

ДИФРАКЦИОННАЯ КВАЗИОПТИКА СВЧ И МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН. ХРОНОЛОГИЯ РАЗВИТИЯ И.В. Минин, О.В. Минин

В работе приведен анализ истории развития и основных публикаций по вопросу исследования свойств и применения дифракционных фокусирующих элементов СВЧ и миллиметрового диапазона длин волн. Показаны основные тенденции в мировом развитии элементов дифракционной квазиоптики.

В основе микроволновых элементов дифракционной квазиоптики лежит явление дифракции на периодической или квазипериодической структуре элемента с характерными размерами порядка длины волны излучения, а не явления отражения или преломления, как принято считать в классической оптике. Работа и свойства многих элементов дифракционной квазиоптики основываются на свойствах зонной пластины Френеля. Эти элементы могут применяться от рентгеновского диапазона длин волн до сверхвысокочастотного, включая акустику [1-3].

Особый интерес представляют элементы, предназначенные для работы в СВЧ и миллиметровом диапазонах длин волн. СВЧ диапазон занимает промежуточное положение между диапазонами радиочастот $f > 10$ ГГц и оптикой $f < 100000$ ГГц. Миллиметровые волны, являясь коротковолновой частью радиодиапазона, обеспечивают высокое пространственное разрешение, предельно широкие полосы передачи информации, минимальные размеры антенных систем, максимальную направленность, помехозащищенность и скрытность каналов связи и т.д.

В 1875 году Сорэ (Jacques-Louis Soret) в Германии опубликовал первую статью по оптической зонной пластине [4]. ЗП Сорэ имела 98 непрозрачных зон. Позднее такая ЗП была усовершенствована Робертом Вудом (Robert W. Wood), заменившим непрозрачные зоны на фазоинверсные. В 1898 году Вуд спроектировал и измерил такую ЗП [5].

В 1957 году Г.Г.Слюсарев предложил видоизмененные ЗП [6], в которых длина оптического пути, соединяющего объект и его изображение, внутри каждой зоны становится постоянной, а от зоны к зоне меняется скачком на 2π .

Первое упоминание об использовании ЗП в СВЧ диапазоне относится к 1936 году [7] (патент был подан в 1932 году). В патенте используется термин "зонная пластина" пропускающего и отражающего типов. Частота излучения соответствовала длине волны 20 см. Следует отметить, что в указанном патенте предложена ЗП отражающего типа на основе амплитудной ЗП и помещенного за ней на расстоянии четверти длины волны экрана. Эта же идея была предложена в 1961 году Van Buskirk и Hendrix [8], которые не упоминали работу [7]. В 1939 и 1946 годах Edmand Bruce получил патенты на зонную пластину, поданные в 1936 и 1941 годах [9,10]. Оба патента используют термин "зонная пластина", упомянуты частоты использования на 3 ГГц. Патент 1939 года усовершенствует патент [7] и заявлен на фазоинверсную диэлектрическую ЗП с эффективной диэлектрической проницаемостью около 20. На длине волны 10 см такая высокая диэлектрическая проницаемость материала позволяет существенно уменьшить вес и толщину материала антенны. Кроме того, в патенте 1939 года, по-видимому впервые предлагается ЗП на цилиндрической поверхности.

В 1944 году W.E. Kock в металлопластинчатой линзе применил фазоинверсную зонную пластину, однако эти результаты не были опубликованы, так как были рассекречены лишь в 1975 году [11]. В 1948 году Maddaus опубликовал сообщение, оставшееся малоизвестным [12]. Он объяснил принцип работы фазоинверсной ЗП, но не упомянул названные выше работы. В его сообщении были приведены диаграммы направленности в Е и Н плоскостях, включая и для внеосевого положения источника излучения, измеренные на длине волны 1.27 см.

В 1951 году Albert Skellett получил патент на микроволновую диэлектрическую линзу [13]. В этом патенте заявлена зонированная линза, установленная в волноводе, а также плоская

и сферическая градиентные линзы с изменяющимся показателем преломления материала линзы от зоны к зоне. Позднее Wiltse реализовал и исследовал аналогичную зонную пластину.

В 1956 году A. Voivin в своей статье обсудил результаты измерений полуволновой ЗП на частоте 24 ГГц [14]. Эти результаты были получены для амплитудной ЗП. Однако эта статья не получила широкой известности, поскольку была опубликована на французском языке в журнале ограниченного распространения. В 1958 году ЗП была использована в СВЧ установке для измерения диэлектрической проницаемости материалов [15].

Первое упоминание об исследовании миллиметровых и субмиллиметровых ЗП относится к 60-м годам и только в начале 70-х годов эти исследования получили свое развитие. Однако применение миллиметровых зонных пластин (антенн и линз) ограничивалось лабораторными установками.

В 1960 году Sobel и Wiltse впервые усовершенствовали и исследовали ЗП фазоинверсного типа в миллиметровом диапазоне длин волн (на частотах 140, 210 и 280 ГГц) [16]. В этой работе впервые была рассмотрена четвертьволновая фазоинверсная ЗП в миллиметровом диапазоне. ЗП была использована в квазиоптических линиях передачи, интерферометре Михельсона и т.п. В 1961 году Van Burskirk и Hendrix опубликовали работы, в которых рассматривалась ЗП отражающего типа, за которой на расстоянии четверти длины волны располагался отражающий экран [8]. Измерения проводились на длине волны 3 см, и статья не содержала списка литературы. Позднее был получен патент [17], в котором была заявлена также эллиптическая ЗП (с эллиптической формой зон). Кроме того, в описании патента (но не в формуле изобретения) впервые упомянуто, что ЗП в виде чередующихся прозрачных и непрозрачных зон может быть нанесена на аэродинамический обтекатель самолета.

Исследованию свойств ЗП в сантиметровом диапазоне были посвящены работы [18] (длина волны 12 см) и [19] (длина волны 3 см). В последней работе изучались свойства металлопластинчатой ЗП. Эти работы были продолжены в 1968 году индийскими учеными Sanjal и Singh [20], которые исследовали поле в области фокуса светосильной ЗП как вдоль, так и поперек оптической оси на нескольких длинах волн также в СВЧ диапазоне. К сожалению, фазоинверсная ЗП ими была спроектирована с ошибкой [1,21]. В течение 70-х годов также индийские ученые теоретически исследовали в параксиальном приближении амплитудные сферическую и параболическую ЗП с небольшим количеством зон на поверхности в трехсантиметровом диапазоне длин волн [22-24]. Было показано, что фокусирующие свойства ЗП на сферической и параболической поверхностях сохраняются при изменении длины волны от расчетной на 5%. Кроме того, ЗП на криволинейной поверхности обеспечивает несколько лучшее разрешение, чем плоская ЗП. Число френелевских зон, укладывающихся на поверхности параболической и сферической ЗП, больше, чем у эквивалентной плоской зонной пластины.

В 1971 году при изучении волновых явлений и дифракции на зонах Френеля было обращено внимание на тот факт, что в СВЧ диапазоне при падении излучения на ЗП под углом или от точечного источника излучения (сферический падающий волновой фронт) необходимо учитывать толщину фазовой ступеньки в зависимости от номера зоны Френеля [25-26]. Эти исследования выполнялись в Томском государственном университете и после переезда автора в Израиль были опубликованы заново в American Journal of Physics в 1996 году [27].

Уже в 1972 году зонные пластины диаметром около 7,3 метра в дециметровом диапазоне длин волн с успехом использовались в пассивных ретрансляторах радиорелейных станций в условиях горной местности [28]. При этом использовались отражающие ЗП из одной - трех зон, разнесенных между собой на четверть длины волны.

Вопросам исследования фокусирующих свойств амплитудных и фазоинверсных ЗП в миллиметровом диапазоне был посвящен цикл работ И.И.Щукина (Воронежский государственный университет) в 70-х годах. Он показал, что ЗП может быть использована для получения радиоизображений отражающих простых плоских предметов [29] и их применение оправдано с

энергетической точки зрения в ряде случаев [30], так как все известные радиопрозрачные материалы в миллиметровом диапазоне длин волн имеют значительные потери. Первая зарубежная работа, посвященная возможности получения радиоизображения плоских предметов на длине волны 3.08 см диапазоне с помощью ЗП, появилась в 1980 году [31], однако она не содержала ссылок на работы И.И.Щукина. В 1975 году [32] для визуализации радиоизображения плоских отражающих предметов в миллиметровом диапазоне были использованы короткофокусная ЗП ($D/F \sim 2$, относительный диаметр 125 длин волн, длина волны 8 мм) и фотоуправляемая структура металл-полупроводник. ЗП амплитудного типа изготавливалась по методу печатных плат из фольгированного гетинакса.

В 1978 году Е.А. Домановой [33] была опубликована оригинальная работа, в которой впервые исследовалась сканирующая полупроводниковая ЗП в миллиметровом диапазоне длин волн. Суть работы состояла в засветке полупроводникового материала светом через экран, представляющий собой ЗП. В засвеченных участках полупроводника изменялась проводимость и материал становился непрозрачным в миллиметровом диапазоне. Почти 20 лет спустя аналогичные (но не реализованные практически) исследования стали проводиться в Норвегии [34]. К сожалению, работы Домановой в них не упоминаются.

В 1979 году появилось первое сообщение о применении ЗП, изготовленной из полиэтилена, в качестве простой антенны в доплеровском локаторе [35], работающем в диапазонах 33 и 66 ГГц. В следующем году Hristov предложил простую антенну с одной фазовой зоной Френеля [36].

80-е годы характеризуются интенсивными теоретическими и экспериментальными исследованиями миллиметровых дифракционных антенн и линз на основе зонных пластин. Это, по-видимому, связано с началом коммерческого освоения этого частотного диапазона и преимуществами дифракционных антенн и линз перед их классическими аналогами.

В 1981 году впервые были проведены детальные исследования (в непараксиальном приближении) предельных фокусирующих свойств как в продольном, так и поперечном относительно оптической оси направлениях светосильного объектива на основе амплитудной ЗП при плоском падающем волновом фронте [37] в диапазоне 70- 140 ГГц. Было показано, что фокусирующие свойства ЗП сохраняются в широком спектральном диапазоне (по крайней мере, при изменении длины волны от расчетной до +20%). Кроме того, было показано, что при дифракции плоской скалярной волны на ЗП двукратный интеграл Френеля-Кирхгофа сводится к однократному интегралу, имеющему вид Фурье-преобразования. В точке геометрического фокуса этот интеграл берется аналитически точно. В 1982 году появляется работа Gravelseter и Stammes [38] о разработке алгоритма расчета дифракции скалярных волн на зонной пластине. Алгоритм позволяет увеличить скорость вычисления интеграла Френеля-Кирхгофа при осевом положении точечного источника излучения, но оказывается малоэффективным при внеосевом положении источника излучения. В этом же году проводятся численные [39] и экспериментальные [40] исследования предельных фокусирующих свойств амплитудной и фазоинверсной ЗП в миллиметровом диапазоне. В этих работах был предложен эффективный алгоритм вычисления дифракционного интеграла Френеля-Кирхгофа, впервые проведены детальные исследования фокусирующих свойств ЗП при осевом и существенно внеосевом положении точечного источника излучения, определена поверхность "наилучшей фокусировки" при одиночном точечном источнике излучения и системы когерентных излучателей в широком спектральном диапазоне. Позднее результаты этих работ частично были опубликованы в [41]. В 1994 году Malliot [42] была получена аналитическая зависимость, описывающая положение области фокусировки зонной пластины - антенны от изменения длины волны используемого излучения, однако без ссылки на более ранние работы [41].

С середины 80-х годов начинаются интенсивные исследования возможности применения ЗП для приема спутникового телевидения в дециметровом и сантиметровом диапазонах. Одной

из первых работ в этой области можно назвать работу Shuter, Li и Yeung [43]. Они использовали металлопластинчатую ЗП размером 3.66x3.66 метра на частоте 4 ГГц, при этом настройка на спутник осуществлялась за счет смещения приемного рупора в диапазоне ± 15 градусов.

В 1983 году ЗП миллиметрового диапазона (осесимметричные, внеосевые и с внеосевым положением фокуса) были использованы для определения длины волны источника излучения и для автоподстройки частоты ЛОВ в блоке обратной связи [44]. В 1984 году для измерения параметров веществ, в том числе и быстропротекающих нестационарных, одновременно на нескольких длинах волн была предложена система на основе двух внеосевых ЗП или ЗП с внеосевым положением фокуса и работающая в миллиметровом диапазоне длин волн [45, 46]. Тогда же впервые был предложен двухкомпонентный дифракционный объектив миллиметрового диапазона для построения радиоизображения существенно объемных предметов с высоким (до 60 градусов) полем зрения [46]. Его фокусирующие, информативные и частотные свойства подробно были рассмотрены в [47]. Миллиметровый двухкомпонентный радиообъектив предназначался для работы в системе радиовидения одностороннего доступа в установках для таможенного досмотра. Сканирование по глубине сцены осуществлялось за счет использования частотных свойств объектива. Позднее этот радиообъектив был заменен на двухкомпонентный объектив из четвертьволновых ЗП на параболической поверхности. Исследование трехмерных зонных пластин на криволинейных поверхностях дало начало новому этапу в развитии зонных пластин миллиметрового диапазона.

В это же время фазоинверсная ЗП на частоте 140 ГГц была использована в установке, предназначенной для визуализации диэлектрических предметов, скрытых за диэлектрической радиопрозрачной преградой на отражающем фоне, например, обнаружения скрытых под одеждой оружия и пластиковых взрывчатых веществ [2]. В 1985 году Wiltse опубликовал статью, в которой ввел термин "планарная линза" и предложил ЗП, в которой каждая зона имеет одинаковую толщину, но разное значение показателя преломления материала [48]. Идея такой линзы с непрерывным изменением показателя преломления материала линзы в каждой зоне высказывалась ранее Skellett в [13].

Примерно в это же время фазоинверсная четвертьволновая ЗП была применена Norden в радиопередающих станциях миллиметрового диапазона серии 3800 [49]. На частоте 37.8 ГГц антенна диаметром 530 мм имела усиление 41.5 дБ при ширине диаграммы направленности 1.1 градус и уровне боковых лепестков -24 дБ.

В 1986 году F.Kubick получил патент на линзу Френеля из ферроэлектрического материала, который меняет свое значение диэлектрической проницаемости материала под действием приложенного напряжения. Патент был заявлен в 1984 году [50].

В 1987 году впервые были опубликованы результаты подробных исследований фазоинверсных миллиметровых ЗП, выполненных на криволинейных поверхностях: сфере, параболе, конусе и оживальной формы [51]. Исследуемые ЗП на различных поверхностях работали в режиме на "просвет". Исследования проводились в миллиметровом диапазоне длин волн (75-140 ГГц) как в ближней (линза), так и дальней (антенна) зоне. Были изучены предельные фокусирующие и частотные свойства (поле зрения, число элементов разрешения в кадре, профиль поверхности фокусировки, диаграмма направленности в дальней зоне при смещении источника излучения и связь этих характеристик с изменением длины волны излучения от расчетной). Было показано, что ЗП на поверхностях имеют лучшие фокусирующие и сканирующие возможности, форма их поверхности и ее ориентация в пространстве (выпуклая или вогнутая) позволяет корректировать частотные свойства таких устройств по сравнению с эквивалентными плоскими ЗП. В этом же году были опубликованы первые результаты по исследованию миллиметрового двухкомпонентного радиообъектива на основе фазоинверсных параболических ЗП [52], а подробные результаты исследований были опубликованы годом позже [53].

В 1988 году впервые была предложена зонная пластина СВЧ, в том числе и миллиметрового диапазона, позволяющая работать на одной выбранной поляризации излучения [54]. Идея заключалась в выполнении непрозрачных зон в виде специальной дифракционной решетки, осуществляющей сдвиг фаз между E и H волнами. В этом же году была предложена модифицированная зонная пластина, позволяющая увеличить глубину резкости и расширить рабочий спектральный диапазон за счет введения понятия т.н. "опорного радиуса" [55]. Объяснение введенного понятия было дано в работе [56] и связано с изменением пространственной частоты следования зон.

В 1988 году Hans Martin Salzmann получил патент на эллиптическую ЗП, предназначенную для приема сигналов спутникового телевидения и расположенную на боковой стене здания [57]. В этом патенте заявлены: амплитудная ЗП, непрозрачные зоны которой выполнены из поглощающего СВЧ излучение материала, диэлектрическая ЗП, металлическая ЗП с прямоугольным и синусоидальным профилем канавок. В этом же году Huder и Menzel предложили плоскую печатную отражающую антенну миллиметровых волн на основе ЗП [58]. Суть их предложения заключалась в расположении металлической ЗП из чередующихся прозрачных и непрозрачных зон на металлическом экране, покрытом слоем диэлектрика определенной толщины. На такую ЗП Bernhard Huder в 1989 году получил патент [59].

В 1985 году Wiltse показал [48], что фазоинверсная двухуровневая ЗП может работать и на кратных частотных гармониках. Было получено соответствующее аналитическое выражение. Позднее (1989 год) в исследованиях [60] были получены аналитические выражения, описывающие фильтрующие и фокусирующие свойства фазоинверсных ЗП с произвольным числом уровней квантования фазы, а также изучены соответствующие частотные и фокусирующие свойства ЗП на частотных гармониках в миллиметровом диапазоне.

В 1988-1989 гг. было предложена усовершенствованная четвертьволновая зеркальная ЗП-антенна, которая изготавливалась по методу многослойных печатных плат, а вместо диэлектрика с высокой диэлектрической постоянной использовался воздух или пенопласт [2]. Тогда же были исследованы полу- и четвертьволновые зеркальные ЗП в 4-миллиметровом диапазоне длин волн с антикоррозийным радиопрозрачным покрытием из Al_2O_3 толщиной около 10 мкм.

В 1989 году были опубликованы результаты исследований, суммирующих основные свойства ЗП миллиметрового диапазона, выполненных на криволинейной поверхности. Так, в работе [61] установлена взаимосвязь частотных и фокусирующих (распределения поля вдоль оптической оси) свойств плоской ЗП и ЗП, выполненной на произвольной криволинейной поверхности в зависимости от ориентации этой поверхности в пространстве. Была теоретически и экспериментально исследована ахроматическая фазоинверсная ЗП [62], построенная по алгоритму, предложенному С.М. Райским в оптике [63]. Проведены исследования ЗП с зонами Френеля прямоугольной формы [64], предложены и опробованы новые алгоритмы синтеза фазовой структуры ЗП: деформационные, конформные, ЗП на основе последовательно расположенных (вдоль оптической оси) нескольких экранов [65], впервые была показана возможность создания микроволновой ЗП, выполненной на произвольной трехмерной поверхности и работающей в заданном порядке дифракции [66]. В этом же году было предложено использовать ЗП, выполненные на произвольных поверхностях, в оптическом вентиле [67], где используется зависимость частотных (хроматических) свойств таких ЗП от ориентации поверхности в пространстве.

В 1989 году был предложен новый тип миллиметровых (65 ГГц) ЗП с несимметричным расположением прямоугольных зон. Такие фокусирующие элементы могут создавать область фокусировки, изменяющейся от линии до эллипса и окружности [66]. Там же был рассмотрен двухкомпонентный радиообъектив на основе предложенных элементов.

В этом же году японскими учеными была предложена и исследована спиральная антенна трехсантиметрового диапазона с отражателем в виде зонной пластины [68]. Особенность данной антенны заключалась в ее параметрах [69]: фокусное расстояние составляло 4 см, диаметр ЗП

5.48 см, длина волны 3.2 см. Было показано, что выполнение отражателя в виде ЗП по сравнению с чисто металлическим экраном сужает диаграмму направленности с 69 до 31 градуса, а усиление возрастает на 3.5 дБ.

В начале 90-х годов был осуществлен переход в изучении характеристик дифракционных антенн от геометрической оптики и скалярной теории дифракции к векторной теории дифракции. В это же время начались работы по разработке дифракционных антенн с частотно-резонансными поверхностями.

В 1990 году было показано, что выбором формы поверхности миллиметровой ЗП возможна коррекция аберраций волнового поля [70].

В этом же году был получен патент на фокусирующее устройство на основе ЗП, предназначенное для приема сигналов спутникового ТВ. ЗП выполнялась на стекле, а зоны, непрозрачные для СВЧ излучения и прозрачные для видимого света, наносились на стекло в виде оксида олова с добавкой фтора толщиной 150-1000 нм [71].

Впервые (1990 г.) на основе проведения вычислительного эксперимента было доказано, что принципы построения ЗП, разработанные в микроволновом и миллиметровом диапазонах, могут быть использованы для фокусировки ударных волн в произвольную область в нелинейном режиме [72, 73].

В 1991 году была предложена ЗП миллиметрового диапазона, предназначенная для фокусировки излучения в кольцевую и эллипсную фокальную области в миллиметровом диапазоне длин волн [74].

Планарная фазоинверсная полуволновая ЗП на конической поверхности для "логических" элементов была исследована в диапазоне 75 ГГц в работе [75]. Там же было предложено осуществлять моделирование планарных оптических ЗП в миллиметровом диапазоне длин волн.

В 1991 году Garrett и Wiltse [76] теоретически получили формулу для оценки полосы пропускания зонной пластины - антенны в зависимости от числа уровней квантования фазы, общего числа зон Френеля, приходящихся на апертуру, и расчетной частоты излучения.

В 1992 году M. Herben с сотрудниками впервые применили векторную теорию дифракции Кирхгофа для расчета диаграммы направленности амплитудной ЗП - антенны [77], а в 1994 году эта теория была применена для расчета характеристик фазоинверсных ЗП - антенн [78]. В 1993 году предложена отражательная четвертьволновая ЗП - антенна, изготовленная по технологии печатных плат [79], которая является усовершенствованным вариантом ЗП, предложенной в [57]. В этом же году Guo, Sussi и Barton была предложена и исследована отражательная четвертьволновая ЗП - антенна с внеосевым фокусом [80].

В 1994 году, по-видимому, впервые предложена многолучевая зеркальная четвертьволновая ЗП на параболической поверхности [81]. Антенна диаметром 90 см, фокусом 29 см, числом зон равным 10 имела эффективность более 56% и предназначалась для работы в диапазоне 12 ГГц.

В 1995 году Guo и Barton предложили отражательную плоскую ЗП - антенну, предназначенную для работы в диапазоне 11.2 ГГц, фазовый профиль которой выполнен в виде искусственного металлодиэлектрика, и изготовленную по технологии печатных плат [82]. Антенны на основе ЗП с внеосевым фокусом (ЗП с эллиптическими зонами) были теоретически исследованы при работе на различных поляризациях [83].

Коммерчески достижимые антенны для приема спутникового телевидения предлагаются в компании Portasat Ltd [84]. В качестве приемной антенны использовалась четырехуровневая внеосевая зонная пластина с квадратной формы апертурой размером 1.2 метра на частоте 12 ГГц. Уровень боковых лепестков составлял 25 дБ при усилении антенны 41 дБ. В 1996 году исследована ЗП-антенна диаметром порядка 1 метра, со структурой зон, состоящих из диэлектриков с различной диэлектрической проницаемостью, и предназначенной для работы в диапазоне

11 ГГц [85], а полоса пропускания такой антенны была определена в работе [86]. В этом же году Ji и Fujita предложили полуволновую ЗП-антенну на цилиндрической поверхности [87]. Антенна диаметром 80 мм предназначалась для работы в диапазоне 9 ГГц.

В работе [88] впервые предложено использовать фазоинверсные диэлектрические ЗП на произвольной поверхности в качестве многолучевой антенны для автомобильного локатора, работающего в диапазоне 76.5 ГГц. Такая антенна может быть вписана в элемент конструкции автомобиля, не нарушая его дизайна и одновременно являясь аэродинамическим обтекателем. В работе [89] описано применение зеркальной четвертьволновой ЗП в качестве сканирующей антенны для локатора, работающего в диапазоне 35 ГГц.

Китайскими учеными в 1997 году был исследован "сэндвич" из двух амплитудных ЗП [90] в СВЧ диапазоне. Такая антенна позволяла улучшить ряд характеристик одиночной зонной пластины.

Возможность применения ЗП на произвольной поверхности вращения в качестве миллиметровой многолучевой антенны обтекателя обсуждается в работе [91]. Впервые были исследованы сферические ЗП - обтекатели с установленной на них аэродинамической иглой. Антенны обтекатели предназначались для объектов, движущихся со сверхзвуковой скоростью. Рассмотрена антенна - обтекатель оптимальной аэродинамической формы, имеющая оживальную форму поверхности. Там же рассмотрено применение параболической фазоинверсной шестнадцатиуровневой ЗП в качестве многолучевой антенны для приема спутникового телевидения. Материал антенны - пенополистирол с коэффициентом преломления $N=1.3$.

В 1999 году Hristov модифицировал конструкцию ЗП на цилиндрической поверхности [92], предложенную ранее Ji и Fujita. В 2000 году была впервые предложена миллиметровая высокоэффективная диэлектрическая ЗП-антенна отражающего излучения типа. Антенна является результатом синтеза фазоинверсной многоуровневой ЗП и слоя диэлектрика с гофрированной границей, создающего полное антизеркальное отражение [93]. Основное отличие этого типа ЗП от известных - чрезвычайно узкая полоса рабочего диапазона. В этом же году Wen Xun Zhang [94] исходя из принципа Гюйгенса-Френеля показал, что оптимальный размер первой зоны Френеля не совпадает с "классическим", однако в своей работе автор не ссылается на аналогичные результаты более ранних работ [55, 56].

Если попытаться в сжатой форме оценить характер развития миллиметровых дифракционных антенн и линз, то история их развития свидетельствует, что:

- значительно выросло число исследований и публикаций, посвященных миллиметровым зонным пластинам - антеннам, особенно в Нидерландах, Англии, Франции, США, Китае, Японии и России;

- теоретические исследования характеристик таких элементов перешли от методов геометрической оптики и скалярной теории дифракции к векторной теории дифракции;

- начался период практического использования дифракционных антенн, появились первые образцы промышленных зонных пластин - антенн для приема спутникового телевидения, дуплексной связи.

К сожалению, следует отметить и тот факт, что многие исследования повторяются, что, вероятно, связано с малоизвестностью некоторых публикаций и результатов.

В последние годы появилось несколько новых направлений в развитии миллиметровых дифракционных антенн и линз.

Первое направление - это "трехмерные" элементы - антенны и линзы на криволинейных поверхностях. Такие дифракционные элементы на "неплоских" поверхностях позволяют создавать устройства с принципиально новыми свойствами, например, миллиметровые антенны для автомобильного локатора, вписанного в конструкцию автомобиля, антенны, совмещенные с обтекателями, миллиметровые многолучевые антенны для связи с подвижными объектами, вентильные устройства и т.д.

Второе направление - это создание "плоских" зеркальных зонных пластин - антенн со структурой фазоинверсных зон в виде искусственного металлодиэлектрика или частотно-резонансных поверхностей.

Третье направление - это создание плоских зонных пластин - антенн линзового типа со структурой фазоинверсных зон, выполненных в виде кусочно – постоянного распределения градиента показателя преломления материала по радиусу зон.

Четвертое направление - это создание оптически управляемых миллиметровых дифракционных элементов. В качестве "преобразователя" служат кремниевые или германиевые пластины, которые под действием светового излучения меняют свои электромагнитные свойства. Если на такой "преобразователь" спроектировать оптическое изображение зонной пластины и сместить его, то область фокусировки излучения будет также смещаться. Таким образом можно осуществить двумерное сканирование.

Пятое направление - это создание миллиметровых многокомпонентных дифракционных радиообъективов, в том числе и на неплоских поверхностях, для систем радиовидения, дефектоскопии, таможенного досмотра, охранных систем и т.д.

Список литературы

1. Wiltse J.C., Millimeter-wave Fresnel zone plate antennas, Chapter 11 in Millimeter and microwave engineering for communications and radar /book/, critical reviews of optical science and technology, Wiltse J.C., ed., SPIE V.CR54, Bellingham, WA, pp.272, 1994.
2. Минин И.В., Минин О.В. Дифракционная квазиоптика и ее применение. Новосибирск: СибАГС, 1999. 273 с.
3. Hristov H.D., Fresnel zones in wireless links, zone plate lenses and antennas// Artech House Inc., 2000, 323 p.
4. Soret J.L., Ueber die durch Kreisgitter erzeugten Diffractionsphanomene// J.C. Poggendorff's Annalen der Physik und Chemie, Leipzig, Germany, vol. 156, pp.99-113, 1875.
5. Wood R.W., Phase-Reversal Zone Plate and Diffraction-Telescopes, Philosophical Magazine, 5th series, vol. 45, N 277, pp.511-523, June, 1898.
6. Слюсарев Г.Г. Оптические системы с фазовыми слоями // ДАН СССР. Т. 113. № 4. – 1957. С. 780.
7. Clavier A.G., Darbord R.H., Directional Radio Transmission System, U.S. Patent 2,043,347, June 9, 1936.
8. Van Buskirk L.F. and Hendrix C.E., The zone plate as a Radio Frequency Focusing Element, IRE Trans. on Antennas and Propag., v.AP-9, pp.319-320. May 1961.
9. Bruce E., Directive Radio System, U.S. Patent 2.169.553, Aug.15, 1939.
10. Bruce E., Directive Radio System, U.S. Patent 2.412.202, Dec. 10. 1946.
11. Kock W.E., Experiments with metal plate lenses for microwaves// Internal Bell Telephone Laboratories memorandum mm 44-160-67, Mar. 27, 1944 (Secret; since declassified). Reprint in: W.E. Kock. Engineering Applications of Laser and Holography. - Plenum Press, N.Y. and London. 1975. 400 P.
12. Maddaus I., Jr, Fresnel Zone Plate Antenna// Naval Research Lab., Washington, D.C., Rept. R-3293, June 3, 1948.
13. Skellett Albert, Microwave Lenses// U.S. Patent 2.547.416, April 3, 1951.
14. Boivin A., Dion A. and Koenig H.P. Etude Experimentale de la Diffraction Des Micro-Ondes Par Des Ouvertures a Symetrie de Revolution// Canadian Journal of Physics, v. 34, pp. 166-178, 1956.
15. Бранд А.А., Пашин Ю.Н., Петелин В.Г. Изучение фокусирующих свойств зонной антенны в сантиметровом диапазоне длин волн // Научные сообщения высшей школы. №6. 1958. С.201-207.
16. King M., Rodgers J., Sobel F., Wentworth F. and Wiltse J.C., Quasi-Optical Components and Surface Waveguides for the 100- to 300- Gc Frequency Range// Electronic Communications, Inc., Report N 2 on contract AF19(604)-5475, Nov. 1960. Reprint in: IRE Trans. on Microwave Theory and Techniques, v. MTT-9, pp.512- 518, Nov. 1961.
17. Van Burskirk L.F., Zone Plate Radio Transmission System// U.S. Patent 3.189.907, June 15, 1965.
18. Brown T., Microwave Zonel Plate with Metallic Ring// Amer. J. Phys., v.30, N1, p.71. 1962.
19. Кириллов В.А., Твердохлебов В.И., Хоменко В.И. Демонстрационные опыты с акустической зонной пластиной// УФН. Т.82. Вып.1. 1964. С.166.
20. Sanyal G.S. and Singh M. Fresnel Zone Plate Antenna// Journal of the Inst. of Telecom. Engineers, v.14, pp.265-281, 1968.
21. Wiltse J.C., The Fresnel Zone Plate Antennas// Chapter 11 in Millimeter and Microwave Engineering for Communications and Radar (book), critical reviews of Optical Science and Technology, J.C. Wiltse ed., SPIE vol. CR54, Bellingham, WA, pp.272-293, Nov. 1994.
22. Wiltse J.C., History and Evolution of Fresnel zone plate antennas for microwaves and millimeter waves// APURSI-1999, pp.722-725, 1999.

23. Dey K.K., Khastgir P., Comparative focusing properties of spherical and plane microwave zone plate antennas/ Int. Journ. Electronic. 1973, v. 34, № 4, pp. 497-506.
24. Khastgir P, Chakravorty I.N., Dey K.K. Microwave paraboloidal, spherical and plane zone plate antennas: comparative study. Indian Journ. of Radio and Space Phys.. 1973, V. 2, March, pp. 47-50.
25. Перкальскис Б.Ш. Использование современных научных средств в физических демонстрациях. - М.: Наука, 1971.
26. Перкальскис Б.Ш. Волновые явления и демонстрации по курсу физики. - Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1984. - 280 с.
27. Benjamin S. Perkalskis and J. Reuben Freeman. Diffraction for Fresnel zones and subzones using microwaves//AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS - December, 1996, p. 1526.
28. Байбосунов М. Сооружение и испытание зональной антенной приставки на РРЛ Чолпон-Ата-Оргочор //Электросвязь. №5. - 1957. С.19-23.
29. Щукин И.И. Формирование радиоизображений фазоинверсными зонными пластинками // Вопросы рассеяния и оптимального приема электромагнитных волн. – Воронеж: изд-во ВГУ, 1973. С. 403-406.
30. Щукин И.И. О потерях в линзах и зонных пластинках// Твердотельная радиоэлектроника –Воронеж. 1973.С.127-130.
31. Stephanis C.G., Hampsas G.D. Imaging with microwave lens// IEEE Trans. on antennas and Propag., V. AP-28, N1. January 1980. p.49-50.
32. Артемов К.С., Иванов В.Н., Котосонов В.Н. и др. Визуализация радиоизображения объектов, сформированных зонной пластиной Френеля с помощью фотоуправляемой структуры полупроводник-металл в микроволновом диапазоне// Вопросы исследования физических свойств твердых тел и обработки информации в диапазоне радиочастот. Ярославль, 1975. С.113-119.
33. Доманова Е.А. Полупроводниковая зонная пластина Френеля// Вестник Харьковского университета, Вып.7 № 163. 1978. С.71-72.
34. Hajian M., Keizer W., Reits B.J., Ligthart L.P., Concept of Scanning Beam Antenna at 35 GHz based on Photoconductivity Technology // Book of Abstract of 20th ESTEC Antenna Workshop on Millimetre Wave Antenna Technology and Antenna Measurements, 18-20 June, Noordwijk. The Netherlands, pp.55-65, 1997.
35. Lazarus M.J., Silvertown A., Novak S., Fresnel-Zone Plate Aids Low-Cost Doppler Design// Microwaves, Nov.1979, pp.78-80.
36. Hristov H.D., Urumov J.R., Semov M.J., Ring-Shaped Dielectric Antenna// Eu. Microwave conf., 6-12 Sept. 1980, Warsaw, Conf. Proc., pp.109-113.
37. Минин И.В., Минин О.В. Исследование структуры поля в области фокуса зонной пластины Френеля// Материалы 19 Всесоюзной научно-студенческой конференции. Новосибирск: НГУ, 1981. С.54-59.
38. Gravelstaeter T., Stammnes J.J., Diffraction by circular apertures// Appl. Opt., v.21, N20, 1982, pp.3644-3651.
39. Минин И.В. Численные исследования дифракции электромагнитной волны на зонной пластине:Дипломная работа. Новосибирск: НГУ, 1982. 74 с.
40. Минин О.В. Экспериментальное исследование структуры электромагнитного поля в области фокуса зонной пластины: Дипломная работа. Новосибирск: НГУ, 1982. 58 с.
41. Байбулатов Ф.Х., Минин И.В., Минин О.В. Исследование фокусирующих свойств зонной пластины Френеля// Радиотехника и электроника., Т.30. №9. 1985. С.1681-1688.
42. Malliot H.A., Zone plate reflector antenna for applications in space // Proc. IEEE Aerospace Applications Conference, Vail Co., USA, 5-12 th. Feb. 1994, pp. 295-311.
43. Shuter W.L.H., Li C.P., Yeung A.K.C., A Metal Plate Fresnel Lens for 4 GHz Satellite TV Reception// Trans. Antennas Propag., v. AP-32, N3, Mar.1984, pp.306-307.
44. Минин И.В., Минин О.В. Определение длины волны генераторов миллиметрового диапазона с использованием зонных пластин: Отчет по НИР. № Гос. рег. И55981, 1983.
45. А.С. СССР 1347690. Устройство для измерения параметров плазмы/ Минин И.В., Минин О.В. №G01N22/00. Заявл. 05.07.84.
46. Минин И.В., Минин О.В., Скарбо Б.А. и др. Применение голографических радиообъективов для дефектоскопии и диагностики плазмы в СВЧ диапазоне// Тез. докл. V Всесоюзной конф. по голографии. Рига, 12-14 ноября 1985. С.233-234.
47. Минин И.В., Минин О.В. Широкоугольный многокомпонентный дифракционный СВЧ- объектив // Радиотехника и электроника. Т.31. №4. 1986. С 800- 806.
48. Wiltse J.C., The Fresnel Zone Plate Lens// Proc. of SPIE Symp. (Arlington. VA), v.544, pp.41-47, Apr.9-10. 1985.
49. Millimeter-Wave Radio Series 3800, Data Sheet, Norden Systems, Inc., Norwalk, CT.
50. Kubick F., U.S. Patent 4.576.441. 1986.
51. Минин И.В., Минин О.В. Дифракционные радиооптические системы СВЧ диапазона. - Тез. докл. VI Всесоюз. конф. "Методы и средства измерений электромагнитных характеристик материалов на ВЧ и СВЧ". Ново-сибирск, 29-30 мая 1987. С.169-170.

52. Минин И.В., Минин О.В. Параболические дифракционные объективы// Всесоюз. конф. "Современные проблемы физики и ее приложений". М., ВДНХ, 19- 21 апреля 1987. С.10.
53. Минин О.В., Минин И.В. Дифракционные объективы на параболических поверхностях//Компьютерная оптика. 1988. №3. С.8-15.
54. А.С. СССР 1596417. Зонная пластина/ Минин И.В., Минин О.В. МКИ H01Q 15/12. Заявл. 28.3.88.
55. А.С. СССР 1617396. Зонная пластина/ Минин И.В., Минин О.В. МКИ G02B 27/42. Заявл. 26.09.88.
56. Минин И.В., Минин О.В. Оптимизация фокусирующих свойств дифракционных элементов// Письма в ЖТФ. Т.15. Вып.23. 1989. С.29-33.
57. Пат. № DE 3536348 C2 H01Q15 14 ФРГ. Оpubл. 6.10.88.
58. Huder V., Menzel W., Flat Printed Reflector Antenna for mm-wave Applications// Electronics Letts., v 24, Mar. 1988, p.318.
59. Huder V., Патент ФРГ № DE 3801301A1, H01Q 15/23, опублик. 27.7.1989.
60. А.С.СССР 1762651. Устройство фокусировки излучения/ Минин И.В., Минин О.В. МКИ G02B 5/32.Заявл. 30.3.89.
61. Минин О.В., Минин И.В. Инвариантные свойства элементов дифракционной квазиоптики на поверхностях вращения второго порядка// Тез. докл. Всесоюз. семинара "Методика и техника обработки двумерных сигналов". М.: ЦНИИТИКПК, 1989. Ч. 2. С.27-28.
62. Минин О.В., Минин И.В. Информативные возможности дифракционной квазиоптики на поверхностях вращения второго порядка. - Там же, С.29-30.
63. Райский С.М. Зонная пластинка// УФН, 1952. Т.47. №4. С.516-536.
64. Минин И.В., Минин О.В. Новый тип элементов компьютерной оптики// Тез. докл. Всесоюз. семинара "Методика и техника обработки двумерных сигналов". М.: ЦНИИТИКПК, 1989. Ч. 2. С.34-35.
65. Минин И.В., Минин О.В. Фокусирующие элементы дифракционной квазиоптики и их применение// Тез. докл. III Всесоюз. школы по распространению миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере. Харьков, 12-17 октября 1989. ИРЭ АН УССР, 1989. С.251-252.
66. Минин И.В., Минин О.В., Жеребин В.В. Фокусировка излучения в произвольную пространственную кривую - новый принцип построения дифракционной оптики// Тез. докл. Всесоюз. конф. "Применение лазеров в народном хозяйстве". Шатура: НИЦГЛАН, 1989. С.213-214.
67. А.С.СССР №1679458, МКИ G02F 3/00. Оптический вентиль/ Минин О.В., Минин И.В. Заявл. 30.03.89.
68. Yamauchi J. et al., Focusing properties of Fresnel zone-plate and its application to a helix radiating a circularly polarized waves// IEICE Trans., pp.648-654, 1989.
69. Yamauchi J., Nakano H., Theoretical and Experimental Investigations of focusing properties of the Fresnel Zone lens and plate, Proc. APURSI-99, pp.746-749, 1999.
70. Минин И.В., Минин О.В. Коррекция aberrаций дифракционных квазиоптических элементов выбором формы их поверхности/ 4-е рабочее совещание по компьютерной оптике. Тольятти, 19-24 февраля 1990//Квантовая электроника. Т.17. №12, С.1644-1649.
71. Пат. Focussing device for a microwave antenna/ International publication number Wo 90/07199 от 28 июня 1990 г.
72. Минин И.В., Минин О.В. Дифракционная оптика в физике высоких плотностей энергии// "Волны и дифракция-90": Сб. науч. труд. М.: МФТИ, 1990. С.194-196.
73. Minin V.F., Minin I.V. and Minin O.V. The dynamics of shock wave focusing with the elements of diffraction quasiopitics// Book of abstracts the 18 Int. Symp. on Shock Waves (Sendai), 1991, pp. 39-40.
74. Минин И.В., Минин О.В. Принцип построения элементов дифракционной квазиоптики для фокусировки когерентного излучения в произвольную пространственную конфигурацию// Тез. докл. I Украинского симпозиума "Физика и техника ММ и субММ радиоволн". Харьков, 1991. Ч.1. С. 14-15.
75. Минин И.В., Минин О.В. Дифракционная квазиоптика// М.: НПО ИнформТЭИ, 1992 180 с.
76. Garrett James F. and Wiltse James C.// Int. Jnl. of Infrared and Millimeter Waves, vol. 12, No 3, 1991.
77. Leyten L.L., Herben M.H.A.J., Fresnel-zone Plate antenna: a comparison with the parabolic reflector antenna// Micro-wave and Opt. Techn. Letts., v.5, № 2, pp.29-56, 1992.
78. Van Houten J.M., Herben M.H.A.J., A Phase-correcting Fresnel zone plate antenna with dielectric/transparent zones// J. of Electromagn. Waves and Applications, V.8, № 7, pp. 847-858, 1994.
79. Delmas, J.J., Toutain S., Landrac G., Cousin P., Antenna for multisatellite reception using 3D Fresnel principle and utli-layer structure// IEEE Int. Antennas and Propagat. Symp., Ann Arbor, MI, June 28-July 2, 1993., Symp. Digest, pp. 1647-1650.
80. Guo Y.J., Sussi I.H., Barton S.K., Multilayer offset Fresnel zone plate reflector, IEEE Microwave and Opt. Techn. Letts., V. 6, № 13, 1993. pp. 769-774
81. Cousin P, G. Laudrac, S. Toutain, Delmas J.J., Calculation of the focal field distribution and radiation pattern of a parabolic antenna with Fresnel zones // JINA 94, Nice, France. 8 Nov., 1994. Proc. Int. Symp., on Antennas, pp. 489-492.
82. Guo Y.J., Barton S.K., Phase correction zonal reflector incorporating rings// IEEE Trans. Antennas and Propagat., V 43, № 4, Apr., 1995, pp.350-355.

83. Van Houten J.M., Herben M.H.A.J. The elliptical Fresnel zone plate antenna// Int. Conf. Antennas and Propagation. (ICAP), Conf. Publ. No 407/IEEE, pp. 97-100, 1995.
84. Portasat 1.2 m four panel transportable Ku-Band Satellite TV receiving antenna. Leaflet.
85. Hristov D., The multi-dielectric Fresnel zone plate antenna -a new candidate for DBS reception, IEEE AP-S Symp. Digest, v. 1, pp. 746-748, 1996.
86. Van Houten J.H., Herben M.H.A.J., The bandwidth of Fresnel zones plate antennas// J. Electrmagn. Waves and Applications, v. 11, pp. 175-183, 1997.
87. Ji Y., Fujita M., A Cylindrical Fresnel zone antenna, IEEE Trans. Antennas and Propagat., v 44, Sept., 1996, pp.1301-1303
88. Minin I.V., Minin O.V., Russer P. et al. Cost effective production of multidirectional antennas in the mm-wave regime// The final Scientific report of contract № G 005830106 of Daimler Chrysler AG, 1998.
89. Minin I.V., Minin O.V., Non-stability of mm-wave radar imaging of the car in dynamics // Computer Optics, 1999, v. 19, pp. 151-153.
90. Jiang, G.Z., Zhang W.X., The effect of layer spacing on the properties of double layer Fresnel Zone Plate lens, IEEE Int. Symp. Antennas and Propag., V.1, Montreal, Canada, July 13-18, 1997, Symp. Digest, pp.472-475.
91. Минин И.В., Минин О.В. Дифракционные антенны обтекатели на основе элементов дифракционной квазиоптики// Компьютерная оптика. Т.19. 1999. С. 154-158.
92. Hristov H.D., Variety of cylindrical Fresnel zone plate antennas, IEEE Int. Antennas and Propag. Symp., Orlando, FL, July 11-16, Symp. Digest, v 2, 199, pp. 750- 753.
93. Minin I.V., Minin O.V. The dielectric non-metallic reflecting FZP antennas// Proc. of the Int. Conf. of infrared and millimeter waves, Sept. 12-15, 2000, Beijing, China.
94. Wen Xun Zhang, The Optimal Design of Printed Fresnel Zone Plate Structure// Book of Abstracts of the AP-2000 Conf., Ref. 339.

Иллюстрации к работе Минина И.В., Минина О.В.: «Дифракционная квазиоптика СВЧ и миллиметровых волн. Хронология развития»

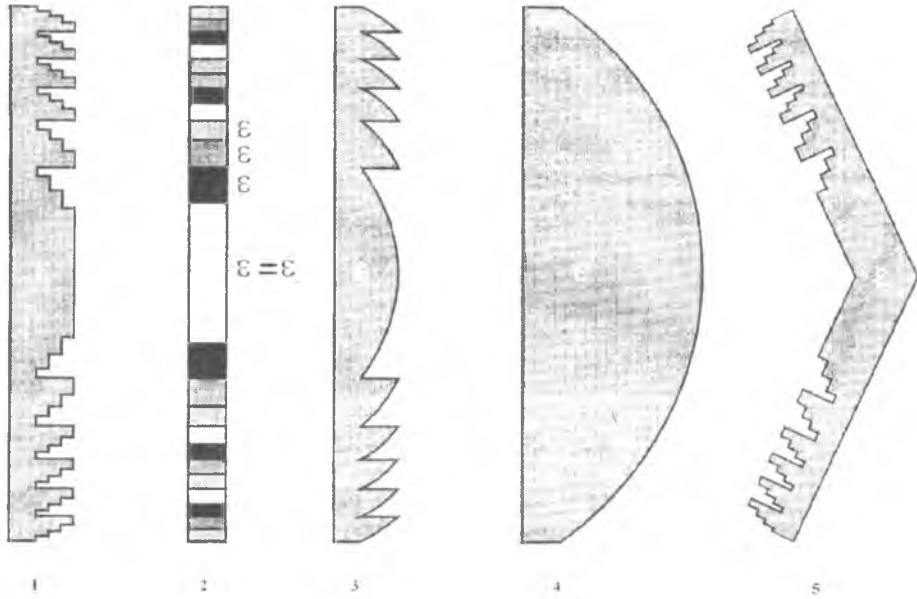


Рис.1. Типы диэлектрических СВЧ линз и антенн:

1 – фазоинверсная зонная пластина, 2 – плоская зонная пластина с кусочно-постоянным распределением показателя преломления по радиусу, 3 – зонированная линза, 4 – диэлектрическая линза, 5 – ЗП на криволинейной поверхности

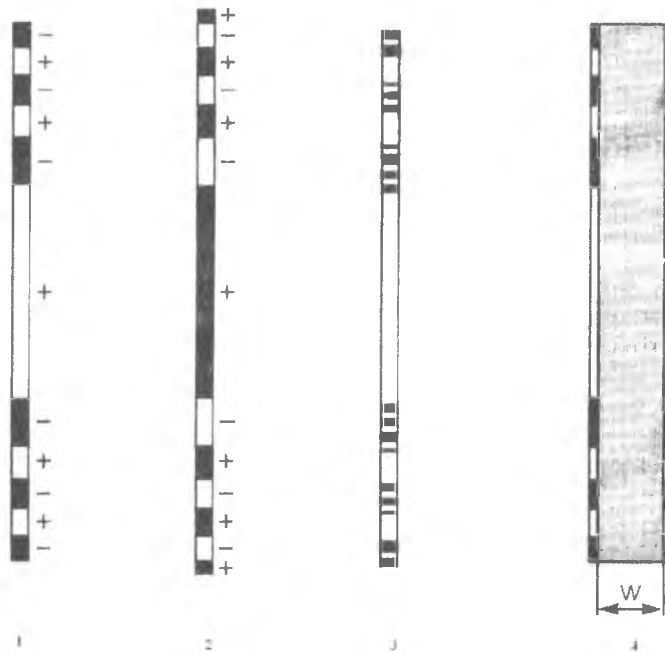


Рис.2. Амплитудные зонные пластины: 1 – положительная, 2 – отрицательная зонные пластины, 3 – поляризационная ЗП, 4 – сэндвич из двух ЗП

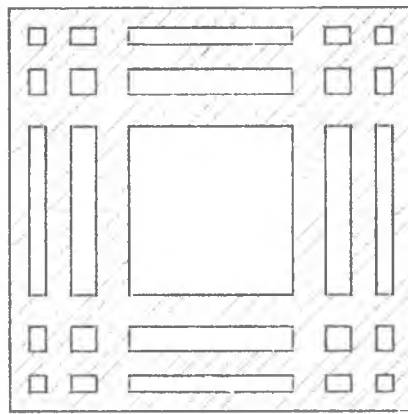


Рис.3. ЗП с прямоугольными зонами

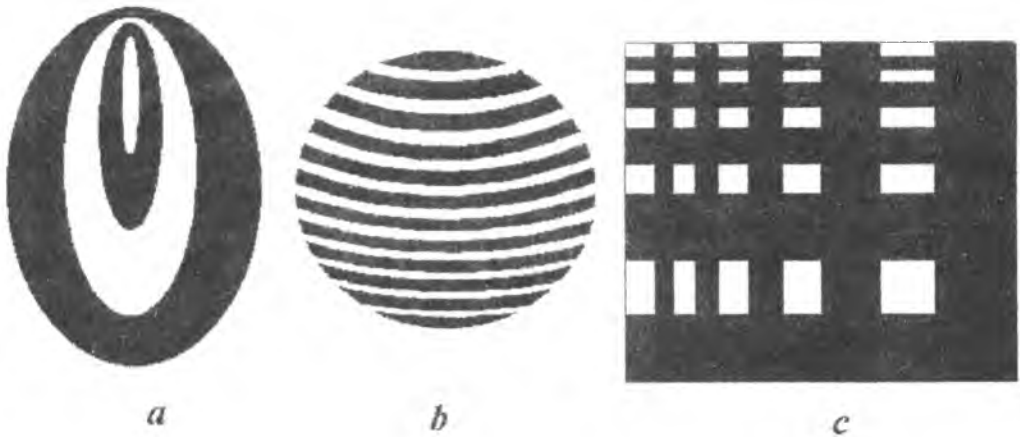


Рис.4. Внеосевые зонные пластины: а – с внеосевым положением фокуса, б – внеосевая ЗП, с – внеосевая ЗП с прямоугольными зонами и «опорным радиусом»

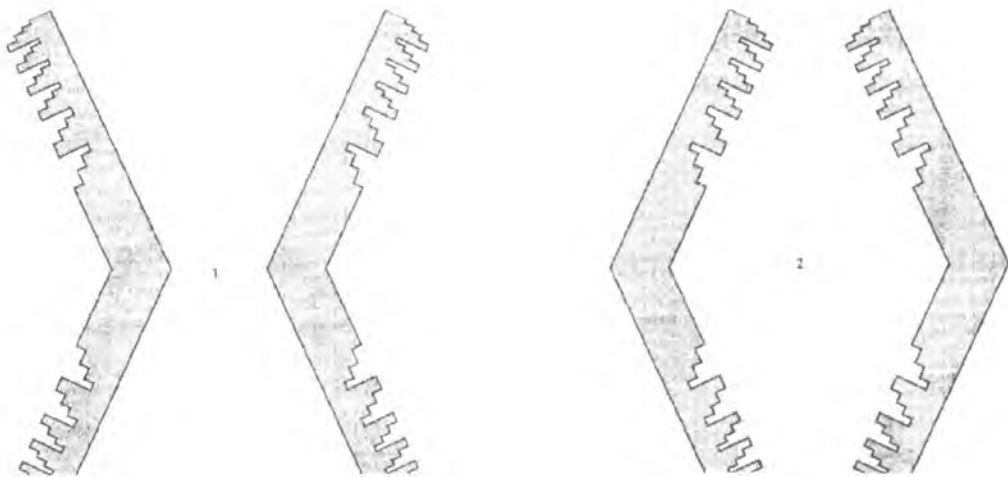


Рис.5. Двухкомпонентные дифракционные радиообъективы на криволинейных поверхностях: 1,2 – различные взаимные ориентации поверхности

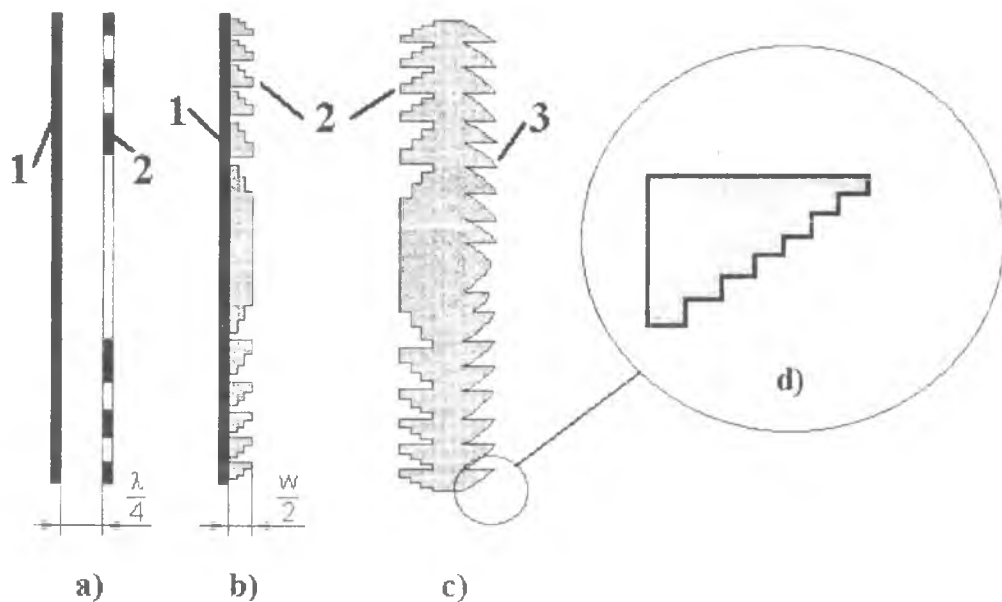


Рис.6. Дифракционные антенны отражающего типа:
 а – на основе амплитудной ЗП и металлического экрана, б – на основе фазоинверсной ЗП и металлического экрана, с – на основе фазоинверсной ЗП и диэлектрической резонансной отражающей структуры (д) эшелетного типа.

1 – металлический экран, 2 – ЗП, 3 – интерференционный диэлектрический отражатель