

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

**«ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА  
ПЛЕНОЧНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ»**

Выполнил студент

405 группы

Бобровский Даниил Иванович

\_\_\_\_\_

подпись студента

Научный руководитель:

к.ф.-м. н. Попов Владимир Викторович

\_\_\_\_\_

подпись научного руководителя

Допущена к защите

Зав.кафедрой \_\_\_\_\_  
подпись зав.кафедрой

Москва

2017

# Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1. Дифракционные оптические элементы.....	5
1.1. Зонная пластинка Рэлея-Вуда.....	6
1.2. Профилированная зонная пластинка.....	8
1.3. Фокусаторы – первые элементы компьютерной оптики.....	10
1.4. Киноформы.....	12
Глава 2. Технологии формирования микрорельефа.....	13
2.1. Фотолитография.....	13
2.2. Электронно-лучевая литография.....	15
2.3. Взаимодействие электронов с резистом и материалом подложки... ..	18
Глава 3. Измерение рельефа ДОО с помощью АСМ микроскопии.....	20
Глава 4. Экспериментальная часть.....	23
4.1. Экспериментальные результаты работы оптических элементов.....	27
4.2. Получение рельефа большой глубины.....	29
4.3. Эффекты близости.....	33
4.4. Увеличение дифракционной эффективности.....	36
ВЫВОДЫ.....	40
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	40
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	41

# ВВЕДЕНИЕ

*Дифракционные оптические элементы (ДОЭ)* являются искусственными двумерными структурами, изменяющими в каждой точке своей поверхности фазу или амплитуду падающей на них электромагнитной волны и позволяющими сформировать пучки с заранее заданными свойствами. В общем случае форма поверхности рассчитывается путем решения обратной задачи дифракции и затем аппроксимируется кусочно-непрерывной функцией. Высота рельефа зависит от многих факторов, таких как используемые технологии и материалы, длина волны излучения, с которым должен работать оптический элемент.

ДОЭ до недавнего времени не находили широкого применения. Лишь в конце XX века благодаря развитию технологий их производства, а также лазерной техники стало возможно использовать их в различных областях, например, в промышленности, медицине и др. ДОЭ могут использоваться в качестве фокусаторов, создающих сложную диаграмму направленности, например, для преобразования гауссова пучка в однородный пучок прямоугольной формы. В настоящее время наиболее распространенным является применение ДОЭ в качестве средства идентификации подлинности различных товаров. Популярность пленочных отражающих ДОЭ связана, с одной стороны, с низкой себестоимостью изготовления при больших тиражах, а с другой стороны, со сложностью воспроизведения таких элементов. Все это делает их эффективным средством борьбы с контрафактной продукцией [13,14].

Технология изготовления оптических элементов на основе явлений отражения и преломления (линзы, призмы, зеркала) уже достаточно отработана, в то время как технология изготовления ДОЭ все еще бурно развивается. В отличие от рефракционных оптических элементов, ДОЭ разделяют световой поток на множество лучей и отклоняют каждый из них на свой угол. Однако отклонить все лучи и тем самым перенаправить всю

интенсивность под заданным углом получается редко. В связи с этим вводится понятие дифракционная эффективность, которая является отношением интенсивности отклоненного на нужный угол света к интенсивности падающего. Дифракционная эффективность элементов сильно зависит от точности изготовления фазового рельефа, поэтому исследование формирования ДОЭ для улучшения разрешения существующих методов изготовления ДОЭ представляют собой весьма актуальную задачу.

В данной работе исследуются способы создания ДОЭ, определяются оптимальные геометрические параметры для ДОЭ с необходимыми свойствами и максимальной дифракционной эффективностью.

# Глава 1. Дифракционные оптические элементы

Дифракционный оптический элемент (ДОЭ) представляет собой пропускающую или отражающую пластинку с тонким фазовым микрорельефом, рассчитанным в рамках теории дифракции. Первым представителем этого класса оптических элементов является *дифракционная решетка*, впервые созданная в 1821 году немецким физиком Фраунгофером. Следующим по хронологии представителем указанного класса оптических элементов является *зонная пластинка*, которую впервые в 1898 году изготовил Роберт Вуд. Если поставить на пути световой волны пластинку, которая перекрывала бы все нечетные (Рис.1.2 (a)) или четные (b) зоны, то интенсивность света резко возрастает. Такая пластинка, называемая *зонной*, действует как собирающая линза. Еще большего эффекта можно достичь, если не перекрывать четные (или нечетные) зоны, а изменить фазу их колебаний на  $\pi$ . Это можно осуществить с помощью прозрачной пластинки, толщина которой в местах четных (c) или нечетных зон изменена надлежащим образом. Такая пластинка называется *фазовой зонной* пластинкой. Если дифракционные решетки нашли широкое применение в приборостроении, то зонные пластины в основном использовались в учебном лабораторном практикуме по оптике для иллюстрации положений теории дифракции [1].

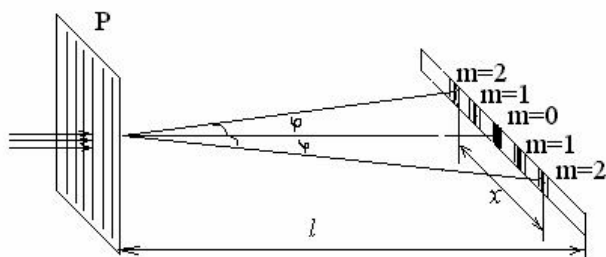


Рис. 1.1. Дифракционная решетка

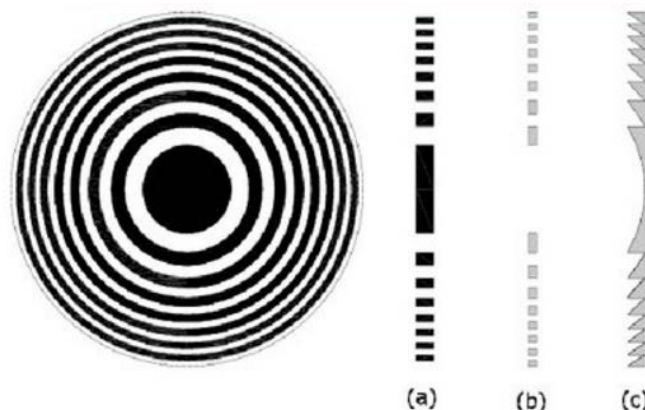


Рис. 1.2. Зонная пластинка Рэля-Вуда

## 1.1 Зонная пластинка Рэлея-Вуда.

В 1871 году лорд Рэлей сконструировал зонную пластинку из 15 зон, а первый доклад о зонных пластинках опубликовал Сорэ в 1875 году. Позже, в 1888 году, Рэлей впервые теоретически обосновал возможность существования фазовой линзы, у которой отсутствует нулевой порядок дифракции.

Он предположил, что если не задерживать свет чётных или нечетных зон (амплитудная зонная пластинка Френеля), а изменить его фазу на обратную, то интенсивность света в  $\pm 1$  порядках при этом возрастает в четыре раза, а нулевой порядок исчезнет. Эта идея лежит в основе фазовой зонной пластинки.

Такую пластинку в 1898 году изготовил Роберт Вуд, покрыв стекло слоем лака и сняв его с нечётных зон так, что разность хода лучей в них составляла  $\lambda/2$ . Стекланную пластинку, покрытую лаком, он поместил на вращающийся столик. Резец — им служила граммафонная игла — срезал слои лака, для внешних зон было достаточно одного прохода иглы, а на внутренних игла двигалась по узкой спирали, последовательно снимая несколько сливающихся бороздок. Диаметр зон и их ширину контролировали в микроскоп [2].

Зона – это ограниченная область ДОЭ, на которой функция пропускания света претерпевает однократное изменение от минимального до максимального значения. Для амплитудной дифракционной решетки зона представляет собой сочетание темной и светлой полос в пределах одного периода решетки. Граница зон при этом – прямая линия. Для зонной пластинки Рэлея–Вуда зона представляет собой совокупность темного и светлого колец переменной толщины (Рис.1.2). Граница зон при этом – окружность переменного диаметра. Радиусы окружности меняются пропорционально квадратным корням из последовательных целых чисел  $p$ :

$$\rho_p = \sqrt{p\lambda f} \quad (1), \text{ где } f \text{ – фокусное расстояние.}$$

Зонная пластинка выполняет функцию фокусировки света и ведет себя как линза с множеством фокусов  $f_{-2}, f_{-1}, f_0, f_1, f_2$ , соответствующих различным порядкам дифракции и расположенных на оси распространения света:

$$f_n = \frac{f}{2n+1}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2)$$

Интенсивность света убывает с ростом номера порядка по закону

$$I_{2n+1} = \frac{4}{\pi^2} \frac{1}{(2n+1)^2} \quad (3)$$

Совершенствование базовых ДОЭ, какими являются 1D дифракционные решетки, возможно за счет изменения профиля зон. При этом получают так называемые решетки с блеском.

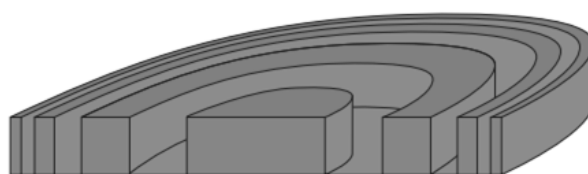
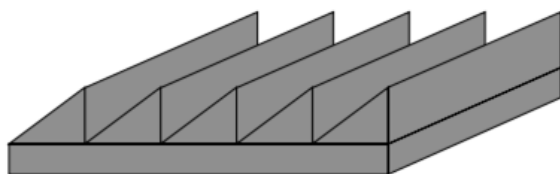


Рис. 1.3. (1D) Дифракционная решетка с блеском

Рис. 1.4. Бинарная фазовая зонная пластинка

Для двумерных (2D) дифракционных решеток естественными являются построение зон, отличных от периодических щеле- и кольцеобразных, и выявление новых функциональных возможностей ДОЭ. Несмотря на кажущуюся очевидность данного вопроса, с момента создания зонной пластинки он не поднимался в течение многих лет по причине отсутствия практической возможности реализации зонных пластинок с варьируемым характером зон [9].

## 1.2. Профилированная зонная пластинка – дифракционный аналог сферической линзы.

Уравнение фазовой функции сферической линзы в параксиальном приближении имеет вид  $\varphi(u, v) = \varphi(r) = -k \frac{u^2 + v^2}{2f}$  при  $r \leq \frac{D}{2}$ , (4)

где  $k = 2\pi/\lambda$  - волновое число,  $f$  - фокусное расстояние,  $D$  - диаметр линзы,  $r = \sqrt{u^2 + v^2}$ .

Если материал линзы имеет коэффициент преломления  $n$ , то максимальная высота рельефа составляет  $h_{max} = \frac{\lambda}{n-1}$  и имеет высоту порядка длины волны. Высота микрорельефа определяется по формуле

$$h(r) = \frac{\lambda}{n-1} * \frac{1}{2\pi} \text{mod}_{2\pi} \varphi(r). \quad (5)$$

Радиусы зон Френеля можно найти из соотношения  $\varphi(r_j) = -2\pi j$ , откуда следует

$$r_j = \sqrt{2\lambda f j}, \text{ где } j - \text{ порядковый номер зоны.} \quad (6)$$

Число полных зон  $j_0$  на линзе определяется из условия  $r_{j_0} \leq D/2$  и удовлетворяет соотношению

$$j_0 = \left[ \frac{D^2}{8\lambda f} \right], \quad (7)$$

где  $[*]$  – целая часть с округлением в меньшую сторону.

Трудности практической реализации ДОО обусловлены необходимостью создания поверхностного микрорельефа [1], максимальная высота которого, исходя из длины волны  $\lambda$  и коэффициента преломления среды  $n$ , определяется:

$$h_{max} = \frac{\lambda}{n-1}. \quad (8)$$

Менее важной, но существенной, является величина ширины зоны:

$$\Delta_j = r_j - r_{j-1}, j = 1, 2, \dots, k, \quad (9)$$



где  $j$  – порядковый номер зоны;  $r_j$  - радиусы Френеля дифракционной линзы, определяемые приблизительно как:  $r_j = \sqrt{2\lambda f j}$ ,  $f$  – фокусное расстояние элемента. В общем случае характерная ширина зоны определяется длиной волны  $\lambda$  и отношением  $f$  к  $D$ :  $\Delta = 2\lambda \frac{f}{D}$ . (10)

На рис.1.5 приведен график зависимости ширины зоны от ее номера для фокусного расстояния 500мм и длины волны 500нм. В соответствии с формулой (9), получаем  $\Delta_j = \sqrt{2\lambda f j} - \sqrt{2\lambda f (j - 1)}$ . Ширина зон плоской сферической линзы является переменной и уменьшается к периферии линзы.

Характерным параметром является ширина  $\Delta$  самой узкой (в данном случае последней) периферийной зоны, определяющей требования к технологическому оборудованию. Присутствие в выражениях (6) и (8) параметра  $\lambda$  свидетельствует о том, что основополагающие параметры микрорельефа  $h_{max}$  и  $\Delta_{jmin}$  могут достигать весьма малых значений (см. таб. 1 при  $n=1,5$ ) [10].

Фокусное расстояние, мм	$\lambda$ , мкм	$\Delta_1$ , мм	$\Delta_{50}$ , мм	$h_{max}$ , мкм
500	1,0	1,0	0,07	2,0
	0,5	0,71	0,05	1,0
	0,1	0,32	0,02	0,2
100	1,0	0,46	0,03	2,0
	0,5	0,32	0,02	1,0
	0,1	0,14	0,01	0,2

Таблица 1.

Зависимость параметров микрорельефа от длины волны для различных фокусных расстояний оптического элемента

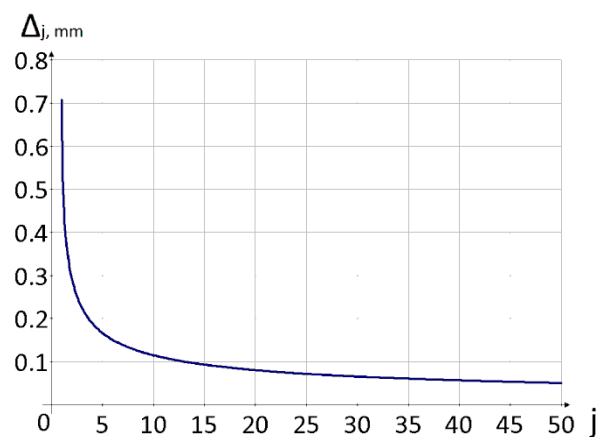


Рис. 1.5. График зависимости ширины зоны от ее номера  $j$

Сравним между собой уравнения радиусов колец зонной пластинки Рэля–Вуда (1) и сферической плоской линзы (6). Видим, что радиусы зон на линзе в  $\sqrt{2}$  раз больше радиусов колец на зонной пластинке. Соответственно при заданном диаметре число колец на зонной пластинке в 2 раза больше, то есть каждому кольцу сферической плоской линзы соответствуют два кольца зонной пластины: темное и светлое. «Плоская» сферическая линза имеет

непрерывный (в пределах зоны) фазовый рельеф, а фазовая зонная пластинка имеет аппроксимирующий его многоуровневый ступенчатый рельеф.

На рис. 1.7. показан пример равномерного квантования фазы плоской сферической линзы Френеля на четыре уровня.

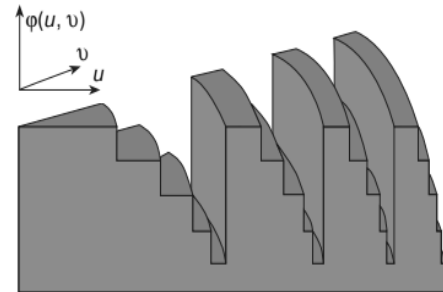
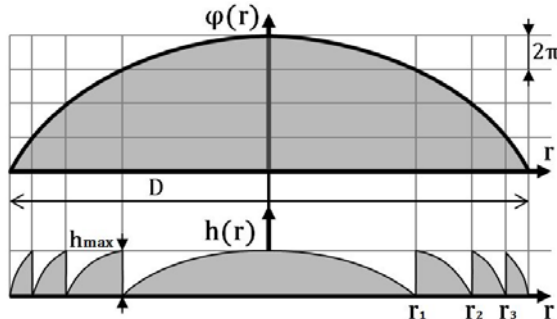


Рис. 1.6. Приведение фазовой функции линзы к интервалу  $[0; 2\pi)$

Рис. 1.7. Ступенчатая аппроксимация фазовой функции сферической линзы

Для того чтобы создать двумерные (2D) ДОЭ, необходимо было построить зонную пластинку с варьируемым характером зон. Традиционными методами этого добиться на тот момент не удавалось, необходимо было решать сложные математические задачи, которые решались численными методами, именно поэтому применение компьютеров произвело толчок в создании более сложных ДОЭ.

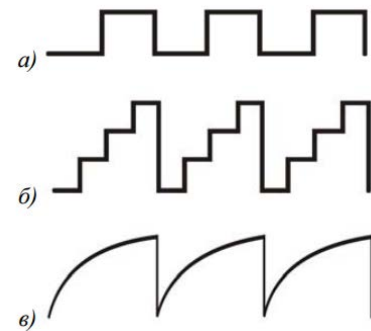


Рис.1.8. Профили микрорельефов ДОЭ: (а) – бинарный; (б) – многоуровневый; (в) – кусочно-непрерывный

### 1.3. Фокусаторы – первые элементы компьютерной оптики

Фокусаторы – это ДОЭ, фокусирующие лазерное излучение в тонкие линии или малые области пространства, рассчитанные в геометрооптическом (лучевом) приближении и имеющие регулярную структуру микрорельефа. Они были предложены и впервые исследованы в нашей стране в 1981г [1]. Задача фокусаторов является обратной задачей синтеза оптических элементов. Расчет фокусатора – это расчет формы зон и высоты рельефа в каждой зон, т.е. необходимо найти поле, все лучи которого проходят через

некую фигуру, создавая в ней требуемое распределение интенсивности. Для этого необходимо решить геометрическую задачу, а именно произвести расчет семейства слоев в области  $G$ . Рассмотрим, например, фокусатор плоского пучка круглого сечения радиуса  $R$  в дугу окружности. Фазовая функция имеет вид:  $\varphi(\xi, t) = -\frac{k}{2f}(p^2(\xi) + t^2) - \frac{k}{f}(tR_1 + \int_0^\xi p(\eta)d\eta)$ , (11)

Где  $R_1$  – радиус дуги,  $p(\xi)$  – функция, описывающая слои,  $t$  – координата.

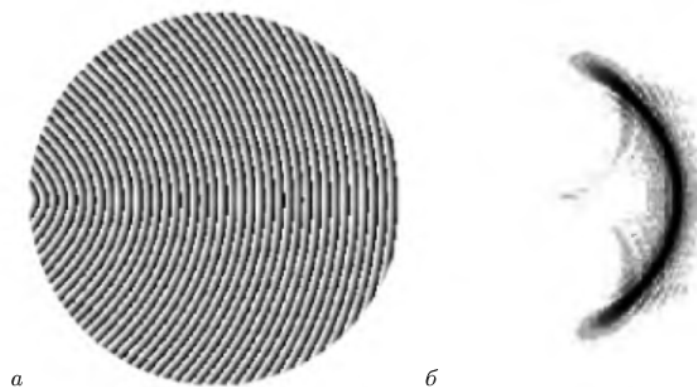


Рис. 1.9. Фазовая функция фокусатора для фокусировки в дугу окружности (а), распределение интенсивности в плоскости фокусировки (б)

Технологии изготовления фокусаторов определяет минимально возможную ширину  $\Delta$  зоны Френеля. При нормальном падении излучения на фокусатор  $\Delta \approx \lambda/\alpha$ , где  $\alpha$  – угол отклонения прошедшего или отраженного луча от нормали. Величина  $\Delta$  определяет максимально возможную энергетическую эффективность фокусатора. Современная технология литографии позволяет создавать элементы величиной  $\Delta \approx 20\lambda$  [ $\lambda = 0.5\mu$ ] и  $\Delta \approx 6\lambda$  [ $\lambda = 10\mu$ ] с эффективностью порядка 70-80% (многоградационные элементы с 6-8 градациями), а с  $\Delta \approx 2\lambda$  – с эффективностью 30-40% (бинарные элементы). При этом увеличение  $\Delta$  приводит к увеличению энергетической эффективности при той же технологии [1,15].

Преимуществами фокусаторов являются высокая энергетическая эффективность и относительно большие размеры зон, позволяющие создать фокусаторы, выдерживающие излучение технологических  $\text{CO}_2$  лазеров. Фокусаторы, рассчитанные геометрическими методами, имеют сложный, кусочно-гладкий, непрерывный рельеф, в отличие от киноформов.

## 1.4. Киноформы

Киноформы представляют собой тонкую фазовую пластинку с постоянным амплитудным пропусканием и фазовым пропусканием, определяемым фазой  $\varphi_T(u, v)$  комплексной функции пропускания. При изготовлении киноформа вычисляют распределение фаз объектной волны, а экспонированием фоточувствительного материала управляют таким образом, что результирующая прозрачность оказывается фазовой маской. При освещении этой маски однородной плоской волной восстанавливается распределение фаз объектной волны.

Киноформы рассчитываются итерационными методами и имеют в результате сложный несимметричный рельеф. Они создают изображение, состоящее из совокупности дискретных точек дифракционного размера, расположенных в одной плоскости, параллельной плоскости киноформа.

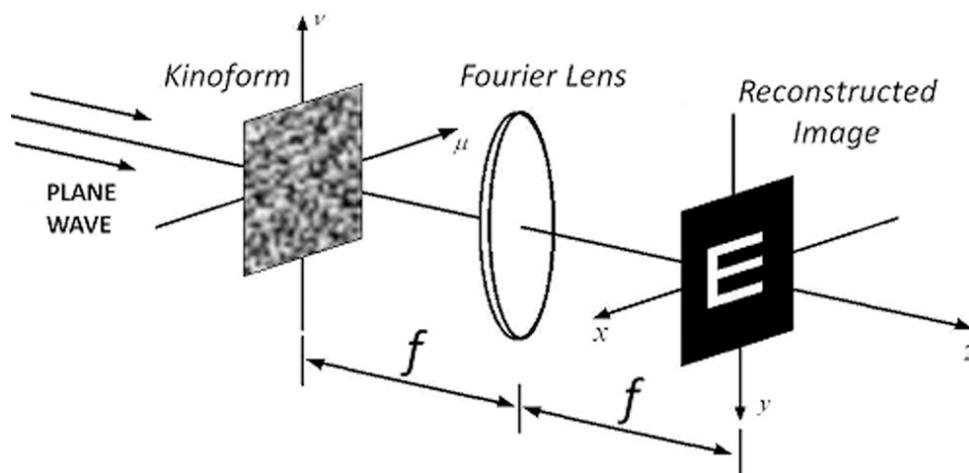


Рис. 1.10. Профиль киноформа и восстановленное изображение

В результате прогресса в области микроэлектроники и лазерной техники появилась возможность записи на физическую среду комплекснозначных функций и получение соответствующих амплитудно-фазовых транспарантов с помощью прецизионных фотопостроителей и электронных литографов. Появились ДОО со сложным профилем зон и с уникальными характеристиками, недостижимыми в рамках традиционной оптики [1].

## Глава 2. Технологии формирования микрорельефа

С точки зрения практической реализации ДОЭ наибольшее распространение получили два типа фазового микрорельефа: ступенчатый (бинарный и многоуровневый) и кусочно-непрерывный. Особое внимание специалистов в области дифракционной оптики привлекают технологии формирования микрорельефа, основанные на достижениях и оборудовании микроэлектроники [1].

*Литография* — это метод получения заданной структуры на поверхности с использованием облучения пленки резиста заряженными частицами или коротковолновым электромагнитным излучением. По способу воздействия литография разделяется на *фотолитографию* (облучение ультрафиолетовым излучением), *рентгеновскую литографию* (облучение рентгеновским излучением), *электронно-лучевую* (облучение электронами) и *ионно-лучевую* (облучение ионами) [3].

### 2.1. Фотолитография

Перенос рисунка микрорельефа ДОЭ в поверхностный слой подложки методом *фотолитографии* происходит в шесть этапов (рис. 2.1):

- 1) *Очистка и подготовка поверхности*: при наличии на пластине загрязнений, пластина может быть отмыта в ходе двухступенчатого процесса: очистка ацетоном, далее для устранения органических загрязнений и последующее полоскание в изопропанолу для удаления оставшегося ацетона.
- 2) *Нанесение фоторезиста*. Существует три основных метода нанесения фоторезиста: центрифугирование, погружение в фоторезист, аэрозольное распыление.

После нанесения резиста необходимо провести его предварительную сушку (задубливание). Для этого образец выдерживается несколько минут в печи, при температуре 100 – 120°C.

3) *Экспонирование*: процесс экспонирования заключается в засветке фоторезиста через фотошаблон светом видимого или ультрафиолетового диапазона. Наиболее стандартными длинами волны экспонирования в фотолитографии являются i-линия (365нм), h-линия (406нм) и g-линия (436нм).

Основными параметрами экспонирования являются:

- Длина волны
- Время экспонирования
- Мощность источника излучения

4) *Проявление фоторезиста*: при проявлении используется специальный концентрированный проявитель, в результате которого происходит растворение не проэкспонированных участков фоторезиста.

5) *Обработка поверхности*: поверхность подвергается травлению, ионной имплантации или электроосаждению.

6) *Удаление фоторезиста*: финальным этапом фотолитографии является снятие фоторезиста. Для удаления фоторезиста с обработанной поверхности используют специальную жидкость – сниматель.

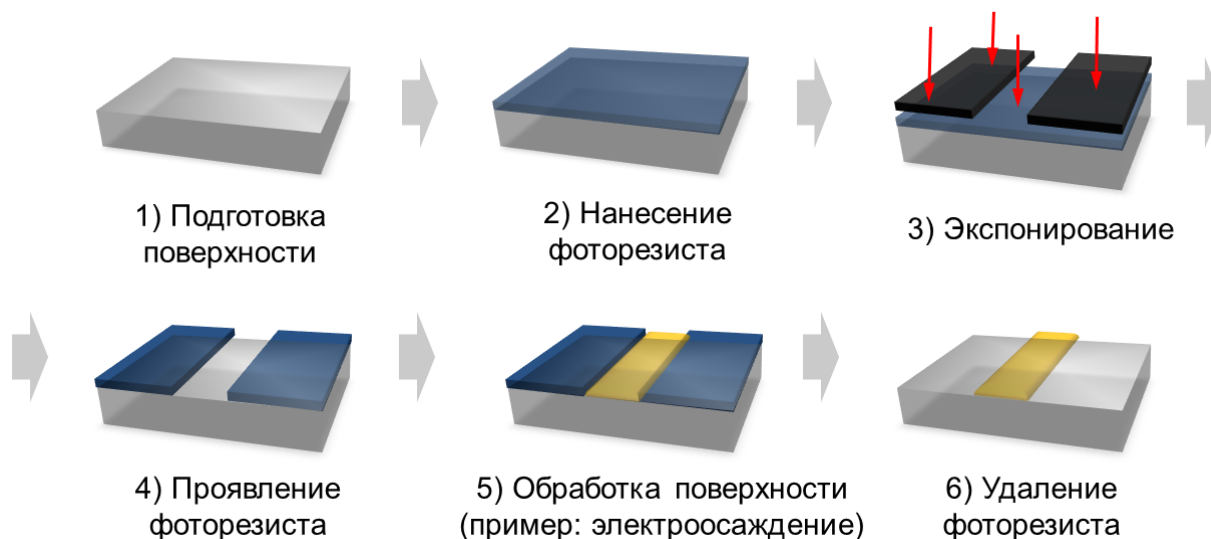


Рис. 2.1. Этапы фотолитографии

На каждой из стадий процесса действуют факторы, искажающие исходный рисунок шаблона. При экспонировании имеют место явления дифракции, преломления и отражения света, приводящие к изменению

размеров элементов рисунка и размытости их краев. Искажения размеров на четвертом этапе (проявления и задубливания) обусловлены набуханием слоя фоторезиста и усадкой фотомаски при тепловой обработке. При травлении негативным фактором является боковое подтравливание под маску.

Условия, в которых происходит обработка на разных стадиях, изменяются как от пластины к пластине, так и в пределах одной пластины. Это приводит к разбросу геометрических параметров микрорельефа и, соответственно, характеристик оптического элемента, что следует учитывать при отработке технологии изготовления ДОЭ [10].

Наименьшее разрешение в фотолитографии определяется длиной волны источника света, качеством применяемой при экспонировании оптики, свойствами фоторезиста и достигает порядка 100 нм. Данный метод позволяет достаточно просто изготавливать и тиражировать ДОЭ с бинарным фазовым профилем, однако создать более сложные структуры с меньшим разрешением весьма сложно. Поэтому для таких задач применяют электронно-лучевую литографию, которая позволяет на нынешнем уровне развития технологии получать структуры с разрешением менее 1 нм, недостижимым для жесткого ультрафиолетового излучения.

### 2.3. Получение многоградационного рельефа с помощью электронно-лучевой литографии

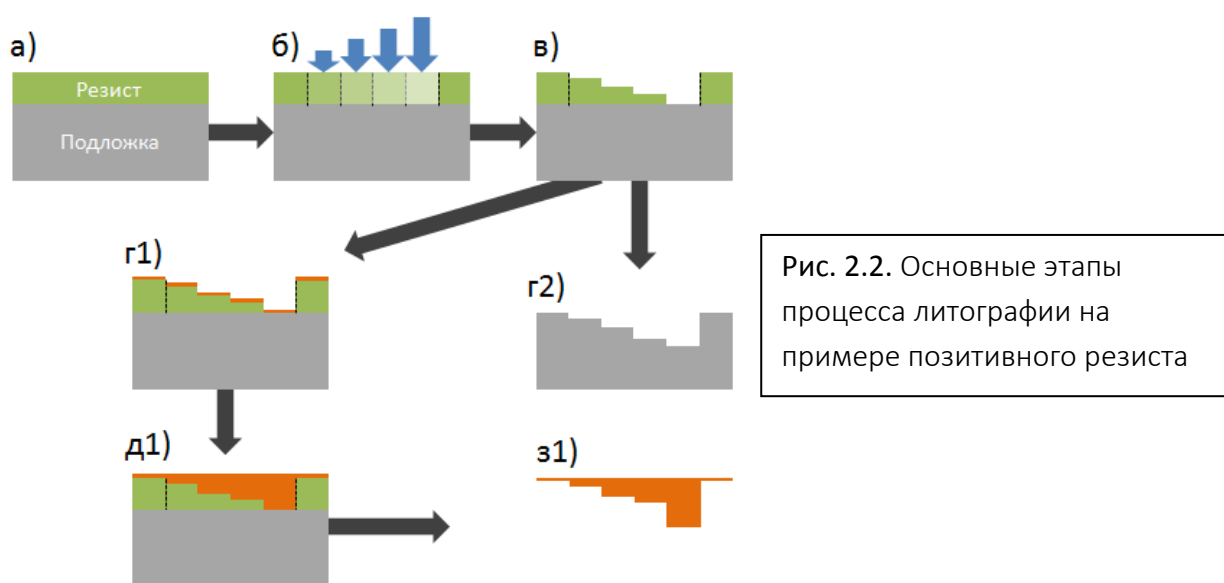
При использовании фотолитографии для получения более сложных рельефов можно пытаться повторять, совмещая операции, описанные выше, но это долгий и неэффективный процесс. Между тем, электронно-лучевая литография позволяет сразу получить многоградационный рельеф в одном процессе при экспонировании резиста с различными дозами.

В электронно-лучевой литографии используется последовательное воздействие сфокусированным электронным пучком на точки экспонируемой структуры. При этом переход от точки к точке может осуществляться путем

отклонения пучка электронов, что позволяет производить сканирование с высокой скоростью.

Процесс электронно-лучевой литографии можно разделить на несколько этапов:

- 1) Нанесение резиста на подложку (рис.2.2 а)
- 2) Воздействие заряженными частицами - экспонирование резиста с различными дозами (рис.2.2 б)
- 3) Растворение проэкспонированного резиста (в случае позитивного резиста) – проявка или ионное травление подложки через слой резиста (рис.2.2 в)
- 4) Напыление металла на подложку (рис.2.2 г1, д1)
- 5) Получение копии рельефа методом гальванопластики (рис.2.2 з1)

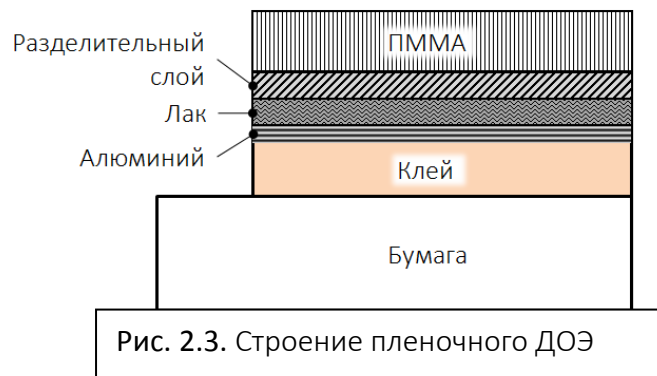


В результате всех проделанных операций получается рельеф на резисте, который не является конечным оптическим элементом, т.к. резист не является стойким материалом, к тому же чаще всего используется непрозрачная подложка, поэтому существует необходимость перенесения рельефа на другой носитель.

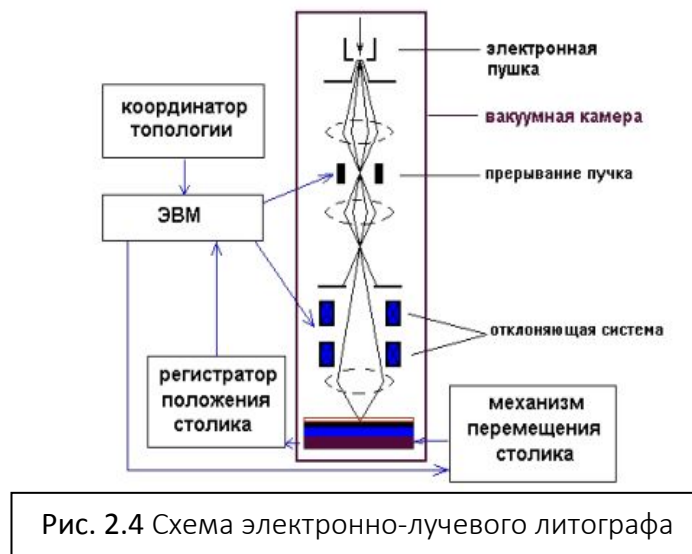
Если необходимо получить оптический элемент, работающий с прецизионной оптикой (лазерами и т.д.), то рельеф, полученный в виде



резиста, подвергается репликации на прозрачных материалах. Репликация может производиться несколькими способами: заливкой резиста различными отверждающими материалами или получение рельефных металлических копий путем тиснения на термопластическом материале с нагревом на полиметилметакрилате или на различных термопластиках – именно таким способом получают *тонкопленочные дифракционные оптические элементы*. На рис.2.3 представлена структура такого элемента.



Для осуществления процесса экспонирования необходим источник электронов, система фокусировки электронного пучка, отклоняющая система для сканирования пучком по поверхности резиста и система отключения электронного пучка, которая необходима, чтобы избежать экспонирования участков резиста между элементами структуры в процессе перемещения пучка. Большинство перечисленных элементов присутствуют в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ).



Основным параметром процесса экспонирования является доза экспонирования – энергия воздействия на единицу площади резиста. В электронной литографии часто используется величина заряда электронов, воздействующих на единицу площади резиста (мкКл/см<sup>2</sup>). Существует пороговая доза экспонирования, необходимая для изменения скорости растворения резиста.

Необходимо помнить, что всегда существует размытие электронного пучка вследствие рассеяния электронов в пленке резиста, что приводит к частичному облучению областей резиста, граничащих с точками облучаемой структуры. При увеличении дозы экспонирования выше пороговой размер получаемой структуры может увеличиваться за счет полного экспонирования этих областей. *Размытие пучка ограничивает минимально возможный размер элементов*, который могут быть получены с помощью литографии.

Электронная литография является основным методом получения масок для использования в последующей фотолитографии при производстве монолитных микросхем. Альтернативным способом создания масок является лазерная технология, однако эта технология имеет меньшее разрешение [3].

## 2.4. Взаимодействие электронов с резистом и материалом подложки

*Резист* – материал, изменяющий свои свойства под действием коротковолнового электромагнитного излучения и ускоренных заряженных частиц. В процессе электронной литографии используется изменение растворимости резиста в специфических растворителях под действием электронов. Принято разделять резисты на позитивные и негативные.

*Позитивный резист* представляет собой полимер (например полиметилметакрилат) в котором при экспонировании происходит разрыв молекул. *Негативный резист*, как правило, полимеризуется при экспонировании.

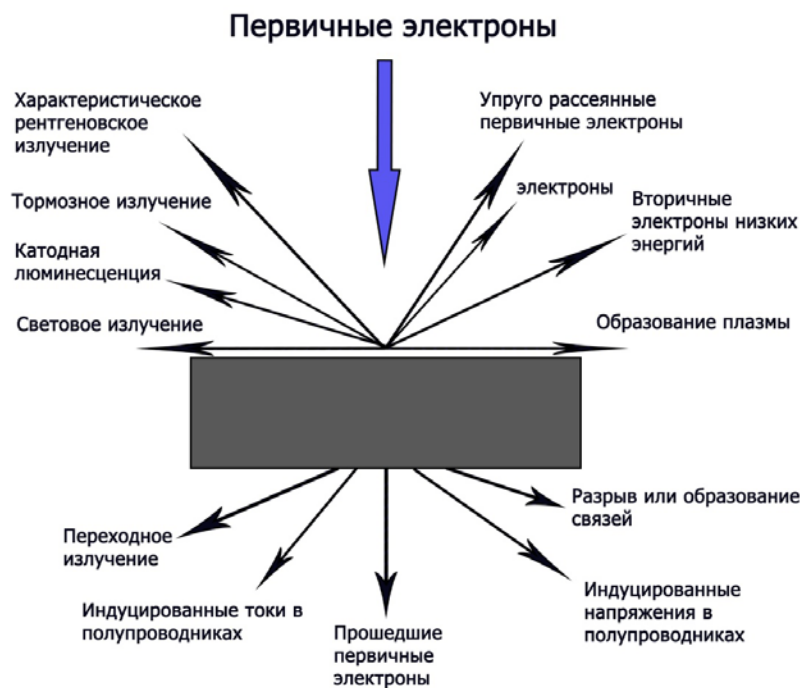


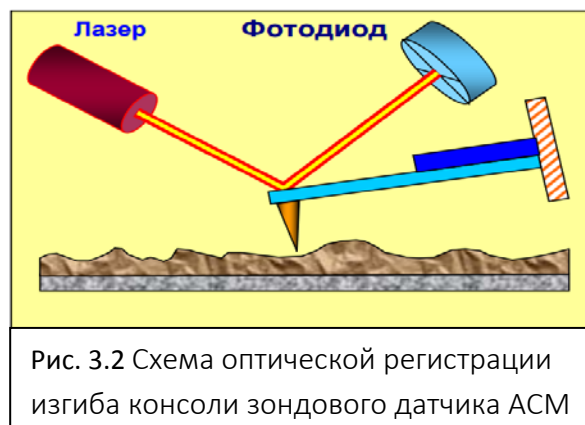
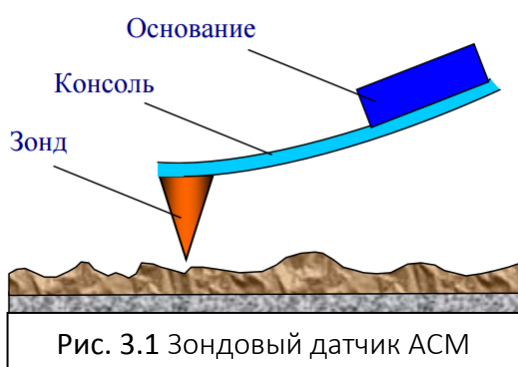
Рис. 2.5 Основные виды взаимодействия электронов с веществом

*Характеристики резиста:* чувствительность позитивного резиста – это минимальная необходимая для проявления резиста до дна доза экспонирования. Чувствительность позитивного резиста характеризует дозу, которую необходимо передать участку этого резиста для его полной прояски за приемлемое время (обычно 1-2 минуты). Чувствительность, как и дозу экспонирования электронного резиста обычно измеряют в Кл/см<sup>2</sup>. Для определения чувствительности обычно используют тестовую структуру, состоящую из массива одинаковых элементов (например, квадратов) с различной дозой экспонирования. Задаётся определённый шаг дозы от одного элемента к следующему. После экспонирования и проявления тестовой структуры, для позитивного резиста ищут среди проявившихся до дна элементов, тот, который был проэкспонирован с минимальной дозой. Эту дозу и принимают равной чувствительности позитивного резиста.

### Глава 3. Измерение рельефа ДОЭ с помощью атомно-силовой микроскопии

Измерение рельефа является необходимой частью процесса изготовления оптических элементов, т.к. высота и форма рельефа являются критически важными параметрами и напрямую влияют на дифракционную эффективность и свойства ДОЭ. Существуют различные методы измерения профиля рельефа ДОЭ, начиная с простых механических профилометров, заканчивая сложными компьютеризованными комплексами, однако на данный момент самым современным и точным является метод АСМ [13].

*Атомно-силовой микроскоп (АСМ)* был изобретён в 1986 году Гердом Биннигом, Кэлвином Куэйтом и Кристофером Гербером. В основе работы АСМ лежит силовое взаимодействие между зондом и поверхностью, для регистрации которого используются специальные зондовые датчики, представляющие собой упругую консоль с острым зондом на конце (рис. 3.1). Сила, действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли. Регистрируя величину изгиба, можно контролировать силу взаимодействия зонда с поверхностью [6].



Под силами, действующими между зондом и образцом, в первую очередь подразумевают дальнедействующие силы Ван-дер-Ваальса, которые сначала являются силами притяжения, а при дальнейшем сближении переходят в силы отталкивания. В зависимости от характера действия силы

между кантилевером и поверхностью образца выделяют три режима работы атомно-силового микроскопа: контактный, бесконтактный, полуконтактный.

**1. Контактный режим работы.** При работе в контактном режиме острие кантилевера находится в непосредственном контакте между образцом и поверхностью. Сканирование осуществляется, как правило, в режиме постоянной силы, когда система обратной связи поддерживает постоянной величину изгиба кантилевера. Изгиб консоли  $\Delta Z$ , пропорциональный силе, действующей на зонд со стороны поверхности, записывается для каждой точки. Изображение в таком режиме представляет собой пространственное распределение силы взаимодействия зонда с поверхностью.

*Достоинства метода:*

Наибольшая по сравнению с другими методами помехоустойчивость;

Наибольшая достижимая скорость сканирования;

Наилучшее качество сканирования поверхностей с резкими перепадами рельефа.

*Недостатки метода:*

При сканировании в открытой атмосфере на зонд действуют капиллярные силы, внося погрешность в определение высоты поверхности;

Практически непригоден для изучения объектов с малой механической жёсткостью.

**2. Бесконтактный режим работы.** В бесконтактном режиме пьезовибратором возбуждаются колебания зонда на некоторой резонансной частоте. Сила, действующая со стороны поверхности, приводит к сдвигу амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик зонда, и амплитуда и фаза изменяют значения. Система обратной связи, как правило, поддерживает постоянной амплитуду колебаний зонда, а изменение частоты и фазы в каждой точке записывается. Однако возможно установление обратной связи путём поддержания постоянной величины частоты или фазы колебаний.

*Достоинства метода:* Отсутствует воздействие зонда на исследуемую поверхность.

*Недостатки метода:* крайне чувствителен ко всем внешним шумам, наименьшее латеральное разрешение, наименьшая скорость сканирования, функционирует лишь в условиях вакуума.

**3. Полуконтактный режим работы.** При работе в полуконтактном режиме также возбуждаются колебания кантилевера. В нижнем полупериоде колебаний кантилевер касается поверхности образца.

*Достоинства метода:* латеральные силы, действующие на зонд со стороны поверхности, устранены — улучшаются получаемые изображения.

*Недостатки метода:* максимальная скорость сканирования меньше, чем в контактном режиме. [7]

### Конструкция атомно-силового микроскопа

Основными конструктивными составляющими АСМ являются:

- Жёсткий корпус, удерживающий систему
- Держатель образца, на котором образец впоследствии закрепляется
- Устройства манипуляции
- Зонд
- Система регистрации отклонения зонда. Система обратной связи
- Управляющий блок с электроникой

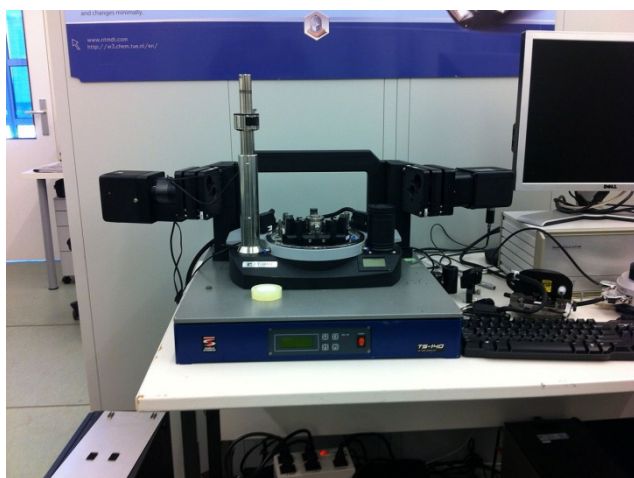


Рис. 3.3 Атомно-силовой микроскоп



Рис. 3.4. График зависимости силы Ван-дер-Ваальса от расстояния между кантилевером и поверхностью

## Глава 4. Экспериментальная часть

### Постановка задачи

Оптический элемент характеризуется различными параметрами, такими как высота, форма рельефа, линейность рельефа и т.д., которые напрямую влияют на свойства и дифракционную эффективность элемента. Варьируя эти параметры, можно получить те или иные оптические элементы с необходимыми свойствами. Поэтому целью настоящей работы было изучить, какими методами можно создавать ДОЭ с наилучшими параметрами, используя электронно-лучевой литограф, который экспонирует резист с различными дозами и атомно-силовой микроскоп, с помощью которого ведется контроль полученного рельефа. В результате необходимо было получить оптический элемент с оптимальными геометрическими параметрами и оптическими свойствами.

### Выполнение эксперимента

Методика эксперимента заключалась в следующем: мы использовали возможность электронно-лучевого литографа экспонировать резист с различными дозами и таким образом создавать многоградационный рельеф, затем с помощью АСМ проводились измерения полученного образца, в результате которых делались соответствующие поправки и выводы. Кроме того, в работе [14] была разработана программа, симулирующая рассеяние электронов в толще резиста, с помощью которой были подобраны соответствующие дозы (Таблица 2), по которым в последующем была получена пластина с серией тестовых решеток. С использованием полученных доз, были изготовлены решетки с различными периодами: 1.2, 1.5, 1.6, 2.0  $\mu$  и интенсивностями 200, 250, 300. Под интенсивностями подразумеваются некоторые коэффициенты, на которые умножаются рассчитанные в программе дозы, для того чтобы получить реальные значения доз с которыми производится экспонирование.

Возможны различные стратегии экспонирования резиста (рис.4.2). В первом варианте сканирование электронным пучком производилось одиночными дозами (single), т.е. узкая полоса излучения, определенных меняющихся доз воздействует на резист, изменяя тем самым его растворимость. После облучения происходит химическое травление, при котором из-за разности в скорости травления по-разному проэкспонированных участков и возникает многоградационный рельеф. Существуют недостатки данного метода: при экспонировании узкой полосой излучения возможно появление астигматизма луча, в результате в разных областях ширина полосы может отличаться: в одной полосе интенсивность может быть больше, а в другой – меньше. При поочередном сканировании электронным пучком резиста отклонения ширины полосы будут накладываться друг на друга на границах областей, и появятся неровности по краям. К тому же могут появляться неоднородности при стыковке. Поэтому было предложено использовать еще один способ экспонирования – сканировать не узкими полосами, а широкими, т.е. разбить одиночные дозы на слои (slicing). При этом доза излучения, попавшая в каждую точку резиста, должна быть такой же, как и при сканировании первым способом. Далее с помощью АСМ были измерены профили данных решеток.

Период	Высота	Градации				
		1	2	3	4	5
1.2μ, 4x0.3	210nm	0	5	8	10.3	-
1.5μ, 5x0.3	238nm	0	4	6.7	8.4	9.9
1.6μ, 4x0.4	278nm	0	5	7.9	10.1	-
2.0μ, 4x0.5	360nm	0	4.9	7.8	10.2	-

Таблица 2. Рассчитанные дозы для получения многоградационного рельефа

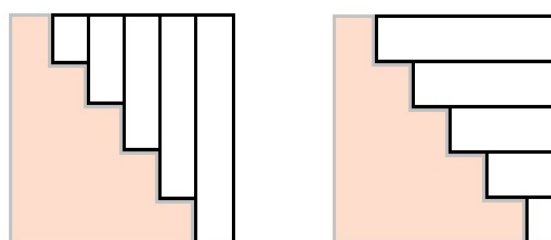


Рис.4.1. Способы экспонирования  
а)Single б) Slicing

На рис.4.2 приведены сравнительные графики получившихся рельефов для различных периодов и интенсивностей. Теории соответствует рельеф, рассчитанный программно для интенсивности 200, 250, 300. Так как мы не знаем точного соответствия времени экспозиции в программе и в реальных условиях, экспериментально были подобраны значения времени проявки, которые соответствуют полученному рельефу.



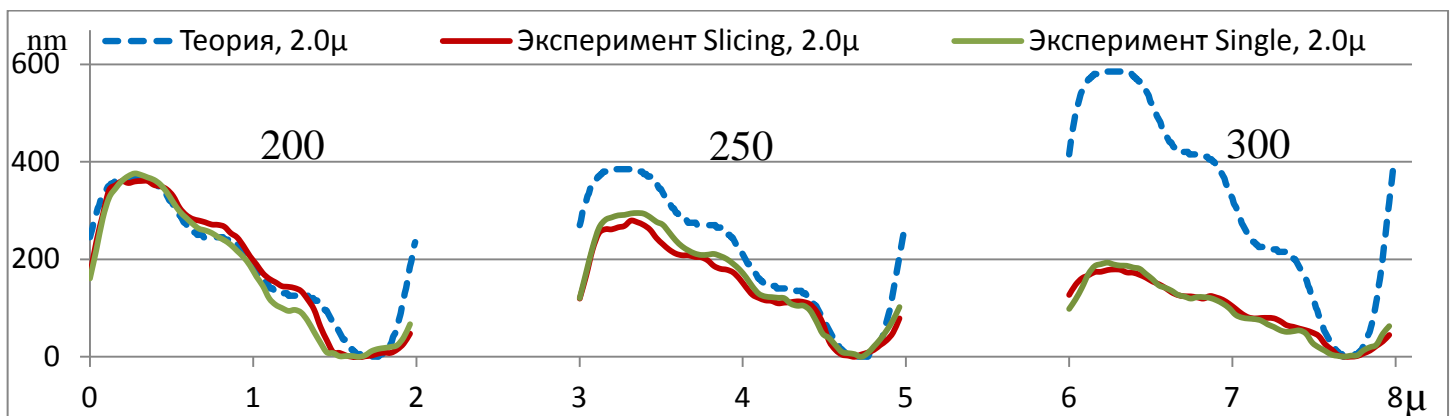
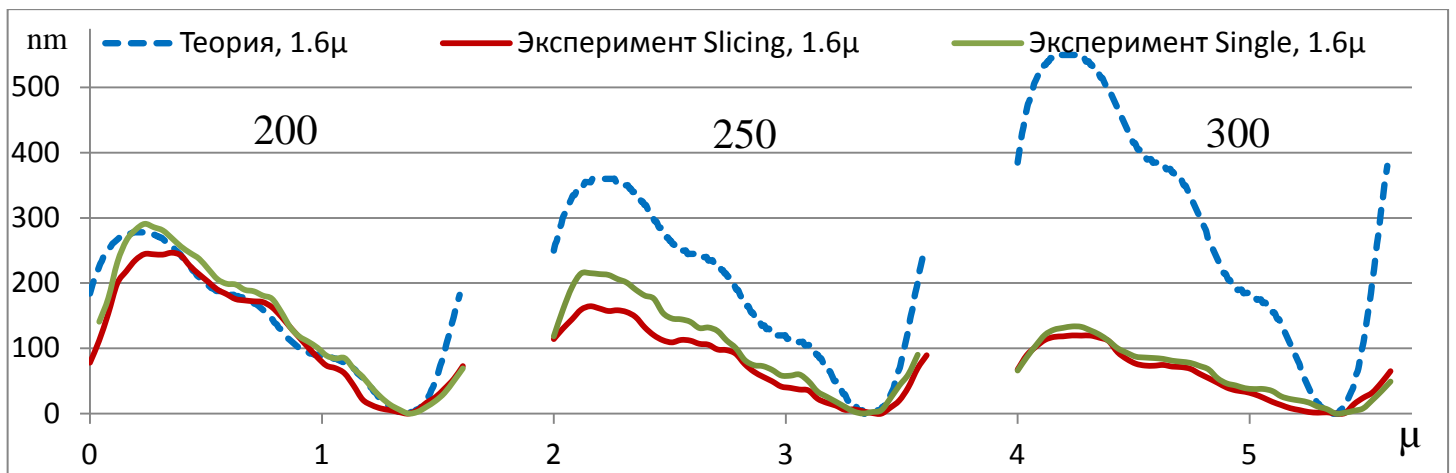
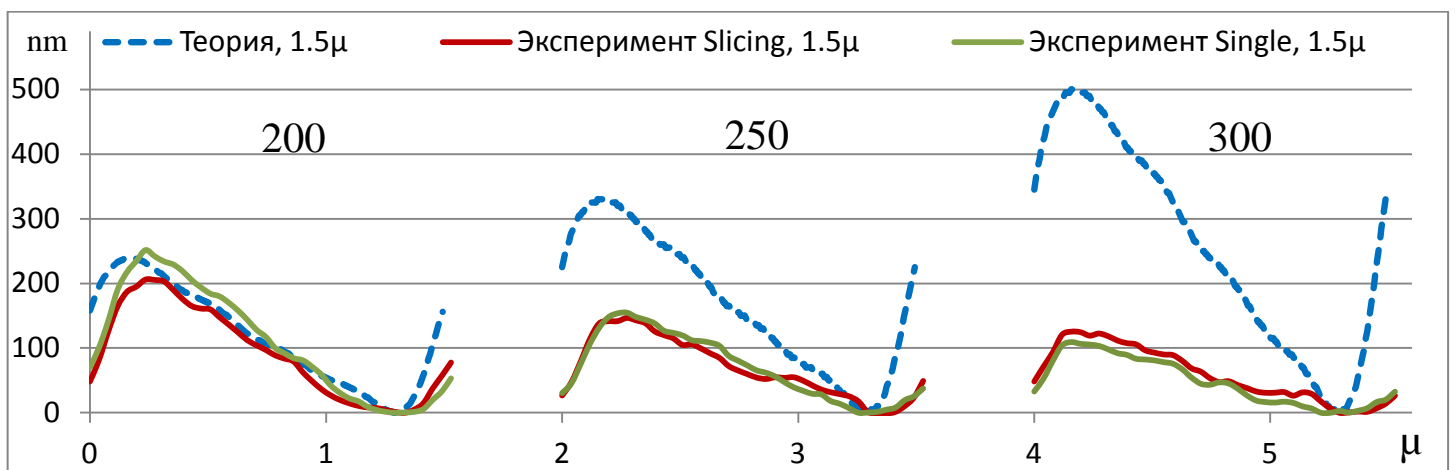
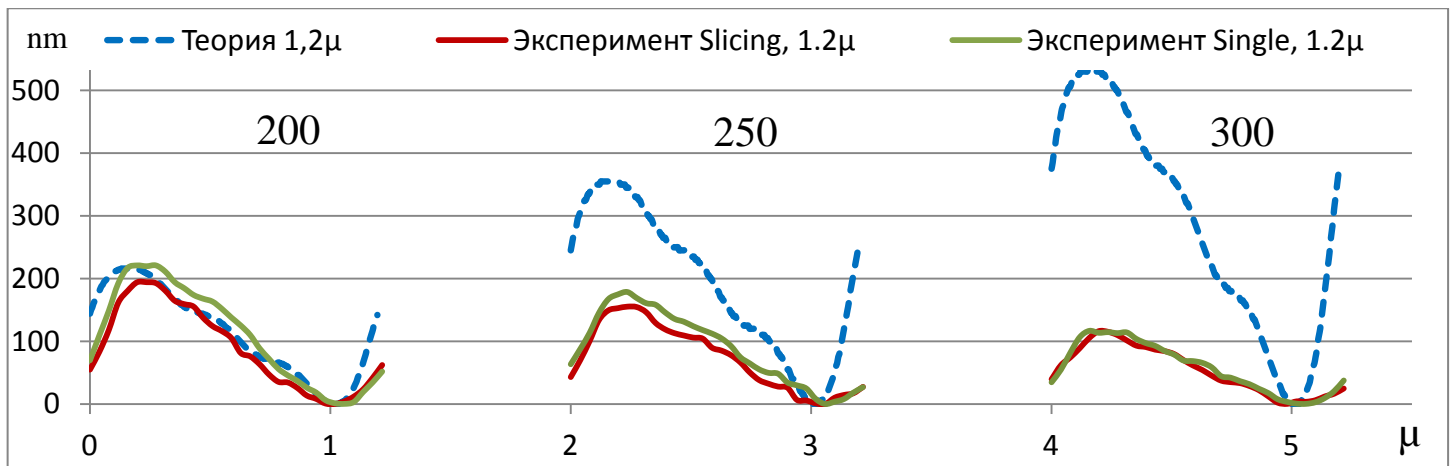


Рис.4.2. Сравнительные графики полученных рельефов

Из графиков можно сделать вывод, что рельеф, смоделированный с помощью программы, при увеличении интенсивности совсем не совпадает с тем, что получилось в реальности. Данное расхождение можно объяснить тем, что толщина резиста оказалась слишком малой для экспонирования его с интенсивностями 250 и 300. При дозах 250 и 300 резист протравливался до хрома, при этом проявление продолжалось, в связи с этим начинал травиться верхний слой, поэтому в реальном эксперименте при увеличении интенсивности больше 200 высота рельефа уменьшалась. Если бы толщина резиста была большей (как рассчитывалось в программе), то эксперимент должен был бы согласовываться с теорией по высоте. Так, можно сделать вывод, что для данного времени проявления доза 200 оказалась более оптимальной, чем 250 и 300. Рельеф для дозы 200 у всех периодов довольно хорошо согласуется с теорией, также получилось достичь линейности профиля, однако некоторые градации необходимо исправить, исходя из полученных данных, была сделана корректировка доз для дальнейшего улучшения линейности.

В некоторых отдельных решетках видна довольно большая разница по высоте между двумя методами single и slicing. При экспонировании «слайсингом» глубина в некоторых местах увеличивается до 50-60nm, в результате нарушается линейность. Однако в целом видно, что два метода дают похожий результат, и кардинальных изменений не происходит. На основе полученных данных были пересчитаны дозы, для улучшения линейности.

Период	Высота	Градации				
		1	2	3	4	5
1.2μ, 4x0.3	210nm	0	6	7.5	10.3	-
1.5μ, 5x0.3	240nm	0	6.1	7.6	8.7	9.9
1.6μ, 4x0.4	280nm	0	5.8	7.9	10.1	-
2.0μ, 4x0.5	360nm	0	5.7	7.6	10.2	-

Таблица 3. Дозы после корректировки

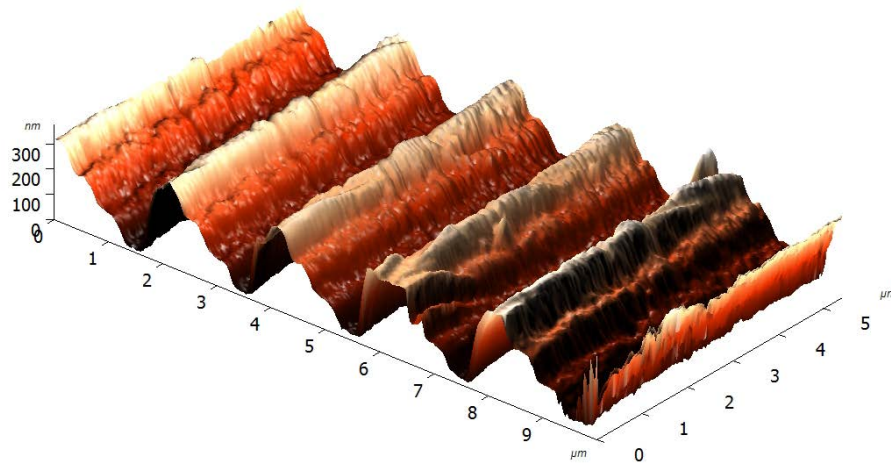


Рис.4.3. АСМ снимок в 3D, рельефа с периодом 2.0μ, 250

#### 4.1. Экспериментальные результаты работы оптических элементов

Следующим этапом было изучение получившихся из тестовых решеток киноформов. Киноформы – оптические элементы рассчитанные методом итеративного подхода, сделанные в виде рельефной структуры с максимальной модуляцией фазы в  $2\pi$ . Киноформы в среде с показателем преломления  $n$  работают на отражение, т.е. расчетная высота рельефа находилась из следующих предположений:

$$\text{Разность хода } \delta = 2hn;$$

$$\text{Разность фаз и разность хода связаны между собой } \Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta;$$

$$\text{Тогда } h = \frac{\lambda}{2n} = |n = 1.5| = \frac{\lambda}{3};$$

Для лазера с длиной волны 532nm, высота рельефа должна быть равна приблизительно  $h = 180nm$ . Рассматривая такую структуру в воздухе без показателя преломления, получим расчетную высоту равную  $h = \frac{\lambda}{2} \cong 270nm$ .

Если такая структура делается на прохождение, то тогда  $\delta = hn - h$ , а высота рельефа должна быть равна  $h = \frac{\lambda}{(n-1)} = |n = 1.5| = 2\lambda$ , т.е. для зеленого лазера  $h \cong 1\mu$ .

В простейшем бинарном случае мы имеем 1 и -1 порядок, если профиль не соответствует нужной высоте, то добавляется еще и нулевой. Методика

расчета киноформа рассматривает всю плоскость, у нее нет понятия 1 и -1 порядок. Рельеф киноформа не периодический, в разных точках рельефа – разная структура киноформа. Каждая конкретная точка в рельефе киноформа отклоняет луч на определенный угол, таким образом можно записать любое изображение практически на всю плоскость. Любая ошибка в рельефе, например, в высоте или нелинейности профиля ведет к увеличению 0 порядка и других порядков не соответствующих расчетным значениям. Поэтому одним из критериев точности изготовления данных оптических элементов является отсутствие 0 порядка.

Преимущество данного киноформа состоит в том, что мы используем всю площадь изображения в отличие от простого бинарного рельефа, где картина изображения симметричная, т.е. в первом порядке будет наблюдаться изображение, а в минус первом оно же только перевернутое. В киноформе, в 1 порядок записывается одно изображение, а в -1 другое. В качестве примера, иллюстрирующего данный механизм, были сделаны элементы, формирующие при освещении изображения в виде слов «YES» и «NO», которые соответствуют 1 и -1 порядку. Из сравнения изображений на экране можно сделать вывод, что наилучшим образом гасится 0 порядок у киноформа с интенсивностью 250 (рис. 4.4).



Рис.4.4. Изображение 1 и -1 порядка на экране с интенсивностями а)200 б)250

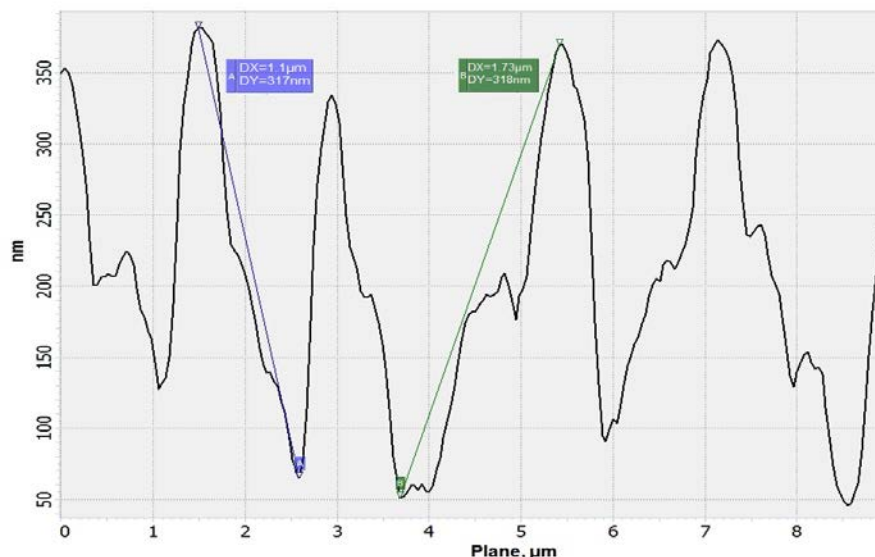


Рис.4.5. АСМ снимок рельефа киноформа с интенсивностью 250

Таким образом, получилось создать отражающий оптический элемент с минимальной интенсивностью в нулевом порядке. Данные структуры используются в отражающих пленочных дифракционных элементах, например для идентификации подлинности. Для того чтобы достичь разумного размера визуализации данных оптических элементов, необходимы большие углы отклонения, т.е. большие угловые масштабы изображения.

## 4.2. Получение рельефа на прохождение

В случае, когда углы отклонения небольшие, а изображение получается на большом расстоянии, т.е. маленький угловой размер изображения, специфика расчета оптического элемента, работающего на прохождение, должна включать в себя увеличение глубины рельефа и увеличение размера зон таких элементов. В связи с этим, как было показано выше, оптические элементы проходящего типа должны иметь высоту рельефа порядка  $1\mu$ . Для этого с помощью вышеописанной программы были получены дозы для решеток с большими периодами ( $2,4,8,16\mu$ ) и большой глубиной рельефа. (Таблица 4).

На рис.4.6 показаны сравнительные графики высот рельефов, полученных экспериментально и рассчитанных в программе. При построении

Период	Высота	Градации							
		1	2	3	4	5	6	7	8
2μ, 5x0.4	1μ	0	7.3	10.9	13.5	16.2	-	-	-
4μ, 5x0.8		0	7.2	10.7	13.3	16.1	-	-	-
8μ, 8x1		0	5.5	8.2	9.7	10.7	12	13.8	16.1
16μ, 8x2		0	5.6	8.1	9.7	10.9	11.8	13	15.5

Таблица 4. Рассчитанные дозы для рельефа 1μ

теоретического рельефа для 4μ, первоначально высота получилась 925nm. Это произошло из-за того, что в программе максимальная высота ограничена 1μ. Несмотря на то, что на 0 градации доза так же нулевая, из-за засветки от остальных градаций, нулевая градация тоже протравливается на определенную высоту. Поэтому пришлось умножить теоретический рельеф на 10/9, чтобы высота совпала с экспериментом. Тем не менее, из данного сравнения видно, что линейность не совсем получилось достигнуть и необходимо также подкорректировать дозы. Наиболее подходящая по высоте и по линейности получилась решетка с периодом 4μ.

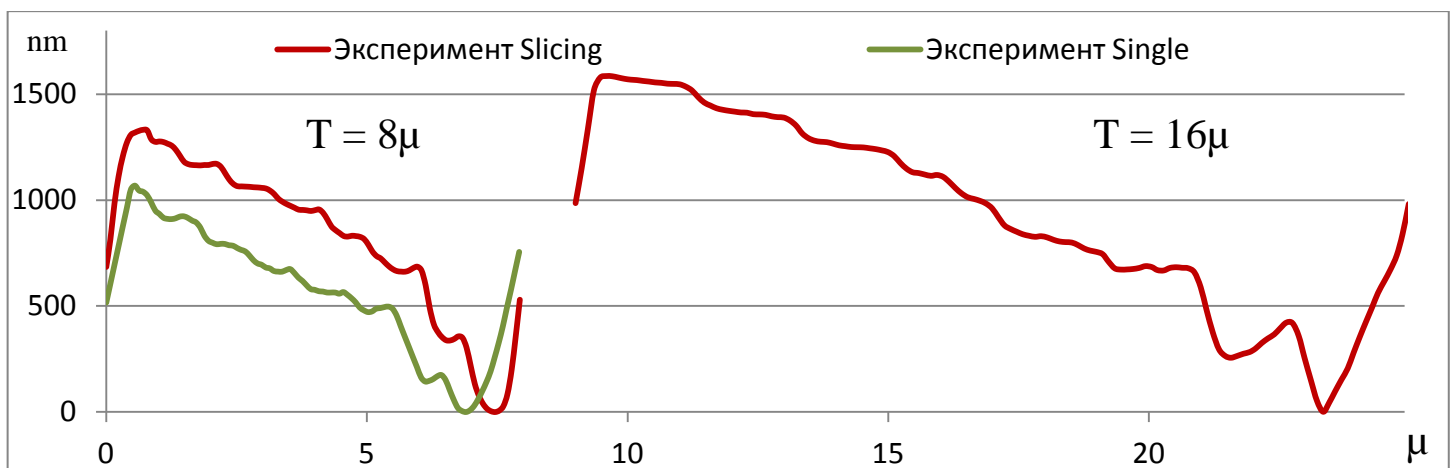
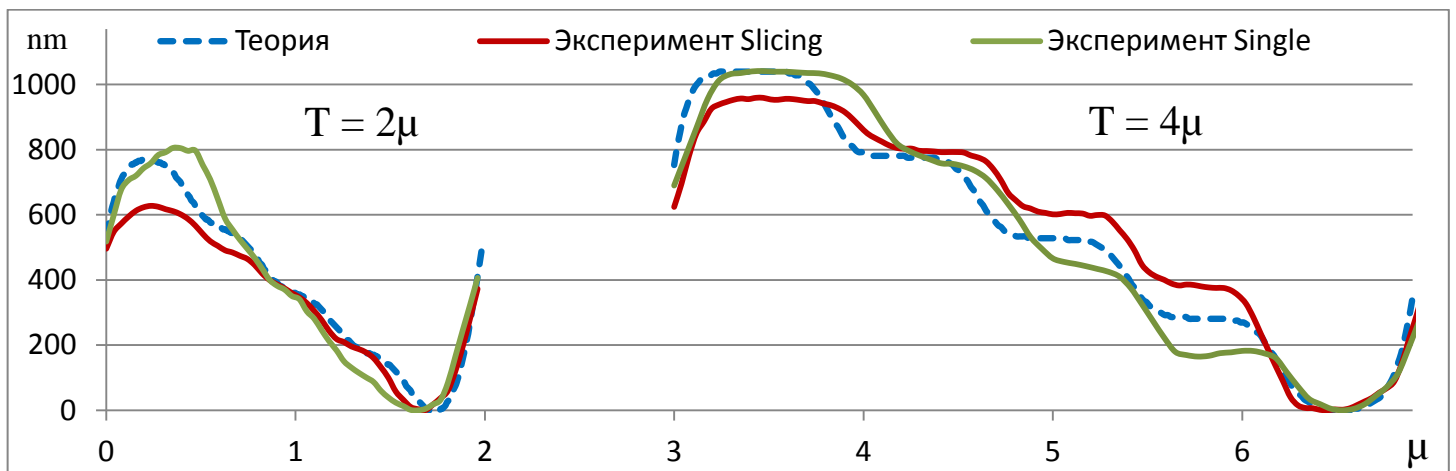


Рис.4.6 Сравнительные графики, полученные для рельефов большой глубины, T-период



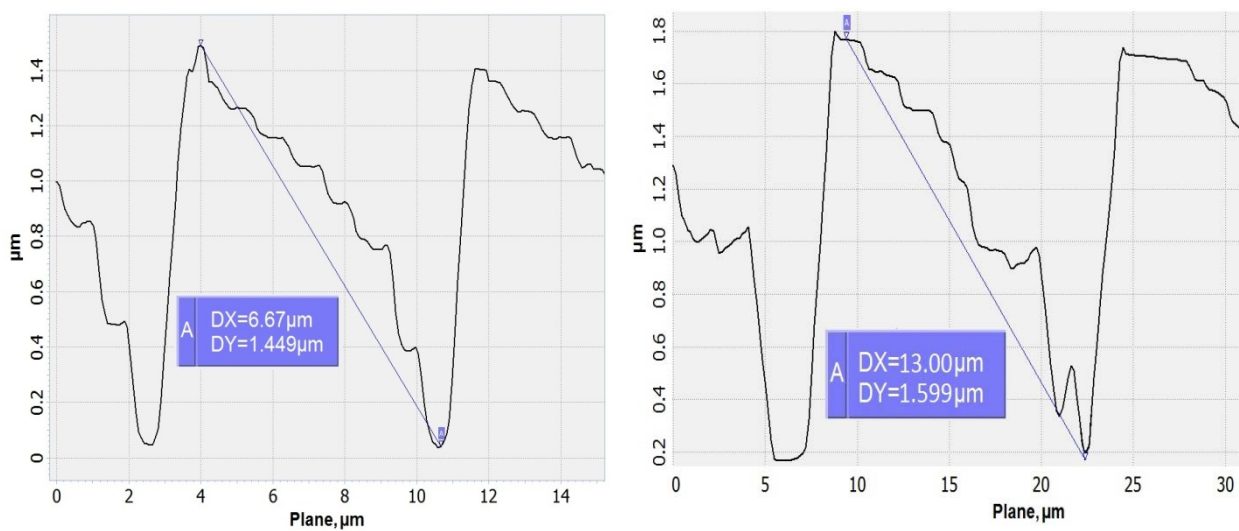


Рис.4.7. Рельеф тестовой решетки а) 8μ б) 16μ

Средние высоты полученных рельефов приведены ниже:

Период, μ	2	4	8	16
Высота, nm	770	1000	1400	1600

В силу ограничений (программа для расчета доз работает до 1000nm), подобрать дозы для 8 и 16μ не получилось, так что сравнить теоретическое предсказание с реальными данными для высоты 1400nm и 1600nm пока что не представляется возможным. По графику видно, что, казалось бы, дозы, которые должны соответствовать линейному рельефу для периода в 4μ здесь не дают такого результата. Кроме того, возникают различные эффекты, такие как эффекты близости. Размытие последней градации для периода 8μ составляет  $\approx 0.8\mu$ , размытие для периода 16μ составляет  $\approx 2.5\mu$ . Влияние данных эффектов сильно увеличивается с ростом периода и высоты рельефа, т.к. можно заметить, что при 4μ данные эффекты выражены гораздо меньше. Если сравнить рельеф для 8 и 16μ, то можно заметить сильное изменение ступенек при периоде в 16μ, по сравнению с 8μ. Изменяется угол наклона и длина каждой ступеньки. В идеале длина каждой ступени должна составлять 2μ, а в реальности получилось, что 4 и 5 ступень сильно размыта.

Также при больших периодах 8 и 16 $\mu$  был обнаружен специфический эффект. При просмотре 3D снимков в последней градации видны довольно большие впадины.

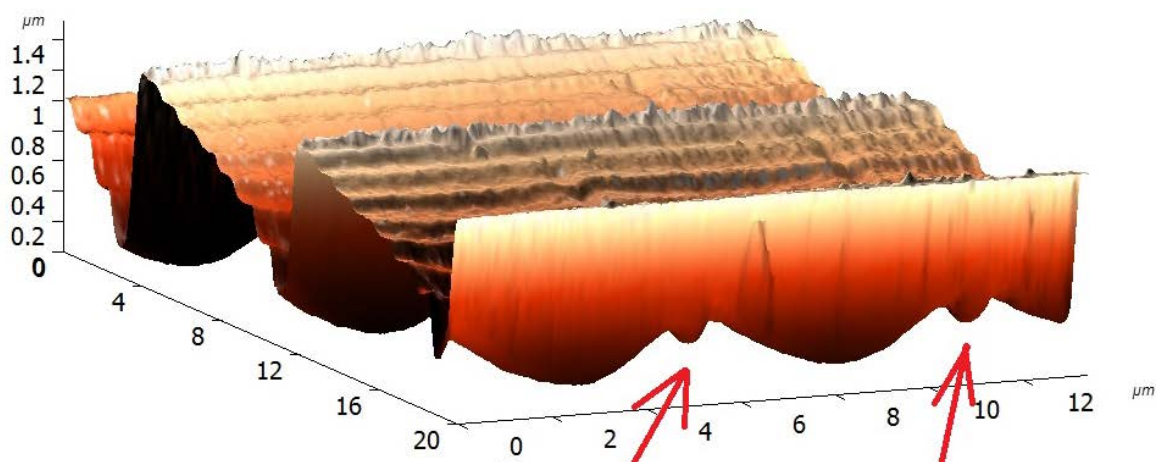


Рис.4.8. АСМ снимок в 3D рельефа с периодом 8 $\mu$

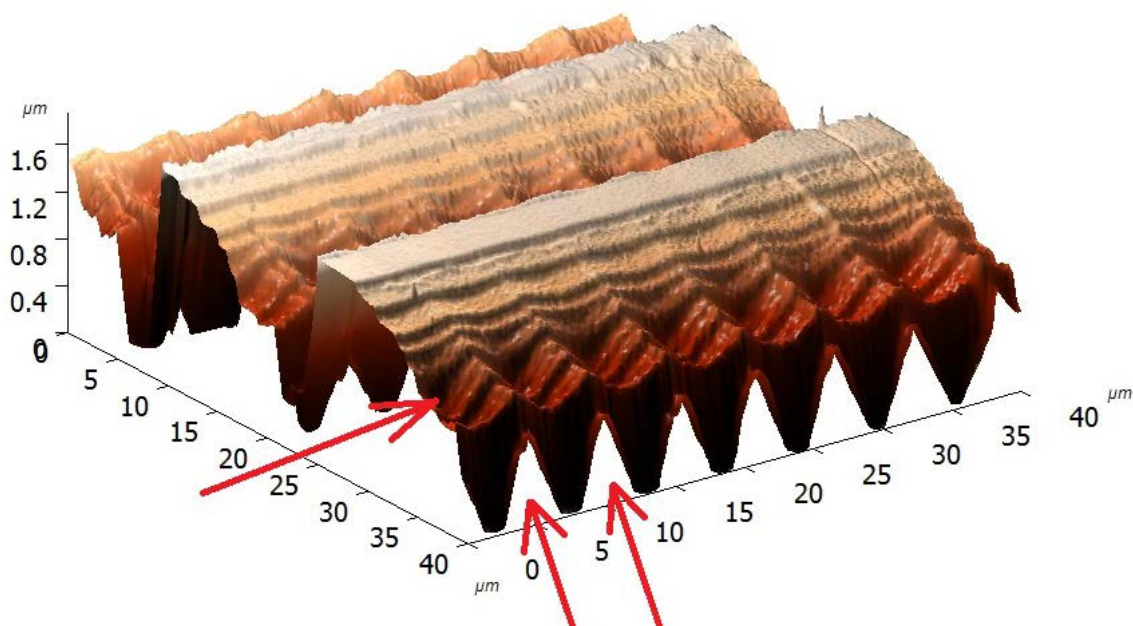


Рис.4.9. АСМ снимок в 3D рельефа с периодом 16 $\mu$

При 16 $\mu$  впадины резко увеличиваются и появляются только с 5 по 8 градацию. Предположительно такое явление возникает из-за эффектов близости, либо из-за неоднородности пучка в электронно-лучевом литографе.

Существует 2 способа экспонирования резиста на электронно-лучевом литографе.



1) Векторное сканирование, в котором пучком минимального диаметра  $\sim 20\text{nm}$  сканируются с большим разрешением нужные участки, в результате чего за большое число проходов получается необходимый рельеф.

2) Сканирование с изменяемой формой пучка (beam shaping). В плоскости формируется пучок электронов, который, проходя через угловые диаграммы, изменяющие его форму и размеры, проецируется на электронный резист.

В нашем случае сканирование производилось вторым способом. Пучок электронов, пройдя через множество линз, диафрагм и т.д., должен сформироваться в некоторое однородное распределение интенсивности. Из этого распределения интенсивности вырезается квадрат  $6 \times 6 \mu\text{m}$ . Далее производится экспонирование длинными прямоугольниками  $5 \times 1 \mu\text{m}$ . Если по какой-либо причине распределение интенсивности получилось неоднородное, то могут возникнуть подобные эффекты.

Возможные методы решения:

а) попытаться определить однородность пучка в электронно-лучевом литографе;

б) уменьшение длины области экспонирования, например  $2 \times 1 \mu\text{m}$ .

### 4.3. Эффекты близости

Эффекты близости - основная проблема электронной литографии. Они приводят к нежелательному экспонированию областей, в которые луч непосредственно не направлялся. Эффекты близости проявляются как искажение получаемого на подложке изображения вследствие упругого и неупругого рассеяния электронов на подложке. Электроны, рассеянные на атомах подложки, проникают в прилежащие к лучу области резиста, производя его дополнительное экспонирование и вызывая тем самым размытие изображения. Различают внутренние и внешние эффекты близости. Внутренние эффекты обусловлены рассеянием электронов, формирующих изображение непосредственно в данной области, а внешние - рассеянием электронов, формирующих изображение в соседних областях. При энергии

луча 25 кэВ и диаметре 1 мкм полуширина области обратного рассеяния электронов составляет 5 мкм, а при энергии 50 кэВ достигает 15 мкм. В зависимости от отсутствия или наличия ближайших “соседей” наблюдаются соответственно внутренний или взаимный эффекты близости.

Поскольку проявление эффекта близости возрастает почти прямо пропорционально толщине резиста (как однослойного, так и многослойного) (рис.4.10), то уменьшение толщины ослабляет эффект близости.

Таким образом, методами ослабления эффектов рассеивания электронов являются:

- использование в качестве подложки тонкой мембраны;
- разбиение фигур рисунка на части со своей дозой в каждой области;
- уменьшение толщины резиста до четверти величины разрешения;
- применение многослойных резистов (антиотражающее покрытие, сополимеры, барьерный слой) [4].

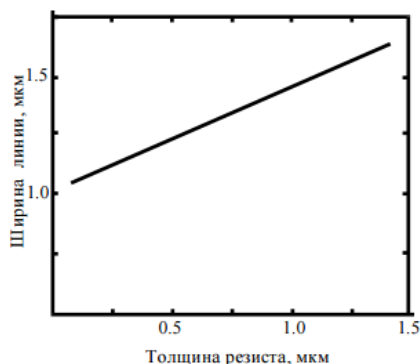


Рис. 4.10. Влияние толщины резиста на величину взаимного эффекта близости в периодической структуре из линий и промежутков шириной 1.0 мкм (кремниевая подложка, позитивный резист, энергия пучка 25 кэВ).

Наиболее распространенным является второй способ, т.е коррекция дозы экспонирования. Для каждого элемента структуры доза экспонирования устанавливается учитывая влияние эффекта близости таким образом, чтобы в результате проявления все элементы структуры проявились одновременно и с точными размерами.

Эффекты близости описываются суммой двух гауссиан – функцией близости.

$$I(r) = \frac{I_1(r)}{(1+\eta)} + \eta \frac{I_2(r)}{(1+\eta)} = \frac{1}{(1+\eta)} \left( \frac{\exp\left(-\frac{r^2}{\alpha^2}\right)}{\pi\alpha^2} + \eta \frac{\exp\left(-\frac{r^2}{\beta^2}\right)}{\pi\beta^2} \right), \quad r^2 = x^2 + y^2 \quad (11)$$

Функция близости – это распределение энергии (дозы) экспонирования, поглощенной в резисте. При облучении резиста электронным лучом размера  $\alpha$  первичные электроны высокой энергии претерпевают малоугловое рассеяние в резисте, при этом вклад первичных электронов описывается первым гауссовым распределением в формуле (11). При рассеянии первичных электронов в подложке возникают вторичные электроны, часть которых рассеивается в резисте и вносит вклад в поглощенную дозу, описываемый вторым гауссовым распределением в формуле выше.

Параметр  $\alpha$  – размер первичного пучка с учетом рассеяния в резисте при прямом прохождении, причем плотность электронов в пучке имеет гауссово распределение, а диаметр пучка ограничен областью, где плотность электронов в  $e$  раз меньше чем в центре пучка. Параметр  $\beta$  – характерный размер области рассеяния электронов в материале подложки;  $\eta$  – относительный вклад, который вносят обратно рассеянные электроны в суммарную поглощенную дозу.

Для расчета дозы с учетом соседних экспонированных областей используется функция  $D(x, y)$  – доза поглощенной резистом энергии, которая определяется как свертка дозы экспонирования и функции близости:

$$\frac{D(x,y)}{D^0} = \int \frac{I(x-x',y-y')T(x',y')}{T^0} dx' dy' \quad (12),$$

где  $D^0, T^0$  – чувствительности поглощения и экспонирования соответственно.

В статье [11] предложен новый эффективный метод коррекции эффекта близости, который впервые стал учитывать влияние процесса проявления на результат экспонирования путем решения обратной задачи, а также предложена методика оценки погрешности различных методов коррекции.

Метод простых компенсаций реализуется следующим образом. Происходит разбиение структуры на области с постоянной дозой экспонирования. Затем методом итераций, используя вышеупомянутые формулы, рассчитывается средняя доза для каждой области с учётом дозы соседних областей. В электронной литографии экспонирование областей и линий производится по точкам. ‘Попад’ в некоторую точку, электронный луч

задерживается в ней на рассчитанный интервал времени для сообщения резисту необходимой дозы. Потом он перемещается в следующую точку, и т.д. Временем перехода между точками можно пренебречь, так как оно много меньше времени, которое пучок затрачивает на точку. Интервал рассчитывается программой исходя из заданной дозы и шага между точками. Следовательно, фиксированная доза при экспонировании области означает, что в пределах этой области электронный зонд будет задерживаться в каждой точке на одинаковое время.

Чтобы коррекция была успешной, важно знать параметры  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\eta$ . Существующая серия тестов позволяет достаточно точно определить эти параметры [12]. Из того, что было выше сказано об этих параметрах, становится очевидно, какие именно условия проведения экспонирования оказывают на них влияние:  $\alpha$  - не зависит от материала подложки и определяется ускоряющим напряжением, толщиной резиста и качеством настройки фокуса микроскопа (опытом оператора);  $\eta$  – параметр, определяющийся материалом подложки,  $\beta$  – материалом подложки и ускоряющим напряжением. Метод простых компенсаций позволяет точно скорректировать вклад обратно рассеянных электронов, однако эффект первичного пучка не может быть устранен полностью, а это означает, например, что невозможно создать два элемента, расстояние между которыми было бы меньше размера первичного пучка  $\alpha$ . Таким образом, влияние первичного пучка может быть скорректировано только приблизительно.

Нами был предложен другой метод ослабления эффектов близости, возникающих в наших образцах.

#### 4.4. Увеличение дифракционной эффективности

Для начала рассмотрим математическое описание дифракционной эффективности для бинарной фазовой решетки. Как показано в работе [16], Фурье преобразование фазовой функции данной решетки в упрощенном виде

выглядит следующим образом: 
$$F(q)|_{q=\frac{m}{T}} = \frac{\sin(\frac{m\pi}{2})}{m\pi/2} * [isin(\frac{m\pi}{2})] \quad (13),$$

где  $m$  – порядок дифракции,  $T$  – период. Для всех четных значений  $m$  функция  $F(q)$  равна 0, для нечетных  $m$ , она описывается выражением (13).

Дифракционная эффективность  $m$  порядка дифракции для бинарной решетки описывается выражением: 
$$\eta_m = p_m^2 \equiv \left| F\left(\frac{m}{T}\right) \right|^2 = \left( \frac{2}{m\pi} \right)^2 \quad (14).$$

Как говорилось ранее, такой рельефа можно аппроксимировать ступенчатой функцией, состоящей из  $N$  ступенек. Дифракционная эффективность 1 порядка в таком случае будет равна: 
$$\eta_1 = \left[ \frac{\sin(\pi/N)}{\pi/N} \right]^2 \quad (15).$$

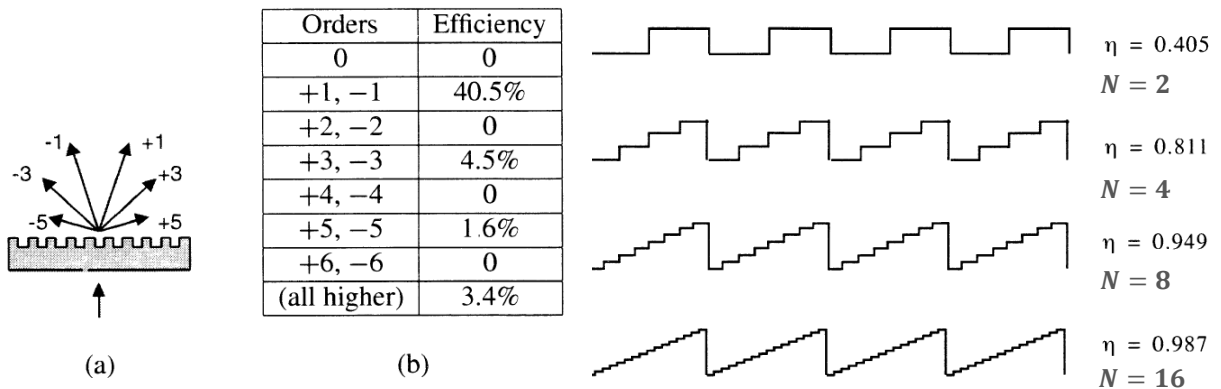


Рис.4.11. а) простая бинарная фазовая решетка; б) Таблица эффективности

Рис.4.12. Дифракционная эффективность первого порядка для различных значений  $N$

Получается, что дифракционная эффективность зависит от глубины и профиля рельефа. Чем большим количеством  $N$  ступенек мы будем аппроксимировать фазовую функцию, тем больше на выходе будет дифракционная эффективность.

Далее была сделана попытка зафиксировать момент окончания проявления и определить увеличение максимальной эффективности. Идея была в том, чтобы сделать первую дозу 0, а последнюю – максимальной для того, чтобы при протравливании резиста до хрома определить момент, когда эффективность перестает расти. Для этого были сделаны полутонные решетки с периодами 1.5 и 1.6μ.

Рельеф с периодом  $1.5\mu$  состоит из трех градаций: первая и третья являлись постоянными и равнялись 0 и 20 соответственно, доза второй варьировалась в пределах 8-16 с шагом 2. Рельеф с периодом  $1.6\mu$  состоит из четырех градаций, аналогично предыдущему здесь варьировались вторая и третья дозы. Таким образом, предполагалось уменьшить или совсем убрать влияние нежелательных эффектов (эффектов близости) и сохранить линейность для увеличения дифракционной эффективности.

На рис. 4.13. показана схема данного метода. Оранжевая пунктирная линия соответствует максимальной глубине рельефа, дальше которой травление не продолжается. Для сравнения показан рельеф, который получается при большой толщине резиста.

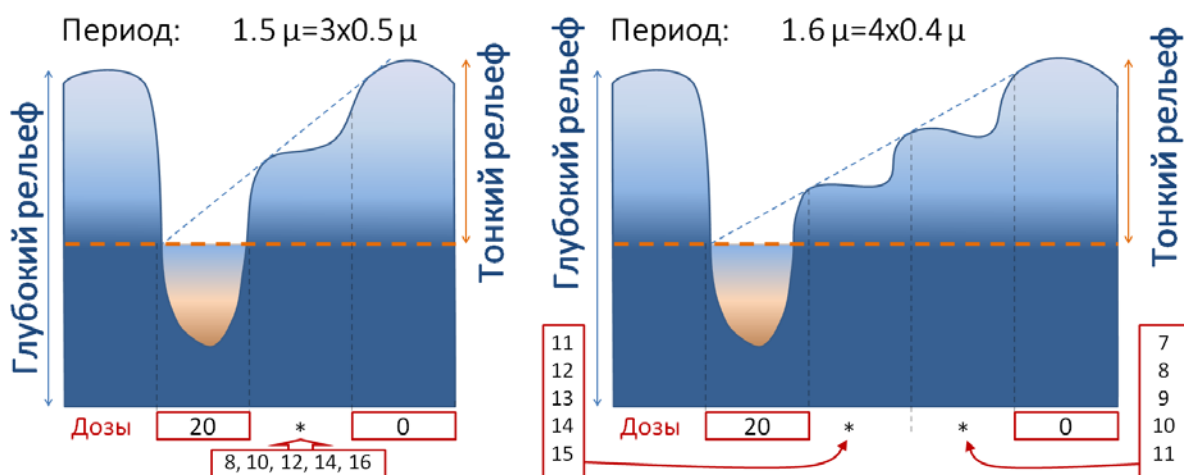


Рис. 4.13. Условная схема методики эксперимента

Снимки рельефа, полученные данным методом, и его теоретическое моделирование представлены на рис. 4.14. На графиках видно, что рельеф с периодом  $1.5\mu$  и с дозами 20-14-0 получился линейным. Также удалось устранить размытие последней градации у основания. У рельефа с периодом  $1.6\mu$  и дозами 20-14-10-0 наблюдается аналогичный рисунок профиля – линейность и пологая последняя градация шириной  $\sim 0.6\mu$ .

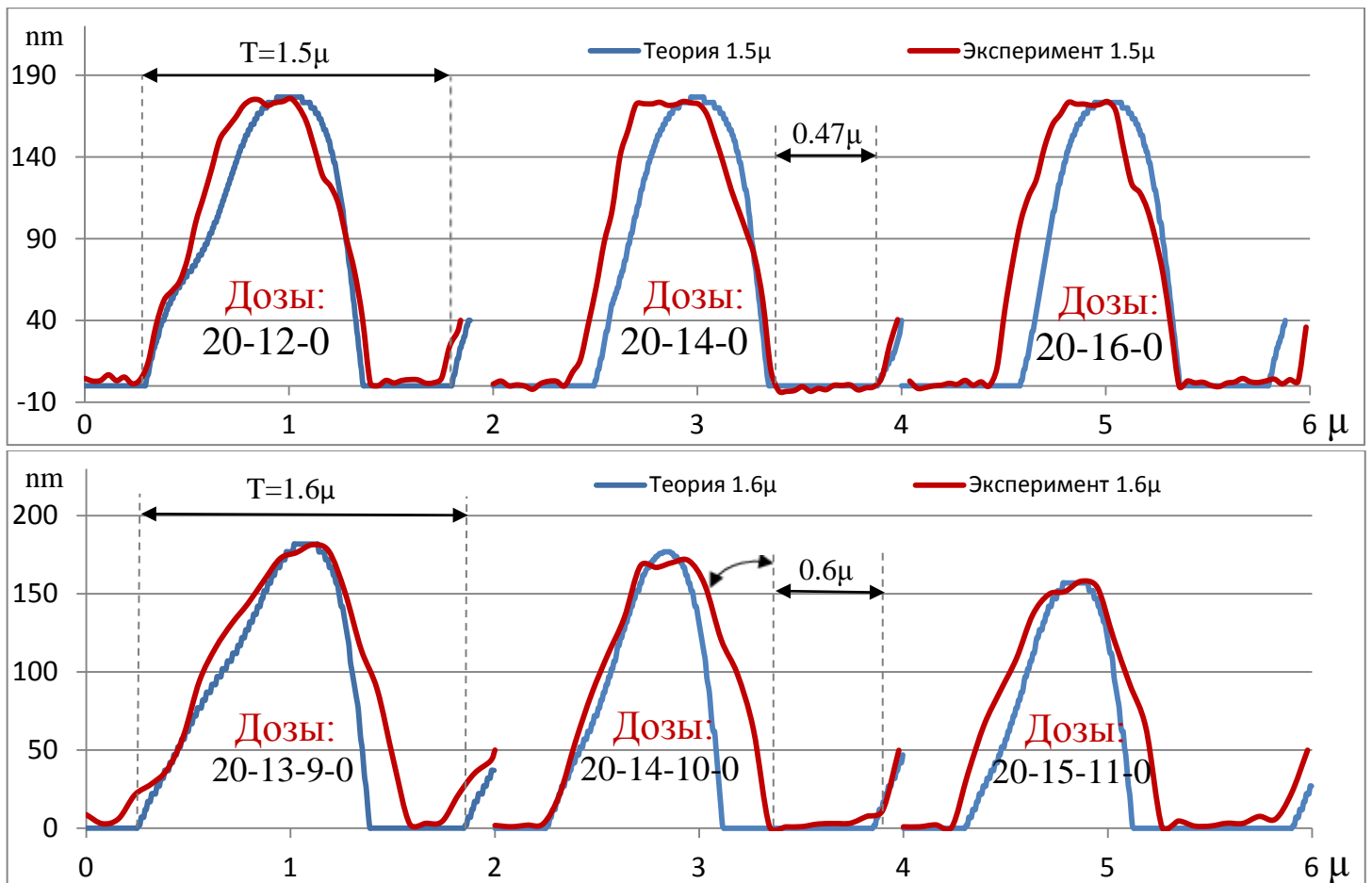


Рис. 4.14. Сравнительные графики рельефов с периодами  $T=1.5$  и  $1.6 \mu\text{m}$

Данный метод позволяет уменьшить эффект близости в последней градации и улучшить линейность, но также у него есть и недостатки, такие как размытие профиля при переходе к новому периоду. Профиль рельефа в этом месте отклоняется на некоторый угол и становится почти симметричным. К сожалению, при малых периодах за счет большого расплывания сложно получить идеальный рельеф, поэтому эксперименты будут продолжены с большими периодами для того чтобы определить границы применения данного метода.

## ВЫВОДЫ

- В данной работе были исследованы методы создания ДОЭ при помощи электронно-лучевой литографии.
- Была проведена серия экспериментов, в результате которых были созданы ДОЭ, работающие на прохождение и на отражение.
- Определены оптимальные параметры создания ДОЭ, такие как, высота, профиль рельефа, дозы экспонирования и т.д.
- Удалось создать киноформный отражательный оптический элемент с минимальной интенсивностью в нулевом порядке и получить различные изображения в 1 и -1 порядках.
- Был исследован новый метод экспонирования, в результате которого удалось улучшить линейность и устранить рассеяние в нижней градации, но в связи с этим, появилось расплывание при резком изменении высоты, что требует дальнейшего изучения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электронно-лучевая литография – наиболее эффективный способ изготовления дифракционных оптических элементов. Моделирование рассеяния электронов в толще резиста позволяет улучшить параметры, однако необходимо более тщательное изучение процесса рассеяния в зависимости от глубины рельефа и других параметров, таких как эффекты близости для того, чтобы создавать оптические элементы с необходимыми фокусирующими свойствами для лазеров, которые могут применяться в различных сферах.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ:

- [1] Методы компьютерной оптики / Под ред. В.А.Сойфера // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
- [2] Concepts of Classical Optics / Strong J 1958 (London: W H Freeman) p189.
- [3] Физика субмикронной литографии. / Валиев К.А. // М.: Наука, 1990. – 528с.
- [4] Микролитография 1 том / Моро У. // Пер. с англ. М.: Мир, 1980. – 574с.
- [5] Литографии в микроэлектронике / А.Н.Россоленко, Т.Е.Голикова, В.Н.Зверев.
- [6] Основы сканирующей зондовой микроскопии / В.Л.Миронов – 2004.
- [7] Основы атомно-силовой микроскопии / И.В.Яминский, Д.В.Багров // – НОУДПО "Институт АйТи" Москва, 2011. – 128с.
- [8] Методы формирования микрорельефа для синтеза дифракционных оптических элементов / А.В.Волков // Вестник СГТУ, Физ.-мат. науки, 1999, выпуск 7, 127–140с.
- [9] Оптические преобразования / В.А.Сойфер // СГАУ Самара – 2007, 18-19с.
- [10] Формирование микрорельефа ДОО с использованием достижений микроэлектроники / А.В. Волков, Р.В. Скиданов // СГАУ, институт систем обработки изображений РАН, 66с.
- [11] Accuracy of proximity correction in electron lithography after development / V.V.Aristov, B.N.Gaifullin, A.A.Svintsov, S.I.Zaitsev, H.F.Raith and R.Jede, // J.Vac.Sci.Technol. vol.10, №6, 2459-2467 (1992)
- [12] Evaluation, Verification and Error Determination of Proximity Parameters,  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\eta$  in Electron Beam Lithography / S.V.Dubonos, B.N.Gaifullin, H.F.Raith, A.A.Svintsov, S.I.Zaitsev // Microelectronics Engineering, 21, 293, (1993)
- [13] Исследование рельефа плёночных дифракционных оптических элементов / Т.П.Каминская, В.В. Попов, А.М. Салецкий // Компьютерная оптика. – 2016
- [14] Исследование влияния эффектов близости при формировании рельефных дифракционных оптических элементов в слоях электронных резистов / А.С.Сомов – 2015
- [15] Фокусаторы в фигуры, составленные из пространственных кривых / В.А. Данилов, К.А. Кулькин, И.Н.Сисакян
- [16] Diffractive optics / Donald C.O`Shea, Thomas J.Suleski, Alan D.Kathman