

ДИФРАКЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ДЕЛИТЕЛИ ПУЧКА

Формулируя задачу расчета дифракционных оптических делителей пучка как задачу минимизации функции качества, и определяя соответствующим образом эту функцию, нам удалось провести оптимизацию профиля периода дифракционной решётки, осуществляющей деление падающего светового пучка на порядки равной интенсивности вплоть до 42-х порядков, с величиной функции качества менее 10^{-24} . Экспериментальное исследование изготовленных образцов показало, что разброс в интенсивностях рабочих порядков делителя на 12 пучков составляет 6% при наличии ошибок изготовления, значительных (до 25%) по отношению к ширине канавки, наиболее узкой в периоде решетки.

Введение.

Делители пучка, осуществляющие деление исходного плоского пучка излучения на заданное количество частей (порядков) таким образом, чтобы отношения интенсивностей излучения, распространяющегося в различных порядках, принимали заданные значения являются одними из наиболее простых дифракционных оптических элементов [1]. Делители пучка используются во многих практических задачах, возникающих в голографии, интегральной оптике, оптической обработке информации, оптической томографии, при трёхмерном контроле изделий (объектов) и других областях современной оптики.

Целью настоящей работы является решение задачи синтеза дифракционного оптического элемента, способного разделить исходный плоский пучок на заданное количество частей, а именно, дифракционных порядков, расположенных в одной плоскости, и обладающих равными энергиями.

Постановка задачи.

Задачи расчёта и изготовления дифракционных оптических делителей пучка рассматривались и ранее в работах [2,3,4,5]. Впервые возможность решения задачи такого типа была обоснована в [2], где сообщается о получении фазовой двухуровневой линейной дифракционной решётки с равными энергиями в порядках $-L, \dots, 0, \dots, +L$. Выравнивание интенсивностей достигалось за счет варьирования профиля периода решетки, что приводило к необходимости решать нелинейную систему уравнений с размерностью, равной L , в предположении симметричности фазовой функции периода. Авторам удалось получить решения с величиной L до 8. В дальнейшем Ю.Г.Туркевич и С.Т. Бобров [3] получили решение этой задачи с величиной L до 11, и, переходя к несимметричному профилю периода, [4] они же увеличили количество порядков до 17, однако при этом размерность нелинейной системы уравнений возрасла. И, хотя несимметричное решение допускает примерно в 2 раза больший уход размеров рельефа в периоде решётки от номинала, чем симметричное, данные, приведённые в [4] свидетельствуют о том, что даже для теоретических спектров отклонение

интенсивностей в боковых рабочих порядках от интенсивности, средней по порядкам, составило $\pm 9\%$. Лучшее теоретическое выравнивание интенсивностей (до 1-2 %) удалось достичь в работе [5] путём введения дискретизации фазовой функции и квантования на произвольное число уровней, однако изготовление таких элементов вызывает значительные трудности.

Интенсивность I_l излучения в l -ом порядке дифракции двухуровневой линейной дифракционной решетки с периодом T , показанной на рис.1, полностью определяется рельефом одного периода (профилем периода решётки) и описывается следующим известным решением:

$$I_l = \frac{(C_l^2 + S_l^2)}{(\pi l)^2} \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right), \quad l \neq 0,$$

$$I_0 = 1 - 4Q(1 - Q) \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right),$$

$$C_l = \sum_{n=l}^{2N} (-1)^n \cos(2\pi l x_n),$$

$$S_l = \sum_{n=l}^{2N} (-1)^n \sin(2\pi l x_n),$$

$$Q = \sum_{n=l}^{2N} (-1)^n x_n,$$

$$\varphi = \frac{2\pi \Delta (v - 1)}{\lambda},$$

где x_n - координаты границ канавок в профиле периода решётки, N - количество канавок в периоде, Δ - глубина канавки, λ - длина световой волны, v - показатель преломления материала подложки.

Профиль штриха двухуровневой периодической дифракционной решетки (N=4).

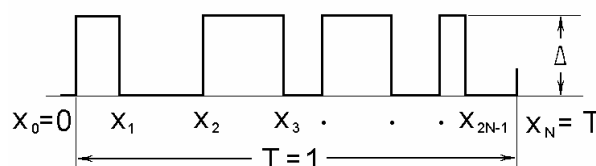


Рис. 1

Выравнивание интенсивностей достигается за счет варьирования профиля периода решетки, а именно, за счет задания положений точек разрыва (границ канавок).

Именно такая постановка задачи обусловлена имеющейся технологией [6] изготовления дифракционных оптических элементов. Отличие настоящей работы от предшествующих заключается в том, что мы свели задачу решения системы нелинейных уравнений к задаче минимизации функции качества и учли технологические требования непосредственно в процессе расчета элемента, что привело к фактически полному теоретическому выравниванию интенсивностей рабочих порядков и лучшему соответствию расчетных и экспериментально полученных значений интенсивностей порядков дифракции.

Рассмотрение задачи оптимизации профиля штриха.

Качество делителя пучка определяется двумя параметрами: полной дифракционной эффективностью (количеством энергии, которая направляется во все рабочие порядки), и степенью равномерности распределения энергии по рабочим порядкам.

Наиболее технологичным является решение, в котором в профиле периода решетки канавки имеют одинаковые или близкие размеры, а так же отсутствуют канавки с такими размерами, которые не могут быть изготовлены на существующем оборудовании.

В связи с вышесказанным, математическая задача определения положения точек разрыва в профиле штриха рассматривалась нами как задача минимизации следующей функции качества:

$$f(x_1, \dots, x_{2N-1}) = \left[I_0 + \sum_{l=1}^{L-1} (I_{l+1} - I_l)^2 \right] + \beta \left[x_l^2 + (1 - x_{2N-1})^2 + \sum_{n=1}^{2N-1} (x_{n+1} - x_n)^2 \right]$$

Функция качества состоит из двух слагаемых. Решение задачи представляет собой глобальный минимум для первого слагаемого. Если нулевой порядок не подавляется, то интенсивность I_0 включается в сумму наравне с другими рабочими порядками. Второе слагаемое позволяет удовлетворить технологическим требованиям. Функция является аналитической и производные первого и второго порядка существуют и ограничены.

В разработанном пакете прикладных программ для численного поиска минимума функции качества используется стандартная программа [7] определения минимума функции методом Ньютона второго порядка. Этот метод отличается надежностью, быстродействием и высокой точностью. Матрица Гессе и вектор градиента вычисляются по формулам, полученным при аналитическом дифференцировании функции качества. Расчет проводится на ЭВМ IBM PC, языком программирования служит Фор-

тран. Комплекс программ позволяет в диалоговом режиме задавать количество дифракционных порядков, демпфирующий множитель и коэффициент β . Поиск минимума проводится циклами. После каждого цикла выводится величина функции качества. Если эта величина равняется нулю, то решение найдено и массив координат точек разрыва выводится на дисплей и на печать.

Экспериментальные результаты.

Нам удалось рассчитывать делители вплоть до 42-х порядков равной интенсивности ($L=21$), при этом величина функции качества равна 10^{-24} . То есть расчетная разница интенсивностей порядков менее 10^{-12} , что значительно превосходит результаты, полученные ранее в [4]. На рис. 2а показан профиль периода дифракционного делителя на 12 порядков.

Профиль периода решётки с 12-ю порядками равной интенсивности. $x_4 - x_3 = 0.04$.

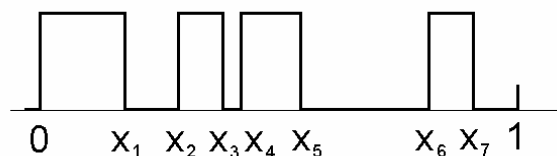


Рис. 2а

По стандартной технологии электронно-лучевой литографии был изготовлен ряд делителей для излучения с длиной волны 0,63 мкм на стеклянных (K8) подложках с расчетной глубиной канавок 0,6 мкм.

Минимальная ширина канавок для делителей на 21 порядок составила $0,035 \times T$, а для делителей на 12 порядков - $0,04 \times T$, где T - основной период решетки. Изготовленные решетки имели следующие периоды: 100 мкм, 150 мкм, 390 мкм. В процессе изготовления допускались ошибки ширины канавок в пределах ± 1 мкм, а так же ошибки глубины травления - $\pm 3\%$ и клин травления в пределах 0,3 мкм.

Экспериментальные исследования образцов проводились на оптической скамье. Источником света служил гелий-неоновый лазер. Дифракционный элемент освещался лазерным пучком, энергия в выбранном порядке измерялась измерителем мощности. Распределение интенсивности в поперечном сечении спектра исследовалось с помощью сканера, базирующегося на МДП-интегральной линейке фотодиодов ЛФ1024-25/1 и имеющего 12-разрядный АЦП [8].

Экспериментальное исследование делителей на 12 порядков показало, что интенсивности в рабочих порядках отличаются от интенсивности, усредненной по порядкам, менее чем на 6%. Делители на 21 порядок демонстрировали больший разброс в

интенсивностях порядков, он составил 11%. Общая дифракционная эффективность составила 92% для решеток с 12-ю порядками ($L=6$) равной интенсивности и 83% - для решеток с 21-м порядком. На рис.2б и 3а приведены распределения интенсивностей в спектрах делителей на 12 и 21 порядок, соответственно. Результаты измерения мощности в дифракционных порядках даны на рис. 2в и 3б.

Распределение интенсивности в спектре делителя на 12 порядков. i - нормированная интенсивность, Y - координата вдоль линейки фотоприёмника.

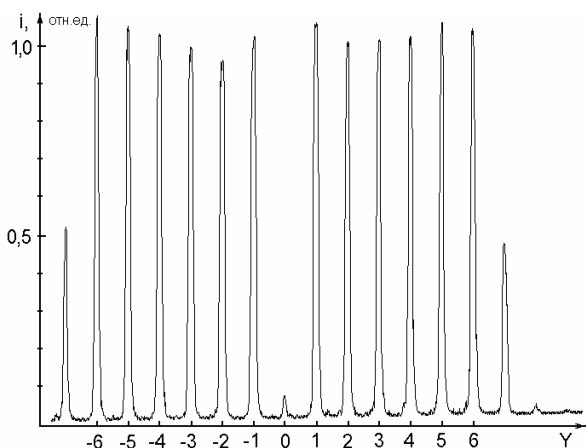


Рис. 2б

Результаты измерения мощности P_n порядков n для делителя на 12 порядков. Величина P_n нормирована на среднее значение по рабочим порядкам.

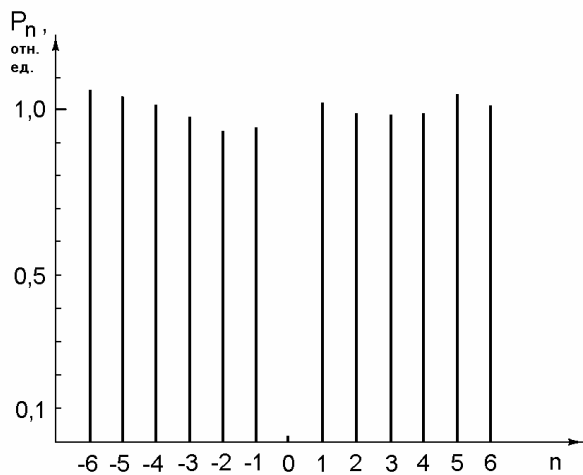


Рис. 2в

Заключение.

Формулируя задачу расчета дифракционных оптических делителей пучка как задачу минимизации функции качества, и определяя соответствующим образом эту функцию, нам удалось провести оптимизацию профиля периода дифракционной решетки, осуществляющей деление падающего

светового пучка на порядки равной интенсивности вплоть до 42-х порядков, с величиной функции качества менее 10^{-24} . Экспериментальное исследование изготовленных образцов показало, что даже ошибки, значительные (до 25%) по отношению к ширине канавки, наиболее узкой в периоде решетки, не приводят к катастрофическим последствиям для распределения интенсивности по порядкам дифракции. Так разброс в интенсивностях рабочих порядков делителя на 12 пучков составил 6%. Этот факт характеризует большую устойчивость полученного решения.

Распределение интенсивности в спектре решетки с 21-м порядком равной интенсивности. i - нормированная интенсивность, Y - координата вдоль линейки фотоприёмника.

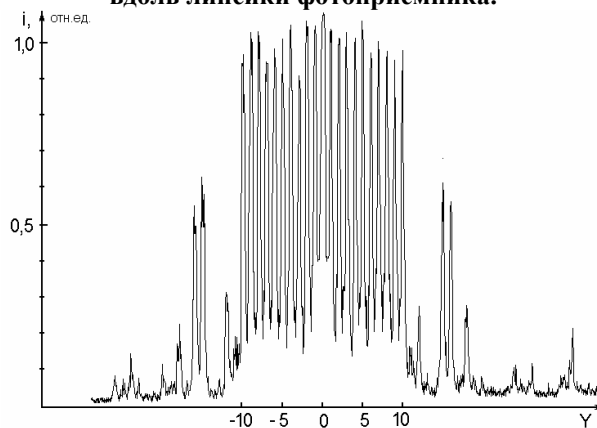


Рис. 3а

Результаты измерения мощности P_n порядков n для делителя на 21 порядок. Величина P_n нормирована на среднее значение по рабочим порядкам.

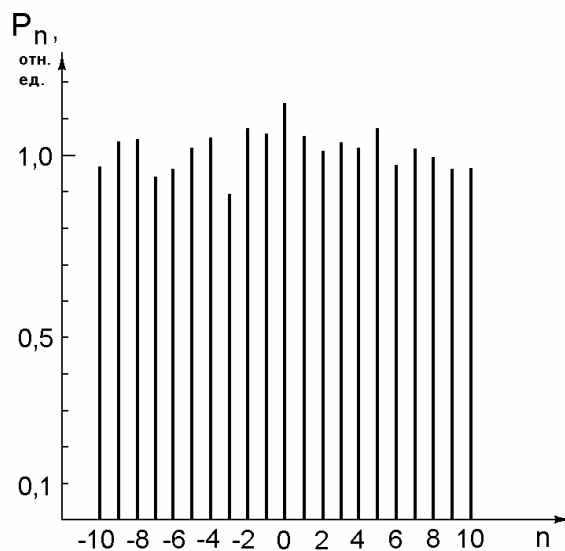


Рис. 3б

Литература.

1. Гончарский А.В., Попов В.В., Степанов В.В.. Введение в компьютерную оптику, М.: Изд-во МГУ, 1991 - 312 с.

2. Damman H., Gortler K. High efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms. *Optical Communication*, 1971, v.3, N5, p.312.

3. Бобров С.Т., Котлецов Б.Н., Минаков В.И. и др. Дифракционные решётки с порядками одинаковой интенсивности.- В кн. Голографические системы // Науч. тр. / НЭТИ, Новосибирск, 1978, вып.2, с.123-129.

4. Бобров С.Т., Туркевич Ю.Г. Многопорядковые дифракционные решётки с несимметричным профилем периода.- *Компьютерная оптика*, 1989, вып.4, с.38.

5. Березный А.Е., Сисакян И.Н. Синтезированные фазовые элементы для интегральных преоб-

разований когерентных оптических полей. - *Компьютерная оптика*, 1989, вып.4, с.9.

6. Korol'kov V.P., Koronkevich V.P., Mikhaltsova I.A., Palchikova I.G., Poleschchuk A.G., Sedukhin A.G., Sokolov A.P., Churin E.G., and Yurlov Yu.I., *Kinofoms: Technology, New components, and Optical systems (part I). Optoelectronics, Instrumentation & Data Processing*, (Allerton Press Inc.) 1989, N 3, p.91-99.

7. Фидлер Дж.К., Найтингейл К. Машинное проектирование электронных схем, М.: "Высшая школа", 1985 - 216 с.

8. Лабусов В.А., Плеханова И.В., Финогенов Л.В. Исследование апертурных характеристик фотодиодных линеек. *Автометрия*, 1989, N 5, с.