

ТЕХНОЛОГИИ ФОКУСАТОРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2014 С.Р. Абульханов

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

Поступила в редакцию 20.03.2014

В статье анализируется широкий спектр технологий, порожденных созданием и применением фокусаторов лазерного излучения. Дается краткий обзор методов решения некорректных обратных задач теории дифракции, методов контроля подложек и формирования дифракционного микрорельефа, оптических схем и устройств для экспериментального исследования фокусаторов, лазерных технологий и установок на их основе.

Ключевые слова: фокусаторы лазерного излучения, вычислительный эксперимент, дифракционные оптические элементы, формирование дифракционного микрорельефа, лазерные технологии.

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 получается уникальный оптический инструмент для требуемой фокусировки лазерного излучения [1-3].

За годы, прошедшие с первой публикации [1] революционной идеи А. М. Прохорова, И. Н. Сисакяна и В. А. Сойфера о возможности использования дифракционного микрорельефа для требуемой фокусировки лазерного излучения в заданную область пространства, был разработан широкий спектр технологий, связанных с созданием и применением фокусаторов лазерного излучения. В предлагаемой работе сделана попытка проанализировать влияние, которое создание фокусаторов оказало на развитие дифракционной оптики, оптическое приборостроение и лазерные технологии.

1. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ФОКУСАТОРОВ

Для расчета дифракционного микрорельефа фокусатора необходимо решить обратную задачу теории дифракции относительно фазовой функции этого оптического элемента. В виду сложности обратной задачи обычно ее решают в рамках приближения геометрической оптики [1-14]. В связи с некорректностью обратных задач теории дифракции в ряде случаев получается несколько видов фазовой функции проектируемого фокусато-

ра. Например, при фокусировке в продольный отрезок [1, 6, 8-9], фокусировке круглого пучка в прямоугольную область [10-12] и т.п. Выявление наиболее эффективного решения является особенно актуальным для базовых (наиболее распространенных) задач фокусировки. Например, решения задач фокусировки в поперечный отрезок [13-15] и кольцо [6, 16] являются базовыми для фокусаторов в литеры [17-18], а решение задачи фокусировки в прямоугольник является базовой при расчете фокусаторов плоские области [19-20]. Интересно, что полученные для фокусировки лазерного излучения решения оказались полезны для фокусировки поверхностных электромагнитных волн [21-23].

В ряде случаев (например, сложная форма распределения интенсивности или фокальной области) невозможно получить аналитическое выражение для фазовой функции фокусатора. В таких случаях применяют разнообразные итерационные методы решения обратных задач в приближении скалярной теории дифракции [8, 24-25]. Разработанные методы расчета объединены в соответствующие программные продукты [25-30].

Для выявления наилучшего решения необходимо проанализировать выходные параметры фокусаторов [5-7]. Среди характеристик, описывающих процессы создания и функционирования фокусатора, можно выделить три вида параметров [5-7]. 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 фокусатора, размеры и форма элементов простран-

Абульханов Станислав Рафаелевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механической обработки материалов и докторант СГАУ. E-mail: abulhanov58@mail.ru

ственного разрешения микрорельефа 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. Для такого анализа были разработаны асимптотические методы исследования фазовой функции фокусирующих ДОЭ, информационные технологии и программные средства вычислительного эксперимента [5-7].

2. АНАЛИТИКО-АСИМПТОТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На начальном этапе создания нового фокусатора важно провести аналитический дифракционный расчет структуры сфокусированного излучения с учетом конечных размеров и конкретных физических параметров ДОЭ [31-37]. Анализ полученных дифракционных соотношений позволяет исследовать ограничения положенного в основу расчета фазовой функции фокусатора геометрического подхода, выявить начальные значения физических параметров, при которых происходит разрушение требуемой формы области фокусировки, обнаружить 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 [6, 16, 31], набор точек, продольный [1, 5-6, 32-34] или поперечный [35-37] отрезок.

В ряде случаев в результате аналитического исследования удается получить дифракционные поправки к фазовой функции фокусатора. Однако в рамках аналитического исследования невозможно учесть влияние дискретизации и квантования фазовой функции фокусатора, возникающих в ходе изготовления ДОЭ.

3. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для дальнейших и более детальных исследований фокусирующих ДОЭ разработаны методология и программные средства вычислительного эксперимента [6, 38-39], позволяющие учесть влияние дискретизации и квантования фазовой функции фокусатора, возникающих в ходе расчета и изготовления ДОЭ.

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 [5-6].

Важнейшим направлением данного исследования является оценка энергетического воздействия на обрабатываемый материал применительно к технологическому назначению фокусатора: маркировке, закалке, формированию нанопор и т. п. (см. раздел 8 данного обзора).

Наличие широкого спектра различных методов формирования дифракционного микрорельефа фокусаторов [40-53] обуславливает необходимость выбора конкретного способа создания микрорельефа еще на этапе проектирования ДОЭ. Наиболее просто сформировать бинарный микрорельеф, 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 [13]. Для устранения подобных негативных явлений были предложены специальные методы расчета [54], позволяющие поднять эффективность бинарных ДОЭ и расширить область применения бинарных микрорельефов.

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

4. ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ДИФРАКЦИОННОГО МИКРОРЕЛЬЕФА

Для изготовления рассчитанных фокусаторов было разработано множество методов и тех-

нологий формирования дифракционного микро- рельефа [40-53]. Выбор технологии зависит от длины волны фокусируемого излучения, материала фокусатора и требуемой мощности лазера. Хронологически наибольшее распространение получили метод задубливания бихромированной желатины [40], темнового роста в слоях жидких полимеризующихся композиций [41], послойного наращивания фоторезиста [42], плазмохимического и ионнохимического травления, электронной литографии [43-49], резания на станках с ЧПУ [50], плазмонной нанолитографии [52-53] и др. Выбор наилучшего метода формирования дифракционного микро-рельефа для конкретных внутренних (в данном случае параметров дискретизации и квантования фазовой функции) параметров задачи эффективно осуществлять на основе данных вычислительного эксперимента.

Для работы с мощными технологическими лазерами рабочую поверхность фокусаторов целесообразно обрабатывать технологическими методами, происходящими со снятием стружки (полирование, шлифование и точение), поскольку в этом случае тело фокусатора изготавливается из цельной заготовки (как правило, из бескислородной меди МОБ), в котором выполняют каналы для охлаждающей жидкости. Опыт выполнения тела фокусатора из жаропрочной керамики, на одну из поверхностей которой осаждается гальваническим методом слой меди и впоследствии на ней нарезается микропрофиль, принято считать неудачным, поскольку структура осажденной меди оказалась недостаточно однородной для отражения мощного лазерного излучения. Ионное напыление на такую поверхность фокусатора золота, привело к существенному изменению геометрии микро-рельефа и, как следствие, к снижению энергетической эффективности фокусатора.

Анализ субмикронных неровностей на поверхности микро-рельефа фокусатора, сформированных в результате механических способов обработки поверхностей, осуществляемых со снятием стружки, показал, что наиболее благоприятный субмикронный микро-рельеф формируется в результате шлифования и полирования. Вместе с этим указанные технологические методы обладают рядом технологических ограничений, которые не позволяют широко их использовать для финишной обработки поверхности фокусаторов. Технологические ограничения шлифования и полирования выражаются, прежде всего, в негарантированном съеме металла с поверхности микро-рельефа, что снижает точность его обработки. Кроме того в этом случае отсутствует возможность обработки зон поднутрения микро-рельефа, т.е. его фрагментов, где сопрягаются ци-

линдрические стенки микро-рельефа с поверхностями, которые отражают лазерное излучение.

По указанным причинам для обработки поверхностей фокусаторов, имеющих осесимметричный микро-рельеф, наиболее целесообразно использовать микро-резание резцом с режущей кромкой из натурального алмаза. Обработка микро-резанием микро-рельефа способна обеспечить точность изготовления рабочей поверхности фокусатора до 0,1 мкм. Как показала практика изготовление микро-рельефа фокусатора микро-резанием должно осуществляться на финишном этапе в два этапа. В первую очередь выполняется микро-рельеф с точностью не менее 1 мкм на станочном оборудовании, использующем подшипники качения или скольжения, а также направляющие скольжения [50-51]. Затем осуществляется окончательная обработка микро-рельефа с глубиной резания до 0,1 мкм. Финишная обработка микро-рельефа может осуществляться в два прохода. Количество проходов резцом микро-рельефа фокусатора определяется высотой микро-рельефа, которая в свою очередь определяется используемой частотой лазерного излучения, которое отражает рабочая поверхность фокусатора.

5. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Если влияние квантования и дискретизации фазовой функции на работу фокусатора можно исследовать в рамках скалярной теории дифракции, то влияние мелких технологических погрешностей дифракционного микро-рельефа на качество и эффективность фокусировки можно оценить только в рамках строгой электромагнитной теории, т. е. на основе решения уравнений Максвелла [4]. Для решения этой задачи разработан ряд разностных схем [55], прозрачных излучающих условий [56-57], интегральных представлений уравнений Максвелла [58-60], декомпозиции сеточной области для разностных схем [61-62], облачных [63-64] и GPGPU сервисов [65]. Разработанный набор информационно-технологических приёмов позволил оценить влияние погрешностей формирования микро-рельефа при лазерной абляции поликристаллических алмазных плёнок на работу пропускающих фокусаторов лазерного излучения инфракрасного диапазона [66].

6. СОЗДАНИЕ НОВЫХ КЛАССОВ ДОЭ

Созданные для фокусаторов методы оказались эффективными при создании и изучении новых классов дифракционных оптических элементов, таких как многофокусные [67-68] и спектральные ДОЭ [69-70], оптические антенны [71-

74], дифракционные делители пучка [75] и др. [76-79]. 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 [69-70]. Оптические антенны оказались эффективными элементами светотехнических устройств [80-86].

7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

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. Экспериментальная проверка качества пронизывает все этапы создания фокусаторов. На начальном этапе изучается чистота и оптическая гладкость используемой подложки. Для этого разработаны специальные методы, основанные на анализе поведения капли жидкости, падающей на поверхность подложки [87-88], трибометрические [89-90], интерференционные и другие подходы [29-30].

Были разработаны также методы контроля формы микрорельефа [91] и различные оптические схемы и установки для экспериментального исследования ДОЭ [92-98]. Важнейшим подтверждением эффективности разработанных информационных и оптических технологий является хорошая согласованность данных вычислительного и физического экспериментов для фокусатора в кольцо [92], дифракционной линзы [93], различных фокусаторов [94-95], спектральных ДОЭ [96], оптоволоконных датчиков [97] и бинарного делителя пучка [98].

8. ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ ФОКУСАТОРОВ

Одно из важнейших практических приложений дифракционной компьютерной оптики – это технологические применения фокусаторов. В качестве примера таких приложений можно при-

вести лазерную закалку [99-100], наплавку, маркировку [101], сублимацию сплавов [102], формирование нанопористых структур металлических [103-104] и кристаллических [105] материалов и пр. Фокусатор в кольцо [6, 16] используется в установке выращивания монокристаллических волокон методом минипьедестала [106], разработанной в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН (г. Москва) для создания твердотельных неодимовых лазеров. Данная установка на основе кольцевого лазерного нагрева обеспечивает производство высококачественных волокон активированных монокристаллов с контролируемым радиальным градиентом показателя преломления. Фокусатор в наборе колец используется для трехмерного контроля дистанционирующих решеток тепловыделяющих сборок атомных реакторов [107].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные методы, устройства и технологии позволили не только решить широкий спектр задач создания и исследования фокусирующих ДОЭ, но и перейти к проектированию эффективных систем технического зрения [108-111], к исследованию уникальных свойств компонентов дифракционной нанофотоники [112-123] и созданию на этой основе перспективных информационных технологий [124].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голуб М.А., Карпеев 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. Infrared 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., Успенцев Г.В., Цветков В.Б., Щербаков И.А. Фокусаторы лазерного излучения ближнего ИК-диапазона // Письма в ЖТФ. 1992. Том 18, № 15. С. 39-41.
4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973, 721 с.
5. Серафимович П.Г. Дифракционное исследование фокусаторов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Том 14, № 6-1. С. 273-278.
6. Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Соифер В.А. Вычислительный эксперимент с элементами плоской оптики // Автометрия. 1988. № 1. С. 70-82.
7. 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.
8. Казанский Н.Л. Процедура корректировки фазовой функции фокусатора по результатам вычислитель-

- ного эксперимента // Компьютерная оптика. 1987. № 1. С. 90-96.
9. *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. P. 37-41.
 10. *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 прямоугольнике с постоянной интенсивностью // Компьютерная оптика. 1990. № 7. С.42-49.
 11. *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.
 12. *Досколович Л.Л., Казанский Н.Л.* Исследование голографических оптических элементов, фокусирующих в двумерную прямоугольную область // Компьютерная оптика. 1992. № 12. С. 14-17.
 13. *Kazanskiy N.L., Soifer V.A.* Diffraction investigation of geometrical optical focusators into segment // *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*. 1994. Vol. 96, № 4. P. 158-162.
 14. *Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Soifer V.A.* Comparative analysis of different focusators into segment // *Optics and Laser Technology*. 1995. Vol. 27, №4. P. 207-213.
 15. *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.
 16. *Казанский Н.Л.* Исследование дифракционных характеристик фокусатора в кольцо методом вычислительного эксперимента // Компьютерная оптика. 1992. №№ 10-11. С. 128-144.
 17. *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.
 18. *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.
 19. *Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Сойфер В.А.* Расчет бинарных дифракционных оптических элементов для фокусировки в заданную двумерную область // Автоматрия. 1995. № 5. С.42-50.
 20. *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. Vol.43, № 7. P. 1423-1433.
 21. *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. P. 015001.
 22. *Bezus E.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L.* Scattering suppression in plasmonic optics using a simple twolayer dielectric structure // *Applied Physics Letters*. 2011. Vol. 98, № 22, 221108 (3 pp.).
 23. *Bezus E.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Soifer V.A.* Scattering in elements of plasmon optics suppressed by twolayer dielectric structures // *Technical Physics Letters*. 2011. Vol. 37, № 12. P. 1091-1095.
 24. *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.
 25. *Волотовский С.Г., Казанский Н.Л., Павельев В.С.* Программное обеспечение для итерационного расчета и исследования ДОО // Компьютерная оптика. 1997. № 17. С. 48-53.
 26. *Казанский Н.Л., Самолинова Е.Б.* Комплекс программ анализа дифракционных характеристик фокусаторов // Компьютерная оптика. 1989. №5. С. 38-43.
 27. *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. P. 278-284.
 28. *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.
 29. *Казанский Н.Л.* Исследовательский комплекс для решения задач компьютерной оптики // Компьютерная оптика. 2006. № 29. С. 58-77.
 30. *Казанский Н.Л.* Исследовательско-технологический центр дифракционной оптики // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Том 13, № 4-1. С. 54-62.
 31. *Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Сойфер В.А., Харитонов С.И.* Дифракционный расчет оптического элемента, фокусирующего в кольцо // *Автоматрия*. 1987. № 6. С. 8-15.
 32. *Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Сойфер В.А., Харитонов С.И.* Оценка дифракционного размытия фокальной линии геометрических фокусаторов // Компьютерная оптика. 1989. №5, С. 34-38.
 33. *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.
 34. *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.
 35. *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. P. 297-300.
 36. *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.
 37. *Казанский Н.Л., Харитонов С.И.* О прохождении пространственноограниченных широкополосных радиальносимметричных сфокусированных импульсов через тонкую плёнку // Компьютерная оптика. 2012. Том 36, № 1. С. 4-13.
 38. *Казанский Н.Л.* Вычислительный эксперимент с линзой Френеля // Компьютерная оптика. 1988. № 3. С. 22-28.
 39. *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.
 40. *Попов В.В.* Материалы и методы для создания плоских фокусирующих элементов // Компьютерная оптика. 1987. № 1. С. 160-162.
 41. *Волков А.В., Казанский Н.Л., Сойфер В.А., Соловьев*

- В.С. Технология изготовления непрерывного микро- рельефа дифракционных оптических элементов // Компьютерная оптика. 1997. № 17. С. 91-93.
42. Volkov A.V., Kazanskiy N.L., Moiseev O.Ju., 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.
 43. 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.
 44. 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.
 45. Волков А.В., Истинова О.Г., Казанский Н.Л., Костюк Г.Ф. Разработка и исследование метода формирования микро рельефа ДОО в сапфировых подложках // Компьютерная оптика. 2002. № 24. С. 70-73.
 46. Волков А.В., Казанский Н.Л., Моисеев О.Ю. Формирование микро рельефа с использованием халькогенидных стеклообразных полупроводников // Компьютерная оптика. 2002. № 24. С. 74-77.
 47. 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. P. 1234-1238.
 48. 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.
 49. Казанский Н.Л., Колпаков В.А. Формирование оптического микро рельефа во внеэлектродной плазме газового разряда. М.: Радио и связь. 2009. 220 с. ISBN 589776011X.
 50. 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.
 51. Способ обработки асферических поверхностей резанием и устройство для его осуществления: а. с. 1816532 (SU). № 4948628/08; заявл. 15.04.91; опубл. 23.05.1993. Бюл. № 19.
 52. Bezus E.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L. Evanescentwave interferometric nanoscale photolithography using guidedmode resonant gratings // Microelectronic Engineering. 2011. Vol. 88, № 2. P. 170-174.
 53. 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.
 54. Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Perlo P., Repetto P., Soifer V.A. Direct twodimensional calculation of binary DOEs using a nonbinary series expression approach // International Journal of Optoelectronics. 1996. Vol. 10, № 4. P. 243-250.
 55. 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.
 56. Головашкин Д.Л., Казанский Н.Л. Методика формирования падающей волны при разностном разностном решении уравнений Максвелла. Одномерный случай // Автометрия. 2006. Том 42, № 6. С. 78-85.
 57. 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.
 58. 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.
 59. 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.
 60. 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.
 61. Головашкин Д.Л., Казанский Н.Л. Декомпозиция сеточной области при разностном решении уравнений Максвелла // Математическое моделирование. 2007. Том 19, №2. С. 48-58.
 62. Golovashkin D.L., Kazanskiy N.L. Mesh Domain Decomposition in the FiniteDifference Solution of Maxwell's Equations // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). 2009. Vol. 18, № 3. P. 203-211.
 63. Kazanskiy N.L., Serafimovich P.G. Cloud Computing for Rigorous CoupledWave Analysis // Advances in Optical Technologies. 2012. Vol. 2012. P. 398341.
 64. Kazanskiy N.L., Serafimovich P.G. Cloud Computing for Nanophotonic Simulations // Lecture Notes in Computer Science. 2013. Vol. 7715. P. 54-67.
 65. 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.
 66. Pavelyev V.S., Soifer V.A., Kazanskiy N.L., Golovashkin D.L., Volkov A.V., Kostyuk G.F., Kononenko V.V., Konov V.I., Pimenov S.M., Komlenok M.S., Duparré M.R., Luedge B. Synthesis and investigation of diamond diffractive optical elements // Proceedings of SPIE. 2006. Vol. 6290 "Laser Beam Shaping VII, San Diego, CA".
 67. 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. P. 1245-1251.
 68. Soifer V.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L. Multifocal diffractive elements // Optical Engineering. 1994. Vol. 33, № 11. P. 3610-3615.
 69. 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.
 70. Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Repetto P., Tyavin Ye.V. Design and investigation of colour separation diffraction gratings // Journal of Optics. 2007. Vol. 9, № 2. P. 123-127.
 71. Голуб М.А., Казанский Н.Л., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А. Синтез оптической антенны // Компьютерная оптика. 1987. № 1. С. 35-40.
 72. Казанский Н.Л., Сойфер В.А., Харитонов С.И. Математическое моделирование светотехнических устройств с ДОО // Компьютерная оптика. 1995. №№ 14-15. Ч.2. С. 107-116.
 73. Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Харитонов С.И.

- Проектирование светотехнических устройств с ДОО // Компьютерная оптика. 1998. № 18. С. 91-96.
74. *Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Soifer V.A., Kharitonov S.I., Perlo P.* A DOE to form a lineshaped directivity diagram // Journal of Modern Optics. 2004. Vol. 51, № 13. P. 1999-2005.
 75. *Казанский Н.Л., Скиданов Р.В.* Бинарный делитель пучка // Компьютерная оптика. 2011. Том 35, № 3. С. 329-334.
 76. *Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Сойфер 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.
 77. *Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Сойфер В.А.* Формирование эталонных волновых фронтов элементами компьютерной оптики // Компьютерная оптика. 1990. № 7. С. 3-26.
 78. *Хонина С.Н., Казанский Н.Л., Устинов А.В., Волотовский С.Г.* Линзакоп: непараксиальные эффекты // Оптический журнал. 2011. Том 78, № 11. С. 44-51.
 79. *Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Volotovskiy S.G.* Vortex phase transmission function as a factor to reduce the focal spot of highaperture focusing system // Journal of Modern Optics. 2011. Vol. 58, № 9. P. 748-760.
 80. *Волков А.В., Казанский Н.Л., Успенев Г.В.* Экспериментальное исследование светотехнических устройств с ДОО // Компьютерная оптика. 1999. № 19. С. 137-142.
 81. *Досколович Л.Л., Казанский Н.Л.* Расчет зеркала для формирования диаграммы направленности излучения // Автометрия. 2004. Том 40, № 5. С. 104-111.
 82. *Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Kharitonov S.I., Perlo P., Bernard S.* Designing reflectors to generate a lineshaped directivity diagram // Journal of Modern Optics. 2005. Vol. 52, № 11. P. 1529-1536.
 83. *Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Тренина М.А.* Расчет зеркала для формирования диаграммы направленности в виде отрезка // Автометрия. 2006. Том 42, № 4. С. 67-75.
 84. *Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Bernard S.* Designing a mirror to form a lineshaped directivity diagram // Journal of Modern Optics. 2007. Vol. 54, №№ 3-4. P. 589-597.
 85. *Moiseev M.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L.* Design of highefficient freeform LED lens for illumination of elongated rectangular regions // Optics Express. 2011. Vol. 19, № S3. P. A225-A233.
 86. *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, No. 23. P. 28651-28656.
 87. *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.
 88. *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.
 89. *Казанский Н.Л., Колтаков В.А., Колтаков А.И., Кричевский С.В., Ивлиев Н.А.* Оптимизация параметров устройства трибометрического измерения чистоты поверхности подложек // Компьютерная оптика. 2005. № 28. С. 76-79.
 90. *Казанский Н.Л., Колтаков В.А., Колтаков А.И., Кричевский С.В., Ивлиев Н.А.* Исследование особенностей трибометрического взаимодействия диэлектрических подложек при экспресс-контроле степени чистоты их поверхности // Компьютерная оптика. 2007. Том 31, № 1. С. 42-46.
 91. *Бабин С.В., Досколович Л.Л., Кадомин И.И., Кадомина Е.А., Казанский Н.Л.* Определение параметров профиля трапецеидальной дифракционной решетки на основе полиномиальных аппроксимаций отраженного поля // Компьютерная оптика. 2009. Том 33, № 2. С. 156-161.
 92. *Арефьев Е.Ю., Гилев В.А., Голуб М.А., Казанский Н.Л., Карпеев С.В., Сисакян И.Н., Сойфер 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.
 93. *Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Сойфер В.А., Успенев Г.В., Якушеникова Д.М.* Многоградационная линза Френеля // Журнал технической физики. 1991. Том 61, № 4. С. 195-197.
 94. *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.
 95. *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.
 96. *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.
 97. *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. P. 833-844.
 98. *Kazanskiy N., Skidanov R.* Binary beam splitter // Applied Optics. 2012. Vol. 51, № 14. P. 2672-2677.
 99. *Сисакян И.Н., Шорин В.П., Сойфер В.А., Мордасов В.И., Попов В.В.* Технологические возможности применения фокусаторов при лазерной обработке материалов // Компьютерная оптика. 1988. № 3. С. 94-97.
 100. *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.
 101. *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.
 102. *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.
 103. *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.
 104. *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.
 105. *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.

106. Буфетов Г.А., Кашин В.В., Николаев Д.А., Русанов С.Я., Серегин В.Ф., Цветков В.Б., Щербаков И.А., Яковлев А.А. Твердотельные неодимовые лазеры на основе монокристаллических волокон с поперечным градиентом показателя преломления // Квантовая электроника. 2006. Том 36, № 7. С. 616-619.
107. Завьялов П.С., Лемешко Ю.А., Финогенов Л.В., Чузуй Ю.В. Трёхмерный контроль дистанционирующих решеток тепловыделяющих сборок атомных реакторов на основе дифракционных оптических элементов // Автоматрия. 2008. Том 44, № 2. С. 23-31.
108. Волоотовский 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.
109. Казанский Н.Л., Попов С.Б. Система технического зрения для определения количества геля частиц в растворе полимера // Компьютерная оптика. 2009. Том 33, № 3. С. 325-331.
110. 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.
111. Казанский Н.Л., Попов С.Б. Распределённая система технического зрения регистрации железнодорожных составов // Компьютерная оптика. 2012. Том 36, № 3. С. 419-428.
112. Со́йфер В.А. Нанопотоника и дифракционная оптика // Компьютерная оптика. 2008. Том 32, № 2. С. 110-118.
113. 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. P. 318-324.
114. Казанский Н.Л., Серафимович П.Г. Использование инфраструктуры облачных вычислений для моделирования сложных нанопотонных структур // Компьютерная оптика. 2011. Том 35, № 3. С. 320-328.
115. Казанский Н.Л., Серафимович П.Г., Хонина С.Н. Нелинейный оптический нанорезонатор в пересечении гребенчатых фотоннокристаллических волноводов // Компьютерная оптика. 2011. Том 35, № 4, С. 426-431.
116. 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.
117. 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.
118. 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. P. 1149-1151.
119. Глуценко А.Г., Гончарова Г.Н., Казанский Н.Л., Топорова Л.В. Волновые свойства многослойных магнитооптических структур // Компьютерная оптика. 2011. Том 35, № 2. С. 231-237.
120. Bykov D.A., Doskolovich L.L., Soifer V.A., and Kazanskiy N.L. Extraordinary MagnetoOptical Effect of a Change in the Phase of Diffraction Orders in Dielectric Diffraction Gratings // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2010. Vol. 111, No. 6. P. 967-974.
121. Глуценко А.Г., Глуценко Е.П., Казанский Н.Л., Топорова Л.В. Стоячие волны в невзаимных гиротропных средах // Компьютерная оптика. 2013. Том 37, № 4. С. 415-418.
122. Bezus E.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L. Low-scattering surface plasmon refraction with isotropic materials // Optics Express. 2014. Vol. 22, № 11. P. 13547-13554.
123. Kazanskiy N.L., Serafimovich P.G. Coupled-resonator optical wave-guides for temporal integration of optical signals // Optics Express. 2014. Vol. 22, № 11. P. 14004-14013.
124. Со́йфер В.А. Дифракционная нанопотоника и перспективные информационные технологии // Вестник Российской академии наук. 2014. Том 84, № 1. С. 11-24.

TECHNOLOGIES OF FOCUSATORS OF LASER RADIATION

© 2014 S.R. Abul'khanov

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

The article analyzes a wide range of technologies generated by the creation and application of focusators of laser radiation. I give a brief review of methods for solving illposed inverse problems of diffraction theory, the methods of monitoring and substrate forming a diffraction micro-relief, optical systems and devices for experimental research of focusators, laser technologies and units on their basis.

Keywords: focusators of laser radiation, computational experiment, diffractive optical elements, formation of diffractive microrelief, laser technologies.