

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ФОКУСАТОРОВ

С.Р. Абульханов

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

Проанализирован спектр технологических применений фокусаторов акустических волн. В докладе приводится краткий обзор использования приборов, работа которых основана на применении акустических фокусаторов. Акустические фокусаторы позволяют преобразовывать энергию механических колебаний для перемешивания дисперсионных сред различных фракций, а также для разделения смесей макро- и микрочастиц по фракциям. В докладе показано достижение эффекта перемешивания и разделения сферических частиц в программной среде ANSYS. Для разделения частиц по фракциям использовался эффект «оживления» мелкодисперсной среды. Придание сферам смеси колебаний при разделении сфер по размерам осуществлял дифракционный элемент, формирующий плоскую акустическую волну. Для перемешивания частиц использовался фокусатор в конус. Исследована на модели возможность использования акустических фокусаторов при перемешивании нанокристаллических материалов в изолированном пространстве, а также разделении микрошаров по фракциям в порошках, используемых в аддитивных технологиях

Дифракционные фокусаторы излучения [1-2] используются в различных лазерных технологиях [3-14]. Представляется важным использовать имеющийся задел для применения акустических волн [15]. В качестве примера использования такого задела можно привести устройства для фокусировки поверхностных электромагнитных волн [16-21]. Необходимо использовать при создании и применении акустических фокусаторов разработанные аналитические методы расчета [22-27], средства моделирования и оптимизации фокусаторов [28-35], технологии формирования дифракционного микрорельефа [36-43], имеющиеся программное обеспечение и оборудование [44-53], опыт синтеза и применения различных дифракционных оптических элементов [54-70] и устройств на их основе [71-85].

Акустический диапазон длин волн составляет от $15 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^6$ метров и соответствует частотам от 10 до $20 \cdot 10^3$ Гц [15]. В соответствии с ГОСТ 8–82 современные особо точные станки с ЧПУ обеспечивают наибольшее отклонение реальных геометрических параметров обработанной фасонной поверхности от номинальных размеров не более 1,6 мкм, что составляет $(0,7 \cdot 10^{-6} - 0,3 \cdot 10^{-7})\%$ от длин волн акустического диапазона. Изготовление акустических фокусаторов на станках нормальной точности обеспечивает отклонение от номинальных размеров не более 10 мкм. Такое соотношение точности позволяет качественно сформировать дифракционный микрорельеф, имеющий несимметричный характер, различную глубину, а также он может быть нанесен на поверхности различной кривизны.

В докладе анализируются запатентованные конструкции вибросмесителя [86] и демпфера высоких частот [87]. В вибросмесителе перемешиваются компоненты пяти различных размеров (фракций) и жесткости. Процесс перемешивания происходит в результате колебаний вибратора. Колебания через диффузор передаются на рабочую поверхность акустического фокусатора, который концентрирует отдельными своими участками в виде зон Френеля акустическую волну в кольца на конической поверхности. Частицы смешиваемых компонент, находящиеся на конической поверхности, приобретают некоторую кинетическую энергию. В результате этого на конической поверхности формируется «сжиженный» слой частиц компонент. При определённом соотношении размеров частиц смешиваемых компонент и расстояниях между соседними кольцами на конической поверхности, частицы компонент скатываются по конической поверхности вниз, а их место при этом занимают частицы из верхних слоев смешиваемых компонент. Таким образом, осуществляется перемешивание. Особенностью конструкции

являются низкие энергетические затраты, технологичность, надёжность. Работоспособность конструкции была подтверждена на основе моделирования в программной среде ANSYS, позволившего подобрать параметры устройства.

С помощью моделирования в программной среде ANSYS была установлена возможность перемешивания нанокристаллических веществ. При этом для исключения кластеризации частиц, имеющих наноразмеры, необходимо выбирать такую частоту акустических колебаний, которая определяется рядом характеристик нанокристаллических порошков. Размеры частиц значительно меньше длины волны колебаний акустического диапазона. По этой причине при исследовании работы устройств, перемешивающих частицы малых размеров, колебания сообщались не каждой частице, а среде, соответствующей своими характеристиками вязкой жидкости. При этом среда была заключена в объём заданной формы

Литература

1. Голуб М.А., Карпеев С.В., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Соيفер В.А. Фокусировка когерентного излучения в заданной области пространства с помощью синтезированных на ЭВМ голограмм // Письма в ЖТФ, 1981, Том 7, № 10, с. 618–623.
2. Серафимович П.Г. Дифракционное исследование фокусаторов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2012, Том 14, № 6–1, с. 273–278.
3. Абульханов С.Р. Технологические применения фокусаторов лазерного излучения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2014, Том 16, № 6–1, с. 316–324.
4. 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, pp. 311–322.
5. 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.
6. Казанский Н.Л., Мурзин С.П., Ключков С.Ю. Формирование требуемого энергетического воздействия при лазерной обработке материалов с применением фокусаторов излучения // Компьютерная оптика, 2005, № 28, с. 89–93.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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, pp. 1264–1267.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. Мурзин С.П. Метод синтеза композиционных наноматериалов металл/оксид импульсно-периодическим лазерным воздействием // Компьютерная оптика, 2014, Том 38, № 3, с. 469–475.
15. Сивухин Д.В. Общий курс физики // М.: Наука, 1990, Том II, 591с.
16. 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.
17. 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.
18. 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.

19. 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.
20. Безус Е.А., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Соيفер В.А. Подавление рассеяния в элементах плазмонной оптики с помощью двухслойной диэлектрической структуры // *Письма в Журнал технической физики*, 2011, Том 37, № 23, с. 10–18.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
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. Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Соифер В.А. Вычислительный эксперимент с элементами плоской оптики // *Автометрия*, 1988, № 1, с. 70–82.
29. Казанский Н.Л. Процедура корректировки фазовой функции фокусатора по результатам вычислительного эксперимента // *Компьютерная оптика*, 1987, № 1, с. 90–96.
30. Казанский Н.Л. Исследование дифракционных характеристик фокусатора в кольцо методом вычислительного эксперимента // *Компьютерная оптика*, 1992, №№ 10–11, с. 128–144.
31. Казанский Н.Л. Математическое моделирование оптических систем // *Самара: СГАУ*, 2005, 240 с.
32. 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.
33. 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.
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 – International Journal for Light and Electron Optics*, 1995, Vol. 101, № 2, pp. 37–41.
35. 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, № 1, pp. 23–42.
36. Волков А.В., Казанский Н.Л., Соифер В.А., Соловьев В.С. Технология изготовления непрерывного микрорельефа дифракционных оптических элементов // *Компьютерная оптика*, 1997, № 17, с. 91–93.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. 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.
41. 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.
42. Казанский Н.Л., Колпаков В.А. Формирование оптического микрорельефа во внеэлектродной плазме газового разряда // *М.: Радио и связь*, 2009, 220 с.
43. 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, pp. 170–174.

44. 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.
45. Doskolovich L.L., Golub M.A., Kazanskiy N.L., Khranov 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, pp. 278–284.
46. 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.
47. Казанский Н.Л. Исследовательский комплекс для решения задач компьютерной оптики // *Компьютерная оптика*, 2006, № 29, с. 58–77.
48. 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.
49. Golovashkin D.L., Kazanskiy N.L. Solving Diffractive Optics Problem using Graphics Processing Units // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2011, Vol. 20, № 2, pp. 85–89.
50. Казанский Н.Л. Исследовательско-технологический центр дифракционной оптики // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2011, Том 13, № 4–1, с. 54–62.
51. Казанский Н.Л., Серафимович П.Г. Использование инфраструктуры облачных вычислений для моделирования сложных нанопотонных структур // *Компьютерная оптика*, 2011, Том 35, № 3, с. 320–328.
52. Kazanskiy N.L. Research and Education Center of Diffractive Optics // *Proceedings of SPIE*, 2012, Vol. 8410, 84100R, DOI: 10.1117/12.923233.
53. Kazanskiy N.L., Serafimovich P.G. Cloud Computing for Nanophotonic Simulations // *Lecture Notes in Computer Science*, 2013, Vol. 7715, pp. 54–67.
54. 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.
55. 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, Том 15, № 3, с. 617–618.
56. 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.
57. 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.
58. 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.
59. 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.
60. Doskolovich L.L., Kazansky N.L., Kharitonov S.I., Soifer V.A. A method of designing diffractive optical elements focusing into plane areas // *Journal of Modern Optics*, 1996, Vol. 43, № 7, pp. 1423–1433.
61. 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.
62. Быков Д.А., Досколович Л.Л., Соифер В.А., Казанский Н.Л. Экстраординарный магнитооптический эффект изменения фазы дифракционных порядков в диэлектрических дифракционных решетках // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 2010, Том 138, № 6, с. 1093–1102.
63. Kazanskiy N.L., Serafimovich P.G., Khonina S.N. Harnessing the Guided-Mode Resonance to Design Nanooptical Transmission Spectral Filters // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2010, Vol. 19, № 4, pp. 318–324.
64. Кравченко С.В., Моисеев М.А., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л. Расчет осесимметричных оптических элементов с двумя асферическими поверхностями для формирования заданных распределений освещенности // *Компьютерная оптика*, 2011, Том 35, № 4, с. 467–472.
65. Хонина С.Н., Казанский Н.Л., Устинов А.В., Волоотовский С.Г. Линзакон: непараксиальные эффекты // *Оптический журнал*, 2011, Том 78, № 11, с. 44–51.
66. Kazanskiy N., Skidanov R. Binary beam splitter // *Applied Optics*, 2012, Vol. 51, № 14, pp. 2672–2677.
67. Aslanov E.R., Doskolovich L.L., Moiseev M.A., Bezus E.A., Kazanskiy N.L. Design of an optical element forming an axial line segment for efficient LED lighting systems // *Optics Express*, 2013, Vol. 21, № 23, pp. 28651–28656.
68. Дмитриев А.Ю., Досколович Д.Л., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л. Аналитический расчёт преломляющих оптических элементов для формирования однопараметрических диаграмм направленности // *Компьютерная оптика*, 2014, Том 38, № 2, с. 207–212.
69. Казанский Н.Л., Хонина С.Н., Скиданов Р.В., Морозов А.А., Харитонов С.И., Волоотовский С.Г. Формирование изображений дифракционной многоуровневой линзой // *Компьютерная оптика*, 2014, Том 38, № 3, с. 425–434.

70. Doskolovich L.L., Dmitriev A.Yu., Moiseev M.A., Kazanskiy N.L. Analytical design of refractive optical elements generating one-parameter intensity distributions // *J. Opt. Soc. Am. A*, 2014, Vol. 31, № 11, pp. 2538–2544.
71. Karpeev S.V., Pavelyev V.S., Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Gavrilov A.V., Eropolov V.A. Fibre sensors based on transverse mode selection // *Journal of Modern Optics*, 2007, Vol. 54, № 6, pp. 833–844.
72. 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.
73. 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, pp. 23–30.
74. 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.
75. 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.
76. 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.
77. Казанский Н.Л., Попов С.Б. Распределённая система технического зрения регистрации железнодорожных составов // *Компьютерная оптика*, 2012, Том 36, № 3, с. 419–428.
78. Kazanskiy N.L., Serafimovich P.G., Khonina S.N. Use of photonic crystal cavities for temporal differentiation of optical signals // *Optics Letters*, 2013, Vol. 38, № 7, pp. 1149–1151.
79. 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.
80. 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.
81. 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.
82. 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.
83. Kazanskiy N.L., Serafimovich P.G. Coupled-resonator optical waveguides for temporal integration of optical signals // *Optics Express*. 2014. Vol. 22, № 11, pp. 14004–14013.
84. 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.
85. 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.
86. Сойфер В.А., Казанский Н.Л., Абульханов С.Р. Миксер // Патент РФ на изобретение № 2319432 от 10.05.2006.
87. Абульханов С.Р., Казанский Н.Л., Сойфер В.А. Демпфер высоких частот // Патент РФ на изобретение № 2462630 от 24.12.2010.