

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).

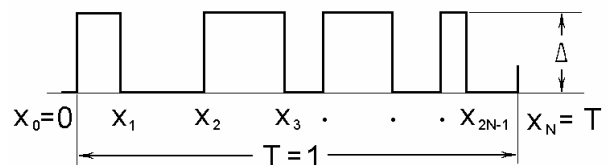


Рис. 1

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. $x_4 - x_3 = 0.04$.

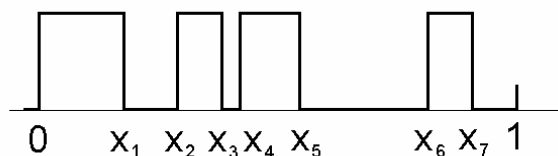


Рис. 2а

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, 150мкм, 390мкм. 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.

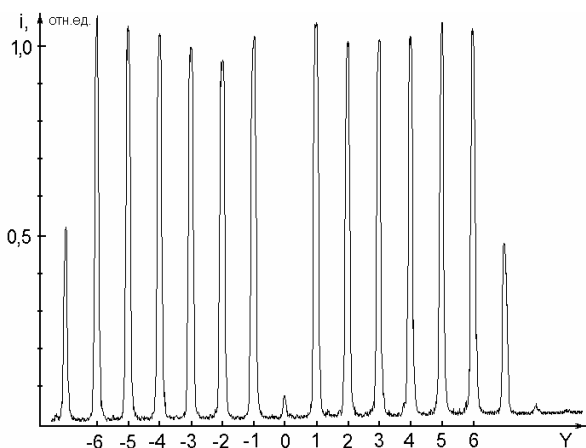


Рис. 2б

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

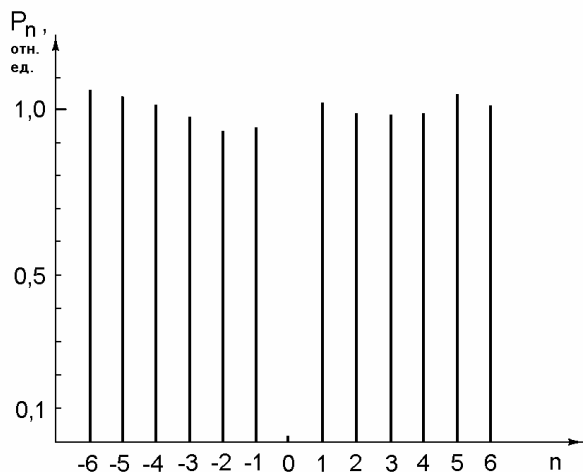


Рис. 2в

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.

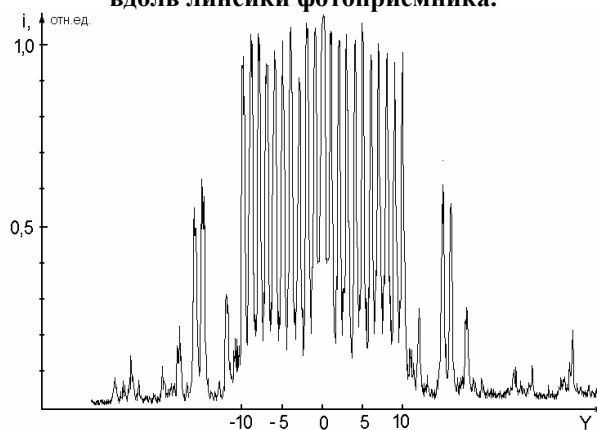


Рис. 3а

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

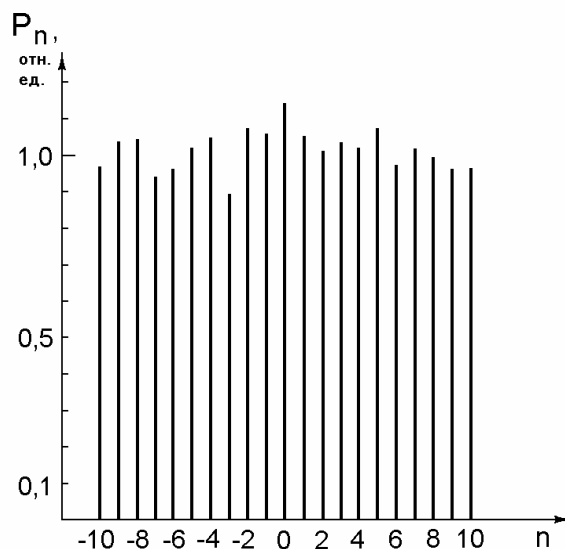


Рис. 3б

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.

Diffractive beam splitters

I.G. Palchikova, A.M. Ryabchun, G.A. Cherkov

Abstract

We have defined the problem of designing the diffractive optical beam splitters as the problem of minimizing the quality function, and defined this function accordingly, thus we were able to optimize the profile of the period of the diffraction grating splitting the incident light beam by the orders of equal intensity up to 42 orders, with a quality function less than 10⁻²⁴. An experimental study of the designed samples showed that the spread in the intensities of the operating orders of a 12-beam splitter is 6% with the significant manufacturing errors (up to 25%) as compared with the width of the narrowest groove of the grid.

Citation: Palchikova IG, Ryabchun AM, Cherkov GA. Diffractive beam splitters. *Computer Optics* 1996; 16: 44-47.

References

- [1] Goncharsky AV, Popov VV, Stepanov VV. Introduction to computer optics; Moscow: MSU Publisher; 1991; 312.
- [2] Damman H, Gortler K. High efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms. *Optical Communication*; 1971; 3(5): 312.
- [3] Bobrov ST, Kofletsov BN, Minakov VI et al. Diffraction grating with same intensity orders. *Hologram systems; Scientific papers; NETI Novosibirsk*; 1978; 2: 123-129.
- [4] Bobrov ST, Turkevich YG. Multi-order diffraction gratings with an asymmetric profile of the period; *Computer Optics*; 1989; 4: 38.
- [5] Berezny AE, Sisakyan IN. Synthesized phase elements for integral transformations of coherent optical fields; *Computer Optics*; 1989; 4: 9.
- [6] Korolkov VP, Koronkevich VP, Mikhaltsova IA, Palchikova IG, Poleshchuk AG, Sedukhin AG, Sokolov AP, Churin EG, Yurlov YI. Kinoforms: technology, new components, and optical systems (part I). *Optoelectronics, Instrumentation & Data Processing (Allerton Press Inc.)*; 1989; 3: 91-99.
- [7] Fidler JK, Nightingale C. *Computer aided circuit design*; Moscow: High School Publisher; 1985; 216.
- [8] Labusov VA, Plekhanova IV, Finogenov LV. Study of aperture characteristics of photodiode arrays. *Avtometriya*; 1989; 5.