

УДК 776.19

### **Анализ влияния на дифракционную эффективность геометрических параметров многоуровневых фазовых решеток**

Донченко С.С.

Студент,  
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»

Научный руководитель: Одинокоев С.Б. ,  
д. т. н., доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы»

МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[dctzloforever@gmail.com](mailto:dctzloforever@gmail.com)

В настоящее время широко распространены оптические дифракционные элементы. Они используются в защитной голографии, как оптические элементы для компенсации aberrаций, дифракционные делители пучки.

Применение голограмм, как средство борьбы с подделками объясняется высокой сложностью подделки такой защиты. Само по себе голографическое изображение может быть довольно сложным: содержать несколько дифракционных элементов с различными эффектами и кроме того в таких голограммах могут быть скрытые метки, видимые только при определенных условиях (например, при освещении голограммы светом определенной длины волны). Такой элемент невозможно скопировать ни одной из современных полиграфических технологий. Даже в случае полной подделки при профессиональной экспертизе возможна ее идентификация, т.к. каждый оптический прибор, используемый для записи голограмм, обладает своими индивидуальными не воспроизводимыми характеристиками.

Использование дифракционных оптических элементов в оптических системах для компенсации aberrаций очень привлекательно ввиду того, что они устраняют хроматические aberrации лучше, чем флюоритовые линзы и прочие преломляющие элементы. Это объясняется тем, что в отличие от обычной преломляющей линзы дифракционный оптический элемент преломляет лучи с большей длиной волны сильнее, чем лучи с короткими длинами волн, в отличие от рефракционных элементов. Поэтому если их объединить, они могут взаимно нейтрализовать и эффективно корректировать хроматические aberrации. Кроме того меняя период решетки, можно достичь эффекта, идентичного действию асферической линзы, позволяя решать различные проблемы, в том числе исправлять сферические aberrации. Использование дифракционного оптического элемента в качестве асферической линзы, а также компенсатора хроматических aberrаций позволяет отказаться от линзы флюорита, что позволяет сократить длину системы вдоль оптической оси примерно на 30 %.

Еще одно применение дифракционных элементов - деление луча. Делители луча применяются в оптических устройствах мультипликации изображений, в оптических соединителях для оптоволокон, в устройствах оптической связи и обработки информации, интерферометрии.

Основная проблема дифракционных оптических элементов – низкая дифракционная эффективность. Самая низкая эффективность у амплитудных

дифракционных элементов, так как для получения дифракции перекрывается часть светового пучка. Эффективность таких элементов редко превышает 10 % в первом порядке. Такая маленькая величина пропускаемого света делает амплитудные элементы непригодными для применения в оптических системах. В фазовых дифракционных элементах функция пропускания имеет исключительно фазовый характер, поэтому эффективность таких элементов максимальна.

Существуют 2 вида фазовых дифракционных решеток: объёмные и тонкие. В объёмных элементах фазовая функция пропускания можно получить периодически меняя коэффициент материала, в тонких же периодически меняется толщина материала. Основное преимущество тонких элементов в том, что у них минимизирована зависимость дифракционной эффективности от длины волны. Кроме того тонкие дифракционные элементы можно массово изготавливать при помощи оборудования, схожего с тем, что применяется для производства микросхем. По этим причинам тонкие элементы наиболее перспективны для изучения, поэтому далее будем рассматривать только тонкие дифракционные элементы.

Так как основная проблема дифракционных элементов низкая дифракционная эффективность, то проанализируем, от каких параметров она зависит.

Проблему получения максимальной дифракционной эффективности изучил и раскрыл в своей работе G.J.Swanson в 1989 году. В своей работе он рассматривал тонкий ДОЭ и определил дифракционную эффективность в зависимости от длины волн и геометрических параметров ДОЭ.

Расчет с помощью точного решения волновых уравнений Максвелла довольно трудоемкий и не всегда имеет решение, к тому же при увеличении отношения периода решетки к длине волны время расчета быстро растет. Поэтому далее будем пользоваться скалярным приближением уравнений Максвелла, которое рассматривает свет с позиции скалярных величин, а не векторного поля и магнитная составляющая поля не связана с электрической. Такое приближение дает довольно точные результаты при довольно большом отношении периода решетки к длине волны. Если же это условие не выполняется и отношение периода к длине волны приближается к единице, то свет отклоняется на большой угол близкий к  $90^\circ$ . При таком режиме скалярная теория неприменима.

Для начала рассмотрим тонкую решетку с кусочно-непрерывным рельефом (см. рис.1).

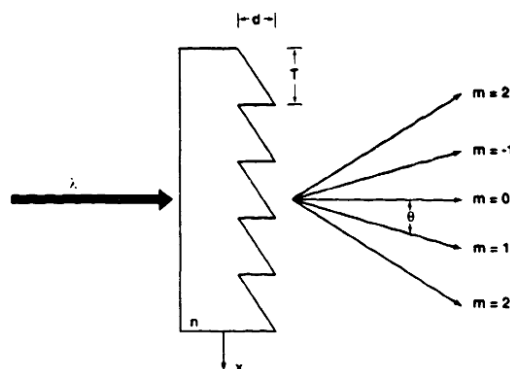


Рис. 1. Тонкий фазовый дифракционный элемент

Примем  $T \gg \lambda$ , чтобы можно было использовать скалярное приближение. Запишем функцию пропускания фазовой решетки на рис.1:

$$t(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(x - mT) \otimes \text{rect}\left(\frac{x}{T}\right) \exp(i2\pi\beta x), \text{ где } \beta = \frac{(n-1)d}{\lambda T}. \quad (1)$$

Чтобы найти дифракционную эффективность, найдем спектр функции пропускания:

$$F(f) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(f - \frac{m}{T}) \frac{\sin(\pi T(\beta - f))}{\pi T(\beta - f)}, \text{ где } f = \sin(\theta) / \lambda. \quad (2)$$

Амплитуда дифракционного порядка  $m$  равна:

$$a_m = \frac{\sin(\pi T(\beta - \frac{m}{T}))}{\pi T(\beta - \frac{m}{T})}. \quad (3)$$

Дифракционная эффективность  $m$ -го порядка равна:

$$\eta_m = \left[ \frac{\sin(\pi T(\beta - \frac{m}{T}))}{\pi T(\beta - \frac{m}{T})} \right]^2. \quad (4)$$

Тогда для 1-го порядка дифракционная эффективность:

$$\eta_1 = \left[ \frac{\sin(\pi(\beta T - 1))}{\pi(\beta T - 1)} \right]^2. \quad (5)$$

Из данного уравнения видно, что при  $\beta = \frac{1}{T}$  дифракционная эффективность элемента будет 100%. Кроме того можно получить уравнение описывающее ДЭ элемента, спроектированного для работы на конкретной длине волны (при  $\lambda_0$  будет максимальная ДЭ):

$$\eta_1 = \left[ \frac{\sin(\pi(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1))}{\pi(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1)} \right]^2. \quad (6)$$

Как уже упоминалось ранее, профиль, изображенный на рис.1 довольно трудно изготовить с помощью существующих технологий, поэтому вместо непрерывного рельефа изготавливают многоуровневый рельеф, который является компромиссом между высокой дифракционной эффективностью и простой изготовления (см. рис.2).

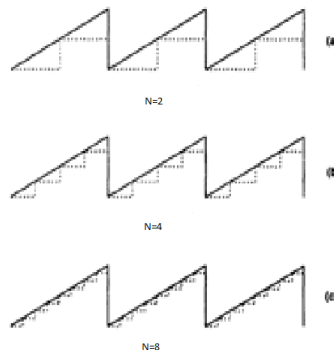


Рис. 2. Сравнение непрерывного рельефа с 2,4 и 8 уровневый рельефом

Соответственно, чем больше уровней, тем лучше аппроксимация непрерывного рельефа и выше дифракционная эффективность такого элемента.

Дифракционная эффективность такого многоуровневого элемента будет равна дифракционной эффективности элемента с непрерывным фазовым рельефом рассмотренным ранее минус ошибка, возникающая при аппроксимации непрерывного рельефа многоуровневым:

$$\eta_m^N = \left[ \frac{\sin(\pi(\frac{(n-1)d}{\lambda} - m))}{\pi(\frac{(n-1)d}{\lambda} - m)} \right]^2 \left[ \frac{\sin(\pi(\frac{(n-1)d}{\lambda N}))}{\pi(\frac{(n-1)d}{\lambda N})} \right]^2. \quad (7)$$

Технологий изготовления многоуровневого дифракционного элемента довольно много: интерференционная, проекционная, лазерная и др. Наибольший интерес представляет лазерная литографическая система, она обладает рядом преимуществ по сравнению остальными системами. В лазерных системах для записи напрямую используется лазер, что делает ненужным шаблон. Отсутствие шаблона делает ненужным контроль положения шаблона и подложки и шаблона относительно друг друга, что сокращает габариты такой установки. Другим немаловажным достоинством является высокое разрешение при записи дифракционного элемента, зависящее от длины волны используемого лазера.

Процесс производства дифракционного элемента на такой установке довольно прост. Первым делом получают заготовку путем нанесения фоторезиста на подложку из стекла, затем ее устанавливают в специальные держатели внутри литографической системы. Далее на компьютере требуемая структура приводится к виду, понятному литографической системе и происходит экспозиция образца. Наконец образцы проявляются и дообрабатываются. Пример лазерной литографической установки на рис.3.

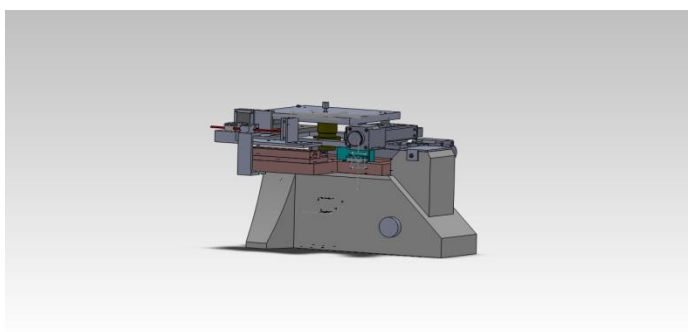


Рис. 3. Лазерная литографическая система

Для записи в лазерной литографической системе используется He-Cd лазер, излучающий на длине волны 442 нм. У используемого в установке объектива кружок рассеяния на длине волны 442 нм составляет 147 нм. Поэтому самый важный узел этой установки – система автофокусировки микрообъектива, так как расфокусировка системы записи приведет к падению разрешения. Учитывая высокое разрешение записи для перемещения микрообъектива, используется сверхточный позиционер с погрешностью не более 10нм. На данной установке можно изготавливать бинарные и многоуровневые структуры.

В соответствии с рассмотренной выше технологией я провел исследование геометрических параметров по формуле (7) с целью определить максимальную дифракционную эффективность многоуровневых элементов, которые можно изготовить на данной установке.

Для записи многоуровневой структуры с помощью лазера не подходит обычный фоторезист с пороговой светочувствительностью (используется для изготовления бинарных дифракционных элементов), поэтому используется фоторезист ma-N 2400 со светочувствительностью, переделаемой графиком 4.

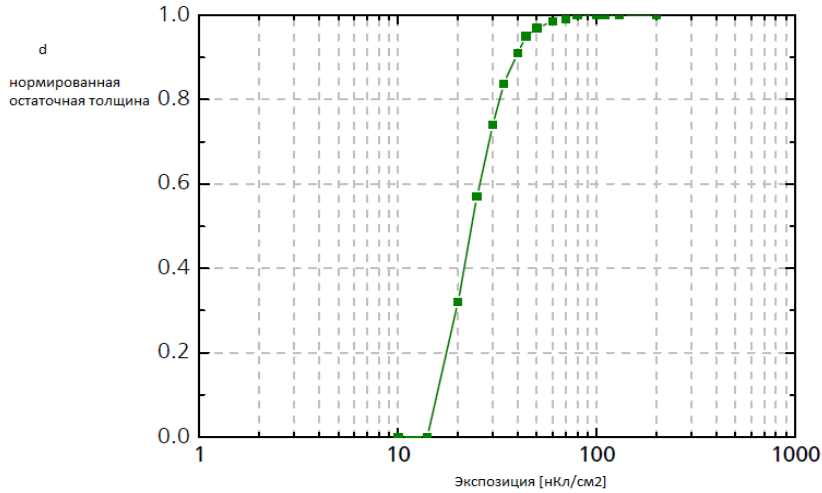


Рис. 4. Зависимость остаточной глубины фоторезиста от интенсивности экспозиции

По графику 4 выбирается линейный участок, далее, исходя из числа уровней, выбираются точки на линейном участке, чтобы определить интенсивности облучения фоторезиста для получения необходимого числа уровней.

Далее определяем показатель преломления для длины волны  $\lambda = 442 \text{ нм}$  по формуле

$$n(\lambda) = 1,601 + 10^2 \frac{123}{\lambda}. \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что показатель преломления для He-Cd лазера равен  $n(442) = 1.66$ .

$$\text{Глубина рельефа рассчитывается по формуле } d = \frac{\lambda}{2(n-1)} = \frac{442 \text{ нм}}{2(1.66-1)} = 0.33 \text{ мкм}$$

Далее из (7) найдем дифракционную эффективность при заданной длине волны, глубине рельефа и фоторезисте для разного числа уровней для первого дифракционного порядка (см. таблицу 1).

Таблица 1. Дифракционная эффективность для разного числа фазовых уровней

N	$\eta$
2	35.5 %
4	38.4 %
8	39.1 %
16	39.3 %

Из таблицы 1 видно, что дифракционная эффективность при 20 уровнях около 40 %, дальнейшее увеличение числа уровней бессмысленно, поэтому попробуем увеличить дифракционную эффективность, меняя глубину рельефа. Выберем количество уровней 16, так дальнейшее увеличение числа уровней только усложняет процесс производства, не увеличивая дифракционную эффективность. Построим зависимость дифракционной эффективности от глубины рельефа при заданной длине волны, фоторезисте и заданном числе уровней (см. рис.5).

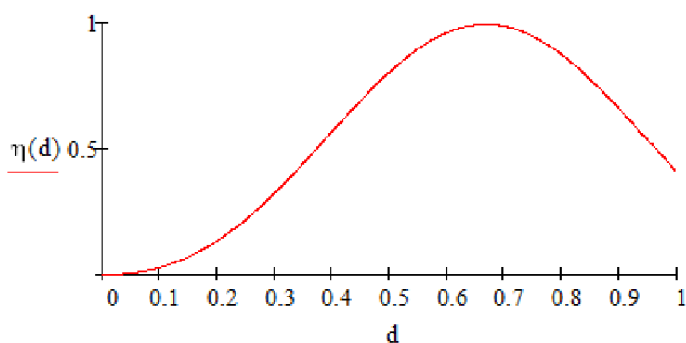


Рис. 5. Зависимость дифракционной эффективности от глубины рельефа

Из графика видно, что максимум дифракционной эффективности 16-уровневого тонкого фазового дифракционного элемента достигается при глубине рельефа  $d = 0.66 \text{ мкм}$  и равняется 99.4 %. Проведенная оптимизация дифракционной эффективности – оптимизация элемента для работы на конкретной длине волны (в нашем случае  $\lambda = 442 \text{ нм}$ ). Однако, не всегда технически осуществимо сделать требуемую глубину рельефа. В таком случае можно по формуле (7) определить для какой длины волны при заданной глубине рельефа ( $d = 0.33 \text{ мкм}$ ) дифракционная эффективность фазового элемента будет максимальна (см. рис.6).

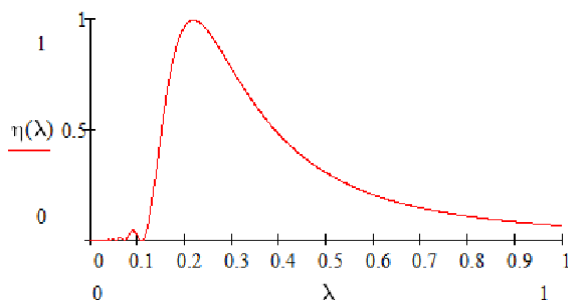


Рис. 6. Зависимость дифракционной эффективности от длины волны

Из графика видно, что для теоретически рассчитанной глубины рельефа максимум дифракционной эффективности достигается при длине волны  $\lambda = 220 \text{ нм}$  и составляет 99.3 %.

Определим по формуле (7), какая часть энергии излучения, падающего на тонкий фазовый дифракционный элемент дифрагирует в 0, -1 порядки дифракции при глубине рельефа  $d = 0.66 \text{ мкм}$  (см. таблицу 2).

Таблица 2. Дифракционная эффективность для разных порядков дифракции

<b>m</b>	<b><math>\eta</math></b>
-1	0.02 %
0	0.005 %
1	99.4 %

#### Выводы

В данной работе была рассмотрена лазерная литографическая установка и возможность получения на ней многоуровневых фазовых дифракционных элементов с максимальной дифракционной эффективностью. В ходе анализа дифракционной эффективности было выяснено, что данная установка позволяет изготавливать многоуровневые элементы с разрешением вплоть до 147 нм и при этом достичь дифракционную эффективность в первом порядке близкую к 100 %. При этом можно изначально спроектировать элемент так, чтобы дифракционная эффективность была максимальна для требуемой длины волны. Это можно достигнуть выбором фоторезиста (так меняется показатель преломления) и изменением глубины рельефа. Если же расчетную глубину рельефа нельзя достичь с помощью лазерной литографии, то можно рассчитать длину волны, при которой эффективность дифракционного элемента будет максимальна. Из данных приведенных выше следует, что при увеличении глубины рельефа, рабочая длина волны (на которой наблюдается максимальная эффективность) фазового элемента будет расти.

#### Список использованных источников

1. Волков А.В., Головашин Д.Л. и др. Методы компьютерной оптики, под ред. В. А. Сойфера, ФИЗМАТЛИТ, 2003.
2. Гончарский А.В., Попов В.В., Степанов В.В. Введение в компьютерную оптику, издательство Московского университета, 1991.
3. Thomas Hessler, Paul Sherrer. Analysis and optimization of Fabrication of continuous- relief diffractive optical elements, Applied Optics, 1997.
4. G.J. Swanson .Binary optics Technology: The Theory and Design of Multilevel Diffractive Optical Elements, Lincoln Laboratory, 1989.
5. G.J. Swanson, Binary optics Technology : Theoretical Limits on the Diffraction Efficiency of Multilevel Diffractive Optical Elements», Lincoln Laboratory, 1991.