

КРАТКИЙ ОБЗОР НАУЧНЫХ РАБОТ И. Н. СИСАКЯНА ПО ДИФРАКЦИОННОЙ И ВОЛОКОННОЙ ОПТИКЕ

В 1970-х гг. 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%-й эффективностью могли фокусировать мощный пучок лазерного света в малую область пространства произвольного вида. Так в начале 1980-х гг. появился принципиально новый тип оптических элементов — фокусаторы. В рамках геометрической оптики были получены аналитические решения практических 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 эффекты при расчете фокусаторов, требуется решать методом последовательных приближений интегральные дифракционные уравнения Кирхгофа-Френеля. Но оказывается, что итеративный процесс поиска дифракционного реше-

ния быстрее всего сходится при выборе в качестве начального приближения для фазы фокусатора геометрического 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. Такие предпосылки привели к возникновению понятия 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 мкм. 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 «Дженерал моторс» (США) фокусатора в отрезок с увеличенной интенсивностью света на краях отрезка для упрочнения стали с помощью 3-киловаттного CO_2 -лазера: срок службы упрочненной полоски стали увеличился в 5-7 раз.

Широкое распространение в 1970-х гг. лазерных источников света и световых волокон, которые порождают многомодовые световые поля, привело к необходимости разработки нового класса приборов — анализаторов модового состава когерентного из-

лучения. Так, в начале 1980-х гг. появились новые ДОО, 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 ДОО 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] сообщается о том, как впервые были синтезированы амплитудные фильтры, согласованные с отдельными модами Гаусса-Лагерра. Знакопеременная функция, описывающая пропускание фильтра, записывалась на амплитудный носитель с помощью специального метода кодирования с добавлением постоянного смещения амплитуды.

Первые моданы имели размер 6,4 x 6,4 мм, разрешение 25 мкм, 256 градаций полутонов амплитуды пропускания.

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

В настоящее время с появлением высокопрецизионных электронных или фотопостроителей с разрешением менее 1 мкм 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 ДОО были рассчитаны и изготовлены в 1984 г. [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 перево-

дится 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. В [7] винтовые бессель-фильтры были изготовлены с помощью отбеливания амплитудных масок.

Расчет ДОО в рамках скалярной теории дифракции Кирхгофа-Френеля основан на итеративном решении интегральных уравнений. В настоящее время существует множество итеративных и градиентных методов для синтеза ДОО, но одна из первых работ по итеративному расчету многопорядковых фазовых дифракционных решеток была выполнена в 1986 г. [8]. Итеративный подход к расчету ДОО позволяет органично учитывать дискретизацию и квантование фазовой функции, которые неизбежны при синтезе ДОО 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 ДОО, который представляет собой многопорядковую дифракционную решетку вместе со сферической линзой.

Интересной и важной 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 распространение света вдоль оптической оси соответствует эволюции квантовой системы во времени. В работах [9, 10] получены явные выражения для траектории лучей, ширин мод, коэффициентов связи между модами для волноводов с искрив-

ленной 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 геометрооптического 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. 1981. Т. 7, вып. 10. С. 618-623.
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. 1982. Т. 8, вып. 13. С. 810-812.
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 СО₂-лазера // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8, вып. 8. С. 449-451.
4. **Golub M. A., Sisakyan I. N., Soifer V. A.** Infra-red radiation focusators // Optics and Lasers in Engineering. 1991. V. 15, No. 5. P. 297-309.
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. 1982. Т. 9, вып. 9. С. 1866-1868.
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. 1984. Т. 11, вып. 9. С. 1869-1871.
7. **Березный А.Е., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Соифер В.А.** Бессель-оптика // Докл. АН СССР. 1984. Т. 274, вып. 4. С. 802-805.
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 // Докл. АН СССР. 1986. Т. 287, вып.3. С. 623-627.
9. **Кривошлыков С. Г., Сисакян И. Н.** Когерентные состояния и распространение света в неоднородных средах // Квантовая электроника. 1980. Т. 7, вып.3. С. 553-565.
10. **Кривошлыков С. Г., Сисакян И. Н.** Когерентные состояния и непараксиальное распространение света в градиентных средах // Квантовая электроника. 1983. Т. 10, вып. 4. С. 735-741.
11. Прыжок перекатом. Памяти профессора И.Н. Сисакяна. Под редакцией В.А. Соифера и В.Ю. Хомича. Дубна: ОИЯИ, 2005, 88с.

I.N. SISAKYAN'S SCIENTIFIC WORKS ON DIFFRACTIVE AND FIBER OPTICS

Overview

In the 1970s, researchers were not satisfied any more with normal ways of light control via lenses, mirrors and diffraction gratings. They needed optics to solve more complicated problems. Computer-synthesized holograms, especially digital holograms, could generally carry out any optical field transformations. However, performance of a first-order diffraction hologram made it energy-inefficient. Thus, optical elements were required, which could focus a powerful laser beam into a small freeform domain with practically one hundred per cent efficiency. So, in the early 1980s, a completely new type of optical elements – *focusators* – appeared. Analytical solutions of practical critical problems in laser-beam focusing process were obtained within the framework of planar optics: focusators were designed and synthesized into a direct-axis segment [1], a transverse segment, a freeform curve segment [2], an O-ring [3], and a constant-rate circle or square [4]. These diffractive optical elements (*DOEs*) for infrared and visible light spectrums were manufactured using photolithography technology, which is normal for microelectronics, and showed high diffraction efficiency (70-90%). Focusators are used as power optics tools when solving materials processing tasks.

These early Sisakyan's and his co-authors' works contained many fundamental ideas of diffractive optics. So, selection of an approximation type, through which focusators were calculated, was driven by maximum diffraction efficiency achieved. This required a focusator's microrelief function to be as smooth as possible and to have as few disconnections as possible, which led to uncontrolled light-energy scattering. Therefore, within the framework of ray optics, using the eikonal equation and the differential law of energy conservation, during radiation transfer from a focusator's plane to a target plane, proper analytical solutions were sought for some key problems with particular symmetries. Of course, in the performance of ray-optics problems, diffraction phenomena, which play an essential role in shaping a focal region, can't be taken into consideration; that's why geometric focusators with high efficiency form the focal intensity distribution with a considerable error (about 30%). In order to consider diffraction effects in calculating focusators, we need to decide diffracting Fresnel-Kirchhoff integral equations, using the successive approximations method. However, as turns out, an iterative process of searching a diffractive solution may faster converge when selecting a ray-optical solution, as a focusator's initial phase approximation. In addition, during iterations, the smoothness of the original solution is insignificantly violated. If an iterative optimizing process starts with a random phase, as is done at calculating phase-only synthetic holograms, the overall DOE phase function will have a discontinuity set, and the overall focusator's surface will look like a rough surface.

When solving a beam freeform focusing problem with a minimum diffraction thickness, while mapping a two-dimensional focusator's plane in a one-dimensional point set, it is required the whole lines on the focusator's surface be focused at some isolated curve points. These conditions resulted in occurrence of a focusator's layer concept, which eventually became a basic concept of geometric focusators theory.

In paper [1] the authors suggest an idea of calculating a DOE phase function as a complementary aberration function, which should be added to the phase function of an ideal converging lens. Thus, the focusator in an axial segment may be represented as a lens with large spherical aberration, whereas the focusator in a transverse segment – as a spherical lens with large astigmatism.

In paper [2] the authors put forward the idea of calculating module (composite) focusators, which focus the light on a freeform plane curve. The whole complex curve is composed from more simple curves (a straight line and semicircle), where a particular focusator's surface area (a single module) is focused on each simple curve.

In paper [3] the synthesis and testing of a reflection-mode focusator in a ring with minimum diffraction width is first reported for a CO₂-laser, 10.6 microns in wavelength. DOE's diameter equals to 2.5 mm, and the ring, 25 mm in diameter, is formed at 30 cm therefrom. The relief surface is almost even (255 relief levels are fulfilled via local washout of photosensitive emulsion and subsequent deposition of an aluminum layer).

As reported in paper [4], the focusator was successfully tested by General Motors (USA) on a segment with larger light intensity on the edges thereof to harden steel by a 3-kilowatt CO₂ laser; the durability of a reinforced steel strip was increased five- or sevenfold.

Ever-growing use of laser light sources and light fibers in the 1970s, which generated multimode light fields, resulted in necessary development of a new class of devices – coherent light mode content analyzers. So, in the early 1980s new diffractive optical elements (*modans*), designed for selection of spatial laser modes, appeared. Modans (spatial filters) were designed and manufactured for selection of Gauss-Laguerre and Gauss-Hermite modes [5, 6]. If a prism or a diffraction grating spatially divides chromatic light spectral components, the modans can spatially divide transversal mode components of laser light beams. Using such diffractive optical elements, it's possible not only to define a target mode at the output of an optical fiber or a laser resonator, but also, in contrast, to form one-mode or multi-mode laser beams for efficient introducing the light into fibers.

In paper [5] the authors explain how amplitude filters were first synthesized matched with particular Gauss-Laguerre modes. An alternating function, describing filter's transmission, was recorded on an amplitude carrier using a special encoding technique with addition of constant amplitude displacement.

The first modans had size of 6.4 x 6.4 mm, 25 microns resolution, and 256 halftone values of the transmission amplitude.

In paper [6] the first experiment on selection of Gauss-Laguerre modes excited by Gaussian beams in graded-index optical fibers with a near-parabolic refraction index profile was described. Positive and negative parts of a real-valued function, describing the mode, were implemented in the form of different amplitude spatial filters. The first four fiber modes were analyzed.

Meantime, with the appearance of high-precision electronic or optical plotters with a resolution of less than 1 micron, many ideas contained in these early works were successfully implemented. Multiordinal phase gray-level modans (up to 64 phase levels) were synthesized, which were capable to simultaneously sort up to 25 different modes excited in waveguides with constant and graded indices.

A new direction in optics – *singular optics* – has been successfully developed in recent years, which studies coherent light fields around zero intensity points. Light propagation near these critical points (a phase of electromagnetic modes isn't defined in these points) is analogous to a vortex. It's possible to form the light field with an angular momentum using Bessel-optics elements. These diffractive optical elements were first designed and fabricated in 1984 [7]. Bessel-optics may also be used to optically perform Hankel integral transforms and to form nondiffraction laser beams.

It is first stated in paper [7] that, using Bessel optics, the Gaussian beam may be transferred into an annular beam, and thus there is no indicative central intensity peak presented during the light-ring formation using a conical axicon and the spherical lens. It is also argued that it's possible, using Bessel optics (angular harmonics), to form and select higher-order Bessel modes that are excited by light fibers with the constant refractive index. In paper [7] it's mentioned that threaded Bessel filters were manufactured by whitening amplitude masks.

Calculation of diffractive optical elements within the framework of the scalar diffraction Kirchhoff-Fresnel theory is based on iterative solution of integral equations. There are currently many iterative and gradient methods for synthesis of DOEs, and one of the first works on iterative calculation of multiordinal phase diffraction gratings was performed in 1986 [8]. The iterative approach to calculating DOEs enables to naturally account for discretization and quantization of the phase function, which can't be avoided in synthesizing DOEs in a multiple substrate etching process, using amplitude masks. Diffraction gratings with symmetrical arrangement of orders, equal in intensity, are of practical interest. To achieve high-accuracy equality of orders intensity, the scanning diffraction occurred due to discretization is considered in paper [8]. In paper [8] a stability analysis of obtained solutions is compared to technology errors (location inaccuracy of different grooves, height inaccuracy of a phase step for a binary grating). The diffractive optical element represented by a multiordinal diffraction grating with the

spherical lens was calculated and fabricated using an intelligence technique.

A series of papers, which defines a new approach in description of light wave propagation in optical fibers, is important and methodically interesting. For example, in papers [9, 10] the known quantum mechanical methods, which describe states of a dynamic quantum system, using invariants (motion integrals), coherent and Fock states, creation and annihilation operators, evolution and density matrix operators, were first used in describing light beams propagation in gradient longitudinally inhomogeneous optical-fiber waveguides. Possible use of quantum mechanical methods in description of classical light fields in gradient waveguides is based on the fact that the paraxial Fock-Leontowitch equation is mathematically equivalent to the Schrodinger equation; thereby light wavelength matches the Planck's constant, and light propagation along an optical axis corresponds to time evolution of a quantum system. In papers [9, 10] explicit expressions were obtained for beams paths, modes widths, coupling factors between modes for waveguides with a curved axis. Moreover, a coherent state described a single beam, and all beams in the waveguide might be obtained from an on-axis beam by means of creation and annihilation operators, whereas Fock states described different waveguide modes. A relationship was obtained between coherent and Fock states that made it possible to pass from the ray-optical description of light beam propagation to the mode wave description.

References

- [1] Golub MA, Karpeev SV, Prokhorov AM, Sisakyan IN, Soifer VA. Focusing of coherent light into a desired spatial domain using computer-generated holograms [In Russian]. Technical Physics Letters 1981; 7(10): 618-623.
- [2] Danilov VA, Popov VV, Prokhorov AM, Sagatelyan DA, Sisakyan IN, Soifer VA. Synthesis of optical elements that create a focal free-form line [In Russian]. Technical Physics Letters 1982; 8(13): 810-812.
- [3] Golub MA, Degtyareva VP, Klimov AM, Popov VV, Prokhorov AM, Sisakyan EV, Sisakyan IN, Soifer VA. Machine synthesis of focusing elements for CO₂-laser [In Russian]. Technical Physics Letters 1982; 8(8): 449-451.
- [4] Golub M A, Sisakyan JN, Soifer VA. Infra-red radiation focusators. Optics and Lasers in Engineering 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. Soviet journal of Quantum Electronics 1982; 9 (9): 1208-1209.
- [6] Golub M A, 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 [In Russian]. Quantum Electronics 1984; 11(9): 1869-1871.
- [7] Bereznyi AE, Prokhorov AM, Sisakyan IN, Soifer VA. Bessel Optics [In Russian]. Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR 1984; 274(4): 802-805.
- [8] Bereznyi AE, Komarov SV, Prokhorov AM, Sisakyan IN, Soifer VA. Phase diffraction gratings with prescribed

- parameters: inverse problem in optics [In Russian]. Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR 1986; 287(3): 623-627.
- [9] Krivoshlykov SG, Sisakyan IN. Coherent states and light propagation in inhomogeneous media. Soviet journal of Quantum Electronics 1980; 10 (3): 312-318.
- [10] Krivoshlykov SG., Sisakyan IN. Coherent states and nonparaxial light propagation in graded-index media. Soviet journal of quantum electronics 1983; 13 (4): 455-458.
- [11] "Western Roll." In Memory of Professor J.N. Sisakyan / Ed. by V.A. Soifer and V.Yu. Khomich [In Russian]. Dubna: Joint Institute for Nuclear Research 2005: 88.