## УДК 537.53

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ФОКУСАТОРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

### ©2014 С.Р. Абульханов

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

#### Поступила в редакцию 22.12.2014

В статье анализируется широкий спектр технологий, порожденных использованием фокусаторов лазерного излучения. Даётся краткий обзор методов контроля подложек и формирования дифракционного микрорельефа, оптических схем и устройств для экспериментального исследования фокусаторов, лазерных технологий и установок на их на основе. Впервые анализируются применения фокусаторов в механической обработке материалов для термозакалки и контроля режущей кромки резца, в нефтяной промышленности для оперативного контроля макродефектов на внутренней поверхности труб и другие применения фокусаторов.

*Ключевые слова:* фокусаторы лазерного излучения, дифракционные оптические элементы, формирование дифракционного микрорельефа, лазерные технологии, кромка резца, термозакалка, внутренняя поверхность трубы, контроль дефектов, центрирование деталей и оптических изделий.

## **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 [2-3], связанных с созданием и применением фокусаторов лазерного излучения. В предлагаемой работе проанализировано влияние, которое создание фокусаторов оказало на оптическое приборостроение и лазерные технологии, описывается ряд новых, запатентованных автором, примеров использования фокусирующих ДОЭ.

# 1. МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ 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 [1-11]. 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, 4-6], фокусировке круглого пучка в прямоугольную область [12] и т.п. Выявление наиболее эффективного решения является особенно актуальным для базовых (наиболее распространенных) задач фокусировки. Например, решения задач фокусировки в поперечный отрезок [7-10] и кольцо [4, 11] являются базовыми для фокусаторов в литеры, а решение задачи фокусировки в прямоугольник является базовой при расчете фокусаторов плоские области [12]. Интересно, что полученные для фокусировки лазерного излучения решения оказались полезны для фокусировки поверхностных электромагнитных волн [13-16]. 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 [5, 17]. Разработанные методы расчета объединены в соответствующие программные продукты [18-21].

Для выявления наилучшего решения необходимо проанализировать выходные параметры фокусаторов [4-9]. Среди характеристик, описывающих процессы создания и функционирования фокусатора, можно выделить три вида параметров [4-9]. К первому виду относятся физические параметры, положенные в основу расчета фазовой функции ДОЭ: фокусное расстояние; рабо-

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

чая 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 пространственного 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 [2-25].

На начальном этапе создания нового фокусатора важно провести аналитический дифракционный расчет структуры сфокусированного излучения с учетом конечных размеров и конкретных физических параметров ДОЭ [22-24]. Анализ полученных дифракционных соотношений позволяет исследовать ограничения положенного в основу расчета фазовой функции фокусатора геометрооптического 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 [4, 11, 22], набор точек, продольный [1, 4-6] или поперечный [7-10] отрезки.

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. Для дальнейших и более детальных исследований фокусирующих ДОЭ разработаны методология и программные средства вычислительного эксперимента [3-25], 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 [3-9].

Важнейшим направлением данного исследования является оценка энергетического воздействия на обрабатываемый материал применительно к технологическому назначению фокусатора: маркировке, закалке, формированию нанопорит.п. (см. разделы 2 и 3 данного обзора).

Наличие широкого спектра различных методов формирования дифракционного микрорельефа фокусаторов [26-37] обусловливает 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 [7]. Выбор наилучшего решения для конкретных внутренних (в данном случае параметров дискретизации и квантования фазовой функции) параметров задачи эффективно осуществляется на основе данных вычислительного эксперимента.

Для изготовления рассчитанных фокусаторов было разработано множество методов и технологий формирования дифракционного микрорельефа [26-37]. Выбор технологии зависит от длины волны фокусируемого излучения, материала фокусатора и требуемой мощности лазера. Наибольшее распространение получили метод темнового роста в слоях жидких полимеризующихся композиций [26-27], послойного наращивания фоторезиста [28], плазмохимического и ионнохимического травления, электронной литографии [29-34], резания на станках с ЧПУ [35], плазмонной нанолитографии [36-37] и др. Вы-

бор наилучшего метода формирования дифракционного микрорельефа для конкретных параметров задачи эффективно осуществлять на основе данных вычислительного эксперимента. Если влияние квантования и дискретизации фазовой функции на работу фокусатора можно исследовать в рамках скалярной теории дифракции, то влияние мелких технологических погрешностей дифракционного микрорельефа на качество и эффективность фокусировки можно оценить только в рамках строгой электромагнитной теории, т. е. на основе решения уравнений Максвелла [9]. Для решения этой задачи разработан ряд разностных схем [9], прозрачных излучающих условий [38-39], интегральных представлений уравнений Максвелла [40], декомпозиции сеточной области для разностных схем [41-42], облачных [43-44] и GPGPU-сервисов [45].

# 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ФОКУСИРУЮЩИХ ДОЭ

Созданные для фокусаторов методы оказались эффективными при создании и изучении новых классов дифракционных оптических элементов, таких как многофокусные [46-47] и спектральные ДОЭ [48], оптические антенны [49-52], дифракционные делители пучка [53] и др. [54-58]. 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 [48]. Оптические антенны оказались эффективными элементами светотехнических устройств [59-66].

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 [67-68], трибометрические [69-70], интерференционные и другие подходы [19-21].

Были разработаны также методы контроля формы микрорельефа [71] и различные оптические схемы и установки для экспериментального исследования ДОЭ [72-76]. Важнейшим подтверждением эффективности разработанных информационных и оптических технологий является хорошая согласованность данных вычислительного и физического экспериментов для фокусатора в кольцо [72], различных фокусаторов [73], спектральных ДОЭ [74], оптоволоконных датчиков [75] и бинарного делителя пучка [76].

Одно из важнейших практических приложений дифракционной компьютерной оптики – это технологические применения фокусаторов. В качестве примера таких приложений можно привести лазерную маркировку [77], закалку [78-79], наплавку, сублимацию сплавов [80], формирование нанопористых структур металлических [81-82] и кристаллических [83] материалов и пр. Фокусатор в кольцо [4, 11] используется в установке выращивания монокристаллических волокон методом минипьедестала [84], 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 [85].

# 3. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕИМУЩЕСТВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОКУСАТОРОВ ВРАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Фокусаторы лазерного излучения находят применения в различных областях:

- металлообработка изделий с поверхностью свободных форм [77-83];

- средства контроля геометрических параметров подвижных и неподвижных объектов [86-88];

- термическая обработка и сварка металлов [89].

Для демонстрации преимуществ использования фокусаторов рассмотрим запатентованные устройства для термозакалки режущей кромки резца [89] и контроля макродефектов на внутренней поверхности труб [87].

На рис. 1 показаны несколько ракурсов конструкции устройства для термозакалки режущей кромки резца [89]. Устройство работает следующим образом. Включают лазер 5 (рис. 1). После чего лазерное излучение 4 падает на поверхность



**Рис. 1.** Устройство для термозакалки режущей кромки резца: 1 – резец; 2 – твердосплавная пластина; 3 – фокусатор; 4 – световой поток; 5 – лазер

фокусатора 3, откуда оно концентрируется на поверхность задних граней твердосплавной пластины 2 резца 1. На участках, принадлежащих задним граням пластин 2, на которые фокусируется лазерное излучение 4, происходит интенсивный нагрев поверхности.

Достоинством конструкции является одномоментная термическая обработка всей режущей кромки инструмента, что ведёт к повышению качества поверхности, а также снижает время термической обработки.

Поскольку фокусатор 3 обеспечивает равномерное распределение энергии на обрабатываемой поверхности пластины 2, то энергия лазерного излучения 4 практически вся поступает на нагрев участков задних граней, находящихся в фокусе фазового элемента (фокусатора) 3, что существенно повышает качество процесса термической закалки. На рис. 2 показана поверхность режущей кромки из твердосплавной пластины



Рис. 2. Режущая кромка резца до воздействия лазерным лучом (a) и после (b)

ВК8 до и после термической обработки с помощью отражённого от фокусатора 3 лазерного излучения 4. Проведённые исследования качественных параметров поверхностного слоя показали, что в результате энергетического воздействия на режущую кромку резца 1 изменились цвет, а также размеры фаз поверхностного слоя. Это обстоятельство обеспечивает повышение коммерческого времени использования резца 1.

Следует отметить, что аналогичные конструкционные и физические принципы были использованы в устройстве бесконтактного контроля углов заточки и координат вершины инструмента на станках с числовым программным управлением [88]. Использование этого устройства на станках с ЧПУ позволяет не только контролировать износ режущей кромки, но и оценивать характер износа.

Устройство контроля макродефектов поверхности труб предназначено для контроля глубины коррозионных раковин на внутренней поверхности труб нефтяного сортамента [87]. На рис. З изображено несколько ракурсов устройства, конструкция которого состоит из следующих деталей: 1 – рукоятка, 2 – корпус, 3 - телекамера, 4 – три штанги, 5, 6 – дифракционные оптические элементы, 7 - светодиод. ДОЭ 5 и 6 формируют структурированное освещение внутренней поверхности трубы. Распределение амплитуды отражённого от поверхности трубы потока света фиксируется телекамерой 3. Расположение структурированного потока света в фокусе телекамеры 3 обеспечивают штанги 4. Корпус 2 обеспечивает совпадение осей симметрий устройства и отверстия трубы.

Достоинством конструкции является возможность с помощью структурированного освещения оценивать глубину коррозионной раковины с требуемой точностью, что снижает вероятность возникновения аварий при добыче нефти.

Низкая стоимость устройства и отсутствие необходимости в квалифицированном обслуживающем персонале позволяют использовать устройство непосредственно на буровых установках, а также на предприятиях по ремонту труб нефтяного сортамента. Достоинством устройства также является возможность эксплуатации его в условиях низких температур, высокой влажности и вибраций.

Конструкция устройства после незначительной модернизации была использована также для контроля наличия дефектов на поверхности шасси самолёта.



**Рис. 3.** Несколько ракурсов с сечением устройства контроля макродефектов на внутренней поверхности труб: 1 – рукоятка, 2 – корпус, 3 – телекамера, 4 – три штанги, 5 – 6 – дифракционные оптические элементы, 7 – светодиод

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные методы, устройства и технологии позволили не только решить широкий спектр задач создания и применения фокусирующих ДОЭ, но и перейти к проектированию эффективных систем технического зрения [90-94], к исследованию уникальных свойств компонентов дифракционной нанофотоники [95-101] и магнитооптики [102-104], реализации оптических вычислений [105-108], разработке сверхкомпактной гиперспектральной аппаратуры для космического мониторинга Земли [109-111] и созданию на этой основе перспективных информационных технологий [112-116].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Голуб М.А., Карпеев С.В., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер 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. Абульханов С.Р. Технологии фокусаторов лазерного излучения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Том 16, № 4–1. С. 287–294.
- Серафимович П.Г. Дифракционное исследование фокусаторов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Том 14, № 6–1. С. 273–278.
- Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Сойфер В.А. Вычислительный эксперимент с элементами плоской оптики // Автометрия. 1988. № 1. С. 70–82.
- Казанский Н.Л. Процедура корректировки фазовой функции фокусатора по результатам вычислительного эксперимента // Компьютерная оптика. 1987. № 1. С. 90–96.
- 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.
- 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. P. 158–162.
- Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Soifer V.A. Comparative analysis of different focusators focusing into a segment // Optics and Laser Technology. 1995. Vol. 27, № 4. P. 207–213.
- Казанский Н.Л. Математическое моделирование оптических систем. Самара: СГАУ. 2005. 240 с. ISBN: 5-7883-0379-6.
- 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.
- Казанский Н.Л. Исследование дифракционных характеристик фокусатора в кольцо методом вычислительного эксперимента // Компьютерная оптика. 1992. № 10–11. С. 128–144.
- 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. P. 1423–1433.

- Безус Е.А, Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Сойфер 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.
- 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.
- 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. P. 221108.
- Bezus E.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L. Lowscattering surface plasmon refraction with isotropic materials // Optics Express. 2014. Vol. 22, № 11. P. 13547–13554.
- 17. Kazanskiy N.L., Kotlyar V.V., Soifer V.A. Computeraided design of diffractive optical elements // Optical Engineering. 1994. Vol. 33, № 10. P. 3156–3166.
- 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.
- Казанский Н.Л. Исследовательский комплекс для решения задач компьютерной оптики // Компьютерная оптика. 2006. № 29. С. 58–77.
- 20. Казанский Н.Л. Исследовательско-технологический центр дифракционной оптики // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Том 13, № 4–1. С. 54–62.
- Kazanskiy N.L. Research & Education Center of Diffractive Optics // Proceedings of SPIE. 2012. Vol. 8410. 84100R. DOI: 10.1117/12.923233.
- 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.
- 23. 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.
- 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.
- 25. Казанский Н.Л. Вычислительный эксперимент с линзой Френеля // Компьютерная оптика. 1988. № 3. С. 22–28.
- 26. Волков А.В., Казанский Н.Л., Сойфер В.А., Соловьев В.С. Технология изготовления непрерывного микрорельефа дифракционных оптических элементов // Компьютерная оптика. 1997. № 17. С. 91–93.
- 27. Соловьёв В.С., Казанский Н.Л., Волков А.В., Володкин Б.О., Старожилов А.Е. Экспериментальная проверка диффузионного механизма массопереноса в жидких фотополимеризующихся композициях с помощью ИК-Фурье спектроскопии // Компьютерная оптика. 2012. Том 36, № 2. С. 235–241.
- Volkov A.V., Kazanskiy N.L., Moiseev O.Ju., 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. P. 281–288.
- 29. 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.
- Волков А.В., Казанский Н.Л., Рыбаков О.Е. Разработка технологии получения дифракционного оптичес-

кого элемента с субмикронными размерами рельефа в кремниевой пластине // Компьютерная оптика. 1998. № 18. С. 130–133.

- 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.
- 32. 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.
- Казанский Н.Л., Колпаков В.А. Формирование оптического микрорельефа во внеэлектродной плазме газового разряда. М.: Радио и связь. 2009. 220 с. ISBN: 5-89776-011-X.
- Kazanskiy N.L., Kolpakov V.A., Podlipnov V.V. Gas discharge devices generating the directed fluxes of offelectrode plasma // Vacuum. 2014. Vol. 101. P. 291–297.
- 35. 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.
- 36. Bezus E.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L. Evanescentwave interferometric nanoscale photolithography using guided-mode resonant gratings // Microelectronic Engineering. 2011. Vol. 88, № 2. P. 170–174.
- 37. 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.
- 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.
- 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.
- 40. 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.
- Головашкин Д.Л., Казанский Н.Л. Декомпозиция сеточной области при разностном решении уравнений Максвелла // Математическое моделирование. 2007. Том 19, № 2. С. 48–58.
- 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.
- Kazanskiy N.L., Serafimovich P.G. Cloud Computing for Rigorous Coupled-Wave Analysis // Advances in Optical Technologies. 2012. Vol. 2012. Article ID 398341.
- Kazanskiy N.L., Serafimovich P.G. Cloud Computing for Nanophotonic Simulations // Lecture Notes in Computer Science. 2013. Vol. 7715. P. 54–67.
- 45. 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. P. 85–89.
- 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.
- Soifer V.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L. Multifocal diffractive elements // Optical Engineering. 1994. Vol. 33, № 11. P. 3610–3615.

- 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.
- 49. 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.
- 50. Казанский Н.Л., Сойфер В.А., Харитонов С.И. Моделирование светотехнических устройств с ДОЭ // Компьютерная оптика. 1995. № 14–15–2. С. 107–116.
- 51. Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Харитонов С.И. Проектирование светотехнических устройств с ДОЭ // Компьютерная оптика. 1998. № 18. С. 91-96.
- 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.
- 53. Казанский Н.Л., Скиданов Р.В. Бинарный делитель пучка // Компьютерная оптика. 2011. Том 35, № 3. С. 329–334.
- 54. Голуб М.А., Карпеев С.В., Казанский Н.Л., Мирзов А.В., Сисакян И.Н., Сойфер В.А., Уваров Г.В. Фазовые пространственные фильтры, согласованные с поперечными модами // Квантовая электроника. 1988. Том 15, № 3. С. 617-618.
- 55. 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.
- 56. Хонина С.Н., Казанский Н.Л., Устинов А.В., Волотовский С.Г. Линзакон: непараксиальные эффекты // Оптический журнал. 2011. Том 78, № 11. С. 44–51.
- 57. *Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Volotovsky S.G.* Vortex phase transmission function as a factor to reduce the focal spot of high-aperture focusing system // Journal of Modern Optics. 2011. Vol. 58, № 9. P. 748–760.
- 58. Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Volotovsky 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. P. 23–42.
- 59. Волков А.В., Казанский Н.Л., Успленьев Г.В. Экспериментальное исследование светотехнических устройств с ДОЭ // Компьютерная оптика. 1999. № 19. С. 137–142.
- 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.
- 61. 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.
- 62. 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.
- 63. 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.
- 64. 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. P. 28651–28656.
- 65. Дмитриев А.Ю., Досколович Д.Л., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л. Аналитический расчёт преломляющих оптических элементов для формирования одно-

параметрических диаграмм направленности // Компьютерная оптика. 2014. Том 38, № 2. С. 207–212.

- 66. Doskolovich L.L., Dmitriev A.Yu., Moiseev M.A., Kazanskiy N.L. Analytical design of refractive optical elements generating one-parameter intensity distributions // Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision. 2014. Vol. 31, № 11. P. 2538–2544.
- 67. 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.
- 68. Бородин С.А., Волков А.В., Казанский Н.Л. Устройство для анализа наношероховатостей и загрязнений подложки по динамическому состоянию капли жидкости, наносимой на ее поверхность // Оптический журнал. 2009. Том 76, № 7. С. 42–47.
- 69. Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Колпаков А.И., Кричевский С.В., Ивлиев Н.А. Оптимизация параметров устройства трибометрического измерения чистоты поверхности подложек // Компьютерная оптика. 2005. № 28. С. 76–79.
- 70. Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Колпаков 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.
- 71. 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.
- 72. Волков А.В., Казанский Н.Л., Успленьев Г.В. Изготовление и экспериментальное исследование фокусаторов в кольцо и в две точки // Компьютерная оптика. 1999. № 19. С. 132–136.
- Волков А.В., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Успленьев Г.В., Занелли А. Создание и исследование бинарных фокусаторов для мощного ND-YAG лазера // Компьютерная оптика. 2000. № 20. С. 84–89.
- 74. Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Khonina S.N., Skidanov R.V., Heikkila N., Siitonen S., Turunen J. Design and investigation of color separation diffraction gratings // Applied Optics. 2007. Vol. 46, № 15. P. 2825–2830.
- 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. P. 833–844.
- Kazanskiy N., Skidanov R. Binary beam splitter // Applied Optics. 2012. Vol. 51, № 14. P. 2672–2677.
- 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.
- 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.
- 79. 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.
- 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.
- Казанский Н.Л., Мурзин С.П., Меженин А.В., Осетров Е.Л. Формирование лазерного излучения для создания наноразмерных пористых структур материалов // Ком-

пьютерная оптика. 2008. Том 32, № 3. С. 246-248.

- 82. 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.
- 83. 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.
- 84. 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.
- 85. Завьялов П.С., Лемешко Ю.А., Финогенов Л.В., Чугуй Ю.В. Трехмерный контроль дистанционирующих решеток тепловыделяющих сборок атомных реакторов на основе дифракционных оптических элементов // Автометрия. 2008. Том 44, № 2. С. 23–31.
- 86. Абульханов С.Р., Васильев Е.Д., Котляр В.В., Сойфер В.А. Лазерное устройство для определения центра вращения детали // Авторское свидетельство СССР № 2022232. 1994.
- 87. Казанский Н.Л., Абульханов С.Р., Попов С.Б. Устройство контроля макродефектов на внутренней поверхности труб // Патент РФ на изобретение № 2531037 от 23.04.2013.
- 88. Абульханов С.Р., Дмитриев А.Ю., Казанский Н.Л., Сойфер В.А., Харитонов С.И. Устройство бесконтактного контроля углов заточки и координат вершины инструмента на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) // Патент на изобретение РФ № 2399461 от 07.04.2009.
- 89. Абульханов С.Р., Сойфер В.А, Казанский Н.Л., Досколович Л.Л. Устройство для термозакалки режущей кромки резца // Патент РФ на изобретение № 2341568 от 09.01.2007.
- 90. 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.
- 91. 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.
- 92. 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.
- 93. Казанский Н.Л., Попов С.Б. Распределённая система технического зрения регистрации железнодорожных составов // Компьютерная оптика. 2012. Том 36, № 3. С. 419–428.
- 94. 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.
- 95. 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.
- 96. Казанский Н.Л., Серафимович П.Г. Использование инфраструктуры облачных вычислений для моделирования сложных нанофотонных структур // Компьютерная оптика. 2011. Том 35, № 3. С. 320–328.

- 97. 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.
- 98. 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.
- 99. 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.
- 100. 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.
- 101. 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.
- 102. Глущенко А.Г., Гончарова Г.Н., Казанский Н.Л., Топоркова Л.В. Влияние намагниченности слоёв магнитооптической структуры на отражение электромагнитных волн // Компьютерная оптика. 2011. Том 35, № 2. С. 231–237.
- 103. Bykov D.A., Doskolovich L.L., Soifer V.A., Kazanskiy N.L. Extraordinary Magneto-Optical Effect of a Change in the Phase of Diffraction Orders in Dielectric Diffraction Gratings // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2010. Vol. 111, № 6. P. 967–974.
- 104. Глущенко А.Г., Глущенко Е.П., Казанский Н.Л., Топоркова Л.В. Стоячие волны в невзаимных гиротропных средах // Компьютерная оптика. 2013. Том 37, № 4. С. 415-418.
- 105. Kazanskiy N.L., Serafimovich P.G. Coupled-resonator optical waveguides for temporal integration of optical signals // Optics Express. 2014. Vol. 22, № 11. P. 14004– 14013.
- 106. 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.

107. 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.

- 108. 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.
- 109. 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.
- 110. 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.
- 111. 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.
- 112. 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.
- 113. Зимичев Е.А., Казанский Н.Л., Серафимович П.Г. Пространственная классификация гиперспектральных изображений с использованием метода кластеризации k-means++ // Компьютерная оптика. 2014. Том 38, № 2. С. 281–286.
- 114. Казанский Н.Л., Проценко В.И., Серафимович П.Г. Сравнение производительности систем потокового анализа данных в задаче обработки изображений скользящим окном // Компьютерная оптика. 2014. Том 38, № 4. С. 804–810.
- 115. Жердев Д.А., Казанский Н.Л., Фурсов В.А. Распознавание объектов по диаграммам рассеяния электромагнитного излучения на основе метода опорных подпространств // Компьютерная оптика. 2014. Том 38, № 3. С. 503–510.
- 116. Сойфер В.А. Дифракционная нанофотоника и перспективные информационные технологии // Вестник Российской академии наук. 2014. Том 84, № 1. С. 11–24.

## TECHNOLOGICAL APPLICATIONS FOR 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 application of focusators of laser radiation. I give a brief review of the methods of monitoring substrates and forming a diffractive micro-relief, optical systems and devices for experimental research of focusators, laser technologies and units on their basis. In particular, I analyze the use of focusators for thermal quenching (and control) of the cutting edge of the cutter in machine industry, for operational control of macroscopic defects on the inner surface of pipes in the oil industry and other applications of focusators.

*Keywords:* focusators of laser radiation, diffractive optical elements, formation of diffractive microrelief, laser technologies, the edge of the cutter, thermal tempering, the inner surface of the pipe, the studying defects, centering optical devices and machine parts.

Stanislav Abul'khanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Mechanical Processing of Materials Department. E-mail: abulhanov58@mail.ru