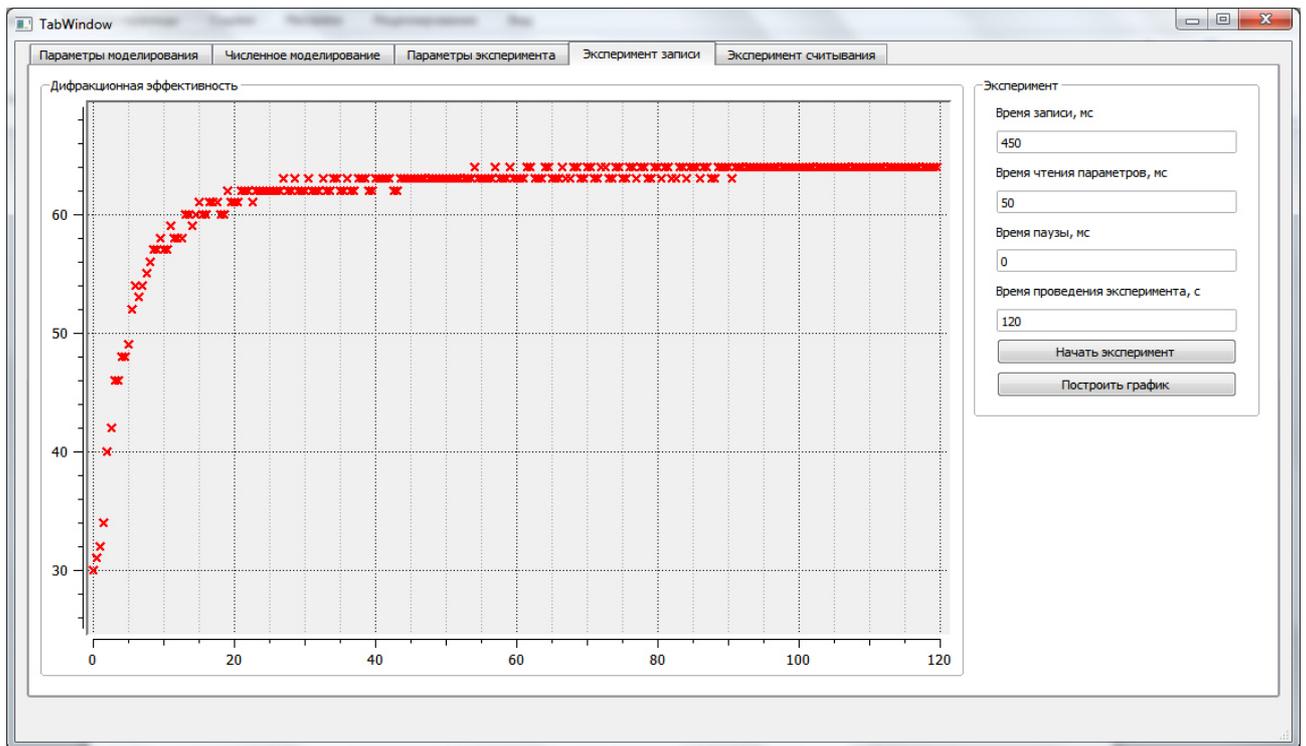


Рисунок 4.6 – Параметры эксперимента записи и график зависимости дифракционной эффективности от времени проведения эксперимента

Далее следует проведение эксперимента по считыванию записанной ранее ГДС, а именно по исследованию дифракционных характеристик (угловой селективности) ГДС в ФПМ-ЖК с использованием разработанного программного обеспечения. Для выполнения данного эксперимента следует проверить наличие надписи «USMCDLL works» в правой части окна «Эксперимент считывания», выставить число точек, т.е. точность считанных значений, а также выставить диапазон углов поворота, на которые поворачивается образец ФПМ-ЖК с ГДС с помощью МВС (см. рисунок 4.7). Результатом проведения эксперимента считывания можно считать данные записанные в файл «ADC select data.csv», которые выгружаются туда после успешного проведения эксперимента, а также полученную зависимость дифракционной эффективности ГДС от угла поворота МПС (см. рисунок 4.7).

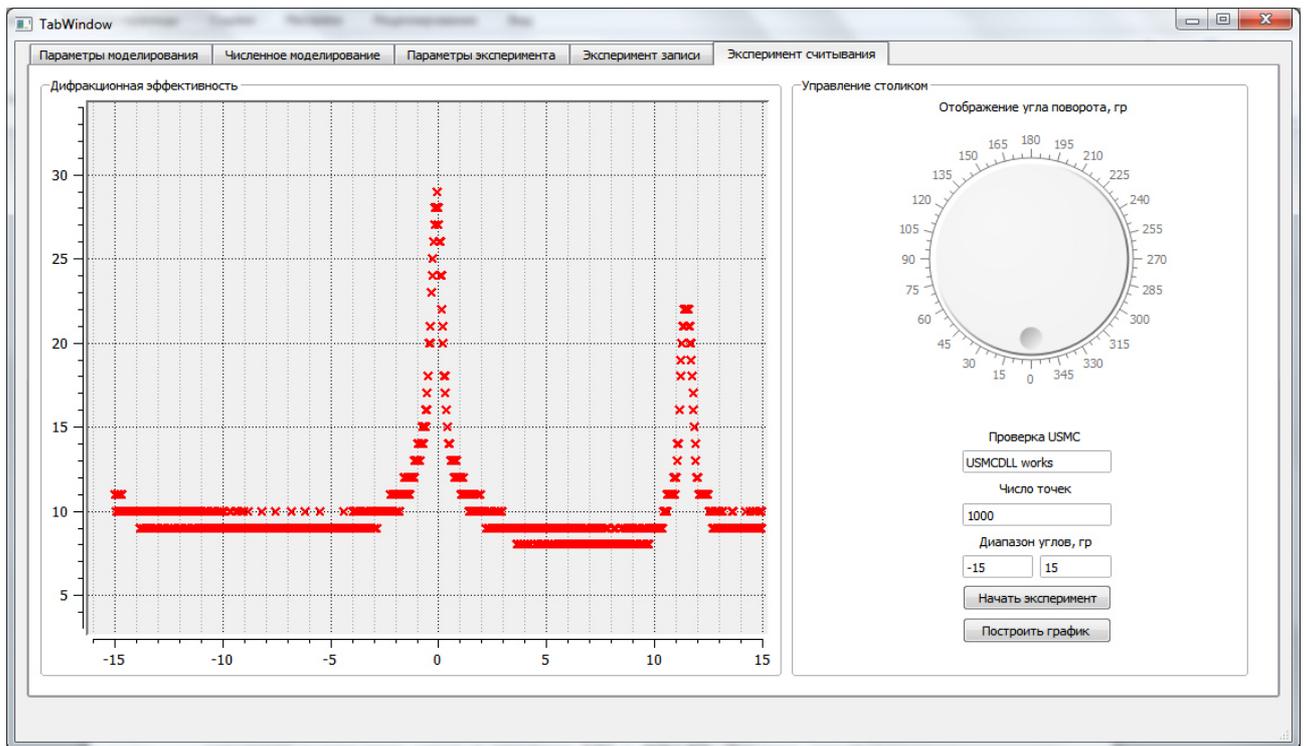


Рисунок 4.7 – Параметры эксперимента считывания и угловая селективность

Стоит отметить, что все численные данные, полученные в ходе проведения экспериментов, записываются в табличный файл с расширением «.csv» и располагаются в папке «Resources», которая в свою очередь расположена в папке, в которую установлен программный комплекс.

На финальной стадии лабораторной работы студент должен сопоставить результаты математического моделирования с результатами, полученными экспериментально в ходе выполнения экспериментов записи и считывания ГДС в ФПМ-ЖК. Для этого следует визуально сравнить зависимости дифракционных эффективностей от угла поворота образца ФПМ-ЖК полученные в результате численного моделирования и проведения экспериментов, путем наложения графиков друг на друга. Сопоставить результаты можно также путем построения двух зависимостей на одном графике, используя табличные данные, полученные в ходе выполнения лабораторной работы, так как это представлено на рисунке 4.8.

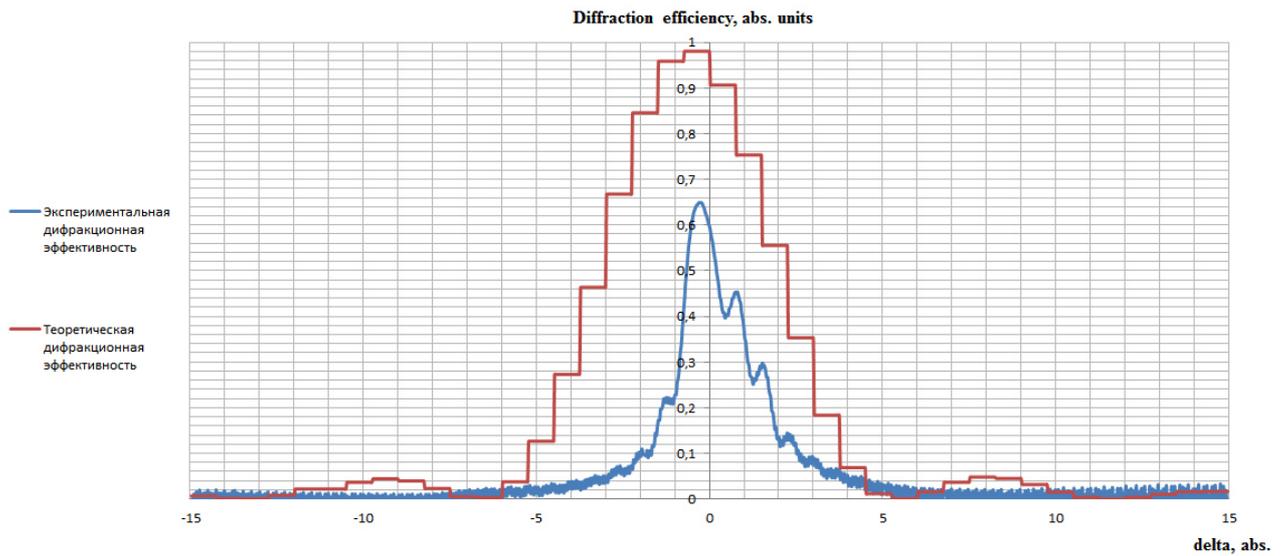


Рисунок 4.8 – Сопоставление результатов численного моделирования и экспериментальных результатов

В заключении студенту требуется сделать ряд сравнительных выводов и численно оценить полученные дифракционные эффективности. После успешного выполнения вышеперечисленных шагов лабораторная работа считается выполненной.

5. Содержание отчета

Отчет по проделанной работе должен содержать следующие разделы:

1. Цель работы;
2. Краткая теория;
3. Результаты работы – графики с краткими пояснениями полученных зависимостей и данные полученные в ходе численного моделирования и экспериментов;
4. Выводы по проделанной работе

6. Контрольные вопросы

1. Назовите основные параметры голографических дифракционных структур.
2. Из чего состоит фотополимеризующаяся композиция (ФПК)?
3. Как найти амплитуды взаимодействующих необыкновенных волн?

Список литературы

1. Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings // Bell Syst. Tech. J. 1969. Vol. 48. No. 9. pp. 2909-2947.
2. Guo J., Gleeson M.R., Sheridan J.T. A review of the optimisation of photopolymer materials for holographic data storage // Physics Research International. 2012. Vol. 12. No. 803439. pp. 1-16.
3. Liu Y.J., Sun X.W. Holographic Polymer-Dispersed Liquid Crystals: Materials, Formation, and Applications // Advances in OptoElectronics. 2008. No. 684349. pp. 1-52.
4. Li H., Yue Q., Sheridan J.T. Three-dimensional extended nonlocal photopolymerization driven diffusion model. Part I. Absorption // JOSA B. 2014. Vol. 31. No. 11. pp. 2638-2647.
5. Li H., Yue Q., Sheridan J.T. Three-dimensional extended nonlocal photopolymerization driven diffusion model. Part II. Photopolymerization and model development // JOSA B. 2014. Vol. 31. No. 11. pp. 2648-2656.
6. Шарангович С.Н., Довольнов Е.А., Ноздреватых Б.Ф., Шабанов А.А., Батаногов Р.Ю. Теоретическое и экспериментальное исследование формирования фотополимерных дифракционных решеток с учетом высших пространственных гармоник // Известия вузов. Физика. 2005. Т. 48. № 6. С. 105-106.
7. Dovolnov E.A., Sharangovich S.N., Sheridan J.T. Inharmonic theoretical models for photopolymers gratings formation // OSA Trends in Optics and Photonics. Washington. 2005. Vol. 99. pp. 469-474.
8. Коваленко Е.С., Шарангович С.Н. Динамика самоусиления голограмм в фотополимерных материалах // Известия вузов. Физика. 1997. № 1. С. 81-91.
9. Довольнов Е.А., Устюжанин С.В., Шарангович С.Н. Импульсная запись пропускающих и отражающих голографических решеток в поглощающих фотополимерах. 1. Теоретический анализ // Известия вузов. Физика. 2007. Т. 50. № 1. С. 58-65.
10. Довольнов Е.А., Миргород В.Г., Пен Е.Ф., Шарангович С.Н., Шелковников В.В. Импульсная запись пропускающих и отражающих голографических дифракционных решеток в поглощающих фотополимерах. 2. Численное моделирование и эксперимент // Известия вузов. Физика. 2007. Т. 50. № 4. С. 34-39.
11. Довольнов Е.А., Устюжанин С.В., Шарангович С.Н. Формирование пропускающих и отражающих голографических дифракционных решеток в фотополимерах при фотоиндуцированном изменении поглощения // Известия вузов. Физика. 2006. Т. 49. № 10. С. 81-89.

12. Gallego S., Neipp C., Estepa L.A., Ortuno M., Marquez A., Frances J., Pascual I., Belendez A. Volume Holograms in Photopolymers: Comparison between Analytical and Rigorous Theories // *Materials*. 2012. No. 5. pp. 1373-1387.

13. Ноздреватых Б.Ф., Устюжанин С.В., Шарангович С.Н. Векторная модель дифракции света на электрически управляемых неоднородных дифракционных структурах в фотополимеризующихся жидкокристаллических композиционных материалах // *Доклады ТУСУРа*. 2007. № 2(16). С. 192-197.

14. Семкин А.О., Шарангович С.Н. Взаимодействие световых пучков с голографическими фотонными ФПМ-ЖК-структурами при неоднородном управляющем электрическом поле // *Известия вузов. Физика* – 2013. – Т. 56, № 9/2 – С. 21-24.

15. Семкин А.О., Шарангович С.Н. Дифракционные характеристики фотонных ФПМ-ЖК структур при сложной дискретной пространственной неоднородности управляющего поля // *Доклады ТУСУРа* – 2014. – № 1(31) – С. 136-140.

16. Куркин А.В., Волченко К.В., Семкин А.О. Влияние плавной пространственной неоднородности управляющего поля на дифракционные характеристики фотонных ФПМ-ЖК структур // *Материалы 53-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2015: Квантовая физика / Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 2015. – С. 94.*

17. К.В. Волченко, В.О. Долгирев, А.В. Куркин, А.О. Семкин Влияние плавной пространственной неоднородности управляющего электрического поля на дифракционные характеристики фотонных ФПМ-ЖК структур // *Научная сессия ТУСУР-2015: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: В-Спектр, 2015. – Ч. 2. – С.110-112.*