

КОМПЬЮТЕРНАЯ ОПТИКА В РАБОТАХ ПРОФЕССОРА И.Н. СИСАКЯНА

В.А. Сойфер

*Институт систем обработки изображений РАН
Самарский государственный аэрокосмический университет*

В 70-х годах исследователей перестали удовлетворять обычные способы управления светом с помощью линз, зеркал и дифракционных решеток. Требовалась оптика, которая способна решать более сложные задачи. Голограммы, особенно цифровые голограммы, которые синтезировались с помощью компьютера, в принципе, могли осуществить любое преобразование светового поля. Но работа голограммы в первом порядке дифракции делает ее энергетически неэффективной. Нужны были оптические элементы, которые бы практически со 100%-ой эффективностью могли фокусировать мощный пучок лазерного света в малую область пространства произвольного вида. Так в начале 80-х годов появился принципиально новый тип оптических элементов – **фокусаторы**. В рамках геометрической оптики были получены аналитические решения практически важных задач фокусировки лазерного излучения: рассчитаны и синтезированы фокусаторы в продольный отрезок [1], поперечный отрезок, сегмент кривой произвольного вида [2], кольцо [3], круг и квадрат с постоянной интенсивностью [4]. Такие дифракционные оптические элементы (ДОЭ) для инфракрасного и видимого диапазонов спектра были изготовлены с помощью фотолитографической технологии, обычной для микроэлектроники, и показали высокую дифракционную эффективность (70-90%). Применяются фокусаторы как силовая оптика для технологических задач обработки материалов. В этих первых работах И.Н. Сисакяна и его соавторов были заложены многие фундаментальные идеи дифракционной оптики. Так выбор типа приближения, в рамках которого рассчитывались фокусаторы, диктовался достижением максимальной дифракционной эффективности. Для этого требовалось, чтобы функция микрорельефа фокусатора была как можно более **гладкой** и имела как можно меньше разрывов, которые приводят к неконтролируемому рассеянию световой энергии. Поэтому в рамках лучевой оптики с помощью уравнения эйконала и дифференциального закона сохранения энергии при переносе излучения с плоскости фокусатора в плоскость мишени искались точные аналитические решения некоторых ключевых задач, обладающих той или иной симметрией. Конечно, при решении задачи в рамках геометрической оптики не учитываются дифракционные явления, которые играют существенную роль при формировании вида фокальной области, поэтому геометрические фокусаторы, обладая высокой эффективностью, формируют фокальное распределение интенсивности с немалой ошибкой (около 30%). Чтобы учесть дифракционные эф-

фекты при расчете фокусаторов требуется решать методом последовательных приближений интегральные дифракционные уравнения Кирхгофа-Френеля. Но оказывается, что итеративный процесс поиска дифракционного решения быстрее всего сходится при выборе в качестве начального приближения для фазы фокусатора – геометро-оптического решения. При этом в ходе итераций гладкость первоначального решения нарушается несущественно. Если же начинать итеративный процесс поиска оптимального решения со случайной фазы, как это делается при расчете киноформов, то итоговая фазовая функция ДОЭ будет иметь множество разрывов, а сама поверхность фокусатора будет выглядеть как шероховатая поверхность.

При решении задачи фокусировки лазерного излучения в произвольную линию, обладающую минимальной дифракционной толщиной, для осуществления отображения двумерной плоскости фокусатора в одномерное множество точек требуется, чтобы целые линии на поверхности фокусатора фокусировали в отдельные точки кривой. Из таких предпосылок возникло понятие **слоя** фокусатора, которое с течением времени стало основным понятием геометрической теории фокусаторов.

В работе [1] также высказана идея расчета фазовой функции ДОЭ как дополнительной аберрационной функции, которую надо добавить к фазовой функции идеальной собирающей линзы. Таким образом, фокусатор в отрезок осевой линии представляется как линза с большой сферической аберрацией, а фокусатор в поперечный отрезок – как сферическая линза с большим астигматизмом.

В работе [2] выдвинута идея расчета модульных (составных) фокусаторов, которые фокусируют излучение в произвольную плоскую кривую. Сама сложная кривая набирается из более простых кривых (отрезка прямой и полуокружности), причем в каждую простую кривую фокусирует отдельный участок поверхности фокусатора (отдельный модуль).

В работе [3] впервые сообщается о синтезе и испытании отражательного фокусатора в кольцо минимальной дифракционной толщины для CO_2 лазера с длиной волны 10,6 микрон. Диаметр ДОЭ был равен 2,5 мм, а кольцо диаметром 25 мм формировалось на расстоянии 30 см. Поверхность рельефа была почти гладкой (255 градаций рельефа было реализовано путем локального вымывания фоточувствительной эмульсии и последующего напыления слоя алюминия).

В работе [4] сообщалось об успешном испытании на фирме Джeneral Моторс (США) фокусатора в отрезок с увеличенной интенсивностью света на краях отрезка для упрочнения стали с помощью 3-х киловаттного CO_2 -лазера: срок службы упрочненной полосы стали увеличился в 5-7 раз.

Широкое распространение в 70-х годах лазерных источников света и световых волокон, которые порождают многомодовые световые поля, привело к необходимости разработки нового класса приборов – анализаторов модового состава когерентного излучения. Так в начале 80-х годов появились новые ДОЭ, предназначенные для **селекции** пространственных мод лазерного излучения – **моданы**. Были рассчитаны и изготовлены моданы (пространственные фильтры) для селекции мод Гаусса-Лагерра и Гаусса-Эрмита [5,6]. Если призма или дифракционная решетка пространственно разделяют хроматические спектральные составляющие света, то моданы пространственно разделяют поперечные модовые составляющие лазерных пучков света. С помощью таких ДОЭ можно не только выделять заданную моду на выходе оптического волокна или лазерного резонатора, но и, наоборот, формировать одномодовые или многомодовые лазерные пучки для эффективного ввода излучения в волокна.

В работе [5] впервые синтезированы амплитудные фильтры, согласованные с отдельными модами Гасса-Лагерра. Знакопеременная функция, описывающая пропускание фильтра, записывалась на амплитудный носитель с помощью специального метода кодирования с добавлением постоянного смещения амплитуды.

Размер первых моданов был 6,4 x 6,4 мм, разрешение 25 микрон, градаций полутонов амплитуды пропускания – 256.

В работе [6] описан первый эксперимент по селекции мод Гаусса-Лагерра, возбужденных с помощью гауссового пучка в градиентном световом волокне с близким к параболическому профилю показателя преломления. Положительные и отрицательные части действительной функции, описывающей моду, реализовались в виде отдельных амплитудных пространственных фильтров. Всего анализировалось первые четыре моды волокна.

В настоящее время с появлением высокопрецизионных фото и электронных или лазерных строителей с разрешением менее 1 микрона многие идеи, заложенные в этих первых работах, успешно реализованы. Синтезированы многопорядковые фазовые многоградационные (до 64 градаций фазы) моданы, способные одновременно селективировать до 25 отдельных мод, возбуждаемых в волноводах с постоянным и градиентным показателями преломления.

В последнее время успешно развивается новое направление в оптике – сингулярная оптика, в которой исследуются когерентные световые поля в окрестности нулевых точек интенсивности. Распространение света вблизи таких особых точек (в таких точках фаза электромагнитных колебаний не определена) напоминает воронку. Сформировать световое поле, обладающее вращательным моментом, можно с помощью элементов **бессель-**

оптики. Впервые такие ДОЭ были рассчитаны и изготовлены в 1984 году [7]. Бессель-оптику можно использовать также для оптического выполнения интегрального преобразования Ханкеля и формирования бездифракционных лазерных пучков.

В работе [7] впервые указывается на то, что с помощью бессель-оптики гауссовый пучок переводится в кольцевой пучок и при этом не возникает характерный центральный пик интенсивности, который присутствует при формировании светового кольца с помощью конического аксикона и сферической линзы. Высказывается также идея о возможности с помощью бессель-оптики (угловых гармоник) формировать и селективировать моды Бесселя высших порядков, которые возбуждаются в световых волокнах с постоянным показателем преломления. Описанные в [7] винтовые бессель-фильтры были изготовлены с помощью отбеливания амплитудных масок.

Расчет ДОЭ в рамках скалярной теории дифракции Френеля-Кирхгофа основан на итеративном решении интегральных уравнений. В настоящее время существует множество итеративных и градиентных методов для синтеза ДОЭ, но одна из первых работ по **итеративному расчету** многопорядковых фазовых дифракционных решеток была выполнена в 1986 году [8]. Итеративный подход к расчету ДОЭ позволяет органично учитывать дискретизацию и квантование фазовой функции, которые неизбежны при синтезе ДОЭ по технологии многократного травления подложки с помощью амплитудных масок. Практический интерес представляют дифракционные решетки с симметричным расположением порядков, равных по интенсивности. Чтобы с высокой точностью достичь равенства интенсивности порядков в [8] учтена дифракция на растре, которая возникает из-за дискретизации. Также в работе [8] проведен анализ устойчивости полученных решений к технологическим ошибкам (неточность положения отдельных штрихов решетки, неточность высоты фазовой ступеньки для бинарной решетки). С помощью развитого метода рассчитан и изготовлен ДОЭ, который представляет собой многопорядковую дифракционную решетку вместе со сферической линзой.

Интересными и важными с методологической точки зрения является серия работ, в которых развивается новый подход к описанию распространения световых волн в оптических волокнах. Так в работах [9, 10] известные методы квантовой механики, описывающие состояния динамической квантовой системы с помощью инвариантов (интегралов движения), когерентных и фоковских состояний, операторов рождения и уничтожения, операторов эволюции и матрицы плотности, были впервые применены к описанию распространения световых пучков в градиентных продольно неоднородных световодах. Возможность применения методов квантовой механики к описанию классических световых полей в градиентных волноводах основана на том, что параксиальное уравнение Фока-Леонтовича математически эквивалентно уравнению Шредингера, при этом длина волны света соответствует постоянной Планка, а распро-

странение света вдоль оптической оси соответствует эволюции квантовой системы во времени. В работах [9,10] получены явные выражения для траектории лучей, ширины мод, коэффициентов связи между модами для волноводов с искривленной осью. Причем когерентное состояние описывает отдельный луч, и все лучи в волноводе можно получить из одного осевого луча с помощью операторов рождения и уничтожения, а фоковские состояния описывают отдельные моды волновода. Получена связь между когерентными и фоковскими состояниями, позволяющая переходить от геометрико-оптического описания распространения света с помощью лучей к волновому описанию с помощью мод.

Литература

1. Голуб М.А., Карпеев С.В., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Соيفер В.А. Фокусировка излучения в заданную область пространства с помощью синтезированных на ЭВМ голограмм // Письма в ЖТФ. Т.7. Вып.10. С. 618-623 (1981).
2. Данилов В.А., Попов В.В., Прохоров А.М., Сагателян Д.А., Сисакян И.Н., Соифер В.А. Синтез оптических элементов, создающих фокальную линию произвольной формы // Письма в ЖТФ. Т. 8. Вып.13. С. 810-812 (1982).
3. Голуб М.А., Дегтярева В.П., Климов А.М., Попов В.В., Прохоров А.М., Сисакян Е.В., Сисакян И.Н., Соифер В.А. Машинный синтез фокусирующих элементов для CO₂-лазера // Письма в ЖТФ. Т. 8. Вып. 8. С. 449-451 (1982).
4. M.A. Golub, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer Infra-red radiation focusators // Optics and Lasers in Engineering. V.15. No.5. P. 297-309 (1991).
5. Голуб М.А., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Соифер В.А. Синтез пространственных фильтров для исследования поперечного модового состава когерентного излучения // Квантовая электроника. Т. 9. Вып. 9. С.1866-1868 (1982).
6. Голуб М.А., Карпеев С.В., Кривошлыков С.Г., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Соифер В.А. Экспериментальное исследование распределения мощности по поперечным модам в волоконном световоде с помощью пространственных фильтров // Квантовая электроника. Т. 11. Вып. 9. С. 1869-1871 (1984).
7. Березный А.Е., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Соифер В.А. Бессель-оптика // Доклады АН СССР. Т. 274. Вып. 4. С. 802-805 (1984).
8. Березный А.Е., Комаров С.В., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Соифер В.А. Фазовые дифракционные решетки с заданными параметрами – об одной обратной задаче оптики // Доклады АН СССР Т. 287. Вып. 3. С. 623-627 (1986).
9. Кривошлыков С.Г., Сисакян И.Н. Когерентные состояния и распространение света в неоднородных средах // Квантовая электроника. Т. 7. Вып. 3. С. 553-565 (1980).
10. Кривошлыков С.Г., Сисакян И.Н. Когерентные состояния и непараксиальное распространение света в градиентных средах // Квантовая электроника. Т. 10. Вып. 4. С.735-741 (1983).

Computer Optics in the works of Professor I.N. Sisakyan

V.A. Soifer^{1,2}

¹ Image Processing Systems Institute of RAS

² Samara State Aerospace University

Abstract

In the 1970s, researchers were no longer satisfied with the traditional light control methods by means of lenses, mirrors, and diffraction gratings. Optical components were required that could solve more complex problems. Computer-generated holograms, especially digital holograms, theoretically, could perform any transformation of the light field. But the operation of the hologram in the first diffraction order makes it energetically ineffective. Optical elements were required that would be able to focus a powerful laser beam into a small area of an arbitrary type with almost 100 % efficiency. This is how the focusators, a fundamentally new type of optical elements, appeared in the early 80s.

Keywords: Computer Optics, lens, mirror, diffraction grating, computer-generated hologram, digital hologram, optical element, laser beam, focusator.

Citation: Soifer VA. Computer Optics in the works of Professor I.N. Sisakyan. Computer Optics 2002; 24: 5-10.

References

- [1] Golub MA, Karpeev SV, Prokhorov AM, Sisakyan IN, Soifer VA. Focusing light into a specified volume by computer-synthesized holograms. Soviet Technical Physics Letters 1981; 7(5): 264-266.
- [2] Danilov VA, Popov VV, Prokhorov AM, Sagatelyan DM, Sisakyan IN, Soifer VA. Synthesis of optical elements giving a focal line of arbitrary shape. Soviet Technical Physics Letters 1982; 8(7): 351-353.
- [3] Golub MA, Degtyarev AA, Klimov AN, Popov VV, Prokhorov AM, Sisakian EV, Sisakian IN, Soifer VA. Computer synthesis of focusing elements for a CO2 laser. Soviet Technical Physics Letters 1982; 8(4): 195-196.
- [4] Golub MA, Sisakyan IN, Soifer VA. Infra-red radiation focusators. Opt Laser Eng 1991; 15(5): 297-309.
- [5] Golub MA, Prokhorov AM, Sisakyan IN, Soifer VA. Synthesis of spatial filters for investigation of the transverse mode composition of coherent radiation. Sov J Quantum Electron 1982; 12(9): 1208-1209.
- [6] Golub MA, Karpeev SV, Krivoshlykov SG, Prokhorov AM, Sisakyan IN, Soifer VA. Spatial filter investigation of the distribution of power between transverse modes in a fiber waveguide. Sov J Quantum Electron 1984; 14(9): 1255-1256.
- [7] Berezny AE, Prokhorov AM, Sisakyan IN, Soifer VA. Bessel optics [In Russian]. Dokl Acad Nauk SSSR 1984; 274(4): 802-804.
- [8] Berezny AE, Komarov SV, Prokhorov AM, Sisakyan IN, Soifer VA. Phase diffraction gratings with prescribed parameters: one inverse problem in optics [In Russian]. Dokl Acad Nauk SSSR 1986; 287(3): 623-627.
- [9] Krivoshlykov SG, Sisakyan IN. Coherent states and light propagation in inhomogeneous media. Sov J Quantum Electron 1980; 10(3): 312-318.
- [10] Krivoshlykov SG, Sisakyan IN. Coherent states and nonparaxial propagation of light in graded-index media. Sov J Quantum Electron 1983; 13(4): 455-458.