

**ДИФРАКЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОКУСАТОРОВ**

© 2012 П.Г. Серафимович

Институт систем обработки изображений РАН, г. Самара

Статья поступила в редакцию 28.08.2012

Анализируются возможности вычислительного эксперимента при исследовании фокусаторов лазерного излучения. Обосновывается необходимость применения вычислительного эксперимента при выборе метода решения некорректных обратных задач теории дифракции, анализе новых типов фокусаторов лазерного излучения, реализуемости и эффективности оптических элементов при заданных физических параметрах оптической схемы.

Ключевые слова: фокусаторы лазерного излучения, информационные технологии, вычислительный эксперимент, дифракционные оптические элементы, дифракционный расчет.

**ВВЕДЕНИЕ**

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) работают на основе дифракции монохроматического света на микрорельефе. Благодаря гибкости компьютерного проектирования дифракционного микрорельефа и возможностям современного прецизионного оборудования для его формирования мы получаем уникальный оптический инструмент для требуемой фокусировки лазерного излучения [1-3].

В предлагаемой работе обосновывается необходимость применения вычислительного эксперимента при выборе метода решения некорректных обратных задач теории дифракции, анализе новых типов фокусаторов лазерного излучения, реализуемости и эффективности оптических элементов при заданных физических параметрах оптической схемы и имеющихся технологических возможностях формирования дифракционного микрорельефа.

**1. ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ФОКУСИРУЮЩИХ ДОЭ**

Среди характеристик, описывающих процессы создания и функционирования фокусатора, можно выделить три вида параметров [4-6].

К первому виду относятся физические параметры, положенные в основу расчета фазовой функции ДОЭ: фокусное расстояние; рабочая длина волны; размеры фокусатора и области фокусировки, а также характеристики, описывающие ее форму и форму фокусируемого пучка; угол падения излучения на оптический элемент и т.п.

Ко второму виду относятся параметры дискретизации и квантования фазовой функции фо-

*Серафимович Павел Григорьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики. E-mail: serp@smr.ru*

кусатора, размеры и форма элементов разрешения фокусатора. Эти параметры связаны с выбором устройства регистрации фазовой функции ДОЭ и спецификой ее расчета.

К третьему виду относятся дифракционные характеристики фокусатора - энергетическая эффективность, ширина фокальной линии, среднеквадратическое отклонение полученного распределения интенсивности в фокальной области от требуемого и т.п.

Для проектирования фокусирующих ДОЭ первые два вида параметров являются внутренними, а дифракционные параметры - внешними, получающимися в результате функционирования фокусатора с выбранными внутренними параметрами. Для исследования фокусатора важно выявить связь внешних и внутренних параметров проектирования. Причем, учитывая трудоемкость, многовариантность процедуры изготовления ДОЭ, исследовать характеристики фокусатора необходимо уже на стадии проектирования.

**2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ  
И ОБОРУДОВАНИЕ**

Для моделирования работы фокусаторов разработан ряд методов, основанных на вычислении интегралов Френеля-Кирхгофа с максимальным использованием аналитических базовых решений [4-6] прямой задачи дифракции. Для исследования влияния мелких технологических погрешностей изготовления дифракционного микрорельефа и моделирования короткофокусных ДОЭ используются различные методы решения уравнений Максвелла [7-12] с соответствующими алгоритмами распараллеливания вычислений [13-14] и использованием графических процессоров [15-16] либо вычислительных кластеров [17-18]. Для реализации этих методов создан ряд программных

комплексов [19-22] и используются мощные вычислительные ресурсы [23]: кластер ИСОИ РАН (HP VLc3000 производительностью 1,3 ТФлопс), университетский кластер СГАУ «Сергей Королев» (производительностью 15 ТФлопс: платформа IBM BladeCenter, 112 блейд-серверов IBM BladeCenter HS22; каждый сервер имеет по два четырехядерных процессора Intel Xeon 5560 с частотой ядра 2,8 ГГц; общий объем оперативной памяти 1,3 Тб; система хранения данных объемом 10 Тб). Для хранения результатов расчета и измерений используются сервер национальной наносети объемом 68 Тб (СГАУ), сервер ИСОИ РАН «HP ProLiant DL100 Storage Server» долговременного хранения данных и др.

Остановимся на основных направлениях дифракционного исследования фокусаторов.

### **3. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ФАЗОВЫХ ФУНКЦИЙ**

На начальном этапе исследований важно провести аналитический дифракционный расчет структуры сфокусированного излучения с учетом конечных размеров и конкретных физических параметров фокусатора [24-30]. Анализ полученных дифракционных соотношений позволяет исследовать ограничения положенного в основу расчета фазовой функции фокусатора геометрического подхода, выявив начальные значения физических параметров, при которых происходит разрушение требуемой формы области фокусировки, выявить возможные ошибки в аналитическом решении обратной задачи теории дифракции. Однако аналитические исследования можно провести только для простейших фазовых функций, освещающих пучков и областей фокусировки – таких как кольцо [24, 30, 31], набор точек [32-33], продольный [1, 4, 5, 34] или поперечный [35-37] отрезок. В ряде случаев в результате аналитического исследования удается получить дифракционные поправки к фазовой функции фокусатора. К сожалению, в рамках аналитического исследования невозможно учесть влияние дискретизации и квантования фазовой функции фокусатора, возникающих в ходе изготовления ДОЭ.

### **4. ВЫБОР ФАЗОВОЙ ФУНКЦИИ**

В связи с некорректностью обратных задач теории дифракции в ряде случаев получается несколько видов фазовой функции проектируемого фокусатора. Например, при фокусировке в продольный отрезок [1, 4, 5, 34], фокусировке круглого пучка в прямоугольную область [38-40] и т.п. Выявление наиболее эффективного решения является особенно актуальным для базовых (наибо-

лее распространенных) задач фокусировки. Например, решения задач фокусировки в поперечный отрезок и кольцо являются базовыми для фокусаторов в литеры [41-42], а решение задачи фокусировки в прямоугольник является базовой при расчете фокусаторов плоские области [43-44].

Эта же проблема возникает, когда решение задачи фокусировки получается различными численными методами и необходимо тщательно исследовать получаемые решения. Выбор наилучшего решения для конкретных внутренних (в первую очередь, физических) параметров задачи приходится делать на основе данных вычислительного эксперимента [45].

Важнейшим направлением данного исследования является оценка энергетического воздействия на обрабатываемый материал применительно к технологическому назначению фокусатора – маркировке [46], закалке [47], формированию нанопор [48-50] и т.п. [51].

### **4. ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ДИФРАКЦИОННОГО МИКРОРЕЛЬЕФА**

Наличие широкого спектра различных методов формирования дифракционного микро рельефа фокусаторов [52-57] обуславливает необходимость выбора конкретного способа создания микро рельефа еще на этапе проектирования ДОЭ. Наиболее просто сформировать бинарный микро рельеф, однако прямолинейное обинаривание фазовой функции ДОЭ не всегда позволяет сохранить требуемую работоспособность оптического элемента. Это показало дифракционное исследование бинарных фокусаторов в полукольцо и в отрезок с линейным распределением интенсивности вдоль отрезка фокусировки. Было выявлено разрушение требуемого распределения интенсивности: возникновение фокального кольца вместо полукольца, отсутствие линейного роста интенсивности вдоль отрезка и другие негативные явления в фокальной области бинарных фокусаторов. Для устранения подобных негативных явлений были предложены специальные методы расчета [58], позволяющие поднять эффективность бинарных ДОЭ и расширить область применения бинарных микро рельефов.

Выбор наилучшего решения для конкретных внутренних (в данном случае параметров дискретизации и квантования фазовой функции) параметров задачи эффективно осуществлять на основе данных вычислительного эксперимента.

### **5. ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ ТИПОВ ДОЭ**

Созданные для фокусаторов методы дифракционного исследования оказались эффективны-

ми при изучении новых классов дифракционных оптических элементов, таких как многофокусные [59-61] и спектральные ДОЭ [62-63], оптические антенны [64-67], дифракционные делители пучка [68] и др. [69-70]. В частности, средствами математического моделирования (еще до оптического эксперимента) была показана возможность работы всей апертуры ДОЭ на составную фокальную область и эффективное функционирование многофокусных ДОЭ, формирующих (в отличие от составных ДОЭ) в несколько раз более тонкие фокальные линии. Также была продемонстрирована работоспособность спектральных ДОЭ, формирующих требуемые индивидуальные распределения интенсивности при освещении монохроматическими пучками с определенными длинами волн из заданного набора [62-63]. Оптические антенны оказались эффективными элементами светотехнических устройств [65-67].

Выбор наилучшего решения для данного класса ДОЭ эффективно осуществлять на этапе проектирования по данным вычислительного эксперимента.

## 7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ

Однако аналитические методы исследования и тщательное математическое моделирование являются все же предварительными методами исследования. Окончательное решение о возможности данного типа фокусировки, работоспособности многофокусных или спектральных ДОЭ, бинарных делителей пучка или оптических антенн принимается по результатам оптического эксперимента. Важнейшим подтверждением эффективности математического моделирования является хорошая согласованность данных вычислительного и оптического экспериментов для фокусатора в кольцо [71], дифракционной линзы [72], различных фокусаторов [73-74], спектральных ДОЭ [75], оптических антенн [76-77] и бинарного делителя пучка [78].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные методы и программное обеспечение вычислительного эксперимента позволили не только решить широкий спектр задач по исследованию фокусирующих ДОЭ, но и перейти к проектированию эффективных светотехнических устройств [79-83], систем технического зрения [84-89], к предсказательному моделированию уникальных свойств устройств дифракционной нанофотоники [90-92], наноструктурированной магнитооптики [93-94] и плазмоники [95-99].

## БЛАГОДАРНОСТИ

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 10-07-00553, 11-07-13164 и гранта Президента РФ № НШ-4128.2012.9.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голуб М.А., Карнеев С.В., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Соифер В.А. Фокусировка когерентного излучения в заданную область пространства с помощью синтезированных на ЭВМ голограмм // Письма в ЖТФ. 1981. Том 7. № 10. С. 618-623.
2. Golub M.A., Sisakian I.N., Soifer V.A. Infra-red radiation focusators // Optics and Lasers in Engineering. 1991. Vol.15, № 5. P.297-309.
3. Голуб М.А., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Климов И.В., Соифер В.А., Успеньев Г.В., Цветков В.Б., Щербачев И.А. Фокусаторы лазерного излучения ближнего ИК-диапазона // Письма в ЖТФ. 1992. Том 18, № 15. С. 39-41.
4. Казанский Н.Л. Процедура корректировки фазовой функции фокусатора по результатам вычислительного эксперимента // Компьютерная оптика. 1987. № 1. С. 90-96.
5. Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Соифер В.А. Вычислительный эксперимент с элементами плоской оптики // Автометрия. 1988. № 1. С. 70-82.
6. Голуб М.А., Казанский Н.Л., Соифер В.А. Математическая модель фокусировки излучения элементами компьютерной оптики // Научное приборостроение. 1993. Том 3. № 1. С.9-23.
7. Головашкин Д.Л., Казанский Н.Л., Сафина В.Н. Применение метода конечных разностей для решения задачи дифракции Н-волны на двумерных диэлектрических решетках // Компьютерная оптика. 2003. № 25. С. 36-40.
8. Головашкин Д.Л., Казанский Н.Л. Методика формирования падающей волны при разностном решении уравнений Максвелла. Одномерный случай // Автометрия. 2006. Том 42. № 6. С. 78-85.
9. Головашкин Д.Л., Казанский Н.Л. Методика формирования падающей волны при разностном решении уравнений Максвелла. Двумерный случай // Автометрия. 2007. Том 43. № 6. С. 78-88.
10. Казанский Н.Л., Каляев М.Л., Харитонов С.И. Компактная запись решений системы уравнений Максвелла в пространственно-частотном представлении // Антенны. 2007. № 10. С. 13-21.
11. Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Харитонов С.И. Интегральные представления решений уравнений Максвелла в виде спектра поверхностных электромагнитных волн // Компьютерная оптика. 2008. Том 32. № 2. С. 151-154.
12. Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Харитонов С.И. Интегральные представления решений системы уравнений Максвелла для анизотропных сред // Компьютерная оптика. 2010. Том 34. № 1. С. 52-57.
13. Головашкин Д.Л., Казанский Н.Л. Декомпозиция сеточной области при разностном решении уравнений Максвелла // Математическое моделирование. 2007. Том 19. №2. С. 48-58.
14. Golovashkin D.L., Kazanskiy N.L. Mesh Domain Decomposition in the Finite-Difference Solution of Maxwell's Equations // Optical Memory & Neural

- Networks (Information Optics). 2009. Vol. 18, № 3. P. 203-211.
15. Головашкин Д.Л., Казанский Н.Л. Решение задач компьютерной оптики на графических вычислительных устройствах // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2010. № 4 (24). С. 159-168.
  16. Golovashkin D.L., Kazanskiy N.L. Solving Diffractive Optics Problem using Graphics Processing Units // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2011. Vol. 20, No. 2. P. 85-89.
  17. Казанский Н.Л. Исследовательский комплекс для решения задач компьютерной оптики // Компьютерная оптика. 2006. № 29. С. 58-77.
  18. Казанский Н.Л. Исследовательско-технологический центр дифракционной оптики // Известия Самарского научного центра РАН, 2011, Том 13. № 4. С. 54-62.
  19. Казанский Н.Л., Самолинова Е.Б. Комплекс программ анализа дифракционных характеристик фокусаторов // Компьютерная оптика. 1989. № 5. С. 38-43.
  20. Kazanskiy N.L., Kotlyar V.V., Soifer V.A. Computer-aided design of diffractive optical elements // Optical Engineering. 1994. Vol. 33. № 10. P. 3156-3166.
  21. Doskolovich L.L., Golub M.A., Kazanskiy N.L., Khramov A.G., Pavelyev V.S., Seraphimovich P.G., Soifer V.A., Volotovskiy S.G. Software on diffractive optics and computer generated holograms // Proceedings of SPIE. 1995. Vol. 2363. P. 278-284.
  22. Волотовский С.Г., Казанский Н.Л., Павельев В.С. Программное обеспечение для итерационного расчета и исследования ДОЭ // Компьютерная оптика. 1997. № 17. С. 48-53.
  23. Волотовский С.Г., Казанский Н.Л., Серафимович П.Г., Харитонов С.И. Программный комплекс для расчета дифракционных оптических элементов с использованием высокоскоростных вычислительных средств // Компьютерная оптика. 2001. № 22. С. 75-79.
  24. Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Сойфер В.А., Харитонов С.И. Дифракционный расчет оптического элемента, фокусирующего в кольцо // Автометрия. 1987. № 6. С. 8-15.
  25. Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Сойфер В.А., Харитонов С.И. Оценка дифракционного размытия фокальной линии геометрооптических фокусаторов // Компьютерная оптика. 1989. № 5. С.34-38.
  26. Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Сойфер В.А., Харитонов С.И. Дифракционный расчет интенсивности поля вблизи фокальной линии фокусатора // Оптика и спектроскопия. 1989. Том 67. № 6. С.1387-1389.
  27. Голуб М.А., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Сойфер В.А., Харитонов С.И. Дифракционный расчет интенсивности светового поля вблизи фокальной линии // Компьютерная оптика. 1992. №№ 10-11. С.122-127.
  28. Kazanskiy N.L., Kharitonov S.I., Soifer V.A. Application of a pseudogeometrical optical approach for calculation of the field formed by a focuator // Optics & Laser Technology. 1996. Vol. 28, № 4. P. 297-300.
  29. Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Моисеев М.А., Харитонов С.И. Асимптотические методы для решения задач дифракции на ДОЭ // Компьютерная оптика. 2006. № 30. С. 49-52.
  30. Казанский Н.Л., Харитонов С.И. О прохождении пространственно-ограниченных широкополосных радиально-симметричных сфокусированных импульсов через тонкую плёнку // Компьютерная оптика. 2012. Том 36, № 1. С. 4-13.
  31. Казанский Н.Л. Исследование дифракционных характеристик фокусатора в кольцо методом вычислительного эксперимента // Компьютерная оптика. 1992. №№ 10-11. С. 128-144.
  32. Казанский Н.Л. Вычислительный эксперимент с линзой Френеля // Компьютерная оптика. 1988. № 3. С.22-28.
  33. Golub M.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Kharitonov S.I., Soifer V.A. Computer generated diffractive multifocal lens // Journal of Modern Optics. 1992. Vol. 39, № 6. P. 1245-1251.
  34. Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Soifer V.A., Tzaregorodtzev A.Ye. Analysis of quasiperiodic and geometric optical solutions of the problem of focusing into an axial segment // Optik. 1995. Vol. 101. № 2. P. 37-41.
  35. Kazanskiy N.L., Soifer V.A. Diffraction investigation of geometric-optical focuators into segment // Optik. 1994. Vol. 96, № 4. P. 158-162.
  36. Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Soifer V.A. Comparative analysis of different focuators into segment // Optics and Laser Technology. 1995. Vol. 27, № 4. P. 207-213.
  37. Soifer V.A., Kazanskiy N.L., Kharitonov S.I. Synthesis of a Binary DOE Focusing into an Arbitrary Curve, Using the Electromagnetic Approximation // Optics and Lasers in Engineering. 1998. Vol. 29, №№ 4-5. P. 237-247.
  38. Голуб М.А., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Сойфер В.А., Харитонов С.И. Вычислительный эксперимент с фокусатором Гауссова пучка в прямоугольник с постоянной интенсивностью // Компьютерная оптика. 1990. № 7. С.42-49.
  39. Голуб М.А., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Сойфер В.А., Харитонов С.И. Исследование фокусаторов в прямоугольнике методом вычислительного эксперимента // Компьютерная оптика. 1992. №№ 10-11. С.110-122.
  40. Досколович Л.Л., Казанский Н.Л. Исследование голографических оптических элементов, фокусирующих в двумерную прямоугольную область // Компьютерная оптика. 1992. № 12. С. 14-17.
  41. Голуб М.А., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Харитонов С.И. Фокусировка лазерного излучения в прямолинейно-скругленные контура // Компьютерная оптика. 1992. № 12. С. 3-8.
  42. Golub M.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Kharitonov S.I., Sisakian I.N., Soifer V.A. Focusators at letters diffraction design // Proceedings of SPIE. 1991. Vol. 1500. P. 211-221.
  43. Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Сойфер В.А. Расчет бинарных дифракционных оптических элементов для фокусировки в заданную двумерную область // Автометрия. 1995. № 5. С.42-50.
  44. Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Kharitonov S.I., Soifer V.A. A method of designing diffractive optical elements focusing into plane areas // Journal of Modern Optics. 1996. V ol.43, № 7. P. 1423-1433.
  45. Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Kharitonov S.I., Tzaregorodtzev A.Ye. A method for estimating the DOE's energy efficiency // Optics and Laser Technology. 1995. Vol.27, № 4. P. 219-221.
  46. Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Kharitonov S.I., Usplenjev G.V. Focusators for laser-branding // Optics and Lasers in Engineering. 1991. Vol. 15, № 5. P. 311-322.
  47. Казанский Н.Л., Мурзин С.П., Клочков С.Ю. Формирование требуемого энергетического воздействия при

- лазерной обработке материалов с применением фокусаторов излучения // Компьютерная оптика. 2005. № 28. С. 89-93.
48. *Казанский Н.Л., Мурзин С.П., Трезуб В.И., Меженин А.В.* Применение фокусаторов излучения при формировании нанопористых структур твердокристаллических материалов // Компьютерная оптика. 2007. Том 31. № 2. С. 48-51.
  49. *Казанский Н.Л., Мурзин С.П., Меженин А.В., Осетров Е.Л.* Формирование лазерного излучения для создания наноразмерных пористых структур материалов // Компьютерная оптика. 2008. Том 32, № 3. С. 246-248.
  50. *Kazanskiy N.L., Murzin S.P., Osetrov Ye.L., Tregub V.I.* Synthesis of nanoporous structures in metallic materials under laser action // Optics and Lasers in Engineering. 2011. Vol. 49, № 11. P. 1264-1267.
  51. *Казанский Н.Л., Мурзин С.П., Трезуб В.И.* Оптическая система для проведения селективной лазерной сублимации компонентов металлических сплавов // Компьютерная оптика. 2010. Том 34, № 4. С. 481-486.
  52. *Волков А.В., Казанский Н.Л., Соифер В.А., Соловьев В.С.* Технология изготовления непрерывного микро рельефа дифракционных оптических элементов // Компьютерная оптика. 1997. № 17. С. 91-93.
  53. *Volkov A.V., Kazanskiy N.L., Moiseev O.Yu., Soifer V.A.* A Method for the Diffractive Microrelief Forming Using the Layered Photoresist Growth // Optics and Lasers in Engineering. 1998. Vol. 29, №№ 4-5. P. 281-288.
  54. *Волков А.В., Казанский Н.Л., Рыбаков О.Е.* Исследование технологии плазменного травления для получения многоуровневых дифракционных оптических элементов // Компьютерная оптика. 1998. № 18. С. 130-133.
  55. *Волков А.В., Казанский Н.Л., Рыбаков О.Е.* Разработка технологии получения дифракционного оптического элемента с субмикронными размерами рельефа в кремниевой пластине // Компьютерная оптика. 1998. № 18. С. 133-138.
  56. *Казанский Н.Л., Колтаков В.А., Колтаков А.И.* Исследование особенностей процесса анизотропного травления диоксида кремния в плазме газового разряда высоковольтного типа // Микроэлектроника. 2004. Том 33, №3. С. 209-224.
  57. *Абульханов С.Р., Казанский Н.Л., Досколович Л.Л., Казакова О.Ю.* Методы изготовления элементов дифракционной оптики резанием на станках с ЧПУ // СТ ИН Станки Инструмент. 2011. № 9. С.20-27.
  58. *Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Perlo P., Repetto P., Soifer V.A.* Direct two-dimensional calculation of binary DOEs using a non-binary series expression approach // International Journal of Optoelectronics. 1995. Vol. 10, № 4. P. 243-250.
  59. *Голуб М.А., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Соифер В.А., Харитонов С.И.* Дифракционный подход к синтезу многофункциональных фазовых элементов // Оптика и спектроскопия. 1992. Том 73. № 1. С. 191-195.
  60. *Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Соифер В.А.* Расчет двухпорядковых фокусаторов // Автометрия. 1993. № 1. С.58-63.
  61. *Soifer V.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L.* Multifocal diffractive elements // Optical Engineering. 1994. Vol. 33. № 11. P. 3610-3615.
  62. *Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Soifer V.A., Perlo P., Repetto P.* Design of DOEs for wavelength division and focusing // Journal of Modern Optics. 2005. Vol. 52, № 6. P. 917-926.
  63. *Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Repetto P., Tyavin Ye.V.* Design and investigation of colour separation diffraction gratings // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. 2007. Vol. 9. P. 123-127.
  64. *Голуб М.А., Казанский Н.Л., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Соифер В.А.* Синтез оптической антенны // Компьютерная оптика. 1987. № 1. С. 35-40.
  65. *Казанский Н.Л., Соифер В.А., Харитонов С.И.* Математическое моделирование светотехнических устройств с ДОЭ // Компьютерная оптика. 1995. №№ 14-15. Ч.2. С.107-116.
  66. *Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Харитонов С.И.* Проектирование светотехнических устройств с ДОЭ // Компьютерная оптика. 1998. № 18. С. 91-96.
  67. *Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Soifer V.A., Kharitonov S.I., Perlo P.* A DOE to form a line-shaped directivity diagram // Journal of Modern Optics. 2004. Vol. 51, № 13. P. 1999-2005.
  68. *Казанский Н.Л., Скиданов Р.В.* Бинарный делитель пучка // Компьютерная оптика. 2011. Том 35. № 3. С. 329-334.
  69. *Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Соифер В.А., Карпеев С.В., Мирзов А.В., Уваров Г.В.* Фазовые пространственные фильтры, согласованные с поперечными модами // Квантовая электроника. 1988. Том 15. № 3. С.617-618.
  70. *Хонина С.Н., Казанский Н.Л., Устинов А.В., Волотовский С.Г.* Линзакон: непараксиальные эффекты // Оптический журнал. 2011. Том 78. № 11. С. 44-51.
  71. *Арефьев Е.Ю., Гилев В.А., Голуб М.А., Казанский Н.Л., Карпеев С.В., Сисакян И.Н., Соифер В.А., Соловьев В.С., Тихонов Д.Н., Уваров Г.В.* Экспериментальное исследование плоского оптического элемента, фокусирующего в кольцо // Компьютерная оптика. 1989. № 5. С. 49-54.
  72. *Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Соифер В.А., Успенев Г.В., Якуненкова Д.М.* Многоградационная линза Френеля // Журнал технической физики. 1991. Том 61, № 4. С.195-197.
  73. *Волков А.В., Казанский Н.Л., Успенев Г.В.* Изготовление и экспериментальное исследование фокусаторов в кольцо и в две точки // Компьютерная оптика. 1999. № 19. С. 132-136.
  74. *Волков А.В., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Успенев Г.В., Занелли А.* Создание и исследование бинарных фокусаторов для мощного ND-YAG лазера // Компьютерная оптика. 2000. № 20. С. 84-89.
  75. *Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Khonina S.N., Skidanov R.V., Heikkila N., Siitonen S., and Turunen J.* Design and investigation of color separation diffraction gratings // Applied Optics. 2007. Vol. 46, № 15. P. 2825-2830.
  76. *Волков А.В., Казанский Н.Л., Успенев Г.В.* Экспериментальное исследование светотехнических устройств с ДОЭ // Компьютерная оптика. 1999. № 19. С. 137-142.
  77. *Kazanskiy N.L., Kharitonov S.I., Soifer V.A., Volkov A.V.* Investigation of Lighting Devices Based on Diffractive Optical Elements // Optical Memory & Neural Networks. 2000. Vol. 9, № 4. P. 301-312.
  78. *Kazanskiy N., Skidanov R.* Binary beam splitter // Applied Optics. 2012. Vol. 51, № 14. P. 2672-2677.
  79. *Досколович Л.Л., Казанский Н.Л.* Расчет зеркала для формирования диаграммы направленности излучения // Автометрия. 2004. Том 40. № 5. С. 104-111.
  80. *Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Kharitonov S.I., Perlo P., Bernard S.* Designing reflectors to generate a line-shaped directivity diagram // Journal of Modern Optics. 2005. Vol. 52, № 11. P. 1529-1536.
  81. *Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Тренина М.А.* Расчет зеркала для формирования диаграммы направ-

- ленности в виде отрезка // Автометрия. 2006. Том 42. № 4. С. 67-75.
82. *Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Bernard S.* Designing a mirror to form a line-shaped directivity diagram // *Journal of Modern Optics*. 2007. Vol. 54, №№ 3-4. P. 589 - 597.
83. *Moiseev M.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L.* Design of high-efficient freeform LED lens for illumination of elongated rectangular regions // *Optics Express*. 2011. Vol. 19, № S3. P. A225-A233.
84. *Волотовский С.Г., Казанский Н.Л., Попов С.Б., Хмелев Р.В.* Система технического зрения для распознавания номеров железнодорожных цистерн с использованием модифицированного коррелятора в метрике Хаусдорфа // *Компьютерная оптика*. 2005. № 27. С. 177-184.
85. *Бородин С.А., Волков А.В., Казанский Н.Л.* Автоматизированное устройство для оценки степени чистоты подложки по динамическому состоянию капли жидкости, наносимой на ее поверхность // *Компьютерная оптика*. 2005. № 28. С. 69-75.
86. *Бородин С.А., Волков А.В., Казанский Н.Л.* Устройство для анализа нанощероховатостей и загрязнений подложки по динамическому состоянию капли жидкости, наносимой на ее поверхность // *Оптический журнал*. 2009. Том 76. № 7. С. 42-47.
87. *Казанский Н.Л., Попов С.Б.* Система технического зрения для определения количества гель-частиц в растворе полимера // *Компьютерная оптика*. 2009. Том 33. № 3. С. 325-331.
88. *Kazanskiy N.L., Popov S.B.* Machine Vision System for Singularity Detection in Monitoring the Long Process // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 2010. Vol. 19, № 1. P. 23–30.
89. *Казанский Н.Л., Попов С.Б.* Распределённая система технического зрения регистрации железнодорожных составов // *Компьютерная оптика*. 2012. Том 36. № 3. С. 419-428.
90. *Соифер В.А.* Нанопотоника и дифракционная оптика // *Компьютерная оптика*. 2008. Том 32. № 2. С. 110-118.
91. *Казанский Н.Л., Хонина С.Н., Харитонов С.И.* Теория возмущений для уравнения Шрёдингера в периодической среде в квазиимпульсном представлении // *Компьютерная оптика*. 2012. Том 36. № 1. С. 21-26.
92. *Казанский Н.Л., Серафимович П.Г., Хонина С.Н.* Повышение пространственного перекрытия резонансных мод фотоннокристаллического нанорезонатора // *Компьютерная оптика*. 2012. Том 36. № 2. С. 199-204.
93. *Глуценко А.Г., Гончарова Г.Н., Казанский Н.Л., Топоркова Л.В.* Волновые свойства многослойных магнитооптических структур // *Компьютерная оптика*. 2011. Том 35. № 2. С. 231-237.
94. *Быков Д.А., Досколович Л.Л., Соифер В.А., Казанский Н.Л.* Экстраординарный магнитооптический эффект изменения фазы дифракционных порядков в диэлектрических дифракционных решетках // *ЖЭТФ*. 2010. Том 138. № 6 (12). С. 1093-1102.
95. *Bezus E.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Soifer V.A., Kharitonov S.I.* Design of diffractive lenses for focusing surface plasmons // *Journal of Optics*. 2010. Vol. 12, № 1. 015001 (7pp).
96. *Bezus E.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L.* Evanescent-wave interferometric nanoscale photolithography using guided-mode resonant gratings // *Microelectronic Engineering*. 2011. Vol. 88, № 2. P. 170–174.
97. *Bezus E.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L.* Scattering suppression in plasmonic optics using a simple two-layer dielectric structure // *Applied Physics Letters*. 2011. Vol. 98, № 22, 221108 (3 pp.).
98. *Безус Е.А., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л.* Формирование интерференционных картин затухающих электромагнитных волн для наноразмерной литографии с помощью волноводных дифракционных решеток // *Квантовая электроника*. 2011. Том 41. № 8. С. 759-764.
99. *Безус Е.А., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Соифер В.А.* Подавление рассеяния в элементах плазмонной оптики с помощью двухслойной диэлектрической структуры // *Письма в ЖТФ*. 2011. Том 37. № 23. С. 10-18.

## DIFFRACTION INVESTIGATION OF FOCUSATORS

© 2012 P.G. Serafimovich

Image Processing Systems Institute of the RAS, Samara

I review the problems of diffractive optics, possible devices and of information technologies needed to create diffractive optical elements (DOEs). I analyze the possibility of computational experiment in investigation of DOEs for focusing laser radiation. I argued the need for the use of computer simulation when choosing a method for ill-posed inverse problems of diffraction theory. I argue the need for diffraction studies to create new types of focusing DOEs as well as to analyze the performance of optical elements for given physical parameters of the optical system.

Keywords: computational experiment, information technology, diffractive optical element, focusing laser beam, diffractive investigation, diffraction efficiency, software