

БИНАРНЫЙ ДЕЛИТЕЛЬ ПУЧКА

Казанский Н.Л., Скиданов Р.В.

Институт систем обработки изображений РАН,

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Аннотация

Представлен метод расчёта дифракционного делителя пучка с равномерным распределением порядков внутри заданной эллиптической области. Экспериментально показана работоспособность рассчитанного оптического элемента.

Ключевые слова: делитель пучка, оптическая антенна, дифракционный оптический элемент, дифракционные порядки, диаграмма направленности излучения, набор лучей, бинарный микрорельеф.

Введение

Делители пучка – весьма распространённые оптические элементы, которые предназначены для деления исходного светового пучка на заданное количество пучков. Для этой цели эффективно использование дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [1], разделяющих плоский пучок на заданное количество дифракционных порядков. Как правило, необходимо провести расчёт дифракционного делителя пучка таким образом, чтобы получились равные интенсивности порядков [2-7]. В настоящее время делители пучка применяются в голографии [5], в оптическом приборостроении [4], в интерферометрии [7].

Задачей настоящей статьи является создание технологически простого в изготовлении оптического элемента, формирующего набор порядков, равномерно заполняющих телесный угол заданной формы. Оптические элементы такого типа могут иметь не только вышеперечисленные применения, но использоваться также в лазерных системах посадки летательных аппаратов [9], в «ослепляющих» системах и лазерных шоу. Основой для создания ДОЭ такого типа могут служить методы синтеза оптических антенн [10-11], используемые, в частности, в светотехнике [12-14]. При этом для равномерного заполнения телесного угла вполне подходят оптические элементы, формирующие осесимметричное распределение порядков. Для расчёта таких ДОЭ может быть использована скалярная теория дифракции, в отличие от несимметричных антенн [15], для расчёта которых желателен строгий подход теории дифракции, то есть решение уравнений Максвелла [1]. Делители пучка, рассчитываемые в рамках строгой электромагнитной теории, имеют малые размеры и обычно формируют только ± 1 порядки дифракции [3-6]. Для увеличения яркости каждого луча, направляемого в заданный телесный угол, необходимо использование специальных дифракционных подходов [16-20], обеспечивающих то, что каждая фокальная точка (или фокальная линия) формируется всей апертурой ДОЭ, а не её сегментом, что обеспечивает максимальное разрешение. В отличие от дифракционного делителя пучка, предложенного в работе [8], который фокусирует каждый порядок в заданную плоскую область [21-23], нам необходимо, чтобы каждый поряд-

док дифракции формировал узкий пучок с требуемой диаграммой направленности излучения, и таких порядков дифракции было даже не десятки, а сотни. Желательно при расчёте многопорядковых ДОЭ с равными интенсивностями порядков учитывать технологические погрешности формирования микрорельефа [24], а для упрощения технологии и удешевления изготовления сразу рассчитывать бинарный рельеф [25,20]. При этом простой способ, который заключается в простом сложении вместе набора дифракционных решёток, каждая из которых формирует дифракционный порядок нужного направления, не всегда подходит, т.к. чрезмерно большое количество таких решёток попросту «стирает» микрорельеф ДОЭ. В настоящей работе предлагается простой способ расчёта многопорядковых бинарных делителей пучка с двумерным радиальным распределением дифракционных порядков. Суть метода в использовании при расчёте ДОЭ суперпозиции многопорядковых бинарных решёток.

1. Постановка задачи

Необходимо сформировать равномерное распределение порядков равной интенсивности, распространяющихся внутри телесного угла и заполняющих на определённом расстоянии двумерную область в форме эллипса с заданными параметрами. Один из вариантов расположения порядков показан на рис. 1.

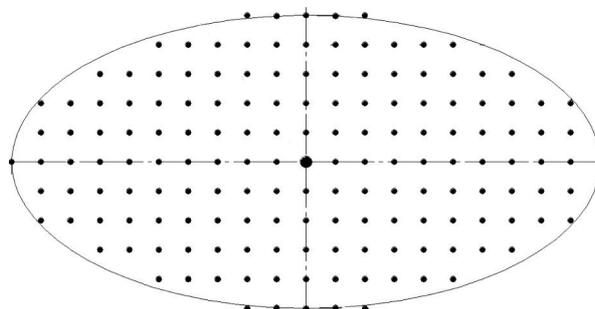


Рис. 1. Примерное расположение порядков в области эллиптической формы

Такое расположение порядков заставляет вспомнить о задаче расчёта многопорядковых ДОЭ [16-20, 26].

Для формирования пространственно разделённых пучков, а также для получения бинарного фазо-

вого элемента обычно используется процедура кодирования [16-20, 26-27]. При расчёте таких многопорядковых ДОЭ к фазовым функциям Φ_{mn} добавляются дифракционные решётки, формирующие порядки с нужным направлением

$$\tau(x, y) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N C_{mn} \exp(i\Phi_{mn}) \exp(i\omega_{mnx}x + i\omega_{mny}y), \quad (1)$$

где (x, y) – декартовы координаты, k – волновое число, $(\omega_{mnx}, \omega_{mny})$ – пространственные частоты.

Частоты (ω_x, ω_y) определяют положение соответствующего порядка. Координаты центра соответствующего дифракционного порядка будут определяться формулами

$$x_{mn} = \frac{\lambda z \omega_{mnx}}{2\pi}; y_{mn} = \frac{\lambda z \omega_{mny}}{2\pi}, \quad (2)$$

где z – расстояние от ДОЭ до плоскости наблюдения, λ – длина волны. Если при этом осуществить бинаризацию полученной фазовой функции по следующей формуле

$$\tau_b(x, y) = \arg \{ \tau(x, y) + \tau^*(x, y) \}, \quad (3)$$

где $*$ – комплексное сопряжение, то мы получим бинарный ДОЭ, формирующий осесимметричное расположение порядков.

Получившийся ДОЭ будет формировать, кроме порядков с координатами (2), дополнительные порядки с координатами

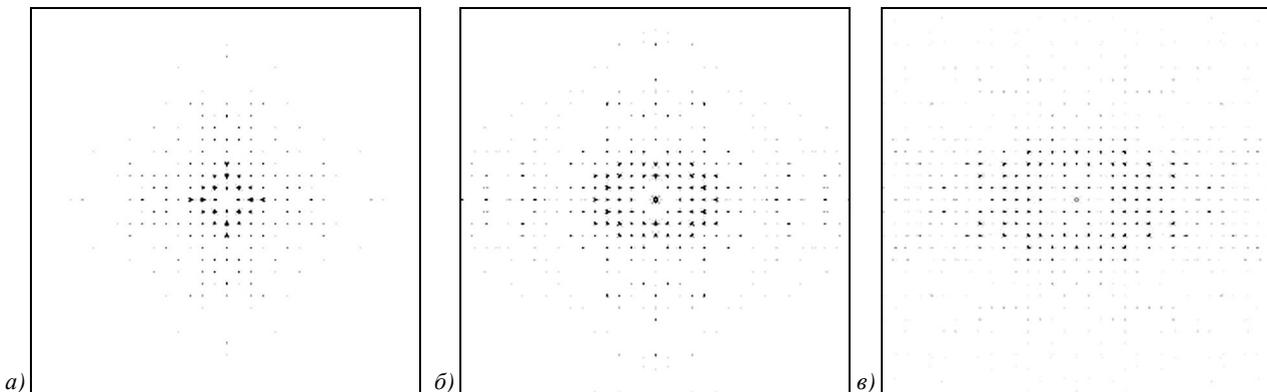


Рис. 2. Формирование 12 (а), 50 (б) и 150 (в) порядков с помощью ДОЭ

При задании координат порядков в узлах сетки в декартовых координатах через одинаковые промежутки требуется слишком большое количество дифракционных решёток; накладываясь одна на другую, они при большом количестве порядков взаимно компенсируют друг друга. Совершенно другая ситуация наблюдается, если располагать дифракционные порядки эквидистантно по полярным координатам. На рис. 3а изображён ДОЭ, формирующий набор порядков по радиусам внутри эллиптической области (рис. 3б). ДОЭ, представленный на рис. 3а, состоит из 10 многопорядковых решёток с количеством порядков от 5 до 10.

Отношение разности максимума и минимума интенсивности в центре порядка к среднему значению

$$x_{mn} = -\frac{\lambda z \omega_{mnx}}{2\pi}; y_{mn} = -\frac{\lambda z \omega_{mny}}{2\pi}. \quad (4)$$

Если в формуле (1) принять $C_{mn} = 1$ и $\Phi_{mn} = 1$, то полученный таким образом элемент будет просто делить исходный пучок на $2 \times M \times N$ порядков.

Однако, если реализовывать описанную методику для эквидистантного расположения порядков по декартовым координатам, как показано на рис. 1, то при большом количестве порядков (более 20-30) быстро растёт неравномерность интенсивности порядков (рис. 2). На рис. 2а показано распределение интенсивности от ДОЭ, составленного из четырёх двухпорядковых решёток, на рис. 2б – из двенадцати решёток с количеством порядков от 3 до 6, на рис. 2в – из тридцати решёток с количеством порядков от 3 до 8.

Для сравнения равномерности распределения интенсивности по порядкам будем рассматривать отношение разности максимума и минимума интенсивности порядков к среднему значению интенсивности порядков.

Для рис. 2а такое отношение составляет 0,34; для рис. 2б – 1,2; для рис. 2в – 3,1. Такая сильная неравномерность делает неэффективным использование элемента. Причины такой сильной неравномерности интенсивности порядков, в общем-то, понятны. Формула (1) при $C_{mn} = 1$ и $\Phi_{mn} = 1$ описывает элемент, который представляет собой суперпозицию многопорядковых дифракционных решёток, повернутых относительно друг друга.

интенсивности в центре порядка для распределения на рис. 3б составляет 0,62. Это значительно лучше, чем у рассмотренных ранее ДОЭ. Недостатком рассчитанного ДОЭ является сильная неравномерность расположения порядков в зависимости от расстояния до оптической оси, что является особенностью полярных координат.

Для устранения этого недостатка предлагается заполнить наиболее удалённые от центрального порядка области дополнительными порядками за счёт добавления в фазу элемента ещё восьми многопорядковых решёток, расположенных так, чтобы порядки от них располагались на биссектрисах углов между соседними секторами (рис. 3б). На рис. 4а представлен такой ДОЭ, а на рис. 4б – распределе-

ние интенсивности, сформированное с его помощью в зоне дифракции Фраунгофера.

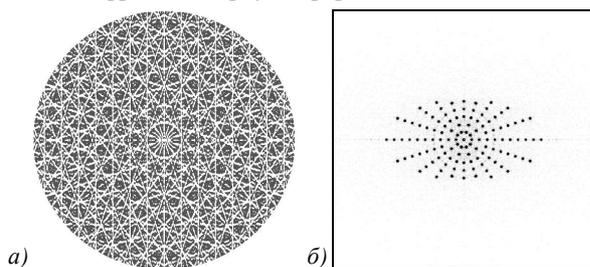


Рис. 3. ДОЭ, формирующий набор порядков по радиусам внутри эллиптической области (а); распределение интенсивности, полученное в результате моделирования дифракции в дальней зоне (б)

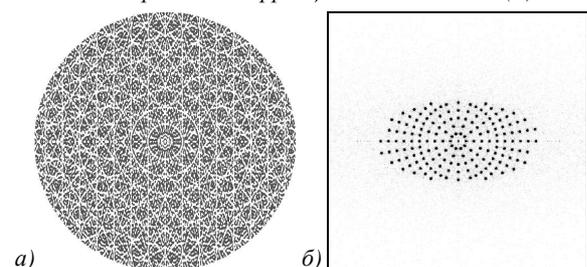


Рис. 4. ДОЭ, формирующий набор порядков по радиусам внутри эллиптической области с дополнительными порядками (а); распределение интенсивности, полученное в результате моделирования дифракции в дальней зоне (б)

Отношение разности максимума и минимума интенсивности в центре порядка к среднему значению интенсивности в центре порядка для распределения на рис. 4б составляет 0,64, что не сильно отличается от предыдущего результата. Рассчитанный таким образом ДОЭ диаметром 3,2 мм при дискретизации 3 мкм на отсчёт и длине волны падающего пучка в 532 нм должен формировать на расстоянии 4 м от ДОЭ набор из 150 ярких точек внутри эллиптической области размером 100×200 мм.

2. Эксперимент

Для проверки правильности полученных выше в ходе вычислительных экспериментов [28-29] результатов работы ДОЭ его фазовая функция была выведена на фазовом динамическом модуляторе света SLR OPTO [27, 30-31].

Модулятор был освещён плоской волной с расходимостью менее 0,5 мрад. Т.к. размер пикселя у модулятора составляет 15 мкм, то размер формируемой эллиптической области уменьшается тоже в 5 раз. На рис. 5 представлено изображение, полученное на расстоянии 4 м от модулятора на белом экране.

Так как съёмка осуществлялась под углом, на рис. 5 видно некоторое искажение картины дифракции. Большой размер нулевого порядка объясняется несогласованностью задержки фазы в модуляторе с длиной волны.

Амплитудный шаблон фазы этого ДОЭ был записан на станции лазерной записи CLWS-200 [30-31] с разрешением 3 мкм в двух вариантах: для длин волн 532 нм и 650 нм. Получившийся амплитудный

ДОЭ был помещён в оптическую схему, представленную на рис. 6. Освещение осуществлялось лазерным пучком без коллимации.

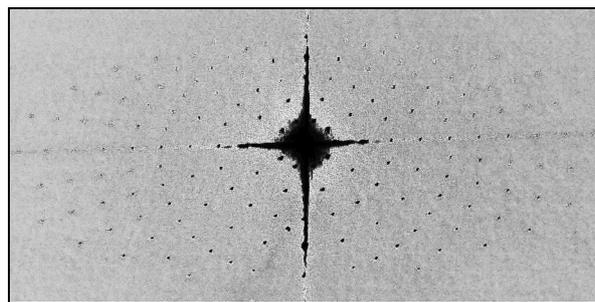


Рис. 5. Распределение интенсивности на расстоянии 4 м от модулятора

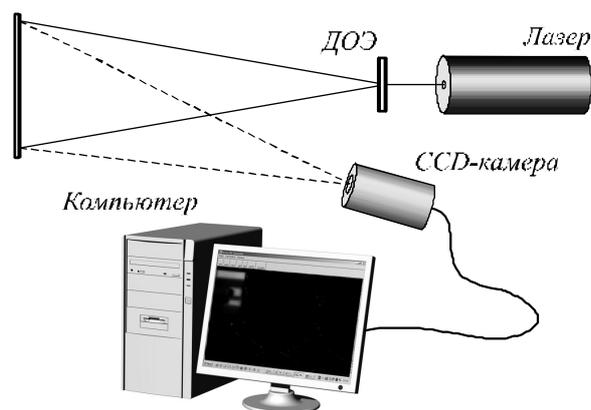


Рис. 6. Оптическая схема эксперимента

Для исследования ДОЭ, рассчитанного на работу с длиной волны 532 нм, использовался твердотельный лазер с расходимостью пучка 1,2 мрад. Получившееся на экране распределение интенсивности снималось с расстояния в 4 м CCD-камерой, расположенной под небольшим углом к оптической оси. На рис. 7а представлены результаты для зелёного лазера. Элемент, рассчитанный на работу с длиной волны 650 нм, был освещён пучком гелий-неонового лазера с длиной волны 633 нм и расходимостью 2,5 мрад.

Как видно из рис. 7, лазер с большей расходимостью даёт на расстоянии 4 м некоторое уширение дифракционных порядков. Отношение разности максимума и минимума интенсивности в центре порядка к среднему значению интенсивности в центре порядка для распределения на рис. 7а составляет 0,59, а на рис. 7б – 0,55. Это даже лучше, чем на изображениях, полученных в результате моделирования (рис. 4б).

На основе амплитудного ДОЭ был изготовлен фазовый ДОЭ с высотой микрорельефа 480 нм, который также был исследован в оптической схеме, представленной на рис. 6. На рис. 8 представлено распределение интенсивности в получившемся пучке.

Как видно из рис. 8, использование фазового ДОЭ позволяет более равномерно распределить энергию по порядкам. Так, по результатам измерения интенсивность центрального порядка всего в 1,9 раза превышает среднюю интенсивность других порядков.

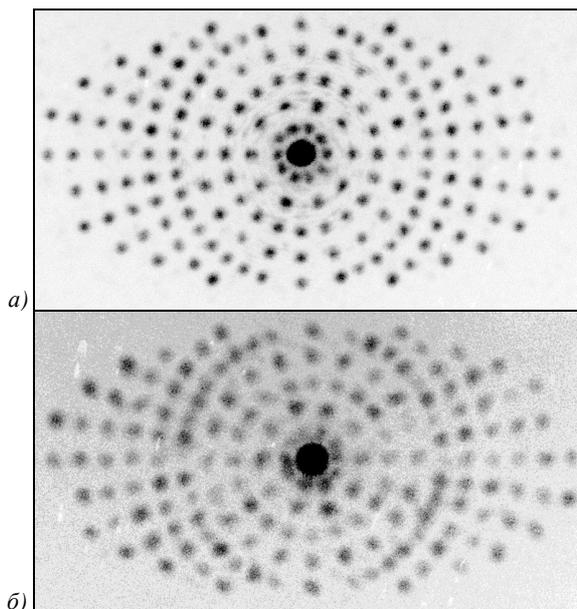


Рис. 7. Распределения интенсивности, сформированные на расстоянии 4 м от ДОО при освещении: твёрдотельным лазером с длиной волны 532 нм (а), гелий-неоновым лазером с длиной волны 633 нм (б)

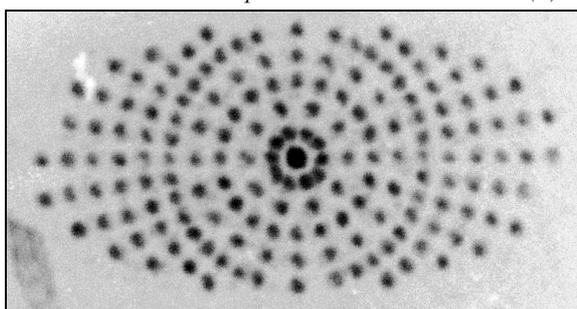


Рис. 8. Распределение интенсивности в пучке после фазового ДОО

Заключение

Описан метод расчёта бинарного делителя пучка с равномерным распределением дифракционных порядков по области эллиптической формы. Показано, что расположение порядков по узлам сетки в полярных координатах даёт лучший результат по сравнению с декартовыми. Проведен натурный эксперимент, доказывающий работоспособность предложенного метода расчёта бинарного делителя пучка.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Президента РФ (№ НШ-7414.2010.9 и № МД-8026.2010.2), грантов РФФИ №№ 10-07-00109, 10-07-00553, 11-07-13164 и 11-07-00153, а также Государственных контрактов № 02.740.11.0805 и № 14.740.11.0016. Авторы благодарны С.Б. Одинокону и С.И. Харитонову за плодотворное обсуждение задачи, а О.Ю. Моисееву и Д.М. Якуненьковой – за помощь в организации оптического эксперимента.

Литература

1. Дифракционная компьютерная оптика / под ред. В.А. Соифера. – М.: Физматлит, 2007. – 736 с.

2. Пальчикова, И.Г. Дифракционные оптические делители пучка / И.Г. Пальчикова, А.М. Рябчун, Г.А. Черков // Компьютерная оптика. – 1996. – № 16. – С. 44-47.
3. Borghi, R. Diffractive variable beam splitter: optimal design / R. Borghi and G. Cincotti // J. Opt. Soc. Am. A. – 2000 – Vol. 17, N 1. – P. 63-67.
4. Feng, D. Design and fabrication of continuous-profile diffractive micro-optical elements as a beam splitter / Di Feng, Yingbai Yan, Guofan Jin and Shoushan Fan // Applied Optics. – 2004. – Vol. 43, N 29. – P. 5476-5480.
5. Gong, D. Two-dimensional higher-diffraction-order optical beam splitter based on hexanethrenequinone-doped poly(methylmethacrylate) photopolymer / Dewei Gong, Zhongxiang Zhou, Hongpeng Liu, Jian Wang and Hongyue Gao // Optics and Lasers in Engineering. – 2009. – Vol. 47, Issue 6. – P. 662-666.
6. Hermerschmidt, A. Binary diffractive beam splitters with arbitrary diffraction angles / A. Hermerschmidt and S. Kruger // Optics Letters. – 2007. – Vol. 32, - N 5. – P. 448-450.
7. Friedrich, D. Diffractive beam splitter characterization via a power-recycled interferometer / Daniel Friedrich, Oliver Burmeister, Alexander Bunkowski, Tina Clausnitzer, Stephan Fahr, Ernst-Bernhard Kley, Andreas Tünnermann, Karsten Danzmann and Roman Schnabel // Optics Letters. – 2008. – Vol. 33, N 2. – P. 101-103.
8. Chen, S.A. Combination of Diffractive Shaper and Splitter for Multiple Beam Laser Processing System / Sin-An Chen, Cheng-Huan Chen, Yu-Chung Lin, Min-Kai Lee and Sung-Ho Liu // Proceedings of OSA Conference "CLEO-2011", 2011, May 1-6, Baltimore, USA, paper JMG4.
9. Свердлов, М.И. Лазерная система посадки воздушных судов / М.И. Свердлов, Г.К. Жуков, В.В. Логунов, Н.И. Лата, Л.С. Шварц, С.И. Гусев, Д.А. Дубовицкий // Патент РФ на изобретение № 2369532 от 10.10.2009.
10. Голуб, М.А. Синтез оптической антенны / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Компьютерная оптика. – 1987. – № 1. – С. 35-40.
11. Bharadwaj, P. Optical Antennas / Palash Bharadwaj, Bradley Deutsch, and Lukas Novotny // Advances in Optics and Photonics. – 2009. – Vol. 1, N 3. – P. 438-483.
12. Kazanskiy, N.L. DOE-based Lighting Devices / N.L. Kazanskiy // Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements, edited by Victor A. Soifer. – A Wiley Interscience Publication. John Wiley & Sons, Inc., 2002. – P. 651-671.
13. Kazanskiy, N.L. Investigation of Lighting Devices Based on Diffractive Optical Elements / N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer, A.V. Volkov // Optical Memory & Neural Networks. – 2000. – Vol. 9, N 4. – P. 301-312.
14. Doskolovich, L.L. A DOE to form a line-shaped directivity diagram / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, S.I. Kharitonov, P. Perlo // Journal of Modern Optics. – 2004. – Vol. 51, - N 13. – P. 1999-2005.
15. Song, J.-H. Optical recoil of asymmetric nano-optical antenna / Jung-Hwan Song, Jonghwa Shin, Hee-Jin Lim, and Yong-Hee Lee // Optics Express. – 2011. – Vol. 19, - N 16. – P. 14929-14936.
16. Golub, M.A. Focusators at letters diffraction design / M.A. Golub, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, I.N. Sisakian, V.A. Soifer // Proceedings of SPIE. – 1991. – Vol. 1500. – P. 211-221.
17. Golub, M.A. Computer generated diffractive multi-focal lens / M.A. Golub, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // Journal of Modern Optics. – 1992. – Vol. 39, N 6. – P. 1245-1251.

18. **Голуб, М.А.** Дифракционный подход к синтезу многофункциональных фазовых элементов / М.А. Голуб, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.А. Сойфер, С.И. Харитонов // Оптика и спектроскопия. – 1992. – Т. 73, № 1. – С. 191-195.
19. **Soifer, V.A.** Multifocal diffractive elements / V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // Optical Engineering. – 1994. – Vol. 33, N 11. – P. 3610-3615.
20. **Doskolovich, L.L.** Direct two-dimensional calculation of binary DOEs using a non-binary series expression approach / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, P. Perlo, P. Repetto, V.A. Soifer // International Journal of Optoelectronics. – 1995. – Vol. 10, N 4. – P. 243-250.
21. **Голуб, М.А.** Исследование фокусаторов в прямоугольник методом вычислительного эксперимента / М.А. Голуб, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.А. Сойфер, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 1992. – № 10-11. – С. 110-122.
22. **Досколович, Л.Л.** Расчёт бинарных дифракционных оптических элементов для фокусировки в заданную двумерную область / Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.А. Сойфер // Автометрия. – 1995. – № 5. – С. 42-50.
23. **Doskolovich, L.L.** A method of designing diffractive optical elements focusing into plane areas / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // Journal of Modern Optics. – 1996. – Vol. 43, - N 7. – P. 1423-1433.
24. **Doskolovich, L.L.** Designing Binary Diffraction Gratings with Etching Wedge areas / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, E.V. Tyavin // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). – 2005. – Vol. 14, - N 2. – P. 91-96.
25. **Golovashkin, D.L.** Technology of DOE Fabrication / D.L. Golovashkin, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, V.S. Pavelyev, V.S. Solovuyev, G.V. Usplenyev, A.V. Volkov // Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements / edited by Victor A. Soifer. – A Wiley Interscience Publication. John Wiley & Sons, Inc. 2002. – P. 267-345.
26. **Хонина, С.Н.** Экспериментальное формирование и селекция мод Гаусса-Эрмита с помощью ДОО / С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2002. – № 23. – С. 15-22.
27. **Скиданов, Р.В.** Оптическая микроманипуляция с использованием бинарного динамического модулятора света / Р.В. Скиданов, С.Н. Хонина, В.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2008/ – Т. 32, № 4. – С. 361-366.
28. **Голуб, М.А.** Вычислительный эксперимент с элементами плоской оптики / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Автометрия. – 1988. – № 1. – С. 70-82.
29. **Казанский, Н.Л.** Математическое моделирование оптических систем / Н.Л. Казанский. – Самара: СГАУ, 2005. – 240 с.
30. **Казанский, Н.Л.** Исследовательский комплекс для решения задач компьютерной оптики / Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2006. – № 29. – С. 58-77.
31. **Казанский, Н.Л.** Исследовательско-технологический центр дифракционной оптики / Н.Л. Казанский // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – Т. 13, - № 4. – С. 54-62.
2. **Palchikova, I.G.** Diffractive optical beam splitters / I.G. Palchikova, A.M. Ryabchun, G.A. Cherkov // Computer Optics. – 1996. – N 16. – P. 44-47. – (in Russian).
3. **Borghi, R.** Diffractive variable beam splitter: optimal design / R. Borghi and G. Cincotti // J. Opt. Soc. Am. A. – 2000 – Vol. 17, N 1. – P. 63-67.
4. **Feng, D.** Design and fabrication of continuous-profile diffractive micro-optical elements as a beam splitter / Di Feng, Yingbai Yan, Guofan Jin and Shoushan Fan // Applied Optics. – 2004. – Vol. 43, N 29. – P. 5476-5480.
5. **Gong, D.** Two-dimensional higher-diffraction-order optical beam splitter based on hexanethrenequinone-doped poly(methylmethacrylate) photopolymer / Dewei Gong, Zhongxiang Zhoua, Hongpeng Liua, Jian Wang and Hongyue Gaoa // Optics and Lasers in Engineering. – 2009. – Vol. 47, Issue 6. – P. 662-666.
6. **Hermerschmidt, A.** Binary diffractive beam splitters with arbitrary diffraction angles / A. Hermerschmidt and S. Kruger // Optics Letters. – 2007. – Vol. 32, N 5. – P. 448-450.
7. **Friedrich, D.** Diffractive beam splitter characterization via a power-recycled interferometer / Daniel Friedrich, Oliver Burmeister, Alexander Bunkowski, Tina Clausnitzer, Stephan Fahr, Ernst-Bernhard Kley, Andreas Tünnermann, Karsten Danzmann and Roman Schnabel // Optics Letters. – 2008. – Vol. 33, N 2. – P. 101-103.
8. **Chen, S.A.** Combination of Diffractive Shaper and Splitter for Multiple Beam Laser Processing System / Sin-An Chen, Cheng-Huan Chen, Yu-Chung Lin, Min-Kai Lee and Sung-Ho Liu // Proceedings of OSA Conference “CLEO-2011”, 2011, May 1-6, Baltimore, USA, paper JMG4.
9. **Sverdlov, M.I.** The laser system for aircraft landing / M.I. Sverdlov, G.K. Zhukov, V.V. Logunov, N.I. Lata, L.S. Schwartz, S.I. Gusev, D.A. Dubovitsky // Patent RF N 2369532 of 10/10/2009. – (in Russian).
10. **Golub, M.A.** Synthesis of optical antennae / M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, A.M. Prokhorov, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer // Computer Optics (Pergamon Press). – 1989. – Vol. 1, N 1. – P. 25-28.
11. **Bharadwaj, P.** Optical Antennas / Palash Bharadwaj, Bradley Deutsch, and Lukas Novotny // Advances in Optics and Photonics. – 2009. – Vol. 1, N 3. – P. 438-483.
12. **Kazanskiy, N.L.** DOE-based Lighting Devices / N.L. Kazanskiy // Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements. edited by Victor A. Soifer. – A Wiley Interscience Publication. John Wiley & Sons, Inc., 2002. – P. 651-671.
13. **Kazanskiy, N.L.** Investigation of Lighting Devices Based on Diffractive Optical Elements / N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer, A.V. Volkov // Optical Memory & Neural Networks. – 2000. – Vol. 9, N 4. – P. 301-312.
14. **Doskolovich, L.L.** A DOE to form a line-shaped directivity diagram / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, S.I. Kharitonov, P. Perlo // Journal of Modern Optics. – 2004. – Vol. 51, N 13. – P. 1999-2005.
15. **Song, J.-H.** Optical recoil of asymmetric nano-optical antenna / Jung-Hwan Song, Jonghwa Shin, Hee-Jin Lim, and Yong-Hee Lee // Optics Express. – 2011. – Vol. 19, N 16. – P. 14929-14936.
16. **Golub, M.A.** Focusators at letters diffraction design / M.A. Golub, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, I.N. Sisakian, V.A. Soifer // Proceedings of SPIE. – 1991. – Vol. 1500. – P. 211-221.
17. **Golub, M.A.** Computer generated diffractive multi-focal lens / M.A. Golub, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // Journal of Modern Optics. – 1992. – Vol. 39, N 6. – P. 1245-1251.

References

1. Diffractive computer optics / edited by V.A. Soifer. – Moscow: “Fizmatlit” Publisher, 2007. – 736 p. – (in Russian).

18. **Golub, M.A.** Diffraction approach to design of multifunctional phase elements / M.A. Golub, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, S.I. Kharitonov // *Optics and Spectroscopy*. – 1992. – Vol. 73, N 1. – P. 191-195. – (in Russian).
19. **Soifer, V.A.** Multifocal diffractive elements / V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // *Optical Engineering*. – 1994. – Vol. 33, N 11. – P. 3610-3615.
20. **Doskolovich, L.L.** Direct two-dimensional calculation of binary DOEs using a non-binary series expression approach / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, P. Perlo, P. Repetto, V.A. Soifer // *International Journal of Optoelectronics*. – 1995. – Vol. 10, N 4. – P. 243-250.
21. **Golub, M.A.** Investigation of focusators in rectangle by computational experiment / M.A. Golub, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, S.I. Kharitonov // *Computer Optics*. – 1992. – N 10-11. – P. 110-122. – (in Russian).
22. **Doskolovich, L.L.** Computation of binary diffractive optical elements for focusing into given two-dimensional region / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer // *Avtometriya*. – 1995. – N 5. – P. 42-50. – (in Russian).
23. **Doskolovich, L.L.** A method of designing diffractive optical elements focusing into plane areas / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // *Journal of Modern Optics*. – 1996. – Vol. 43, N 7. – P. 1423-1433.
24. **Doskolovich, L.L.** Designing Binary Diffraction Gratings with Etching Wedge areas / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, E.V. Tyavin // *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*. – 2005. – Vol. 14, N 2. – P. 91-96.
25. **Golovashkin, D.L.** Technology of DOE Fabrication / D.L. Golovashkin, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, V.S. Pavelyev, V.S. Solovyev, G.V. Usplenyev and A.V. Volkov // *Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements* / edited by Victor A. Soifer. – A Wiley Interscience Publication. John Wiley & Sons, Inc., 2002. – P. 267-345.
26. **Khonina, S.N.** Experimental generation and selection of modes of Gauss-Hermite with using DOE / S.N. Khonina // *Computer Optics*. – 2002. – N 23. – P. 15-22. – (in Russian).
27. **Skidanov, R.V.** Optical micromanipulation using a binary dynamic light modulator / R.V. Skidanov, S.N. Khonina, V.V. Kotlyar // *Computer Optics*. – 2008. – Vol. 32, N 4. – P. 361-366. – (in Russian).
28. **Golub, M.A.** Computational experiment with plane optical elements / M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 1988. – N 1. – P. 78-89.
29. **Kazanskiy, N.L.** Mathematical simulation of optical systems / N.L. Kazanskiy. – Samara: "SSAU" Publisher, 2005. – 240 p. – (in Russian).
30. **Kazanskiy, N.L.** Research facility to solve the problems of computer optics / N.L. Kazanskiy // *Computer Optics*. – 2006. – N 29. – P. 58-77. – (in Russian).
31. **Kazanskiy, N.L.** Research & technological center of diffractive optics / N.L. Kazanskiy // *Proceedings of the Samara Scientific Center of RAS*. – 2011. – Vol. 13, N 4. – P. 54-62. – (in Russian).

DIFFRACTIVE BEAM SPLITTER

N.L. Kazanskiy, R.V. Skidanov

Image Processing Systems Institute of the RAS,

S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University)

Abstract

We proposed a method for calculating the diffractive beam splitter to design the distribution of diffractive orders within a given elliptic region. We demonstrated experimentally the operability of calculated optical element.

Key words: beam splitter, an optical antenna, diffractive optical element, diffraction orders, directivity diagram, a set of rays, binary microrelief.

Сведения об авторах

Сведения об авторе Казанский Николай Львович – см. стр. 328 этого номера.



Скиданов Роман Васильевич, 1973 года рождения. В 1990 году с отличием окончил Самарский государственный университет (СамГУ) по специальности «Физика». Доктор физико-математических наук (2007 год), работает старшим научным сотрудником лаборатории лазерных измерений Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики СГАУ. Скиданов Р.В. – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанопластики. В списке научных работ Р.В. Скиданова 60 статей, 3 монографии.

E-mail: romans@smr.ru.

Roman Vasilevich Skidanov (b. 1973) graduated with honours (1990) from the Samara State University (SSU), majoring in Physics. He received his Doctor in Physics & Maths (2007) degrees from Samara State Aerospace University. He is the senior researcher laboratory of laser measurement at the Samara Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS), holding a part-time position of professor at SSAU's Technical Cybernetics sub-department. He is co-author of 60 scientific papers, 3 monographs. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics.

Поступила в редакцию 29 июня 2011 г.