

ДИФРАКЦИОННАЯ ПЛОСКАЯ ОПТИКА И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ В НАУЧНОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Дифракционная плоская оптика и обработка изображений с давних пор широко используются в научных приборах и экспериментальных физических установках. Достаточно вспомнить, что с момента создания дифракционной решетки и спектральных приборов на ее основе прошло более 200 лет, а тенью метод исследования изменений показателя преломления прозрачных сред был предложен полтора века назад. Теоретические и прикладные исследования в области цифровой обработки и анализа изображений широко развернулись в мире в конце 60-х—70-х гг. нашего столетия, особенно в связи с освоением космоса и созданием диагностических комплексов в геологии и медицине. Количество оригинальных научных публикаций по обработке изображений в этот период исчислялось сотнями в год.

В настоящее время цифровая обработка изображений прочно вошла во все сферы деятельности человека, в том числе и в сферу научных исследований. В то же время исследования и разработки в области дифракционной плоской оптики еще только приближаются к пику своей активности. Появление лазеров породило целую гамму приборов, в которых информация об исследуемом объекте или процессе содержится в комплексной амплитуде световой волны. С точки зрения прикладной теории информации речь в данном случае идет о двумерных оптических сигналах — изображениях.

Развитие компьютеров и микроэлектроники придало мощный импульс оптике, в том числе дифракционной, и обработке изображений. Появилась возможность проводить цифровую обработку оптических изображений в реальном масштабе времени, решать обратные задачи дифракционной оптики. С помощью фотолитографии и особенно электронной литографии стало осуществимым автоматизированное получение плоских оптических элементов со сложным, многоградационным фазовым микрорельефом для широкого диапазона волн: от ИК до ультрафиолета.

В этой вступительной статье хотелось бы кратко упомянуть о наиболее заметных результатах, полученных научной группой, работающей под руководством автора, а также обрисовать видимую перспективу.

В 1972—1979 гг. в Куйбышевском авиационном институте (с 1992 г. — Самарский государственный аэрокосмический университет — СГАУ) проводились исследования в направлении обработки изображений и цифровой голографии, включая фильтрацию, оценивание параметров пространственно-распределенных сигналов, а также синтез пространственных фильтров Карунена—Лозва и компенсаторов для контроля асферических зеркал. Особое внимание уделялось теоретическим вопросам дискретизации и квантования. Начиная с 1979 г. основные успехи достигнуты при создании дифракционных оптических элементов для физических приложений. Теоретические исследования дополни-

лись вопросами геометрооптического распространения и дифракции света. После образования в 1988 г. на базе кафедры технической кибернетики СГАУ филиала ЦКБ уникального приборостроения РАН в составе МНТК "Научные приборы" начато систематическое создание научной и технической базы для формирования микрорельефа дифракционных оптических элементов ИК-диапазона, а в 1989—1992 гг. — для видимого диапазона.

В работах последних лет решены задачи фокусировки лазерного излучения и на основе микроэлектронных технологий созданы плоские оптические элементы с тонким фазовым микрорельефом — фокусаторы лазерного излучения (ИК, ближний ИК и видимый диапазоны волн). Синтезированы и изготовлены в виде дифракционных решеток со сложной фазовой модуляцией так называемые моданы, осуществляющие селекцию поперечных мод лазерных пучков. Создана фазовая Бессель-оптика — новая элементная база оптических корреляторов радиально-симметричных микрообъектов. Создание новых оптических элементов сопровождается разработкой новых автоматизированных технологий их реализации, причем в последнее время — на базе электронной литографии.

Оптические элементы прошли испытания в научных центрах страны и за рубежом, отмечены высшими наградами международных выставок. С помощью фокусаторов получены ранее недостижимые результаты по термопрочности и формообразованию металлов. На основе моданов созданы волоконно-оптические датчики микроперемещений с рекордными характеристиками чувствительности. Элементы Бессель-оптики позволили разработать высокоэффективные анализаторы микроструктур. Автоматизированные интерферометры с элементами компьютерной оптики дали возможность решать задачи контроля волнистости кремниевых пластин (вейферов) и восстановления полей вибросмещений при испытаниях объектов авиационной техники.

Разработаны теоретические методы и модели обработки изображений, реализованные в виде программно-аппаратных комплексов на базе персональных компьютеров и мини-ЭВМ, внедренных и работающих в 18 организациях стран СНГ.

Большое внимание работам в области компьютерной оптики уделяется за рубежом. Начиная с 1987 г. в США и Канаде предпринимаются энергичные шаги по промышленному освоению выпуска элементов компьютерной оптики, называемых там "бинарной дифракционной оптикой". Еще в августе 1989 г. Аллен Кокс (фирма Ханивел, США) сравнил направление компьютерной (бинарной) оптики с возникшим примерно 10—20 лет назад направлением "микропроцессоры в микроэлектронике" (*Laser Focus World*. 1989. Август. С. 47—48). В США ожидается создание новой отрасли промышленности по производству компьютерной (бинарной) оптики для применения в авиации, космонавтике, медицине, системах оптической связи, бытовой электронике, робототехнике, автомобилестроении и др. Ожидаемые потребители больших тиражей бинарной или компьютерной оптики — фирмы "Lockheed", "McDonnell Douglas", "Hughes Aircraft", "General Electric", государственные агентства: Национальный центр вооружений, Центр ночного видения и электрооптики вооруженных сил США. Эксперт Джефф Хетч (США) отмечает, что разработчики военных систем могут оценить уменьшенный вес бинарной или компьютерной оптики, расширенные функциональные возможности, высокую технологичность промышленного выпуска и низкую цену (*Lasers & Optics*. 1990. Май).

Важнейшее применение бинарной оптики в медицине — искусственные хрусталики для человеческого глаза. На сегодняшний день ежегодно в мире проводится более 1 млн операций по вживлению искусственного хрусталика глаза, а также более 15 тыс. операций по пересадке бифокального хрусталика с зонированным микрорельефом на базе бинарной оптики.

Перечислим основные оптические элементы, установки и системы, созданные нашей научной группой.

Фокусаторы. Предназначены для фокусировки лазерных или некогерентных пучков света в заданную фокальную область с требуемым распределением интенсивности. Проведено детальное теоретическое исследование фокусаторов на основе геометрической оптики, скалярной теории дифракции; получены аналитические формулы для фазового пропускания фокусаторов; проведено компьютерное моделирование фокусировки лазерного излучения. Пройден весь цикл разработки и получены опытные образцы отражательных фокусаторов дальнего ИК-диапазона в отрезок, кольцо, контуры букв. В основе лежат технологии гальванопластики, фотолитографии, вымывания желатина, использование жидких фотополимеризующихся композиций. Изготовлен пропускающий фокусатор в отрезок прямой для ближнего ИК-диапазона, работающий с импульсным неодимовым лазером, а также фокусатор в букву для видимого диапазона длин волн, исследовано воздействие излучения от фокусатора на различные материалы и предварительно исследованы первые образцы фокусаторов для ультрафиолетового диапазона, а также опытные образцы динамических фокусаторов на основе вращающихся лазерных головок и жидких кристаллов, позволяющие управлять структурой излучения не только в пространстве, но и во времени.

Микролинзы. Созданы линзы Френеля, астигматические линзы, бифокальные линзы для видимого диапазона длин волн как на стекле, так и на тонкой пленке из пластмассы. Изучены возможности применения в оптических приборах, в волоконно-оптических системах, в офтальмологии для изготовления контактных линз и искусственных хрусталиков.

Компенсаторы. Предназначены для формирования асферических волновых фронтов когерентного излучения. Проведен расчет различных типов компенсаторов, подробно исследовано влияние дискретизации и квантования фазы на точность формирования волнового фронта. Изготовлены компенсаторы для формирования фронтов второго и высших порядков, а также для контроля качества внеосевых сегментов параболоида.

Дифракционные насадки. Предназначены для создания художественных световых эффектов при съемке фото- и киноаппаратурой.

Комбинированные оптические элементы. Совмещают на одной плоской подложке 7 и более призм и линз. Могут применяться в светотехнических устройствах автомобилей, а также в качестве очковых линз.

Моданы. Предназначены для селективного воздействия на отдельные моды когерентного света, возникающие в волоконных световодах, резонаторах лазеров. Моданы позволяют измерять "спектр" мод, а также формировать световые пучки с заданным модовым составом. Моданы могут иметь применение для создания волоконно-оптических систем связи с модовым уплотнением каналов, волоконно-оптических датчиков с повышенной чувствительностью.

Пространственные фильтры для оптического распознавания изображений. Позволяют реализовать оптическое разложение изображения по базису Карунена—Лоэва, осуществлять распознавание образов, а также анализировать

изображение, например, с помощью винтовых пространственных фильтров и дифракционных решеток с рассчитанным переменным шагом.

Автоматизированный лазерный дифракционный измеритель микрочастиц. Предназначен для бесконтактного оперативного анализа относительной концентрации частиц заданного радиуса в смеси частиц. Диапазон измеряемых радиусов от 10 до 300 мкм. Время измерения — менее 30 с. Область применения: в порошковой металлургии, моторостроении, медицине, пищевой промышленности.

Автоматизированный стабильный сдвиговый лазерный интерферометр для контроля плоскостности отражающих поверхностей. Предназначен для бесконтактного измерения отклонения от плоскости для полированных кремниевых пластин (вейферов) диаметром до 200 мм. Диапазон измерения отклонений от 1 до 100 мкм, время измерения — 2 мин. Применения: в микроэлектронике и оптической промышленности.

Автоматизированный сканирующий профилометр на полупроводниковом лазере для контроля фазового профиля дифракционных оптических элементов ИК-диапазона. Глубина измеряемого профиля от 1 до 100 мкм.

Автоматизированная система обработки изображений глазного дна при флюоресцентной ангиографии. Предназначена для ввода, предобработки и анализа изображений, получаемых при флюоресцентной ангиографии глазного дна. Реализована на ПЭВМ IBM PC/AT, размер изображений 256 x 256, 8 бит на отсчет. Внедрена в Самарской областной офтальмологической клинике им. Т.И. Ерошевского.

Автоматизированная система обработки интерферограмм. Предназначена для расшифровки интерферограмм, полученных методом двух экспозиций и методом усреднения во времени. Система позволяет по наблюдаемым интерферограммам восстанавливать фазовую функцию и вычислять компоненты вектора перемещений точек объекта. Реализована на ПЭВМ IBM PC/AT, размер изображений 512 x 512, 8 бит на отсчет. Область применения: экспериментальная механика. Внедрена в НПО "Труд" для расчета вибросмещений лопаток турбины авиационного двигателя.

Методы и программные средства моделирования видеоинформационного канала системы технического зрения космических аппаратов. Разработаны алгоритмы и программные средства моделирования видеоинформационного канала системы технического зрения для IBM PC и VAX, обеспечивающие синтез тестовых изображений; цифровую имитацию искажения оптических сигналов, возникающих в среде распространения, оптических элементах, видеодатчиках; выполнение типовых операций обработки и анализа изображений (фильтрация и восстановление сигналов, эффективное кодирование, обнаружение опорных точек и геометрическая привязка, распознавание изображений); проведение статистических экспериментов с моделью канала передачи изображений из космоса.

В настоящее время Самарский филиал ЦКБ УП РАН и кафедра технической кибернетики СГАУ активно развивают следующие фундаментальные научные направления:

1. Математическое моделирование процессов управления пространственно-временными параметрами волновых полей.
2. Разработка методов идентификации систем с распределенными параметрами.
3. Разработка приближенных методов решения прямых и обратных задач дифракции для расчета плоских оптических элементов.

4. Решение проблем дискретизации волновых полей и установление связей дискретных и непрерывных представлений.

5. Разработка методов спектрального анализа и управления поперечно-модовым составом волновых полей в волоконных световодах, резонаторах лазеров и градиентных средах.

Ожидается, что на основе развития указанных научных направлений будут решены следующие задачи: создание фокусаторов ближнего и среднего ИК-диапазона для лазерной технологии обработки материалов и медицины, фокусаторов видимого диапазона, микролинз, оптических элементов для формирования волновых фронтов; разработка опытной технологии компьютерной оптики на основе электронной литографии и достижений микроэлектроники и химии фотополимеров; разработка светотехнических устройств для автомобилестроения и авиастроения на основе синтезированных оптических элементов; создание многофункциональных оптических хрусталиков.

Будут созданы оптические элементы, имеющие новые функциональные возможности: уменьшены габариты, масса, повышена технологичность известных оптических систем и приборов; созданы принципиально новые оптические приборы, не имеющие аналогов в классической оптике, например, лазерная оптико-цифровая система стереовидения; повышена надежность деталей и узлов машин, сэкономлены материалы, людские и энергетические ресурсы на основе внедрения разработанных дифракционных оптических элементов, оптических приборов и установок.

Некоторые научные и практические результаты последнего периода времени изложены в статьях, вошедших в этот номер журнала.

Авторы данного тематического выпуска представляют, в основном, СГАУ и СФ ЦКБ уникального приборостроения РАН. Хочется отметить, что за последние пять лет упомянутой группой авторов опубликовано более 200 научных трудов, из них более 50— за рубежом, в том числе в таких изданиях, как "Proceeding SPIE", "Optics Communications", "Optik", "Journal of Modern Optics", "J. Opt. & Quant. Electr.", "Доклады Академии Наук", "Оптика и спектроскопия", "Квантовая электроника" и др. В рамках периодического международного издания "Computer Optics" (Pergamon Press) опубликован специальный выпуск "Computer Optics" журнала "Optics and Lasers in Engineering" (1991 Vol.15, N 5. Издательство "Elsevier Applied Science").

Инициатива подготовки тематического выпуска "Компьютерная оптика и обработка изображений" журнала "Научное приборостроение" принадлежит чл.-корр РАН М. Л. Александрову и профессору И. А. Водоватову, которым авторский коллектив выражает благодарность.

Доктор техн. наук,
профессор В. А. Сойфер