

УДК 621.396

И. В. Минин, О. В. Минин

(Новосибирск)

**ЭЛЕМЕНТЫ ДИФРАКЦИОННОЙ КВАЗИОПТИКИ.  
Ч. II. ОСНОВНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ**

Рассмотрены некоторые области применения дифракционных фокусирующих элементов в различных спектральных диапазонах: от рентгеновского до сверхвысокочастотного, включая акустику.

В работе кратко рассмотрены основные области применения элементов дифракционной оптики и квазиоптики в различных спектральных диапазонах. Разумеется, что в данной статье невозможно охватить все аспекты и особенности использования дифракционных фокусирующих элементов в соответствующих областях науки и техники, поэтому лишь обозначим основные направления использования рассматриваемых элементов и остановимся более подробно на некоторых нетрадиционных областях их применения [1].

Рентгеновская дифракционная оптика. Необходимость фокусировки рентгеновского излучения возникла практически одновременно с открытием проникающих свойств этого вида электромагнитного излучения. Рентгеновски фокусирующие элементы необходимы для создания рентгеновских микроскопов и телескопов высокого разрешения, рентгеновской литографии, записи, передачи и обработки изображения, рентгеновской спектроскопии и интерферометрии [2—6] и т. д.

Известные решения задачи фокусировки рентгеновского излучения строятся на основе различного рода дифракционных явлений, возникающих при взаимодействии излучения с веществом. Это многослойные рентгеновски зеркала и элементы дифракционной оптики. При изготовлении многослойных рентгеновских зеркал очень жесткие требования предъявляются к качеству поверхности подложки, что затрудняет получение устройств с высоким разрешением. Необходимые значения периода повторения слоев в многослойных рентгеновских зеркалах составляют единицы нанометров, а соответствующая толщина слоя измеряется несколькими атомными радиусами используемого вещества. Другим направлением создания фокусирующих элементов является разработка рентгеновской оптики на основе зонных пластинок. Повышение эффективности дифракционных элементов в рентгеновском диапазоне длин волн идет по пути синтеза многослойных рентгеновских зеркал с элементами дифракционной оптики [7, 8].

В качестве рентгенооптических элементов используются многослойные рентгеновски зеркала. Падающее под определенным углом на многослойную структуру рентгеновское излучение дифрагирует, отражаясь по закону Вульфа — Брэгга в узком спектральном и угловом интервалах. При создании на отражающем рентгеновском зеркале топологии дифракционного фокусирующего элемента возникает возможность одновременной монохроматизации и фокусировки падающего излучения. Элементы этого типа получили название брэгг-френелевских элементов. Полная эффективность брэгг-френелевской линзы по отношению к падающему пучку может достигать 20—70 % [9].

зависимости от длины волны, с разрешением, близким к дифракционному пределу.

Зависимость фокусного расстояния зонных пластинок от длины волны излучения использовалась при создании спектрометра для получения пространственно разделенных (селектированных) по длине волны изображений источника [3, 9]. Конденсорные зонные пластинки с большими апертурами и числом зон 1000 — 10000 применяются для монохроматизации «белого» синхронного излучения [8]. Монохроматор, созданный на основе зонных пластинок (с числом зон 630 и 1196, апертурой 2,3 мм), имел степень монохроматизации  $\Delta\lambda/\lambda$  100 и 250 соответственно.

Малые радиационные повреждения при использовании мягкого рентгеновского излучения позволяют исследовать такие объекты, где применение электронной микроскопии сильно ограничено, например биологические. В работе [10] описана конструкция сканирующего рентгеновского микроскопа, в котором в качестве фокусирующих систем используется зонная пластинка Френеля. Использовалось рентгеновское излучение с длиной волны 3,2 нм, при этом эффективность пяти зонных пластинок находилась в интервале 0,75 — 2,9 %. Рентгеновский микроскоп позволяет получать снимки живых клеток тканей организма человека с разрешающей способностью около 50 нм, причем возможно улучшение этого параметра до 10 нм [11].

**Оптические дифракционные элементы.** Развитие дифракционных оптических элементов связано, прежде всего, с широким применением лазеров в различных областях науки и техники. Дифракционные элементы разрабатываются для лазерных технологических установок в промышленности, в медицине, для использования в оптическом приборостроении, волоконной связи, в оптических процессорах, для маркировки алфавитно-цифровыми символами и т. д.

Наиболее широко используются дифракционные оптические элементы для фокусировки монохроматического излучения в качестве аналога классических линз. В интегральной оптике фокусирующие элементы являются ее базовыми компонентами, выполняемыми по интегральной технологии. Фокусирующие системы — один из основных функциональных узлов интегрально-оптических спектроанализаторов, корреляторов и ряда других систем обработки информации [12, 13]. Основные требования, предъявляемые к элементам интегральной оптики, — технологичность выполнения структуры фокусирующего элемента и обеспечение возможности их тиражирования без ухудшения оптических характеристик. Таким требованиям удовлетворяют планарные дифракционные элементы.

Дифракционные оптические элементы разрабатываются и используются в качестве корректоров волнового фронта для систем аттестации асферической оптики [14], в дифракционных интерферометрах [15], медицине (офтальмохирургии) [16], спектроскопии [17], в различных сканирующих устройствах [18], для считывания информации с оптических дисков [19], в системах волоконно-оптической связи, оптических логических процессорах, интегрально-оптических датчиках [20], устройствах преобразования солнечной энергии [21]. Дифракционные элементы способны осуществлять фокусировку излучения в определенную точку или линию. Такие элементы используются в задачах лазерной термообработки материалов, маркировки изделий, сварки полимеров. Медные гальваноконии с охлаждением фокусирующих элементов могут работать в течение продолжительного времени с излучением мощностью 2 кВт [22, 23]. Элементы дифракционной оптики встречаются в таких устройствах, как инфракрасные фотокамеры, эндоскопы и датчики ультрафиолетового излучения [24—26]. Применение новых элементов позволило улучшить рабочие характеристики этих приборов и одновременно снизить количество оптических элементов в них, уменьшить их габариты и себестоимость. Специалисты корпорации 3M Сопрапу разработали элементы, которые могут заменить глазные хрусталики у больных, страдающих катарактой.

Дифракционные планарные элементы, выполненные на неплоской поверхности, позволяют существенно расширять элементную базу интегральной

оптики, создавать элементы с новыми свойствами и возможностями [1]. Наиболее наглядно это можно проиллюстрировать на примере оптических полихроматических вычислительных машин. Например, планарный элемент на конической поверхности (рис. 1) может быть использован в качестве нелинейного устройства для полихроматического излучения. Частотные свойства таких элементов определяются величиной стрелки прогиба поверхности элемента и направлением падения излучения на его поверхность. Следовательно, при работе на длине волны  $\lambda \neq \lambda_0$  положение области фокусировки в пространстве (величина фокуса смещения) будет зависеть от направления падения излучения. Поэтому, располагая приемники излучения в соответствующих точках пространства, можно отличить сигнал, падающий на «вершину» элемента, от сигнала, падающего на его «вогнутую» сторону. Аналогичным образом легко организовать и логические элементы. Рассмотрим для примера планарный дифракционный элемент, обеспечивающий фокусировку излучения из одного точечного источника в две точки. Такой элемент является двумерным аналогом трехмерного элемента, обеспечивающего фокусировку из точечного источника излучения в кольцо. Используем теперь этот элемент «наоборот»: пусть он обеспечивает фокусировку излучения из двух точечных источников в точку. Тогда, если изменить длину волны излучения одного из этих двух точечных источников, область фокусировки излучения изменит свое положение в пространстве: сместится поперек оптической оси элемента. Таким образом, получен полихроматический логический элемент: если частоты излучения на его двух входах одинаковы, то сигнал на выходе есть (нет); при отличии одной из частот на входе на выходе сигнал пропадает (появляется) в зависимости от расположения приемника излучения. Другими словами, реализуются логические элементы И и ИЛИ. Аналогичным образом может быть реализован управляемый оптический вентиль [1].

Применение дифракционной квазиоптики в оптическом компьютере при использовании многочастотных дискретных сигналов или излучения непрерывного спектра в некотором заданном диапазоне позволяет создать устройства, не имеющие аналогов среди современных ЭВМ, т. е. оптические устройства с несколькими значениями устойчивых состояний, в то время как, например, транзистор имеет всего два уровня выходного сигнала. Принцип действия таких устройств может быть основан на использовании соответствующих мод или гармоник излучения, выбор которых осуществляется выбором числа уровней квантования фазы дифракционного элемента. Создание таких оптических систем может привести к принципиальному изменению логики построения вычислительных систем в целом, так как реализуются устройства, позволяющие выполнять несколько последовательных переключений.

В ряде практически важных задач, связанных, в частности, с разработкой проблемы лазерного термоядерного управляемого синтеза, диагностикой материалов при экстремальных импульсных воздействиях, используется воздействие высокоэнергетического излучения на мишень. Почти во всех публикациях на эту тему применяется следующая схема воздействия излу-

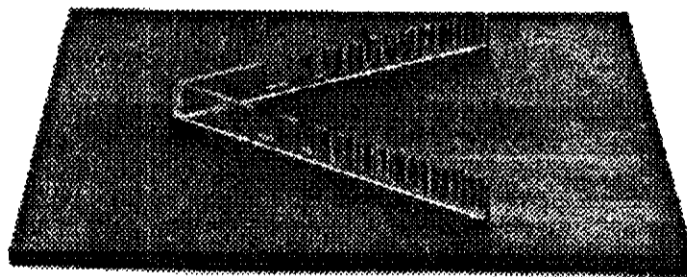


Рис. 1

чения на мишень. Мишень выполняется в виде достаточно тонкой пластины, а распределение плотности энергии по сечению (радиусу) падающего на него излучения с хорошей точностью постоянно. При этом для повышения уровня достижимых в мишени давлений и сжатия материала этой мишени обычно требуется увеличение плотности потока энергии, падающего на мишень.

Использование элементов дифракционной оптики позволяет реализовать новые возможности в вышеуказанной области физики. Предлагаемая идея достаточно проста [1]. Необходимо осуществить фокусировку падающего на мишень высокоэнергетического излучения со специальным распределением плотности энергии по сечению пятна фокусировки. В частности, при фокусировке излучения не в диск, а в кольцо можно добиться значительного повышения давления во фронте распространяющейся по материалу мишени ударной волны из-за эффекта ее схождения на ось симметрии (рис. 2, где 1 — источник излучения, 2 — дифракционный фокусирующий элемент, 3 — мишень, 4 — распределение энергии на поверхности мишени, 5 — ударная волна). Более того, выбором геометрических параметров задачи — радиуса кольца фокусировки излучения, его ширины, толщины мишени, распределения и величины плотности энергии в пятне фокусировки — можно добиться нерегулярного взаимодействия генерируемых в мишени ударных волн с образованием маховской конфигурации волн. Вычислительный эксперимент проводился при воздействии излучения с плотностью энергии  $I \sim 1,6 \cdot 10^{14}$  Вт/см при суммарной длительности импульса энергии треугольной формы  $\tau \sim 2,5$  нс в кольцевую область с внешним радиусом кольца 50 мкм, шириной кольца порядка 5 мкм на алюминиевой мишени толщиной 150 мкм. Было показано, что по сравнению со случаем фокусировки в «диск» происходит увеличение давления в мишени в 3,5—4 раза без увеличения мощности источника излучения [1].

Микроволновые элементы дифракционной квазиоптики. Микроволновой диапазон длин волн характеризуется, в частности, и тем, что отношение диаметра дифракционного элемента к длине волны излучения такое же, как и у элементов интегральной оптики. Это позволяет проводить разработку принципиально новых элементов и моделировать свойства соответствующих оптических устройств в микроволновом диапазоне. Кроме того, в данном спектральном диапазоне удобно изучать тонкую структуру распределения интенсивности поля в области фокусировки излучения и предельные свойства таких элементов. Этот диапазон представляет и значительный самостоятельный интерес.

В миллиметровом диапазоне, как и в оптическом, для целей формирования радиоизображений объекта используются диэлектрические линзы и зеркальные СВЧ-антенны. Применение этих фокусирующих элементов не решает полностью задачи, так как для формирования качественных радиоизображений необходимы объективы с достаточно большими апертурами (даже в коротковолновой части миллиметрового диапазона — порядка единиц метров). Изготовление подобных радиообъективов связано со значительными технологическими трудностями, так как для названных целей наиболее практичными являются линзы, имеющие коэффициент преломления 1,3—1,6 и фокусное расстояние, равное апертуре, при этом толщина линзы составляет несколько десятков процентов от размера апертуры. Поэтому такой радиообъектив имеет большую массу. Велики потери энергии, связанные с поглощением проходящего излучения в материале

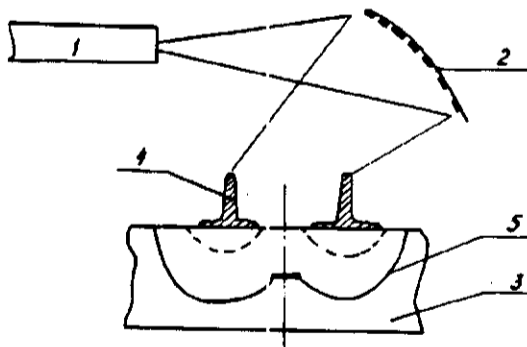


Рис. 2

линзы, так как даже лучшие диэлектрики в миллиметровом диапазоне длин волн, такие как плавленый кварц, фторопласт, полистирол, полиэтилен, имеют значительные потери ( $\text{tg}\delta \sim 10^{-3}$ ). Использование зеркал для получения радиоизображений ограничивается тем, что объект и его изображение находятся с одной стороны от фокусирующей системы. Перспективными аналогами линз в СВЧ-диапазоне являются радиообъективы на основе зонных пластинок [27, 28], причем применение дифракционных объективов оправдано с энергетической точки зрения.

Анализ квазиоптических систем радиовидения позволяет сформулировать следующие основные требования к фокусирующему устройству [29]. Объектив должен быть многокомпонентным (для удовлетворения требований по полю зрения  $2\beta \sim 60^\circ$ ), обладать частотными свойствами для просмотра трехмерных сцен в реальном времени за счет сканирования пространства по глубине сцены, областью фокусировки при изменении частоты подсвечиваемого излучения, иметь высокий КПД и малый вес. Этим требованиям удовлетворяют многокомпонентные дифракционные радиообъективы с переменным фокусным расстоянием на основе фазоинверсных зонных пластинок [29] и дифракционные объективы на неплоских поверхностях [1, 30]. Такие системы формирования изображения позволяют просматривать пространство по глубине, в 10—20 раз превосходящей глубину резкости объектива, немеханическим способом. В работах [1, 31, 32] предложено использовать дифракционные объективы в качестве частотного фильтра гармоник или для разделения сигналов различных частот в миллиметровом диапазоне длин волн. Дифракционные объективы применяются в интерферометрах [32], в качестве антенны для радиотелескопа [33], в квазиоптических линиях передачи [32], в дефектоскопии [34], в качестве пассивных ретрансляторов [35]. Для диагностики плазменных образований, например, в задачах получения управляемого термоядерного синтеза, при исследовании работы МГД-генераторов и т. д. достаточно эффективной является система диагностики на основе внеосевых дифракционных элементов [36]. В такой системе угловое разнесение траекторий зондирования, осуществление зондирования плазмы в локальной области одновременно на нескольких длинах волн через одну и ту же антенну реализуется за счет использования пространственно-спектрально-фокусирующих свойств дифракционных элементов с внеосевым положением области фокусировки. Другой тип систем микроволнового диапазона основан на возможностях дифракционных элементов обеспечить фокусировку излучения в произвольную пространственную конфигурацию. Это позволяет создавать системы СВЧ-удержания плазмы в произвольной области, устройства создания СВЧ-разрядов сложной трехмерной конфигурации [37]. На рис. 3 показано распределение интенсивности поля в области фокусировки дифракционного элемента, предназначенного для создания эллиптического СВЧ-барьера в системе удержания плазмы.

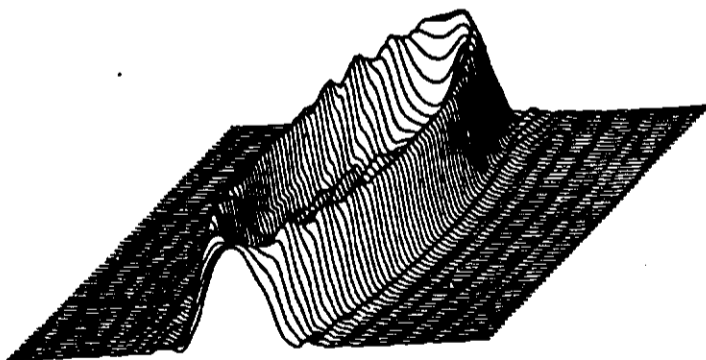


Рис. 3

Основное применение дифракционных элементов в СВЧ-диапазоне — в качестве антенн для различных систем [1]. Антенны на основе дифракционных элементов позволяют снизить ЭПР-антенны, особенно в угловом секторе главного лепестка диаграммы направленности на нерабочих частотах. С развитием спутниковых средств связи в качестве приемных антенн предлагается использовать зеркальные дифракционные антенны, которые имеют некоторые преимущества перед параболическими антеннами [38, 39]. Прежде всего, такие антенны более технологичны, их можно изготавливать плоскими, например, по технологии печатных плат, более легкие и т. д. Кроме того, применение антенн с фокусировкой излучения вне оптической оси позволяет избежать экранировки излучения приемным устройством и уменьшить шумы антенной системы [40—45]. В работе [46] предложено выполнять микроволновую антенну в виде зонной пластинки для приёма спутникового телевидения, нанесенной на оконное стекло. Зоны антенны выполнены из материала, прозрачного для видимого излучения и непрозрачного для СВЧ (например, напыленный оловянный или полупроводниковый окисел). Неметаллические дифракционные антенны [1] способны формировать диаграмму направленности достаточно произвольной формы. В такого рода антеннах возможно обеспечение сканирования диаграммой направленности в диапазоне не менее  $\pm 20^\circ$  за счет перемещения приемника излучения или осуществление одновременного приема сигналов от нескольких абонентов в этом секторе. Такие антенны позволяют одновременно использовать их и в качестве радиопрозрачного колпака для защиты соответствующей аппаратуры от воздействия окружающей среды. Это свойство дифракционных антенн перспективно для использования в создаваемой Всеевропейской системе персональной радиосвязи в полосе 38 ГГц [47], в том числе и для связи с подвижными объектами. Учитывая, что дифракционные антенны могут быть выполнены на произвольной по форме поверхности, такие антенны сочетают в себе свойства аэродинамического обтекателя. Большую роль играет возможность выполнения таких антенн с широким выбором их дизайна. Например, это дает возможность изготовления антенн для автомобильных локаторов с аэродинамическими свойствами и дизайном, определяемым назначением и внешним видом этого автомобиля.

Подобные антенные системы могут найти самое широкое применение в системах связи различного назначения, радиотрансляции, репортажном телевидении, системах дуплексной связи, охранных системах, локальных и сотовых системах связи. Одной из перспективных областей применения дифракционных антенных систем, использующей практически все ее свойства, является спутниковое телевидение. Разнообразие внешнего вида антенн, их эстетическая согласованность с интерьером квартир и различных строений, достаточно высокие технические параметры позволяют реализовать целый арсенал антенных систем для приема программ спутникового телевидения миллиметрового диапазона. На рис. 4 показан внешний вид одного из вариантов антенны для приема спутникового телевидения миллиметрового диапазона.

Используя прозрачные материалы в ИК- и СВЧ-диапазонах, например ZnS или ZnSe, можно синтезировать комбинированные фокусирующие элементы, предназначенные для работы одновременно в двух спектральных диапазонах [1].

Акустические дифракционные элементы. Интересное применение дифракционные элементы находят в акустике [48—51], например, в звуковидении [50], ультразвуковой дефектоскопии [52]. Дифракционные элементы могут использоваться как в режиме приема, так и в режиме излучения. В режиме приема зонная пластинка состоит из последовательности чередующихся прозрачных и непрозрачных зон. Такая зонная пластинка ведет себя как обычная акустическая линза. При использовании в качестве фокусирующего излучателя акустический преобразователь выполняется в виде зонной пластинки. Например, в работе [48] описана бинарная зонная пластинка с десятью зонами в виде электродов из золота, расположенных на поверхности керамического преобразователя. При приложении к преобразователю

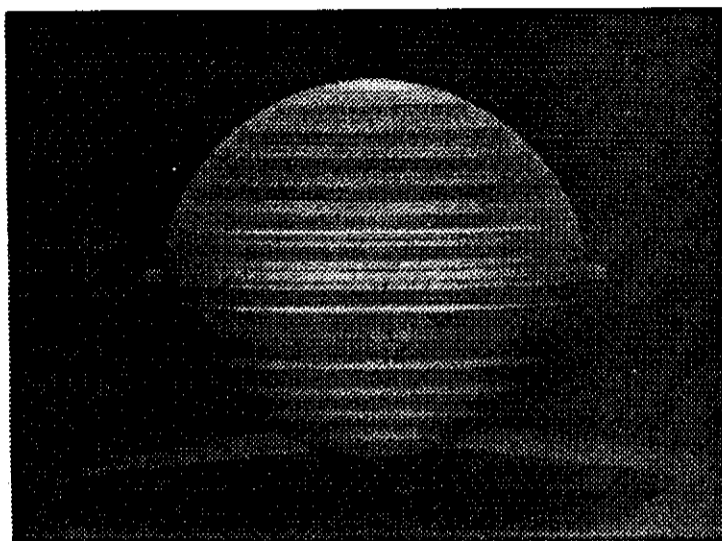


Рис. 4

электрического поля излучающими являются только прозрачные зоны. Это означает, что одна и та же зонная пластинка может использоваться и для «озвучания» предмета, и для получения его изображения. В акустике излучающие дифракционные фокусирующие элементы обладают еще одним интересным и весьма перспективным свойством [48, 50]. Если зоны, выполненные из золотых электродов, заменить на фотопроводящие слои и заключить их между преобразователем и оптически прозрачным электродом, то таким устройством можно управлять с помощью света. Если на такой преобразователь спроецировать оптическое изображение зонной пластинки и сместить его, то точка акустического фокуса будет смещаться. В СВЧ-диапазоне можно использовать в качестве преобразователя кремниевые или германиевые пластинки, которые под действием светового излучения меняют свои электромагнитные свойства [53].

На основе разработки принципов построения и изучения свойств дифракционных элементов в микроволновом диапазоне длин волн удалось показать принципиальную возможность фокусировки ударных волн в нелинейном режиме [1, 54] в кольцевую область, что может найти применение, например, в медицине для дробления камней в почках. Приведенные в работе [54] результаты исследований позволяют говорить о возможности создания целого класса дифракционных преобразователей фронтов ударных и, возможно, детонационных волн. Разумеется, что эти все вопросы подлежат дальнейшему теоретическому и экспериментальному исследованию.

Настоящая работа частично поддержана грантом фонда Сороса, учрежденного Американским физическим обществом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минин И. В., Минин О. В. Дифракционная квазиоптика. — М.: НПО «ИнформТЭИ», 1992.
2. Мишett А. Оптика мягкого рентгеновского излучения: Пер. с англ. /Под ред. Н. В. Виноградова. — М.: Мир, 1982.
3. Оптика мягкого рентгеновского излучения /Под ред. В. В. Аристова. — М.: МЦНТИ, 1987.
4. Шабельников П. Г. Технология микронэлектроники в производстве фокусирующих элементов // Зарубежная электрон. техника. — 1987. — № 8 (315).
5. Рентгеновская оптика и микроскопия: Пер. с англ. /Под ред. Г. Шмала, Д. Рудольфа. — М.: Мир, 1987.
6. Aristov V. V., Erko A. I., Martynov V. V. Principles of Bragg — Fresnel multilayer optics // Rev. de Phys. Appl. — 1988. — 23, N 10.

7. Ермо А. И. Синтезированная френелевская оптика нанометрового диапазона длин волн // Голографические методы в науке и технике.—Л.: ФТИ им. А. Ф. Иоффе, 1990.
8. Аристов В. В., Ермо А. И. Рентгеновская оптика.—М.: Наука, 1991.
9. Thime J. Construction of condenser zone plate for a scanning X-ray microscope // X-ray Microscopy /Ed. by G. Schmahl, D. Rudolph.—Berlin, 1984 (Springer Ser. in Opt. Sci; V. 43).
10. New Scientist.—1991.—129, N 1752.
11. Kirz J., Ube H., Anderson E. et al. X-ray microscopy with the NSLS soft X-ray undulator // Phys. Scr. T.—1990.—V. 31.
12. Свечников Г. С. Интегральная оптика.—Киев: Наук. думка, 1988.
13. Семенов А. С., Смирнов В. Л., Шманько А. В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации.—М.: Радио и связь, 1990.
14. Koronkevich V. P., Kiriyapov V. P., Kokoulin F. I. et. al. Fabrication of kinoform optical elements // Optik.—1984.—67, N 3.
15. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А. Дифракционный интерферометр // Автометрия.—1984.—№ 3.
16. Акопян В. С., Даниленко Ю. К., Данилов В. А. и др. Использование плоских неаксиально-симметричных фокусаторов в лазерной офтальмохирургии // Квантовая электрон.—1985.—12, № 2.
17. Walsh A. Echelette zone plate for use in far infrared spectroscopy // JOSA.—1952.—42, N 3.
18. Firth K. Recent developments in diffractive optics // GEC. J. Res.—1985.—3, N 1.
19. Бобров С. Т., Туркевич Ю. Г. Объектив с дифракционным корректором для лазерного проигрывателя // Компьютерная оптика.—1990.—№ 7.
20. Halley M., Stevens R., Daly D. Micro lens arrays // Phys. World.—1991.—4, N 7.
21. Мустафин К. С. Голограммная оптика. Разработка и применения // Голографические методы в науке и технике.—Л.: ФТИ им. А. Ф. Иоффе, 1990.
22. Сисакян И. Н., Шорин В. П., Сойфер В. А. и др. Технические возможности применения фокусаторов при лазерной обработке материалов // Компьютерная оптика.—1988.—№ 3.
23. Гончарский П. В., Попов В. В., Степанов В. В. Введение в компьютерную оптику.—М.: Изд-во МГУ, 1991.
24. Настоящее и будущее бинарной оптики // В мире науки.—1991.—№ 8.
25. Митл Л. Мир связи движется с курсом на волоконную оптику // Электротехника.—1992.—9—10.
26. Велдкамп У. Б., Макхью Т. Дж. Бинарная оптика // В мире науки.—1992.—№ 7.
27. Минин И. В., Минин О. В. Информативные свойства зонной пластины // Компьютерная оптика.—1989.—№ 3.
28. Carret James E., Wiltse James C. Performance characteristics of phase-correcting Fresnel zone plates // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Dallas Tex.—N. Y., 1990.—V. 2.
29. Минин И. В., Минин О. В. Широкоугольный многокомпонентный дифракционный СВЧ-объектив // Радиотехника и электроника.—1986.—31, № 4.
30. Минин И. В., Минин О. В. Дифракционные объективы на параболических поверхностях // Компьютерная оптика.—1988.—№ 3.
31. Wiltse J. C. The Fresnel zone-plate lense // Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.—1985.—544.
32. Sobel F., Wentworth E. L., Wiltse J. C. Quasi optical surface waveguide and other components for the 100-to 1000 Gc/sec region // IRE Trans. Microwave Theory and Techn.—1961.—MMT-9, N 6.
33. Buskirk L. F., Hendrix C. E. The zone plate as a radio-frequency focusing element // IRE Trans. on Antennas & Propag.—1961.—AP-9, N 3.
34. Байбулатов Ф. Х., Минин И. В., Минин О. В. Исследование фокусирующих свойств зонной пластины Френеля // Радиотехника и электроника.—1985.—30, № 9.
35. Камаев Р. Р., Орозобаков Т., Гейде Э. К., Далбаев К. Применение пассивных ретрансляторов отражающего типа на РРЛ прямой видимости // Электросвязь.—1983.—№ 3.
36. А. с. 134769 СССР. Устройство для измерения параметров плазмы /Минин И. В., Минин О. В.—Опубл. 1988, Бюл. № 27.
37. Минин И. В., Минин О. В. Дифракционная оптика в физике высоких плотностей энергии // Волны и дифракция-90.—М.: Физ. об-во, 1990.—Т. 3.
38. Lambley R. Fresnel antenna // Electronics and Wireless World.—1989.—95, N 1642.
39. Пат. 3536348 ФРГ.
40. Пат. 3728976 ФРГ.
41. Пат. 3189907 США.
42. Пат. 4825223 США.



43. A new planar grating-reflector antenna // IEEE Trans. Anten. and Propag.—1990.—38, N 9.
44. Fujimoto M., Harrison D, Lowzir A. et al. A DBS antenna-receiver system for simultaneous multi-satellite reception // IEEE Trans. Consum. Electron.—1992.—38, N 3.
45. Guo Y. J., Barton S. K. A high-efficiency quarter-wave zone plate reflector // IEEE Microwave and Guided Wave Lett.—1992.—2, N 12.
46. Inter. Patent N WO 90/07199, 28 Jule 1990.
47. Legskov R. Millimeter technology gets a new lease on life // Microwave J.—1992.—35, N 3.
48. Грегум П. Звуковидение: Пер. с англ. /Под ред. В. Д. Света.—М.: Мир, 1982.
49. Wu Jinyuan, Wang Cheng-hao, He Qi-guano. Focusing and scanning properties of acoustic beam in solid using a Fresnel array // Acta Phys. Sin.—1988.—37, N 10.
50. Shattuck D. P., Nowhi J. Focusing on optoacoustic transducer // IEEE Trans. Ultrason., Ferraelec., and Freq. Contr.—1988.—35, N 4.
51. Cao Jian-bo, Zhang Wu-cheng, Zhao Heng Juan. Focusing properties acoustic Fresnel lenses // Acta Acust.—1988.—13, N 5.  
Book of abstrs.

*Поступила в редакцию 18 февраля 1994 г.*