

Секция 3:

КОМПЬЮТЕРНАЯ ОПТИКА И НАНОФОТОНИКА

АСИМПТОТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКЕ

Н.Л. Казанский^{1,2}

¹Институт систем обработки изображений РАН,

²Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

В докладе даётся обзор методов и возможностей асимптотических исследований при решении задач дифракционной компьютерной оптики. Анализируется актуальность использования полученных результатов в проектировании дифракционных оптических элементов, предназначенных для лазерной обработки различных материалов. Обсуждаются перспективы развития разработанных подходов для исследования компонентов дифракционной нанофотоники.

Асимптотические методы всегда находились в центре внимания ученых-оптиков [1-3] и в последние годы также вызывают явный интерес [4-11]. Ученые, работающие в области дифракционной компьютерной оптики, также активно использовали возможности, предоставляемые асимптотическими методами [12-31]. Особенно хорошо асимптотические методы показали себя при исследовании такого класса дифракционных оптических элементов (ДОЭ), как фокусаторы лазерного излучения [12-27].

На начальном этапе исследования фокусатора важно провести аналитический дифракционный расчет структуры сфокусированного излучения с учетом конечных размеров и конкретных физических параметров фокусатора [12-27]. Анализ полученных дифракционных соотношений позволяет исследовать ограничения положенного в основу расчета фазовой функции фокусатора геометрикооптического 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, осесимметричных освещающих пучков и областей фокусировки – таких как кольцо [12], набор точек [30-31], продольный [13-16] или поперечный [17-27] отрезки. В ряде случаев в результате аналитического исследования удаётся получить дифракционные поправки к фазовой функции фокусатора [15]. К сожалению, в рамках аналитического исследования невозможно учесть влияние дискретизации и квантования фазовой функции фокусатора, возникающих в ходе изготовления ДОЭ, тем не менее асимптотико-аналитический анализ является важным этапом исследований, дополняющим возможности вычислительного эксперимента [32-40].

В частности, аналитические методы не обеспечивают возможность анализа различных методов изготовления микрорельефа дифракционных оптических элементов [41-50] с целью выбора наиболее подходящей технологии изготовления ДОЭ с заданными параметрами для решения конкретной задачи. В то же время асимптотико-аналитический анализ позволяет оптимизировать фазовую функцию фокусатора для применения в

конкретной лазерной технологии обработки заданного типа материала [51-59]. Полученные результаты могут быть использованы также при исследовании других типов ДОЭ [60-63] и для фокусировки поверхностных электромагнитных волн [64-67].

В последние годы активно развиваются асимптотические методы расчета поля, формируемого ДОЭ, в рамках электромагнитной теории [68-75]. Эти методы можно использовать не только при исследовании дифракционных оптических элементов, в частности, короткофокусных ДОЭ, но и для исследования компонентов нанофотоники [76-82], проектирования гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования Земли [83-88] и решения других актуальных задач дифракционной нанофотоники [89-90].

Литература

1. Walker J. The Analytical Theory of Light // C. J. Clay and Sons, 1904, 432 p.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики // М.: Наука, 1973, 721 с.
3. Бабич В.М., Булдырев В.С. Асимптотические методы в задачах дифракции коротких волн // М.: Наука, 1972, 456 с.
4. Heyman E., Felsen L.B. Gaussian beam and pulsed-beam dynamics: complex-source and complex-spectrum formulations within and beyond paraxial asymptotics // J. Opt. Soc. Am. A, 2001, Vol. 18, No. 7, pp. 1588–1611.
5. Ahrens C.D., Ablowitz M.J., Docherty A., Sinkin O.V., Grigoryan V., Menyuk C.R. Asymptotic analysis of collision-induced timing shifts in return-to-zero quasi-linear systems with predispersion and postdispersion compensation // Optics Letters, 2006, Vol. 31, No. 1, pp. 5-7.
6. Simonov A.N., Rombach M.C. Asymptotic behavior of the spatial frequency response of an optical system with defocus and spherical aberration // J. Opt. Soc. Am. A, 2010, Vol. 27, No. 12, pp. 2563–2573.
7. Zhu J., Chen Z., Tang S. Leaky modes of optical waveguides with varied refractive index for microchip optical interconnect applications — asymptotic solutions // Microelectronics Reliability, 2008, vol. 48, no. 4, pp. 555–562.
8. Zhu J., Lu Y.Y. Asymptotic solutions of eigenmodes in slab waveguides terminated by perfectly matched layers // J. Opt. Soc. Amer. A, 2013, vol. 30, no. 10, pp. 2090–2095.
9. Sheppard C.J.R. Limitations of the paraxial Debye approximation // Optics Letters, 2013, vol. 38, pp. 1074–1076.
10. Rawlins, A.D. A note on uniform asymptotic wave diffraction by a wedge // Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 2014, Vol. 67, № 1, pp. 43-56.
11. Groth, S.P., Hewett, D.P., Langdon, S. Hybrid numerical-asymptotic approximation for high-frequency scattering by penetrable convex polygons // IMA Journal of Applied Mathematics (Institute of Mathematics and Its Applications), 2015, Vol. 80, № 2, pp. 324-353.
12. Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Соифер В.А., Харитонов С.И. Дифракционный расчет оптического элемента, фокусирующего в кольцо // Автометрия, 1987, № 6, с.8-15.
13. Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Соифер В.А., Харитонов С.И. Оценка дифракционного размытия фокальной линии геометрооптических фокусаторов // Компьютерная оптика, 1989, № 5. С.34-38.
14. Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Соифер В.А., Харитонов С.И. Дифракционный расчет интенсивности поля вблизи фокальной линии фокусатора // Оптика и спектроскопия, 1989, Том 67, № 6. С. 1387-1389.
15. 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.
16. Голуб М.А., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Соифер В.А., Харитонов С.И. Дифракционный расчет интенсивности светового поля вблизи фокальной линии // Компьютерная оптика, 1992, №№ 10-11. С.122-127.
17. Kazanskiy N.L., Soifer V.A. Diffraction investigation of geometric-optical focusators into segment // Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 1994, Vol.96, № 4, pp. 158-162.
18. Kazanskiy N.L., Kharitonov S.I., Soifer V.A. Application of a pseudogeometrical optical approach for calculation of the field formed by a focusator // Optics & Laser Technology, 1996, vol.28, № 4, pp. 297-300.
19. Харитонов С.И. Дифракция на квазипериодических одномерных структурах // Компьютерная оптика, 1997, № 17. С. 10-15.
20. Серафимович П.Г., Харитонов С.И. Расчет поля, формируемого геометрооптическими фокусаторами // Компьютерная оптика, 1998, № 18. С. 96-104.
21. Волоотовский С.Г., Казанский Н.Л., Харитонов С.И. Методы теории рассеяния для решения задач дифракционной оптики // Компьютерная оптика, 2001, № 21, с. 23-30.

22. Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Мордасов В.И., Мурзин С.П., Харитонов С.И. Исследование оптических систем управления передачей высоких энергий // Компьютерная оптика, 2002, № 23, с. 40-43.
23. Харитонов С.И., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л. Асимптотические решения скалярного волнового уравнения // Компьютерная оптика, 2003, № 25, с. 49-53.
24. Досколович Л.Л., Харитонов С.И., Казанский Н.Л., Тулупова Е.А., Скуратов С.А. Асимптотические решения уравнения Гельмгольца для псевдопериодических структур // Компьютерная оптика, 2005, № 27, с. 50-55.
25. Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Моисеев М.А., Харитонов С.И. Асимптотические методы для решения задач дифракции на ДОО // Компьютерная оптика, 2006, № 30, с. 49-52.
26. Харитонов С.И., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Каляев М.Л. Асимптотический метод расчета поля от оптических элементов, обладающих зонной структурой // Компьютерная оптика, 2007, Том 31, № 4, с. 7-18.
27. Дмитриев А.Ю., Досколович Л.Л., Харитонов С.И. Асимптотический расчет светового поля, формируемого дифракционным оптическим элементом для фокусировки в линию // Компьютерная оптика, 2008, Том 32, № 2, с. 195-200.
28. Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Volotovskiy S.G. Influence of Vortex Transmission Phase Function on Intensity Distribution in the Focal Area of High-Aperture Focusing System // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics), 2011, Vol. 20, No. 1, pp. 23-42.
29. Хонина С.Н., Казанский Н.Л., Устинов А.В., Волотовский С.Г. Линзакон: непараксиальные эффекты // Оптический журнал, 2011, Том 78, № 11, с. 44-51.
30. Golub M.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Kharitonov S.I., Soifer V.A. Computer generated diffractive multi-focal lens // Journal of Modern Optics. 1992. Vol. 39, № 6, pp. 1245-1251.
31. 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, pp. 917-926.
32. Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Соифер В.А. Вычислительный эксперимент с элементами плоской оптики // Автометрия, 1988, № 1, с. 70-82.
33. Казанский Н.Л. Процедура корректировки фазовой функции фокусатора по результатам вычислительного эксперимента // Компьютерная оптика, 1987, № 1, с. 90-96.
34. Казанский Н.Л. Исследование дифракционных характеристик фокусатора в кольцо методом вычислительного эксперимента // Компьютерная оптика, 1992, №№ 10-11, с. 128-144.
35. Казанский Н.Л. Математическое моделирование оптических систем. – Самара: СГАУ, 2005, 240с.
36. Kazanskiy N.L., Kotlyar V.V., Soifer V.A. Computer-aided design of diffractive optical elements // Optical Engineering, 1994, Vol. 33, № 10, pp. 3156-3166.
37. 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 - International Journal for Light and Electron Optics, 1995, Vol.101, № 2, pp. 37-41.
38. 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 "Image Processing and Computer Optics (DIP-94)". - P.278-284.
39. Joyce C.J., Fitt A.D., Monro T.M. Mathematical modeling as an accurate predictive tool in capillary and microstructured fibre manufacture: The effects of preform rotation // Journal of Lightwave Technology, 2008, vol. 26, no. 7, pp. 791-798.
40. 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, pp. 85-89.
41. Технология изготовления непрерывного микрорельефа дифракционных оптических элементов / Волков А.В., Казанский Н.Л., Соифер В.А., Соловьев В.С. // Компьютерная оптика, 1997, № 17, с. 91-93.
42. Волков А.В., Казанский Н.Л., Рыбаков О.Е. Исследование технологии плазменного травления для получения многоуровневых дифракционных оптических элементов // Компьютерная оптика, 1998, № 18, с. 127-130.
43. 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. 130-133.
44. Volkov A.V., Kazanskiy N.L., Moiseev O.Yu., Soifer V.A. A Method for the Diffractive Microrelief Formation Using the Layered Photoresist Growth // Optics and Lasers in Engineering, 1998, vol. 29, №№ 4-5, pp. 281-288.
45. Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Колпаков А.И. Исследование особенностей процесса анизотропного травления диоксида кремния в плазме газового разряда высоковольтного типа // Микроэлектроника, 2004, Том 33, №3, с. 209-224.
46. Pavelyev V.S., Borodin S.A., Kazanskiy N.L., Kostyuk G.F., Volkov A.V. Formation of diffractive microrelief on diamond film surface // Optics & Laser Technology, 2007, vol.39, № 6, pp.1234-1238.

47. Казанский Н.Л., Колпаков В.А. Формирование оптического микрорельефа во внеэлектродной плазме газового разряда. – М.: Радио и связь, 2009, 220 с.
48. Абульханов С.Р., Казанский Н.Л., Досколович Л.Л., Казакова О.Ю. Методы изготовления элементов дифракционной оптики резанием на станках с ЧПУ // СТИН, 2011, № 9, с. 22-27.
49. Kazanskiy N.L. Research and Education Center of Diffractive Optics // Proceedings of SPIE, 2012, Vol.8410, 84100R, DOI: 10.1117/12.923233.
50. Kazanskiy N.L., Kolpakov V.A., Podlipnov V.V. Gas discharge devices generating the directed fluxes of off-electrode plasma // Vacuum, 2014, Vol. 101, pp. 291–297.
51. 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.
52. Казанский Н.Л., Мурзин С.П., Трегуб В.И., Меженин А.В. Применение фокусаторов излучения при формировании нанопористых структур твердокристаллических материалов // Компьютерная оптика, 2007, Том 31, № 2, с. 48-51.
53. 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.
54. Казанский Н.Л., Мурзин С.П., Трегуб В.И. Оптическая система для проведения селективной лазерной сублимации компонентов металлических сплавов // Компьютерная оптика, 2010, Том 34, № 4, с. 481-486.
55. Мурзин С.П., Трегуб В.И., Шокова Е.В., Трегуб Н.В. Термоциклирование импульсно-периодическим лазерным воздействием для формирования нанопористой структуры в металлическом материале // Компьютерная оптика, 2013, Том 37, № 1, с. 99-104.
56. Мурзин С.П., Трегуб В.И., Мельников А.А., Трегуб Н.В. Применение фокусаторов излучения для создания металлических нанопористых материалов с высокой удельной площадью поверхности лазерным воздействием // Компьютерная оптика, 2013, Том 37, № 2, с. 226-232.
57. Мурзин С.П. Синтез нанопористых структур металлических материалов циклическим упруго-пластическим деформированием при лазерном воздействии с применением фокусаторов излучения // Компьютерная оптика, 2014, Том 38, № 2, с. 249-255.
58. Мурзин С.П. Метод синтеза композиционных наноматериалов металл/оксид импульсно-периодическим лазерным воздействием // Компьютерная оптика, 2014, Том 38, № 3, с. 469-475.
59. Мурзин С.П., Балякин В.Б., Мельников А.А., Васильев Н.Н., Лихтнер П.И. Определение возможности улучшения трибологических свойств керамики из карбида кремния импульсно-периодической лазерной обработкой // Компьютерная оптика, 2015, Том 39, № 1, с. 64-69.
60. Голуб М.А., Карпеев С.В., Казанский Н.Л., Мирзов А.В., Сисакян И.Н., Соيفер В.А., Уваров Г.В. Фазовые пространственные фильтры, согласованные с поперечными модами // Квантовая электроника, 1988, Т.15, № 3, с. 617-618.
61. Karpeev S.V., Pavelyev V.S., Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Gavrilov A.V., Erolov V.A. Fibre sensors based on transverse mode selection // Journal of Modern Optics, 2007, Vol. 54, № 6, pp. 833 - 844.
62. Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Соифер В.А. Формирование эталонных волновых фронтов элементами компьютерной оптики // Компьютерная оптика, 1990, № 7, с. 3-26.
63. 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.
64. Безус Е.А., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Соифер В.А., Харитонов С.И., Пицци М., Перло П. Расчет дифракционных структур для фокусировки поверхностных электромагнитных волн // Компьютерная оптика, 2009, Том 33, № 2, с. 185-192.
65. Bezus E.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Soifer V.A. and Kharitonov S.I. Design of diffractive lenses for focusing surface plasmons // Journal of Optics, 2010, Vol. 12, № 1, 015001 (7pp).
66. 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.).
67. Bezus E.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L. Low-scattering surface plasmon refraction with isotropic materials // Optics Express, 2014, Vol. 22, № 11, pp. 13547–13554.
68. Харитонов С.И., Серафимович П.Г. Асимптотические методы расчета поля, формируемого ДОО в рамках электромагнитной теории // Компьютерная оптика, 1999, № 19, с. 33-39.
69. 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.
70. 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.
71. 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.

72. Хонина С.Н., Харитонов С.И. Аналог интеграла Рэля-Зоммерфельда для анизотропной и гиротропной сред // Компьютерная оптика, 2012, Том 36, № 2, с. 172-182.
73. Хонина С.Н., Волотовский С.Г., Харитонов С.И., Казанский Н.Л. Расчёт энергетического спектра сложных низкоразмерных гетероструктур в присутствии электрического поля // Компьютерная оптика, 2012, Том 36, № 1, с. 27-33.
74. Казанский Н.Л., Харитонов С.И., Хонина С.Н. Совместное решение уравнения Клейна-Гордона и системы уравнений Максвелла // Компьютерная оптика, 2012, Том 36, № 4, с. 518-526.
75. Жердев Д.А., Казанский Н.Л., Фурсов В.А., Харитонов С.И. Моделирование рассеяния электромагнитного поля от техногенных объектов на подстилающих поверхностях // Компьютерная оптика, 2013, Том 37, № 1, с. 91-98.
76. Казанский Н.Л., Серафимович П.Г., Попов С.Б., Хонина С.Н. Использование волноводного резонанса для создания нанооптических спектральных пропускающих фильтров // Компьютерная оптика, 2010, Том 34, № 2, с. 162-168.
77. Казанский Н.Л., Серафимович П.Г. Использование инфраструктуры облачных вычислений для моделирования сложных нанопотонных структур // Компьютерная оптика, 2011, Том 35, № 3, с. 320-328.
78. Казанский Н.Л., Серафимович П.Г., Хонина С.Н. Оптический нанорезонатор в пересечении гребенчатых фотоннокристаллических волноводов // Компьютерная оптика, 2011, Том 35, № 4, с. 426-431.
79. 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.
80. Казанский Н.Л., Серафимович П.Г., Хонина С.Н. Использование фотоннокристаллических резонаторов для дифференцирования оптических импульсов по времени // Компьютерная оптика, 2012, Том 36, № 4, с. 474-478.
81. Казанский Н.Л., Серафимович П.Г. Использование массива фотонно-кристаллических резонаторов для интегрирования оптических сигналов во времени // Компьютерная оптика, 2014, Том 38, № 2, с. 181-187.
82. Егоров А.В., Казанский Н.Л., Серафимович П.Г. Использование связанных фотонно-кристаллических резонаторов для повышения чувствительности оптического датчика // Компьютерная оптика, 2015, Том 39, № 2, с. 158-162.
83. Казанский Н.Л., Харитонов С.И., Хонина С.Н., Волотовский С.Г., Стрелков Ю.С. Моделирование гиперспектрометра на спектральных фильтрах с линейно-изменяющимися параметрами // Компьютерная оптика, 2014, Том 38, № 2, с. 256-270.
84. Казанский Н.Л., Харитонов С.И., Карсаков А.В., Хонина С.Н. Моделирование работы гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера, в рамках геометрической оптики // Компьютерная оптика, 2014, Том 38, № 2, с. 271-280.
85. Казанский Н.Л., Хонина С.Н., Скиданов Р.В., Морозов А.А., Харитонов С.И., Волотовский С.Г. Формирование изображений дифракционной многоуровневой линзой // Компьютерная оптика, 2014, Том 38, № 3, с. 425-434.
86. Казанский Н.Л., Харитонов С.И., Хонина С.Н. Моделирование гиперспектрометра на спектральных фильтрах с линейно-изменяющимися параметрами с использованием векторных Бесселевых пучков // Компьютерная оптика, 2014, Том 38, № 4, с. 770-776.
87. Казанский Н.Л., Харитонов С.И., Досколович Л.Л., Павельев А.В. Моделирование работы космического гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера // Компьютерная оптика, 2015, Том 39, № 1, с. 70-76.
88. Досколович Л.Л., Безус Е.А., Быков Д.А. О коррекции эффекта перекрытия дифракционных порядков в спектрометре на основе схемы Оффнера // Компьютерная оптика, 2014, Том 38, № 4, с. 777-781.
89. Сойфер В.А., Куприянов А.В. Анализ и распознавание наномасштабных изображений: традиционные подходы и новые постановки задач // Компьютерная оптика, 2011, Том 35, № 2, с. 136-144.
90. Сойфер В.А. Дифракционная нанопотоника и перспективные информационные технологии // Вестник Российской академии наук, 2014, Том 84, № 1, с. 11-24.