

УДК 537.53

## ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ДИФРАКЦИОННОЙ ОПТИКИ

© 2011 Н.Л. Казанский

Учреждение Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН, г. Самара

Поступила в редакцию 28.02.2011

Приводятся обзор задач дифракционной компьютерной оптики, возможная приборная база и информационные технологии, необходимые для их решения. На основе проведенного исследования анализируются достоинства и недостатки оснащения созданного в институте научно-образовательного центра компьютерной оптики и используемых технологических маршрутов.

Ключевые слова: дифракционная компьютерная оптика, информационные технологии, вычислительные ресурсы, программное обеспечение, приборная база, технологии дифракционной оптики, технологическое оборудование.

### ВВЕДЕНИЕ

Дифракционная оптика в течение последних 30 лет вызывает повышенный интерес конструкторов оптических систем и ученых во всем мире [1-2]. Научная группа, возглавляемая членом-корреспондентом РАН В.А. Соифером, ведет научные исследования в данной области с 1979 года [3]. Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) работают на основе дифракции монохроматического света на микрорельефе. Благодаря гибкости компьютерного проектирования дифракционного микрорельефа и возможностям современного прецизионного оборудования для его формирования мы получаем уникальный оптический инструмент для требуемого управления волновым фронтом или заданного преобразования монохроматических световых пучков [4-8]. Идеальный микрорельеф ДОЭ получил название «непрерывный». Его реализация в форме аппроксимирующих ступенек называется «многоуровневым» или «ступенчатым» микрорельефом, в простейшем варианте двух градаций ДОЭ называется «бинарным». Классические (киноформные) дифракционные элементы изготавливаются на роторных станках с числовым программным управлением и используются для коррекции аберраций оптических приборов, формирующих изображения [4]. Элементы дифракционной компьютерной оптики [1-2] ориентированы на решение разнообразных физических задач [5] (что требует создания специальных методов проектирования [5-6]), чаще всего не имеют осевой симметрии и поэтому не могут быть изготовлены на роторных станках с ЧПУ

[7-8]. К настоящему времени к физическим задачам, решаемым с использованием элементов компьютерной оптики, относятся: фокусировка лазерного излучения в заданную область пространства с требуемым распределением интенсивности [9-16], управление поперечно-модовым составом лазерного излучения [17-19], создание волновых фронтов требуемой формы [20-22], формирование инвариантных, гипергеометрических и других пучков с замечательными свойствами [23-28], создание требуемой диаграммы направленности излучения [29-32] и др.

Основные этапы создания ДОЭ включают в себя: 1) Расчет фазовой функции ДОЭ; 2) Формирование дифракционного микрорельефа; 3) Исследование функциональных возможностей и дифракционных характеристик ДОЭ; 4) Использование ДОЭ (проектирование и изготовление устройств на основе ДОЭ, тиражирование).

Для решения задач дифракционной оптики, реализации всех вышеперечисленных этапов создания ДОЭ, кадрового и приборного обеспечения этих задач Самарским государственным аэрокосмическим университетом имени академика С.П. Королева (национальным исследовательским университетом) (далее – СГАУ) и Институтом систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН) создан научно-образовательный центр компьютерной оптики (далее – Центр).

В предлагаемой работе анализируются возможная приборная база и информационные технологии, необходимые для решения задач дифракционной оптики и реализации этапов создания ДОЭ. На основе проведенного обзора исследуются достоинства и недостатки оснащения созданного научно-образовательного центра компьютерной оптики и используемых технологических маршрутов.

*Казанский Николай Львович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией дифракционной оптики. E-mail: kazansky@smr.ru*

## 1. РАСЧЕТ ФАЗОВОЙ ФУНКЦИИ ДИФРАКЦИОННОГО ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Расчет ДОЭ состоит обычно из следующих шагов. Сначала в рамках более грубого физического подхода (например, в рамках геометрической оптики или скалярной теории дифракции) происходит решение обратной задачи теории дифракции. В результате получается первоначальное приближение фазовой функции ДОЭ. На последующих этапах расчета необходимо учитывать технологические ограничения и технологические особенности формирования микрорельефа рассчитываемого ДОЭ. Для этого с учетом указанных ограничений осуществляется численное решение прямой задачи теории дифракции в рамках более строгого физического подхода [33-40]. На основе анализа рассчитанного при этом светового поля делается заключение о приемлемости полученного решения или (в противном случае) запускается процедура итерационной оптимизации первоначального приближения. Учитывая перечисленные сложности, проектировщик обычно создает для каждого типа ДОЭ, его параметров и метода формирования дифракционного микрорельефа свое программное обеспечение. Тем не менее, ряд наиболее интересных и часто встречающихся решений, ряд методов моделирования и оптимизации ДОЭ нами были доработаны до законченных программных продуктов, нашедших своих пользователей в Италии, Германии и США [40-47]. Для обучения студентов нами была приобретена сетевая версия (на 10 компьютеров) программного обеспечения "TracePro Expert" фирмы "Lambda Research Corporation" (США) [40]. Основное назначение программного обеспечения "TracePro Expert" – моделирование оптических систем на основе расчета трассировки лучей. Этот программный продукт имеет широкие возможности, реализованные большой специализированной фирмой "Lambda Research Corporation": обмен данными с разнообразными САД-системами, наличие программно реализованных описаний работы различных выпускаемых по всему миру оптических элементов и источников света и т.п. Возможно, более эффективным для выполнения заказов на расчет светотехнических устройств является программное обеспечение "ASAP" фирмы "BRO" (США), но фирма отказалась продавать нам свое программное обеспечение. Если же вести речь о рынке программных продуктов для расчета ДОЭ, то он достаточно узок, и относительный успех возможен

в случае «заточки» такого продукта под решение лабораторных задач вузовского обучения. Положительный пример такого успеха - созданное под руководством Франка Вировского фирмой "LightTrans GmbH" (Германия) программное обеспечение "VirtualLab™" [48-49] и наши программные продукты [40-47]. В рамках выполнения инновационной образовательной программы СГАУ (2006-2007 гг.) Центр удалось оснастить программными продуктами, предназначенными для решения задач дифракционной, интегральной и классической оптики: "Full WAVE 6.0" (разработчик - фирма "RSoft Design Group", США, [www.rsoftdesign.com](http://www.rsoftdesign.com)); "FIMMWAVE" (фирма "Photon Design", Оксфорд, Англия, [www.photond.com](http://www.photond.com)); "OlympiOs 5.2" (фирма "Concept to Volume", Голландия, [www.c2v.nl](http://www.c2v.nl)), "FRED" (фирма "Photon Engineering", США, [www.photonengr.com](http://www.photonengr.com)). Программное обеспечение "Full WAVE" обеспечивает решение уравнений Максвелла на основе разностных схем - методом FDTD (finite-difference time-domain) [50-54], а также включает в себя модули "BeamPROP", "GratingMOD" и "DiffractMOD". Программное обеспечение "FIMMWAVE" позволяет моделировать разновидности двух- и трехмерных волноводных структур на базе точного полностью векторного метода решения уравнения Гельмгольца, основанного на соответствии (сопряжении) мод в однородных слоях. Программное обеспечение "OlympiOs" предназначено для моделирования и разработки элементов интегральной оптики на основе численного нахождения мод и моделирования распространения излучения в оптических структурах с использованием ВМР (Beam Propagation Method). Программное обеспечение "FRED" близко к "TracePro Expert", но обладает рядом дополнительных функциональных возможностей.

Для расчета и моделирования работы ДОЭ (и оптических систем с ДОЭ) используется ряд вычислительных кластеров: кластер ИСОИ РАН (HP BLc3000 производительностью 1,3 ТФлопс), университетский кластер СГАУ «Сергей Королев» (производительностью 10 ТФлопс: платформа IBM BladeCenter, 112 блейд-серверов IBM BladeCenter HS22; каждый сервер имеет по два четырехядерных процессора Intel Xeon 5560 с частотой ядра 2,8 ГГц; общий объем оперативной памяти 1,3Тб; система хранения данных объемом 10Тб). Для хранения результатов расчета и измерений используются сервер национальной наносети объемом 60 Тб (СГАУ), сервер ИСОИ РАН «HP ProLiant DL100 Storage Server» долговременного хранения данных и др.

## 2. ФОРМИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННОГО МИКРОРЕЛЬЕФА

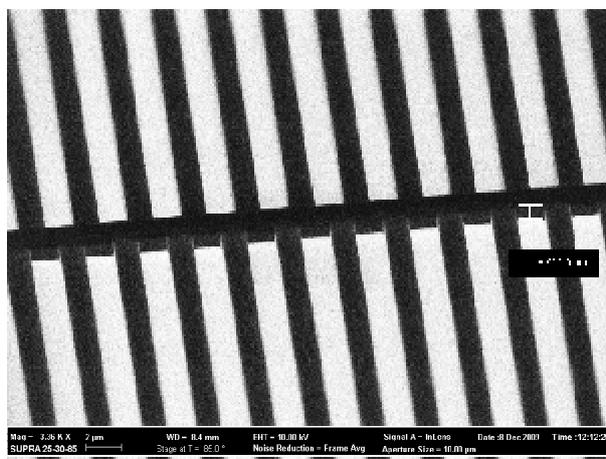
Результатом работы нашего программного обеспечения обычно является файл в формате, предназначенном для вывода на электронном литографе, лазерном построителе или ионной пушке. Данный формат определяется тем методом формирования дифракционного микро рельефа, который мы собираемся применить. Например, в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова (г. Санкт-Петербург) есть прецизионные станки с алмазным резцом. Сотрудники этого института режут с их помощью микро рельеф ДОЭ с вращательной симметрией [4]. Более могучие фирмы могут формировать на дорогих станках с ЧПУ и неосесимметричный микро рельеф. Однако на микро рельефе имеются узкие места, расположенные там, где рассчитанная фазовая функция ДОЭ делает скачок на  $2\pi$ . В такие места резец проникает с большим трудом и не может сформировать эти участки без погрешностей. Поэтому учеными всего мира развивается целый комплекс технологий, основанных на лазерном, электронном или ионном микро структурировании (абляции) материала подложки или резиста. Наиболее эффективным средством формирования микро рельефа является электронная литография [55], однако стоимость современного электронного литографа составляет несколько миллионов долларов, к тому же ряд фирм (например, IBM) создают их только для себя, а не на продажу. Приемлемый вариант решения этой задачи – приобретение специальной литографической приставки к растровому электронному микроскопу. В рамках инновационной образовательной программы СГАУ Центр смог приобрести растровый электронный микроскоп «Carl Zeiss SUPRA 25» с нанолитографической приставкой «XENOS XeDraw 2» (Германия), обеспечивающей разрешение 20 нм. Пример дифракционного микро рельефа, сформированного с помощью этой установки Д.В. Нестеренко, представлен на рис. 1. Сверхвысоковакуумный нанотехнологический комплекс НАНОФАБ-100 с модулем фокусированных ионных пучков и модулем плазмохимического травления и напыления (производства фирмы «НТ-МДТ», Зеленоград), имеющийся в научно-образовательном центре нанотехнологий СГАУ, позволяет осуществлять микро структурирование с помощью ионного пучка. К сожалению, реально на приставках к электронному микроскопу и нанофабу можно сформировать оптический элемент с размером рабочей области всего в несколько миллиметров. Тем не менее, с помощью ионного пучка было бы интересно из-

готовить и экспериментально исследовать работу спектральных ДОЭ [56-59], микро рельеф которых в несколько раз выше обычного дифракционного рельефа ДОЭ, рассчитанного на работу на одной длине волны.

Весьма перспективным представляется метод выращивания непрерывного микро рельефа в слоях жидких фотополимеризующихся композиций [60-63]. Метод обладает целым рядом достоинств: простота, оптическая гладкость получаемой поверхности, возможность формирования «высокого» рельефа, эквивалентного максимуму фазы в 10-100 раз по  $2\pi$ . Однако метод имеет существенные [60] ограничения пространственного разрешения формируемого микро рельефа, которые приходится преодолевать с помощью различных ухищрений [62-63].

Формирование многоуровневого микро рельефа схематично можно представить в виде следующих шагов: исходный контроль материалов и подложек, запись шаблонов, итеративное повторение фотолитографических операций (создание защитных покрытий, травление микро рельефа, совмещение) и контроль полученного микро рельефа.

Перечень приборов, используемых на этапе предварительного контроля, включает следующее: высокопроизводительная система анализа спектров оптического излучения «SR303i» («LOT-Oriel GmbH & Co», Германия), сканирующий зондовый микроскоп «SOLVER-Pro» («НТ-МДТ», Зеленоград), микроскоп контроля микро дефектов МКД-Р («ЛОМО»), установки для экспресс-контроля степени чистоты и шероховатости поверхности подложек. Установки экспресс-контроля степени чистоты поверхности подложек, разработанные в Центре, основаны на



**Рис. 1.** Изображение дифракционного микро рельефа, созданного с помощью литографической приставки «XENOS XeDraw 2» к электронному микроскопу (период решетки в резисте – 3 мкм, высота – 830 нм)

трибометрических методах [64-67] и на анализе поведения упавшей на поверхность подложки капли жидкости [68-70].

Для создания большегабаритных фотошаблонов (диаметром до 200 мм) мы используем станцию лазерной записи CLWS-200 [71], спроектированную в Институте автоматики и электрометрии СО РАН (ИАиЭ СО РАН). Проведя в 2002 году анализ мирового рынка, ученый совет Центра пришел к выводу, что данный вариант решения проблемы создания шаблонов широкоформатных ДОЭ является наиболее приемлемым. Альтернативные варианты установок лазерной записи – “Risø National Laboratory” (Дания) стоимостью 1,4 миллиона долларов США и “Heptagon Oy” (Швейцария) стоимостью 525 тысяч евро (без монтажа оборудования в Самаре) – в несколько раз дороже новосибирской станции. К тому же из-за построчного сканирования [72] швейцарская установка крайне медлительна – время записи шаблона размером 5x5 мм – 2,5 часа; 10x10 мм – 6,5 часов; 20x20 мм – 15,5 часов.

Важным этапом фотолитографии является создание защитных покрытий. Для этого в Центре применяется автоматическая установка магнетронного и термического нанесения пленок «Каролина D12A» (производитель – АО «ЭСТО-Вакуум», г. Зеленоград). Для «сухого» травления рельефа используется установка плазмохимического травления «Оратория» и плазменного травления «Каролина 15». С помощью этих установок были созданы микрорельефы на кремнии [73], стекле [74], кварце [13, 75], сапфире [76], поликристаллических алмазных пленках [77-79] с разрешением до 0,1 мкм.

Основная проблема формирования микрорельефа на алмазных пленках заключается в особой прочности алмаза [77], поэтому выбор режимов травления и защитного покрытия (в данном случае удалось подобрать эффективные защитные пленки на основе ниобия) играет решающую роль [77-79].

Для того, чтобы получить многоуровневый рельеф [80], используется установка экспонирования и совмещения ЭМ 5006А. Все вышеперечисленные установки специально доработаны нами для задач дифракционной оптики. Необходимость такой доработки обусловлена наличием разных размеров подложек и существенной (с точки зрения микроэлектроники, для решения задач которой создавались установки) высотой получаемого микрорельефа. Один из оригинальных методов формирования микрорельефа, предложенный и апробированный в Центре, – способ послойного наращивания фоторезиста [81-84]. При формировании микрорельефа этим простым (но достаточно трудоемким) способом

исключается этап травления и вносимые им погрешности, а используются центрифуга «Polos» и установка экспонирования и совмещения. Этим запатентованным способом был изготовлен ряд фокусаторов для технологических CO<sub>2</sub>-лазеров (10,6 мкм). Фокусатор в кольцо [34-35] используется в установке выращивания монокристаллических волокон методом минипьедестала [85], 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. Остальные изготовленные фокусаторы применяются в различных технологических подходах [86-92].

В Центре имеется широкий перечень оборудования, используемого для контроля микрорельефа ДОЭ. В частности, сканирующий зондовый микроскоп «SOLVER-Pro» (ЗАО «НТ-МДТ») обеспечивает контроль с точностью 10 нм на микронных участках, а трехмерно-отображающий анализатор поверхности “NewView 5000” (“Zygo Inc.”, США) с микронной точностью на площадках размером 20 см на 20 см. Кроме этого активно используются профилометр “KIA Tencor” (“Tencor”, США), микроинтерферометр МИИ-4, комплекс исследования структуры поверхности “Nanopics 2100” (“Tencor”, США), зондовая нанолаборатория “Ntegra Solaris” (ЗАО «НТ-МДТ») для ближнепольной микроскопии с возможностью проведения спектральных измерений, комплекс изучения наноструктур “CPS-DC” (“L.O.T.- Oriel GmbH & Co”, Германия), установка исследования механических свойств материалов на наноуровне “NANOTEST 600” (“Micromaterials”, Великобритания). Интересные возможности для контроля методом рефлектотрии геометрических параметров тестовых дифракционных решеток, располагаемых на периферии подложек ДОЭ, открывает разработанное в Центре специальное программное обеспечение [93] для эллипсометра “M2000DI” (“LOT-Oriel Gruppe”, Германия).

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДОЭ

Перечень оборудования, используемого для исследования характеристик ДОЭ, включает динамический транспарант (микродисплей) SXGA-R2-N1 (“CRL Opto Ltd.”, Великобритания), приставку для анализа параметров пучка лазерного излучения “BeamProfiler”, систему для регистрации и анализа инфракрас-

ного излучения "XPORT" ("L.O.T.- Oriel GmbH & Co", Германия), видеокамеры ("VS-STT-252", "MDCE-5A", "VS-FAST/C/G6" и другие), аппаратно-программный комплекс дистанционного мониторинга динамических процессов и объектов (ИАиЭ СО РАН), оптические и голографические столы "Standa", различные типы лазеров. Динамический транспарант позволяет для ряда задач экспериментально проверить результаты расчета без изготовления ДОЭ [94]. Наличие лазеров на средний ИК (10,6 мкм), ближний ИК (1,06 мкм) и видимый диапазоны позволяет исследовать оптические элементы, работающие на разных длинах волн. Каждый класс дифракционных оптических элементов требует для экспериментального исследования разработки индивидуальных оптических схем и средств автоматизации эксперимента [1-3, 5-9, 18-21, 24, 29, 74-75, 84-97]. Особую сложность вызывает экспериментальное исследование многофокусных и многопорядковых ДОЭ [16, 56, 98-101].

#### 4. ПРИМЕРЫ СОЗДАНИЯ ДОЭ И УСТРОЙСТВ НА ИХ ОСНОВЕ

Проведенное рассмотрение этапов создания дифракционных оптических элементов показывает, что имеющиеся в Центре приборы и программные продукты позволяют эффективно проектировать, изготавливать и исследовать основные классы ДОЭ, начиная с (линзы, призмы, решетки, корректоры аберраций) и заканчивая многопорядковыми, многофункциональными и спектральными оптическими элементами.

Это является основой для создания лазерных технологий обработки материалов [85-92, 102-103] и проектирования уникальных оптических приборов на базе дифракционных оптических элементов – светотехнических устройств [104-105], систем технического зрения [106-108], устройств для манипуляции микрообъектами (рис.2) [94-97], волоконно-оптических датчиков [109-111] и др.

Например, реализация методом горячей штамповки микрорельефа моданов на торце галогенидного ИК-волокна [109-110] позволяет создать новый класс компактных волоконно-оптических датчиков повышенной чувствительности [111].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научно-образовательный центр компьютерной оптики обеспечивает решение широкого спектра задач дифракционной оптики. Имеющиеся в Центре программные продукты и оборудо-



Рис. 2. Фотография установки манипуляции микрообъектами, созданной на основе ДОЭ

вание позволяют качественно реализовать все этапы создания и исследования ДОЭ и перейти к экспериментальному решению задач нанофотоники [112-114], дифракционной магнитооптики [115-116] и плазмоники [117-120]. В то же время для инновационного применения полученных результатов желательно включение в состав Центра оборудования, предназначенного для тиражирования дифракционных оптических элементов [121].

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Оснащение Центра осуществлялось при поддержке Федеральной целевой программы «Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997-2000 годы», Федеральной целевой программы «Интеграция науки и высшего образования России на 2002-2006 гг.», Российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» ("BRHE": 2002-2010 гг.), Инновационной образовательной программы СГАУ (2006-2007 гг.), программы развития национального исследовательского университета (2009-2018 гг.), проектов развития материальной базы научных исследований Российского фонда фундаментальных исследований и Президиума Российской академии наук.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сисакян И.Н., Сойфер В.А.* Компьютерная оптика. Достижения и проблемы // Компьютерная оптика. 1987. № 1. С. 5-19.
2. *Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements* / edited by Victor A. Soifer. A Wiley Interscience Publication. John Wiley & Sons, Inc., 2002. 765 p.
3. *Казанский Н.Л.* 70 лет профессору Иосифу Норайровичу Сисакяну // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева. 2008. № 2(15). С. 9-34.
4. *Ган М.А.* 50 лет киноформной оптике, итоги и перспективы развития // Оптический журнал. 2006. Том 73, № 7. С. 9-16.
5. Дифракционная компьютерная оптика / под редакцией В.А. Сойфера. М.: Физматлит, 2007. 736 с.
6. Методы компьютерной оптики / под редакцией В.А. Сойфера. Издание 2-ое исправленное. М.: Физматлит, 2003. 688 с.
7. *Казанский Н.Л.* Исследовательский комплекс для решения задач компьютерной оптики // Компьютерная оптика. 2006. № 29. С. 58-77.
8. *Казанский Н.Л., Колтаков В.А.* Формирование оптического микрорельефа во внеэлектродной плазме газового разряда. М.: Радио и связь, 2009. 220 с.
9. *Голуб М.А., Карнеев 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.
10. *Голуб М.А., Дегтярева В.П., Климов А.Н., Попов В.В., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А.* Машинный синтез фокусирующих элементов для CO<sub>2</sub>-лазера // Письма в ЖТФ. 1982. Том 8, № 13. С. 449-451.
11. *Данилов В.А., Попов В.В., Прохоров А.М., Сагателян Д.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А.* Синтез оптических элементов, создающих фокальную линию произвольной формы // Письма в ЖТФ. 1982. Том 8, № 13. С. 810-815.
12. *Гончарский А.В., Данилов В.А., Попов В.В., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А., Степанов В.В.* Решение обратной задачи фокусировки лазерного излучения в произвольную кривую // Доклады АН СССР. 1983. Том 273, № 3. С. 605-608.
13. *Голуб М.А., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Климов И.В., Сойфер В.А., Успенцев Г.В., Цветков В.Б., Щербачев И.А.* Фокусаторы лазерного излучения ближнего ИК-диапазона // Письма в ЖТФ. 1992. Том 18, № 15. С. 39-41.
14. *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.
15. *Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Сойфер В.А., Харитонов С.И.* Фокусировка лазерного излучения на трехмерную поверхность вращения // Компьютерная оптика. 1992. № 12. С. 8-14.
16. *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.
17. *Голуб М.А., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А.* Синтез пространственных фильтров для исследования поперечно-модового состава когерентного излучения // Квантовая электроника. 1982. Том 12, № 9. С. 1866-1868.
18. *Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Сойфер В.А., Карнеев С.В., Мирзов А.В., Уваров Г.В.* Фазовые пространственные фильтры, согласованные с поперечными модами // Квантовая электроника. 1988. Том 15, № 3. С. 617-618.
19. *Сисакян И.Н., Сойфер В.А.* Моданы - оптические элементы для анализа и формирования поперечно-модового состава лазерного излучения // Компьютерная оптика. 1989. № 4. С.3-9.
20. *Голуб М.А., Живописцев Е.С., Карнеев С.В., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А.* Получение асферических волновых фронтов при помощи машинных голограмм // Доклады АН СССР. 1980. Том 253, № 5. С. 1104-1108.
21. *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.
22. *Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Сойфер В.А.* Синтез эталонов для контроля внеосевых сегментов асферических поверхностей // Оптика и спектроскопия. 1990. Том 68, № 2. С. 461-466.
23. *Березный А.Е., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А.* Бессель-оптика // Доклады АН СССР. 1984. Том 274, № 3. С. 605-608.
24. *Kotlyar V.V., Skidanov R.V., Khonina S.N., Soifer V.A.* Hypergeometric modes // Optics Letters. 2007. Vol. 32, № 7. P. 742-744.
25. *Ковалев А.А., Котляр В.В., Хонина С.Н., Сойфер В.А.* Параксиальные гипергеометрические лазерные пучки с особенностью в центре перетяжки // Компьютерная оптика. 2007. Том 31, № 1. С. 9-13.
26. *Ковалев А.А., Котляр В.В.* Гипергеометрические лазерные пучки общего вида и их известные частные случаи // Компьютерная оптика. 2007. Том 31, № 4. С. 30-31.
27. *Kotlyar V.V., Kovalev A.A.* Family of hypergeometric laser beams // Journal of the Optical Society of America A. 2008. Vol. 25, № 1. P. 262-270.
28. *Котляр В.В., Ковалев А.А.* Самофокусировка гипергеометрических лазерных пучков // Компьютерная оптика. 2010. Том 34, № 3. С. 286-291.
29. *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.
30. *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.
31. *Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Мусеев М.А.* Расчет эйконала светового поля для заданного масштабирования распределения освещенности // Известия Самарского научного центра РАН. 2006. Том 8, № 4. С. 1195-1199.
32. *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, № 4. P. 589 - 597.
33. *Казанский Н.Л.* Процедура корректировки фазовой функции фокусатора по результатам вычислительного эксперимента // Компьютерная оптика. 1987. № 1. С. 90-96.
34. *Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Сойфер В.А.* Вычислительный эксперимент с элементами плоской оптики // Автометрия. 1988. № 1. С. 70-82.
35. *Казанский Н.Л.* Исследование дифракционных характеристик фокусатора в кольцо методом вычислительного эксперимента // Компьютерная оптика. 1992. № 10-11. С. 128-144.

36. 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.
37. Kazanskiy N.L., Soifer V.A. Diffraction investigation of geometric-optical focusators into segment // Optik. 1994. Vol. 96, № 4. P. 158-162.
38. Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Харитонов С.И. Метод оценки энергетической эффективности ДОО // Компьютерная оптика. 1996. № 16. С. 47-50.
39. 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.
40. Казанский Н.Л. Математическое моделирование оптических систем. Самара: СГАУ, 2005. 240 с.
41. Казанский Н.Л., Самолинова Е.Б. Комплекс программ анализа дифракционных характеристик фокусаторов // Компьютерная оптика. 1989. № 5. С. 38-43.
42. Голуб М.А., Казанский Н.Л., Шинкарев М.В. Структура комплекса программ синтеза элементов компьютерной оптики // Компьютерная оптика. 1989. № 5. С. 43-48.
43. Волоотовский С.Г., Голуб М.А., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Павельев В.С., Серафимович П.Г., Сойфер В.А., Харитонов С.И., Царезгородцев А.Е. Программное обеспечение по компьютерной оптике // Компьютерная оптика. 1995. №№ 14-15. Ч.2. С.94-106.
44. Doskolovich L.L., Golub M.A., Kazanskiy N.L., Khratov 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.
45. Волоотовский С.Г., Казанский Н.Л., Павельев В.С. Программное обеспечение для итерационного расчета и исследования ДОО // Компьютерная оптика. 1997. № 17. С. 48-53.
46. Волоотовский 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.
47. Doskolovich L., Kadamina E., Kadamina I., and Kharitonov S. Software for Designing and Modeling the Diffraction Gratings within the Rigorous Electromagnetic Theory // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2007. Vol. 16, № 1. P. 24-30.
48. Wyrowski F., Turunen J. Wave-optical engineering // in book "International Trends in Applied Optics" edited by A.H. Guenther, London: SPIE Press, 2002. P. 471-496.
49. Buhling S., Schimmel H., Wyrowski F. Wave-optical engineering with VOL4 VirtualLab // Proceedings of SPIE. 2004. Vol. 5182. P. 24-33.
50. Головашкин Д.Л., Дегтярёв А.А., Сойфер В.А. Моделирование волноводного распространения оптического излучения в рамках электромагнитной теории // Компьютерная оптика. 1997. № 17. С. 5-9.
51. 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.
52. Головашкин Д.Л., Казанский Н.Л. Методика формирования падающей волны при разностном решении уравнений Максвелла. Одномерный случай // Автоматика. 2006. Том 42, № 6. С. 78-85.
53. Головашкин Д.Л., Казанский Н.Л. Методика формирования падающей волны при разностном решении уравнений Максвелла. Двумерный случай // Автоматика. 2007. Том 43, № 6. С. 78-88.
54. Головашкин Д.Л., Казанский Н.Л. Декомпозиция сеточной области при разностном решении уравнений Максвелла // Математическое моделирование. 2007. Том 19, №2. С. 48-58.
55. Stern M.B. Binary Optics Fabrication // In the book "Micro-optics. Elements, systems and applications" edited by Hans Peter Herzig. London: Taylor & Francis Ltd, 1997. P. 53-85.
56. 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.
57. Досколович Л.Л., Тявин Е.В., Казанский Н.Л., Петрова О.И. Расчет и исследование цветоделительных дифракционных решеток // Компьютерная оптика. 2005. № 27. С. 11-16.
58. Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Repetto P., Tyavin Ye.V. Design and investigation of colour separation diffraction gratings // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. 2007. Vol. 9. P. 123-127.
59. 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.
60. Волков А.В., Волоотовский С.Г., Гранчак В.М., Казанский Н.Л., Мусеев О.Ю., Сойфер В.А., Соловьев В.С., Якуненкова Д.М. Экспериментальное исследование массопереноса в жидких фотополимеризующихся композициях // Журнал технической физики. 1995. Том 65, № 9. С. 181-185.
61. 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.
62. Волков А.В., Казанский Н.Л., Соловьев В.С. Контроль изменения показателя преломления в жидких фотополимеризующихся композициях // Компьютерная оптика. 2001. № 21. С. 117-120.
63. Соловьев В.С., Волков А.В., Володкин Б.О., Казанский Н.Л., Сторожилова О.В. Рельефообразующие надмолекулярные структуры на силоксановых полимерах // Компьютерная оптика. 2008. Том 32, № 1. С. 59-61.
64. 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.
65. 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.
66. Казанский Н.Л., Колтаков В.А., Кричевский С.В., Ивлиев Н.А. Способ измерения чистоты поверхности подложек // Патент РФ на изобретение № 2307339 от 27.09.2007. Бюл. № 27.
67. Сойфер В.А., Казанский Н.Л., Колтаков В.А., Колтаков А.И., Подлитнов В.В. Способ измерения чистоты поверхности подложек // Патент РФ на изобретение № 2380684 от 27.01.2010. Бюл. № 3.
68. 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. 70-75.
69. Казанский Н.Л., Волков А.В., Бородин С.А. Способ

- контроля шероховатости поверхности диэлектрических подложек // Патент РФ на изобретение № 2331870 от 20.08.2008. Бюл. № 23.
70. *Borodin S.A., Volkov A.V., Kazanskiy N.L.* 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.
  71. 3D лазерные информационные технологии / Отв. редактор П.Е. Твердохлеб. Новосибирск: ЗАО ИПП «ОФСЕТ», 2003. 550 с.
  72. *Gale M.T.* Direct Writing of Continuous-Relief Micro-Optics // In the book "Micro-optics. Elements, systems and applications" edited by Hans Peter Herzig. London: Taylor & Francis Ltd, 1997. P. 87-126.
  73. *Волков А.В., Казанский Н.Л., Рыбаков О.Е.* Разработка технологии получения дифракционного оптического элемента с субмикронными размерами рельефа в кремниевой пластине // Компьютерная оптика. 1998. № 18. С. 133-138.
  74. *Волков А.В., Казанский Н.Л., Успенцев Г.В.* Изготовление и экспериментальное исследование фокусаторов в кольцо и в две точки // Компьютерная оптика. 1999. № 19. С. 132-136.
  75. *Волков А.В., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Успенцев Г.В., Занелли А.* Создание и исследование бинарных фокусаторов для мощного ND-YAG лазера // Компьютерная оптика. 2000. № 20. С. 84-89.
  76. *Волков А.В., Истинова О.Г., Казанский Н.Л., Костюк Г.Ф.* Разработка и исследование метода формирования микрорельефа ДОЭ в сапфировых подложках // Компьютерная оптика. 2002. № 24. С. 70-73.
  77. *Волков А.В., Казанский Н.Л., Костюк Г.Ф., Павельев В.С.* Сухое травление поликристаллических алмазных пленок // Компьютерная оптика. 2001. № 22. С. 50-52.
  78. *Волков А.В., Казанский Н.Л., Моисеев О.Ю., Сойфер В.А.* Способ изготовления дифракционных оптических элементов на алмазных и алмазоподобных пленках // Патент на изобретение № 2197006 от 20.01.2003. Бюл. № 2.
  79. *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.
  80. *Волков А.В., Казанский Н.Л., Рыбаков О.Е.* Исследование технологии плазменного травления для получения многоуровневых дифракционных оптических элементов // Компьютерная оптика. 1998. № 18. С. 130-133.
  81. *Волков А.В., Казанский Н.Л., Моисеев О.Ю., Сойфер В.А.* Метод формирования дифракционного микрорельефа на основе послойного наращивания фоторезиста // Компьютерная оптика. 1996. № 16. С. 12-14.
  82. *Volkov A.V., Kazanskiy N.L., Moiseev O.Yu., Soifer V.A.* A Method for the Diffractive Microrelief Forming Using the Layered Photoresist Growth // Optics and Lasers in Engineering. 1998. Vol. 29, №№ 4-5. P. 281-288.
  83. *Волков А.В., Казанский Н.Л., Моисеев О.Ю.* Подготовка поверхности подложек для изготовления ДОЭ методом послойного наращивания фоторезиста // Компьютерная оптика. 2001. № 21. С. 113-116.
  84. *Волков А.В., Казанский Н.Л., Моисеев О.Ю.* Способ изготовления дифракционных оптических элементов // Патент на изобретение № 2231812 от 27 июня 2004 года. Бюл. № 18.
  85. *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.
  86. *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.
  87. *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.
  88. *Казанский Н.Л., Мордасов В.И., Мурзин С.П.* Формирование энергетических потоков при проведении лазерной и комбинированной обработки материалов // Компьютерная оптика. 2003. № 25. С. 120-125.
  89. *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.
  90. *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.
  91. *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.
  92. *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.
  93. *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.
  94. *Скиданов Р.В., Хонина С.Н., Котляр В.В.* Оптическая микроманипуляция с использованием бинарного динамического модулятора света // Компьютерная оптика. 2008. Том 32, № 4. С. 361-365.
  95. *Khonina S.N., Kotlyar V.V., Skidanov R.V., Soifer V.A., Jefimovs K., Simonen J., Turunen J.* Rotation of microparticles with Bessel beams generated by diffractive elements // Journal of Modern Optics. 2004. Vol. 51, № 14. P. 2167-2184.
  96. *Скиданов Р.В., Порфирьев А.П.* Оптическая микроманипуляция с использованием бинарных фокусаторов // Компьютерная оптика. 2010. Том 34, № 2. С. 214-218.
  97. *Скиданов Р.В., Морозов А.А.* Оптическая микроманипуляция с использованием микровзрывов частиц полистирола // Компьютерная оптика. 2010. Том 34, № 3. С. 302-307.
  98. *Голуб М.А., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Сойфер В.А., Харитонов С.И.* Дифракционный подход к синтезу многофункциональных фазовых элементов // Оптика и спектроскопия. 1992. Том 73, № 1. С. 191-195.
  99. *Soifer V.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L.* Multifocal diffractive elements // Optical Engineering. 1994. Vol. 33, № 11. P. 3610-3615.
  100. *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.
101. Volkov A.V., Kazanskiy N.L., Usplen'ev G.V. Automation of the Physical Experiment in Computer Optics // Pattern Recognition and Image Analysis. 2001. Vol. 11, № 2. P. 469-470.
102. Соифер В.А., Казанский Н.Л., Абульханов С.Р., Досколович Л.Л., Харитонов С.И. Устройство для термомозаики режущей кромки резца // Патент РФ на изобретение № 2341568 от 20.12.2008. Бюл. № 35.
103. Казанский Н.Л., Мурзин С.П., Досколович Л.Л., Харитонов С.И., Меженин А.В. Способ лазерной термической обработки материалов // Патент РФ на изобретение № 2345148 от 27.01.2009. Бюл. № 3.
104. Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Харитонов С.И. Проектирование светотехнических устройств с ДОЭ // Компьютерная оптика. 1998. № 18. С. 91-96.
105. Волков А.В., Казанский Н.Л., Успенев Г.В. Экспериментальное исследование светотехнических устройств с ДОЭ // Компьютерная оптика. 1999. № 19. С. 137-142.
106. Вологовский 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.
107. Казанский Н.Л., Попов С.Б. Система технического зрения для определения количества гелевых частиц в растворе полимера // Компьютерная оптика. 2009. Том 33, № 3. С. 325-331.
108. 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.
109. Волков А.В., Головашкин Д.Л., Ерополов В.А., Казанский Н.Л., Карпеев С.В., Моисеев О.Ю., Павельев В.С., Артюшенко В.Г., Кашин В.В. Исследование погрешностей формирования дифракционной решетки на торце галогенидного ИК-волновода // Известия Самарского научного центра РАН. 2006. Том 8, № 4. С. 1211-1217.
110. 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.
111. Соифер В.А., Карпеев В.С., Павельев В.С., Казанский Н.Л., Гаврилов А.В. Волоконно-оптическое устройство для измерения вектора поперечной деформации // Патент РФ на изобретение № 2386105 от 10.04.2010. Бюл. № 10.
112. Соифер В.А. Нанопотоника и дифракционная оптика // Компьютерная оптика. 2008. Том 32, № 2. С. 110-118.
113. Соифер В.А., Котляр В.В., Досколович Л.Л. Дифракционные оптические элементы в устройствах нанопотоники // Компьютерная оптика. 2009. Том 33, № 4. С. 352-368.
114. 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.
115. Belotelov V.I., Doskolovich L.L., Zvezdin A.K. Extraordinary magneto-optical effects and transmission through metal-dielectric plasmonic systems // Physical Review Letters. 2007. Vol. 98, № 7.
116. Быков Д.А., Досколович Л.Л., Соифер В.А., Казанский Н.Л. Экстраординарный магнитооптический эффект изменения фазы дифракционных порядков в диэлектрических дифракционных решетках // ЖЭТФ. 2010. Том 138, № 6 (12). С. 1093-1102.
117. Досколович Л.Л., Кадомина Е.А., Кадомин И.И., Казанский Н.Л. Формирование высокочастотных интерференционных картин поверхностных электромагнитных волн // Радиотехника. 2008. № 3. С. 75-79.
118. Безус Е.А., Досколович Л.Л., Кадомин И.И., Казанский Н.Л., Civera P., Pizzi M. Формирование интерференционных картин поверхностных электромагнитных волн с изменяемым периодом с помощью дифракционных решеток // Компьютерная оптика. 2008. Том 32, № 3. С. 234-237.
119. 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.
120. Bezus E.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L. Evanescent-wave interferometric nanoscale photolithography using guided-mode resonant gratings // Microelectronic Engineering. 2011. Vol. 88, № 2. P. 170-174.
121. Gale M.T. Replication // In the book "Micro-optics. Elements, systems and applications" edited by Hans Peter Herzig. London: Taylor & Francis Ltd, 1997. P. 153-178.

## RESEARCH-TECHNOLOGICAL CENTER OF DIFFRACTIVE OPTICS

© 2011 N.L. Kazanskiy

Image Processing Systems Institute of the RAS, Samara

I review the problems of diffractive optics, possible devices and of information technologies needed to solve them. Based on the research I analyze the advantages and disadvantages of existing equipment of the research and education center and used technological routes.

Keywords: diffractive computer optics, information technology, computing resources, software, diffraction optics technology, scientific and technological equipment.