

В 1865 г. Максвелл предложил свою теорию света. К концу 1888 г. она всесторонне проверена и подтверждена. Полное ее развитие есть не более, как вопрос времени, труда и остроумия. Все владения оптики теперь присоединены к электричеству, которое таким образом сделалось господствующей наукой.

О. Лодж. Современные взгляды на электричество

Квазиоптика: исторические предпосылки и современные тенденции развития

А. А. Костенко

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
Украина, 61085, г. Харьков, ул. академика Прокура, 12
kostenko@ire.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 13 октября 2000 г.

В настоящей работе представлен современный уровень развития квазиоптической техники во всем многообразии вариантов используемых линий передачи. Рассмотрены различные применения квазиоптических систем с учетом особенностей отдельных научных проблем и специфики прикладных задач. Изложение проведено исходя из первых принципов, начиная с пионерских исследований “волн Герца”. Основное внимание уделено работам радиофизиков стран бывшего Советского Союза, которые внесли существенный вклад в разработку квазиоптической техники.

У роботі представлений сучасний рівень розвитку квазіоптичної техніки у всій різноманітності варіантів ліній передачі, що використовуються. Розглянуто застосування квазіоптичних систем з урахуванням особливостей окремих наукових напрямків і специфіки прикладних проблем. Дослідження проведено виходячи з перших принципів, починаючи з піонерських досліджень “хвиль Герца”. Особливу увагу приділено працям радіофізиків країн колишнього Радянського Союзу, котрі зробили істотний внесок у розробку квазіоптичної техніки.

1. Введение

Более чем за вековой период своей истории квазиоптика сформировалась как универсальное научное направление, включающее совокупность методов и средств для изучения процессов распространения, преломления и отражения электромагнитных волн в том случае, когда длина волны мала по сравнению с поперечными размерами рассеивающих или направляющих систем, $\lambda < D$ (в отличие от геометрической оптики, где $\lambda \ll D$, здесь наряду с геометрическими учитываются дифракционные явления). В то же время в научной литературе имеется крайне огра-

ниченное количество работ, в которых все аспекты проблемы представлены в полном объеме, в сопоставимой форме, в динамике развития с учетом особенностей отдельных научных проблем и специфики прикладных задач. Как правило, эти публикации относятся к определенному историческому периоду [1-3], посвящены разработке того или иного направления исследований [4-6] или являются обзорами работ отдельной научной школы [7-10]. В 1998 г. вышла в свет монография [11] с уникальным библиографическим списком, содержащим более 700 наименований. В этой работе наиболее полно систематизирована теория гауссовых волновых пучков, приведены резуль-

таты разработки элементной базы и рассмотрены особенности решения прикладных задач применительно к этому важному, но, тем не менее, не единственному способу канализации электромагнитной энергии и реализации функциональных систем различного назначения. Среди русскоязычной научной литературы первым изданием, посвященным таким вопросам, можно считать изданный в 1966 г. сборник [12], в который вошли избранные доклады на международном симпозиуме по квазиоптике, состоявшемся в 1964 г. в Нью-Йорке. Наиболее исчерпывающая информация о квазиоптических линиях передачи различного типа и принципах построения приборов и устройств, соответствующая уровню развития элементной базы 60-х годов, содержится в монографии [13] (1969 г.). Дополнительные сведения относительно разработок более позднего периода, в частности, на основе полого диэлектрического лучевода и металло-диэлектрических волноводов можно найти в работах [14, 15].

В настоящей работе сделана попытка показать современный уровень развития квазиоптической техники во всем многообразии вариантов применяемых линий передачи и различных ее приложений. Наряду с этим приведен обзор исследований “волн Герца” (так называли опыты по изучению свойств электромагнитных волн последователи Герца), в которых были заложены основные квазиоптические принципы, широко и эффективно используемые в современной СВЧ технике. Объем журнальной публикации не позволяет детально рассмотреть технические характеристики квазиоптических систем различного типа и привести полный обзор литературы в части описания приборов и устройств, но при этом показаны ключевые тенденции исследований и разработок, выделены основополагающие работы и статьи обзорного характера. Из рассмотрения заведомо исключены такие важные проблемы, как разработка СВЧ антенн оптического типа [16-18], открытых резонаторов [19-21] и квазиоптических твердотельных приборов [22], которые в настоящее время определились как самостоятельные научные направления и широко освещены в современной научно-технической литературе.

2. Пионерские исследования “волн Герца” (1888-1900 гг.)

Формирование квазиоптики как научного направления тесно связано с развитием высокочастотной радиотехники и берет свое начало в знаменитых опытах Г. Герца, результаты которых были представлены 13 декабря 1888 г. в докладе

“О лучах электрической силы” на заседании Берлинской академии наук и убедительно доказали единство природы электромагнитных и световых волн [23]. При постановке этих экспериментов Герц стремился к уменьшению геометрических размеров приборов, что позволило ему получить электромагнитное излучение с длиной волны $\lambda = 66$ см и провести исследования, следуя классическим оптическим представлениям. “Мне удалось, – писал он, – получить отчетливые лучи электрической силы и произвести при их помощи все элементарные опыты, которые производятся со световыми и тепловыми лучами”. Для концентрации электромагнитной энергии в виде направленного луча Герц использовал параболическое цилиндрическое зеркало из цинкового листа с размером апертуры 2.0×1.2 м² и фокусным расстоянием 12.5 см (рис. 1). В фокальной линии зеркала был установлен диполь с искровым зазором

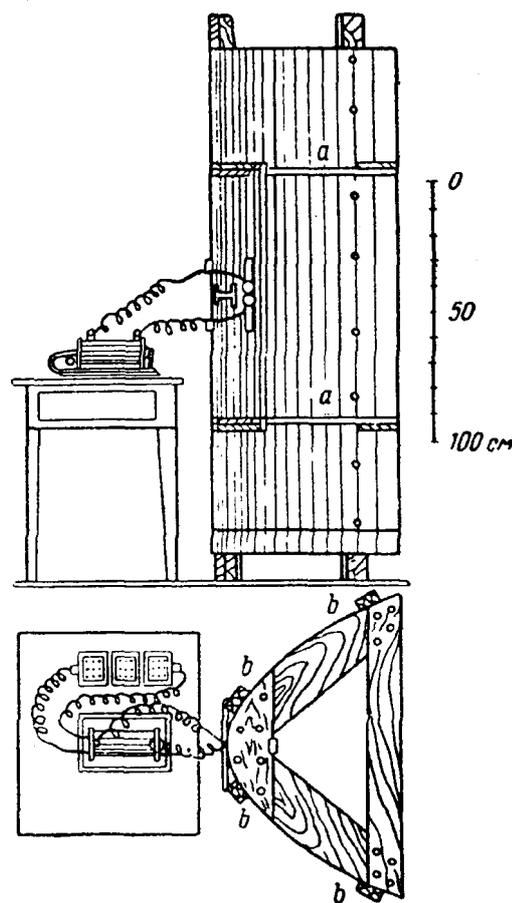


Рис. 1. Параболический рефлектор антенны Герца для опытов на волне $\lambda = 66$ см. Репродукция из работы [23]

для подключения к индукционному устройству типа Кайзера – Шмидта (рис. 2, а). Приемная антенна имела аналогичную конструкцию, а в фокальной линии зеркала был размещен резонатор в виде двух стержней, внутренние концы которых при помощи проволок, проходивших через стенку зеркала наружу, присоединялись к искровому промежутку, регулируемому при помощи микрометрического винта (рис. 2, б). Регистрация электромагнитного излучения осуществлялась за счет вторичного искрового разряда. Экспериментируя с направленными пучками лучей, Герц подтвердил законы прямолинейного распространения, отражения, преломления и исследовал поляризационные явления применительно к электромагнитным волнам, по сути дела, впервые реализовав квазиоптические принципы в высокочастотной радиотехнике. При этом он использовал экраны из станиоля, золотых листочков и деревянных щитов, а максимальное расстояние между антеннами в его опытах составляло 16 м. Для исследования преломления при прохождении луча из одной среды в другую Герц изготовил призму из асфальта массой 1200 кг с сечением в виде равнобедренного треугольника с боковой стороной 1.2 м, высотой 1.5 м, преломляющим углом 30°. Для поляризационных исследований он использовал решетку из медной проволоки (диаметр $2b = 1$ см, период $l = 3$ см), натянутую на деревянную восьмиугольную рамку 2.0×2.0 м².

Эксперименты Герца имели фундаментальное значение и стимулировали развитие исследований оптических свойств электромагнитных волн и их практических приложений. При этом последователи Герца, воспроизводя и развивая его опыты,

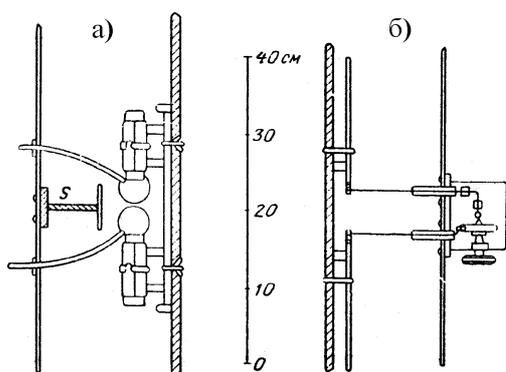


Рис. 2. Конструкции передающего (а) и приемного (б) диполей антенны Герца (Репродукция из работы [23])

стремились к еще большему укорочению длины волны и совершенствованию экспериментальных приборов.

В 1894 г. А. Риги модернизировал диполь Герца, введя вместо одного искрового промежутка три, что позволило ему получить излучение с длиной волны $\lambda = 7.5$ и 20 см [24]. Один из вариантов конструкции подобного осциллятора с параболическим рефлектором показан на рис. 3. Уже в 1895 г. П. Н. Лебедев провел серию опытов с волной $\lambda = 6$ мм [25, 26]. По его словам, “появилась потребность делать его (Герца – А. К.) опыты в небольшом масштабе, более удобном для научных изысканий”, и переход к столь коротким волнам был необходим для формирования и фокусировки “лучей электрической силы”, предназначенных для исследования взаимодействия электромагнитных волн с веществом. Хотя в целом программа исследований Лебедева соответствовала опытам Герца, линейные размеры разработанных им приборов были в сто раз меньше, а их техническая реализация для своего времени являлась уникальной и вызывала восхищение современников. Первичный излучатель явился развитием идеи, предложенной Риги, и состоял из двух платиновых цилиндров длиной 1.3 мм и диаметром 0.5 мм, расположенных в фокусе кругового цилиндрического зеркала размером 2.0×1.2 см². Зеркало было помещено в

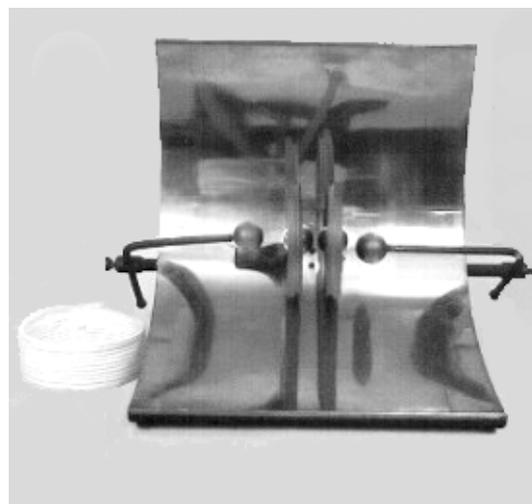


Рис. 3. Конструкция одного из вариантов осциллятора Риги с параболическим рефлектором. (Репродукция со страницы <http://www.df.umbo.it/museo/files/RIGHI.HTM> с любезного разрешения Museo di Fisica, Dipartimento di Fisica, Universita degli Studi di Bologna (Italy))

керосиновую ванну, из которой электромагнитный луч выходил через слюдяное окно. Аналогично была выполнена приемная антенна: в фокусе вторичного зеркала были расположены два прямолинейных резонатора длиной 3 мм, но индикатором служила не вторичная искра, как у Герца, а железо-константановая термопара и чувствительный

гальванометр. В большинстве опытов расстояние между антеннами составляло 10 см. Комплект экспериментальных устройств (рис. 4), разработанных Лебедевым, включал проволочный поляризатор (решетка из 20 тонких проволок, натянутых на четырехугольную рамку размером 2.0×2.0 см²), металлические зеркала 2.0×2.0 см², призму из эбонита (вы-



Рис. 4. Комплект устройств, разработанных Лебедевым для осуществления опытов Герца на волне $\lambda = 6$ мм. (Репродукция из работы [26])

сота 1.8 см, ширина 1.2 см, преломляющий угол 45° , вес 2 г), а также призмы, николь и четвертьволновую фазовую пластинку из двоякопреломляющих кристаллов ромбической серы. Изготовленные Лебедевым приборы позволили ему не только повторить опыты Герца, но также экспериментально наблюдать двойное преломление лучей и продемонстрировали “тождество в явлениях электрических и световых колебаний в этом более сложном случае”. Более того, уменьшая размеры вибратора (длина – 0.8 мм и диаметр – 0.3 мм), Лебедев обнаружил колебания при $\lambda = 3$ мм [27]. В то время это были самые короткие электромагнитные волны, полученные при помощи искрового колебательного разряда. Как писал А. Дюбуа в письме к Лебедеву от 10.10.1899 г., в результате этих работ “Россия становится world’s small wave champion” [28].

В идейном плане эта работа предвосхитила развитие квазиоптических методов формирования полей в виде остронаправленных пучков и их преобразования различными системами на пути освоения миллиметрового диапазона. Лебедев писал [25]: “...короткие волны пригодны для обширных применений, так как здесь с приборами средних размеров, безукоризненными в оптическом отношении, дифракционные явления могут быть вполне отодвинуты на задний план, и незначительные количества исследуемых веществ уже достаточны для точных измерений. Таким образом, те простые условия, к которым мы привыкли при оптических исследованиях, могут быть осуществлены в оптике герцевских колебаний”.

Именно для реализации тех условий, в которых могли быть эффективно осуществлены квазиоптические принципы, исследователи “волн Герца” искали новые методы построения излучающих и детектирующих устройств.

В 1894 г. О. Дж. Лодж впервые предложил излучатель волноводного типа, поместив вибратор в отрезок медной трубы круглого сечения, которая была закрыта с одной стороны и открыта с другой (рис. 5). В своих опытах он использовал электромагнитные волны $\lambda = 7.5$ и 20 см [29]. Аналогичные конструкции на основе волноводов круглого и квадратного сечений были исследованы Дж. Ч. Бозе в 1897 г. в диапазоне $\lambda = 0.5 \div 2.5$ см [4]. В коротковолновой части диапазона волновод был сверхразмерным (поперечный размер порядка 2.5 см), а устранение колебаний высших типов достигалось при помощи поглощающего покрытия на внутренней поверхности трубы в виде промокательной бумаги, пропитанной электролитом. В 1900 г. Дж. А. Флеминг в исследованиях на волне $\lambda = 20$ см [30] предложил излучатель прямоугольного сечения, который можно считать

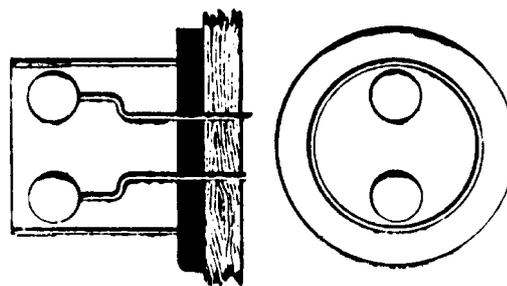


Рис. 5. Конструкция волноводного излучателя Лоджа в виде отрезка медной трубы круглого сечения. (Репродукция из работы [29])

прообразом прямоугольного волновода, а для фокусировки луча применил цилиндрическую линзу из парафина (рис. 6, а). При этом в системах на основе излучателей волноводного типа авторы фактически использовали фильтрующие свойства волновода для подавления низкочастотных составляющих спектра шумового источника излучений.

Возможность сконцентрировать электромагнитную энергию при помощи линз привлекала исследователей как альтернативный вариант зеркальной системы, не всегда удобной в лабораторных усло-

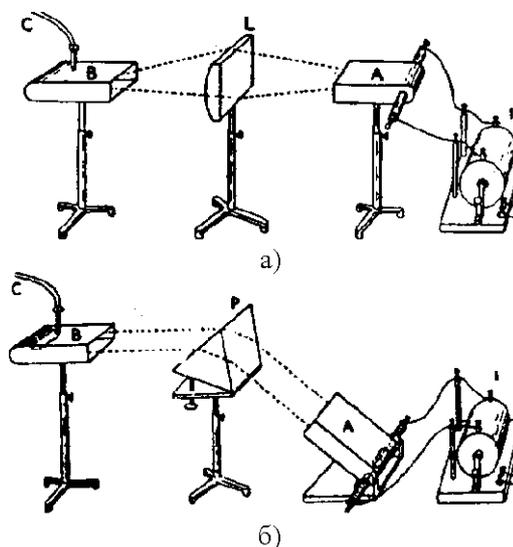


Рис. 6. Экспериментальные устройства Флеминга для исследований на волне $\lambda = 20$ см:

а) конструкция излучателя в виде волновода прямоугольного сечения и цилиндрической фокусирующей линзы;
б) измерительная установка для исследования преломляющих свойств призмы. (Репродукции из работы [30])

виях. Еще в 1889 г. О. Дж. Лодж и Дж. Л. Говард [31] изготовили для этих целей цилиндрические линзы из древесной смолы, однако не смогли добиться достаточной фокусировки луча, т. к. линза имела размеры соизмеримые с длиной волны ($\lambda = 101$ см). В 1894 г. Лодж использовал стеклянную линзу диаметром 23 см ($\lambda = 7.5$ см) и отметил заметный фокусирующий эффект [29]. Еще в большей степени фокусирующее действие линзы проявилось в опытах Риги [32], который экспериментировал с линзами (рис. 7) из парафина и серы диаметром 32 см ($\lambda = 3$ см). В 1897 г. Бозе, осуществляя свои эксперименты в диапазоне длин волн $\lambda = 0.5 \div 2.5$ см [4], разработал ряд квазиоптических устройств, в том числе экранированную линзовую антенну (рис. 8), в которой излучатель и цилиндрическая линза из серы диаметром 25 мм были объединены в единую конструкцию внутри трубы. При этом для устранения нежелательных переотражений он, так же как и в своих волноводных излучателях, применил поглощающее покрытие на внутренней поверхности трубы. Кроме этого, Бозе в качестве приемного устройства впервые использовал пирамидальный волноводный рупор [33].

В 1890 г. Э. Бранли в качестве детектирующего устройства предложил прибор, основанный на изменении проводимости металлических порошков под воздействием электромагнитного излучения. В дальнейшем большинство исследователей использовали различные варианты конструкции подобного устройства, усовершенствованного в 1894 г. Лоджем [29] и названного им “когерером”.



Рис. 7. Линзы, используемые в экспериментах Риги. (Репродукция со страницы <http://www.df.umbo.it/museo/files/RIGHI.HTM> с любезного разрешения Museo di Fisica, Dipartimento di Fisica, Universita degli Studi di Bologna (Italy))

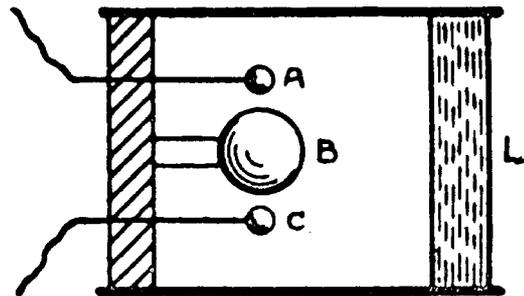


Рис. 8. Конструкция экранированной линзовой антенны Бозе. (Репродукция из работы [4])

Большой вклад в развитие детектирующего элемента внес Бозе. С целью повышения надежности и стабильности работы он модернизировал когерер и вместо металлического порошка использовал спиральную стальную пружину [33]. Такое устройство представляло собой мультиточечный детектор, использующий полупроводниковые свойства естественного оксидного покрытия пружины. Конструкция детектора обеспечивала регулировку чувствительности, что позволило Бозе осуществить достаточно тонкие поляризационные измерения с высокой степенью надежности. Его дальнейшие исследования проводимости различных материалов при воздействии электромагнитного излучения привели к созданию точечно-контактного полупроводникового детектора на основе сульфида свинца. Изобретение Бозе было зарегистрировано в 1901 г. и впоследствии признано первым в мире патентом на полупроводниковый прибор (датирован 29 марта 1904 г. [34]). Это устройство, являясь по своей сути прибором квазиоптического типа, было предназначено для исследований в миллиметровом диапазоне длин волн, что соответствовало общим тенденциям в высокочастотных исследованиях того периода. Точечно-контактный детектор (cat whiskers) был размещен в сферическом корпусе, а электромагнитное излучение поступало на него через стеклянную линзу (рис. 9).

Наряду с работами по созданию новых излучающих и детектирующих устройств был внесен существенный вклад в дальнейшее развитие квазиоптических методов исследований. В частности, Лодж [29] и Флеминг (рис. 6, б) [30] изучили преломляющие свойства призм из парафина. Возможность в больших пределах регулировать величину отношения переданной и отраженной мощностей

№. 705,840. J. C. BOSE. PATENTED MAR. 29, 1904.
DETECTOR FOR ELECTRICAL DISTURBANCES.
APPLICATION FILED SEPT. 20, 1901.
36 MODEL.

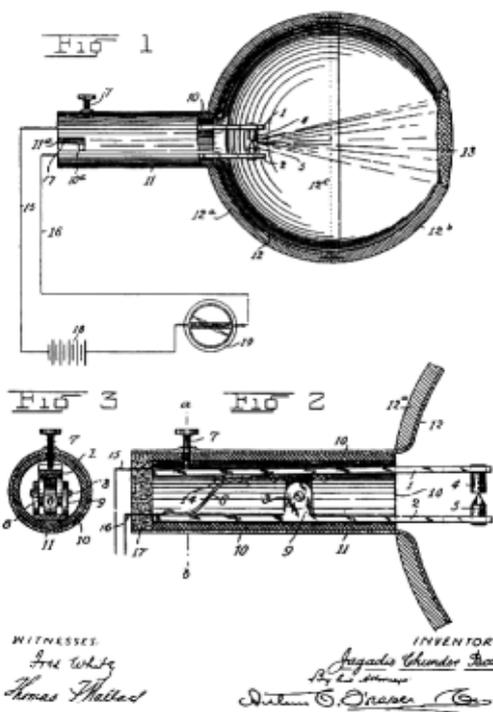


Рис. 9. Точечно-контактный полупроводниковый детектор Бозе. (Репродукция из работы [34])

при изменении расстояния между гранями двух диэлектрических призм (рис. 10) была впервые отмечена Бозе, а использование этого свойства позволило ему реализовать оригинальную конструкцию аттенюатора [4]. Важным этапом было создание поляриметрических и интерферометрических систем на базе уже известных устройств. При помощи интерферометра, осуществленного в 1897 г. Дж. Ф. Халлом, были проведены измерения длины волны ($\lambda = 9.12$ см) с погрешностью менее 1% [35]. Бозе разработал спектрометр (рис. 11), включающий комплект квазиоптических устройств [33] для диапазона длин волн $\lambda = 0.5 \div 2.5$ см. Кроме того, он создал ряд поляриметрических систем [36], где в качестве поляризаторов наряду с проволочной дифракционной решеткой использовал металло-пластинчатую структуру (рис. 12), период которой был выбран таким образом, чтобы обеспечить предельный режим для основного типа колебаний в системе волноводного типа.

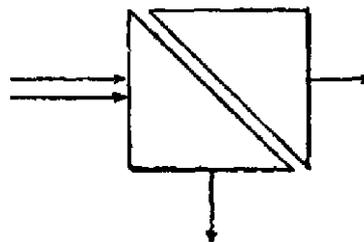


Рис. 10. Схема аттенюатора Бозе на основе двух призм с регулируемым зазором между гранями. (Репродукция из работы [4])

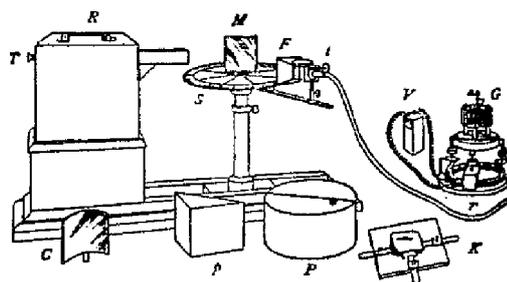


Рис. 11. Спектрометр Бозе, предназначенный для исследований в диапазоне волн $\lambda = 0.5 \div 2.5$ см. (Репродукция из работы [4])

Успехи, достигнутые на рубеже XIX и XX столетий в исследованиях “волн Герца”, а также широкие функциональные возможности разработанной квазиоптической аппаратуры привели к созданию принципиально новых методов изучения живой и неживой материи. Комплект измерительных устройств, разработанных Бозе, был применен им для поляризационных исследований мно-

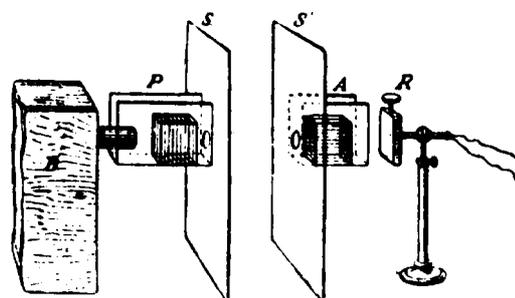


Рис. 12. Металло-пластинчатый поляризатор Бозе. (Репродукция из работы [36])

гих естественных материалов и искусственных сред, включая различные кристаллы и растительные волокна [36], а также для осуществления первых экспериментов по микроволновому моделированию молекул оптически активных веществ [37]. Риги изготовил четвертьволновую секцию [32], используя поляризационно-избирательные свойства растительных волокон. А. Гарбассо и Е. Ашкинас в 1894 г. реализовали поляризационно-селективное зеркало в виде решетки диполей, а также призму, состоящую из системы дисперсионных диполей ($\lambda = 7.5$ см) [38], которую можно считать первой структурой, выполненной из искусственного диэлектрика. В 1894 г. М. Беркленд изготовил “синтетические” материалы, в частности, “ферро-парафин”, состоящий из опилок чугуна или чугушной пудры, смешанных вместе с порошком кварца в парафине [39]. На различных частотах были исследованы свойства воды (Флеминг [30], Коул [40]), спиртов, касторового и оливкового масел, бензина и др. веществ (Бранли [41]).

Имея важное фундаментальное значение, исследования “волн Герца” вместе с тем послужили основой для практических работ А. С. Попова (1895 г.) и Г. Маркони (1896 г.) в области беспроводной радиотелеграфии. Характерно, что в ранних исследованиях Маркони под влиянием работ своего соотечественника Риги исходил из квазиоптических представлений и в первых опытах по радиотелеграфии на волне длиной 25 см для формирования направленного излучения использовал зеркальную антенную систему. Антенна его конструкции, выполненная в виде параболического цилиндра (рис. 13) [42], позволила достигнуть дальности передачи 6.5 км.

Однако несмотря на столь яркие и многообещающие результаты, характерные для начального периода развития высокочастотной радиотехники (1888–1900 гг.), в последующие годы в области освоения высокочастотных диапазонов, а также в разработке техники и методов исследований с использованием квазиоптических принципов наблюдался заметный спад. В первую очередь это объясняется тем, что искровые методы возбуждения затухающих колебаний исчерпали свои возможности как на пути дальнейшего укорочения длины волны, так и в плане развития высокочастотных методов исследований материи. В частности, Лебедев предвидел, что в этом смысле создание монохроматических генераторов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов будет представлять основную и наиболее сложную проблему [27]: “...для получения колебаний, заключающихся между $\lambda = 3$ мм и $\lambda = 0.1$ мм нам необходимо найти

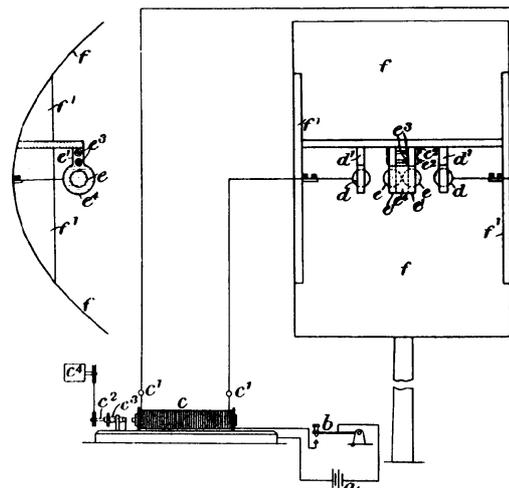


Рис. 13. Антенна Маркони с параболическим зеркальным рефлектором. (Репродукция из работы [42])

новый источник. Измерять длины этих более коротких волн интерференцией и наблюдать их термозащитой не составит трудности, но получать их известными уже приемами вряд ли возможно; вибратору и резонатору нужно было бы дать размеры, по сравнению с которыми самые тонкие произведения часовщика или ювелира – только неуклюжие металлические массы; количество энергии, которое в виде заряда можно запасти на таком микроскопическом вибраторе, неуловимо мало; сверх всего этого является совершенно неизвестным, возможны ли образования колебаний при искровом разряде таких ничтожных зарядов. Сейчас мы не имеем возможности предвидеть, как удастся разрешить это затруднение; во всяком случае тут встретятся значительные затруднения, и способ получения еще более коротких волн будет очень крупным шагом вперед в области экспериментальной физики.”

С другой стороны, впечатляющие успехи, достигнутые в увеличении дальности радиосвязи при переходе к более длинным волнам (уже в 1901 г. Маркони удалось осуществить радиопередачу из Европы в Америку через Атлантику на расстояние свыше 3500 км), существенно ослабили интерес к исследованиям в сверхвысокочастотном диапазоне и в то же время стимулировали исследования в области коротких, средних и длинных волн. Тем не менее, некоторые исследователи продолжали реализовывать квазиоптические подходы в различных работах. При этом разрабатывались такие системы, размеры которых в низкочастотных диапазонах соответствовали условию $D/\lambda > 1$. В пер-

вую очередь это относится к созданию зеркальных антенн [16], в том числе для формирования остро-направленного излучения в радиотелескопах [17].

3. Передача электромагнитной энергии из передающей антенны в приемную в виде направленного пучка

Широкомасштабное освоение сверхвысококачественного диапазона возобновилось только в 30-е годы, когда были разработаны монохроматические источники колебаний и чувствительные приемно-усилительные устройства. Решающим фактором было создание полых металлических волноводов и функциональных устройств на их основе. По мере продвижения волноводной техники в направлении укорочения длины волны одновременно совершенствовалась технология изготовления волноводных узлов, создавались новые материалы, разрабатывались методы измерений и необходимая измерительная аппаратура.

На рубеже 50-х и 60-х годов были освоены дециметровый, сантиметровый и частично миллиметровый диапазоны волн, а в научном и технологическом аспектах была подготовлена почва для разработки устройств и систем коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн. Здесь квазиоптические принципы оказались весьма плодотворными и открывали широкие возможности для создания адекватной элементной базы. В эти годы был осуществлен прорыв в разработке квазиоптических методов передачи и преобразования электромагнитных волн, а квазиоптика сформировалась как важное и эффективное направление радиофизических исследований и разнообразных приложений.

Как было отмечено выше, идея передачи электромагнитной энергии из передающей в приемную антенну направленным волновым пучком была апробирована еще в первых опытах исследователей "волн Герца". Естественно, что подобная система, как наиболее простая и легко реализуемая, в дальнейшем была развита, исследована и использована для различных применений еще до появления квазиоптических линий передачи других типов. Для теоретического анализа полей излучения в такой системе обычно эффективно применяется метод Гюйгенса-Кирхгофа, в соответствии с которым в дифракционном поле выделяют три зоны – ближнюю, промежуточную (зону дифракции Френеля) и дальнюю. Если в дальней зоне, т. е. на расстоянии $R > 2D^2/\lambda$, электромагнитное поле сформировано в виде сферической волны, то в

ближней и промежуточной зонах оно имеет вид лучевой трубки. В этой области за счет квадратичной коррекции в апертурном распределении фазы можно добиться фокусировки антенны и осуществить направленную передачу энергии на приемную антенну. Эффективность фокусировки в такой системе определяется относительным размером раскрытия антенны и ее фокусным расстоянием. Наряду с методом Гюйгенса-Кирхгофа, для изучения поля излучения было предложено [43] и в дальнейшем развито [44] его представление в виде суперпозиции плоских волн, распространяющихся в различных направлениях. При этом было введено понятие углового спектра как функции амплитуды и фазы волн в зависимости от направления их распространения, который представляет собой Фурье-преобразование распределения поля в плоскости апертуры. Для определения мощности падающей на приемную антенну неплоской волны было найдено простое и удобное для инженерных расчетов соотношение [45], основанное на лемме Лоренца и полученное для антенн с большим раскрытием, т. е. с допущениями, эквивалентными приближению Кирхгофа. Это выражение оказалось эффективным для расчета потерь не только при передаче мощности от передающей антенны в приемную [46], но и при включении в систему элементов и устройств, в той или иной степени искажающих амплитудно-фазовое распределение исходного волнового поля [47].

3.1. Квазиоптические приборы и устройства открытого типа

Для открытых систем, в которых передача электромагнитной энергии между приемной и передающей антеннами осуществляется сфокусированным пучком, был реализован целый ряд устройств, способных решать самые разнообразные функциональные задачи. Система двух призм с регулируемым зазором между гранями [4] в дальнейшем использовалась при построении таких устройств, как направленный ответвитель, поглощающий аттенуатор, измеритель коэффициента стоячей волны, преобразователь поляризации и др. [5, 6, 48]. Другим элементом, нашедшим самое широкое применение в квазиоптической технике, является делитель на основе полупрозрачной диэлектрической пластины, расположенной под углом относительно направления распространения. В частности, такое устройство было взято за основу при реализации пассивного антенного переключателя [48].

Важным этапом в подобных разработках стало использование искусственных диэлектриков и пе-

риодических структур различного типа, уникальные свойства которых обеспечили создание целого ряда квазиоптических устройств и систем. Было разработано большое количество самых разнообразных искусственных сред, которые можно подразделить на структуры из препятствий и структуры волноводного типа [5, 6]. В частности, волноводная структура в виде набора эквидистантных металлических пластин широко использовалась при создании поляризаторов, поляризационно-селективных отражателей, преобразователей поляризации и др. На основе подобной структуры были реализованы пассивные антенные переключатели с круговой поляризацией [48, 49]; лабораторный макет одного из вариантов ($\lambda = 8.5$ мм) показан на рис. 14. Существенную роль при создании квазиоптической техники сыграло применение дифракционных решеток различного типа как эффективных поляризационных элементов. Теоретические работы, посвященные прохождению электромагнитных волн через подобные структуры, имеют давнюю историю [50] и проводились многими исследователями в течение длительного периода. Следует выделить работу [51], где методом возмущений были найдены аналитические решения для коэффициентов отражения и прохождения проволочных дифракционных решеток в случае $2a \gg \lambda \gg l > 2b$ (где $2a$ – внешний размер решетки, $2b$ – диаметр проволоки, l – период решетки). Впоследствии эти выражения были уточнены и получены для широкого класса дифракционных структур, в том числе для ленточных решеток [52, 53]. Найденные соотношения обеспечивают высокую степень достоверности для гео-



Рис. 14. Антенный переключатель открытого типа для работы в режиме круговой поляризации ($\lambda = 5$ мм). (Репродукция из работы [48])

метрии решеток, типичной в квазиоптической технике и позволили исследовать электродинамические свойства в сопоставлении с экспериментальными исследованиями [54]. Сравнительный анализ решеток различного типа, проведенный на основе обзора экспериментальных результатов, представлен в работе [55]. Промышленный выпуск проволочных решеток, освоенный в широком диапазоне геометрических параметров ($2b = (8 \div 20) \cdot 10^{-6}$ м, $l = (20 \div 400) \cdot 10^{-6}$ м и $2a = 40 \div 100$ мм), способствовал созданию в Физическом институте имени П. Н. Лебедева АН СССР (впоследствии ФИ РАН, Москва) квазиоптической измерительной аппаратуры субмиллиметрового диапазона открытого типа [8]: поляризатора (рис. 15), интерферометра Фабри-Перо, аттенуатора, вращателя плоскости поляризации, калиброванного волномера и др.

3.2. Лабораторные измерительные установки открытого типа

Линии передачи электромагнитной энергии между приемной и передающей антеннами в виде направленного излучения уже в 50-60-е годы были

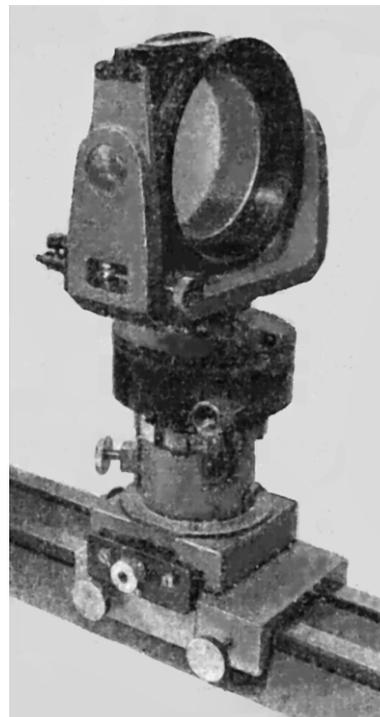


Рис. 15. Поляризатор миллиметрового диапазона на основе проволочной дифракционной решетки. (Репродукция из работы [8])

реализованы в таких лабораторных измерительных приборах, как спектрометры и интерферометры [56-61], измерительная часть которых представляла собой квазиоптический узел открытого типа. В этот период наряду с созданием устройств сантиметрового диапазона [56, 57] более активно разрабатываются аналогичные установки в миллиметровом диапазоне волн [58-61], для которых характерно использование принципов, хорошо известных в оптике, с учетом особенностей и уровня технологий соответствующей элементной базы. Фотография интерферометра Майкельсона, обеспечивающего измерения характеристик диэлектриков в диапазоне частот $100 \div 300$ ГГц [61], который был реализован в 1961 г. Ф. Собелом, приведена на рис. 16.

В дальнейшем подобные системы нашли широкое применение как лабораторные измерительные комплексы. В частности, в ЛОВ-радиоспектрометре, осуществленном в ФИ РАН и предназначенном для исследования твердых тел в диапазоне длин волн $\lambda = 0.5 \div 2.5$ мм при температуре жидкого гелия, параксиальный поляризованный волновой пучок при помощи системы зеркал вводился в гелиевый криостат через тефлоновое окно [62]. Работы в области ЛОВ-радиоспектроскопии на основе открытых квазиоптических систем получили развитие в Институте общей физики АН СССР (впоследствии ИОФ РАН, Москва).

Примером удачного использования открытой линии передачи является также четырехканальный интерферометр, разработанный для экспериментальной термоядерной установки Токамак ТФР на основе HCN лазера ($\lambda = 0.337$ мм) [63].

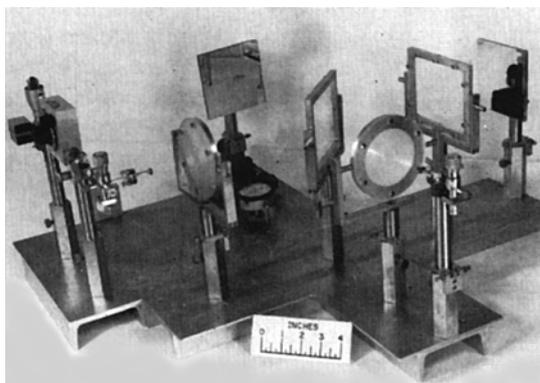


Рис. 16. Интерферометр Майкельсона открытого типа для исследования характеристик диэлектриков в диапазоне частот $f=100 \div 300$ ГГц. (Репродукция из работы [61])

3.3. Передача СВЧ энергии на расстояние

Формирование направленного излучения при помощи фокусирующей антенной системы также использовалось или предполагалось использовать при передаче СВЧ энергии. Эта идея впервые была высказана в 1899 г. Н. Тесла и на многие годы предвосхитила развитие СВЧ энергетики. В 1945 г. С. И. Тетельбаум впервые рассмотрел энергетическую эффективность такой линии для беспроводной электропередачи [64], а возможности ее реализации в дальнейшем прорабатывались многими авторами [65, 66]. Известны грандиозные проекты создания солнечных электростанций, расположенных на космических платформах и передающих энергию на Землю при помощи направленного СВЧ излучения [67, 68], а также проекты использования подобного луча для питания двигательных установок космических объектов [69]. В частности, система передачи СВЧ энергии [69] должна обеспечивать работу СВЧ двигателя одной из ступеней ракеты при выводе космического корабля на лунную орбиту. Наземная антенна представляет собой решетку из 1000 отдельных параболических антенн ($\lambda = 3$ см, диаметр 10 м), а бортовая антенна в развернутом состоянии образует параболоид диаметром 100 м (рис. 17). Предполагается, что приемная антенна этой системы должна получать более 30 % излучаемой мощности при расстоянии между приемной и передающей антеннами до 1000 км. Однако осуществления таких сложнейших масштабных проектов трудно ожидать в ближайшем будущем. В то же время решение более частных и локальных задач по передаче энергии на расстояние в виде направленного пучка представляется реальным и уже реализовано в ряде экспериментов. В 1964 г. был продемонстрирован вертолет с электромотором, который продержался на высоте 17 м в течение 10 часов, потребляя только энергию в виде СВЧ пучка [70]. Это явилось первой демонстрацией подобной линии передачи энергии, а в 1975 г. был проведен полигонный эксперимент по передаче СВЧ энергии на расстояние в одну морскую милю (1.6 км) [68].

3.4. Квазиоптические тракты питания антенных систем

Аналогичный подход был реализован при разработке устройств питания радиорелейных линий и антенн наземных станций спутниковых линий связи [46, 71]. Передача энергии в виде сфокусированного луча от стационарного приемно-передающего устройства к основной антенне, расположенной на большой высоте, позволила исключить длинный тракт питания с дополнительными потерями и обеспечить высокие параметры устройства в широкой

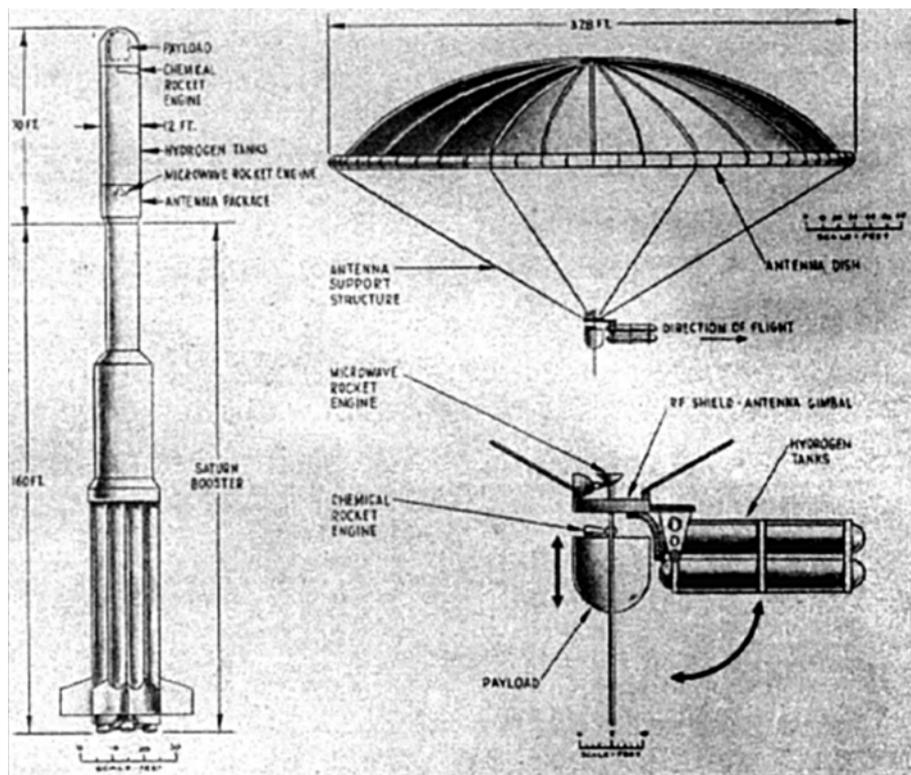


Рис. 17. Параболическая бортовая антенна СВЧ двигателя ракеты, предназначенной для вывода космического корабля на лунную орбиту (проект). (Репродукция из работы [69])

полосе частот. При этом наряду с линией передачи в виде двух взаимно сфокусированных зеркальных антенн (рис. 18, а), широкое распространение получили перископические системы, в которых антенные системы представляют собой различные комбинации параболических и плоских зеркал (рис. 18, б). Подобные комбинированные зеркала использовались также при создании лабораторных измерительных стендов квазиоптического типа [13].

Рассмотренные принципы, заложенные в основу работы элементов и приборов для систем, образованных передающей и приемной апертурами, оказались типичными и общими для большинства других квазиоптических линий передачи и в дальнейшем были воплощены во многих вариантах устройств различного назначения.

Тем не менее, следует отметить, что суммарная длина тракта, образованного передающей и приемной апертурами, не может превышать значения, характеризующегося величиной зоны Френеля, что в некоторых случаях ограничивает возможность применения подобных систем.

4. Металлические сверхразмерные волноводы

В указанном смысле представляют интерес металлические волноводы с существенно увеличенными размерами внутренних сечений, или сверхразмерные волноводы (СРВ), в которых погонное затухание значительно ниже, чем в стандартном волноводе, однако возможно возбуждение и распространение колебаний высших типов. Такие линии передачи оказались весьма эффективными и использовались для построения различных систем и устройств как базовые. При этом были развиты квазиоптические подходы для расчета различных неоднородностей в СРВ [72-76], а анализ таких элементов тракта, проведенный строгими методами [77], показал применимость этих методов при поперечных размерах волновода $D/\lambda > 5$.

4.1. Волновод круглого сечения с волной H_{01}

Симметричная магнитная волна в круглом металлическом волноводе обладает удивительным свойством – коэффициент затухания такой волны

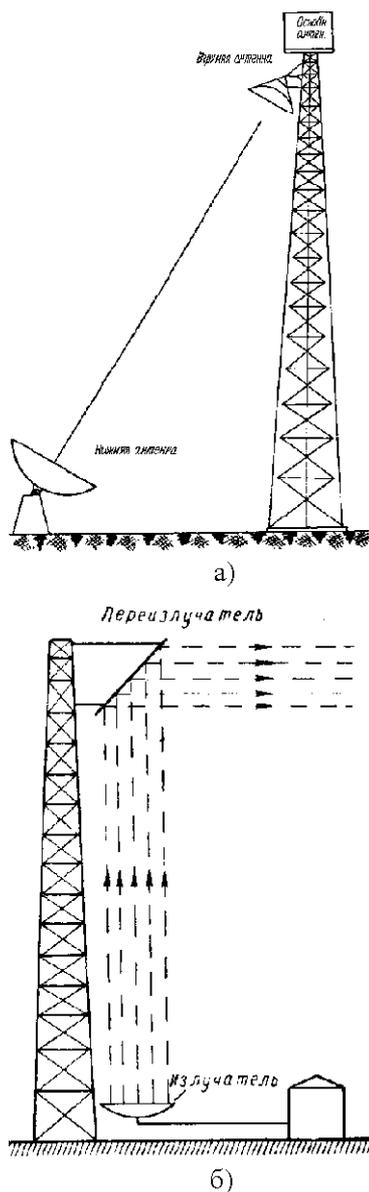


Рис. 18. Беспроводные линии передачи энергии в виде двух сфокусированных зеркальных антенн (а) и перископического типа (б). (Репродукции из работ [46,71])

уменьшается, стремясь к нулю при увеличении площади поперечного сечения, значительно быстрее, чем для других волн. Это объясняется тем, что волна H_{01} не возбуждает в металлических стенках токов, текущих в направлении ее распространения, что отличает ее от всех других типов колебаний, существующих в таких волноводах. Указанное обстоятельство в 50-е и 60-е годы вызвало повышенный интерес к СВВ круглого сечения с волной H_{01} , связанный с возможностью создания многока-

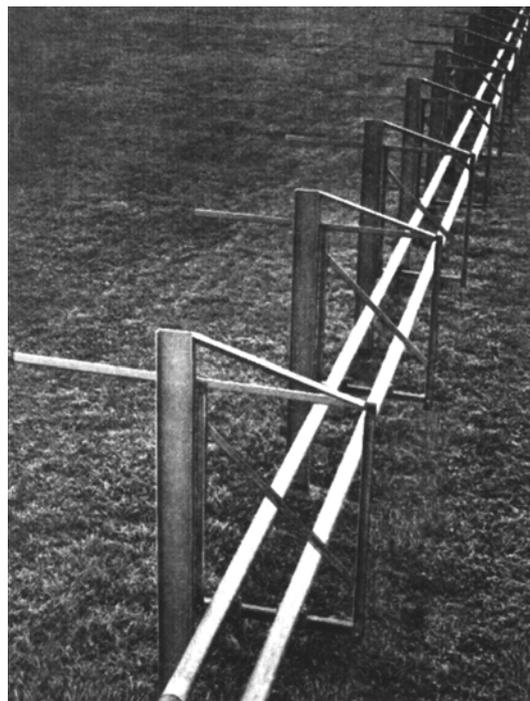


Рис. 19. Экспериментальная линия передачи энергии на основе круглого сверхразмерного волновода с волной H_{01} ($f = 9$ ГГц). (Репродукция из работы [78])

нальной линии связи на дальние расстояния. В этот период были проведены широкомасштабные исследования физических свойств таких волноводов, осуществлены разработка функциональных устройств на их основе, а также опыты по реализации экспериментальных волноводных линий. В частности, в работе [78] приведены результаты целого комплекса исследований фирмы "Bell Telephone" по изучению волны H_{01} в круглом волноводе и передаче энергии по экспериментальной линии (длина 152 м, диаметр 127 мм, рабочая частота 9 ГГц), показанной на рис. 19, а в сборнике статей [79] наиболее полно отражены все стороны проблемы (в том числе исследования в миллиметровом диапазоне). Целый ряд вопросов, связанных с особенностями практической реализации таких волноводов при наличии изломов и изгибов, приведен в работе [80]. Однако в дальнейшем проблема использования СВВ круглого сечения с волной H_{01} в качестве линии связи была исчерпана в связи с появлением волоконно-оптических средств, решающих задачу создания магистральных линий связи на принципиально новом технологическом уровне. Следует также отметить, что реализация большинства устройств на основе круглого волновода

с волной H_{01} сводится к преобразованию основного типа колебаний в волну H_{01} прямоугольного волновода, осуществлению соответствующих функций с использованием техники на основе прямоугольного волновода и обратного преобразования в волну H_{01} круглого волновода. В то же время устройства возбуждения волны H_{01} отличаются большими габаритами, сложной конфигурацией и достаточно большими потерями, в связи с чем круглый СВВ с колебаниями типа H_{01} не нашел широкого применения в многофункциональных системах. По этой же причине не получили дальнейшего развития идеи передачи СВЧ энергии по круглым подземным волноводам большого диаметра ($1 \div 2$ м) на волне H_{01} [68].

4.2. Волновод прямоугольного сечения с волной H_{10}

Для СВВ прямоугольного сечения с волной H_{10} характерно использование в качестве базовой линии передачи стандартных волноводов с более чем десятикратным увеличением поперечных размеров относительно одномодового режима [81]. В частности, использование волновода 3-см диапазона WG-16 (сечение 22.86×10.16 мм²) на длине волны 2 мм приводит к уменьшению затухания в 20 раз и составляет 0.23 дБ/м [82], а для волновода сечением 7.2×3.4 мм² в диапазоне длин волн $\lambda = 0.8 \div 0.9$ мм погонные потери составляют 1.4 дБ/м [83].

Были подробно исследованы свойства СВВ прямоугольного сечения, в том числе особенности его возбуждения [84], и показано, что если линейный плавный переход от волновода стандартного сечения (одномодовый режим) к волноводу повышенного сечения должен иметь длину не менее 50λ , то использование возбуждателей с более сложной формой позволяет уменьшить это значение до $(5 \div 10)\lambda$. При разработке устройств для СВВ необходимо учитывать возможность распространения колебаний высших типов, в связи с чем применение неоднородных в поперечном сечении элементов не представляется возможным. В работе [85] описаны устройства на основе стандартного 3-см волновода, используемые в диапазоне длин волн $0.5 \div 8$ мм, в том числе пирамидальные переходы, детекторная секция, крестообразный делитель на основе полупрозрачной пластины, фазовращатель, эталонный и поглощающий аттенюаторы и интерферометр Маха-Цендера. Для волновода сечением 7.2×3.6 мм² были изготовлены направленный ответвитель (рис. 20), регулируемый аттенюатор и фазовращатель с переменным фазовым сдвигом, выполненные на основе делителя с двойной

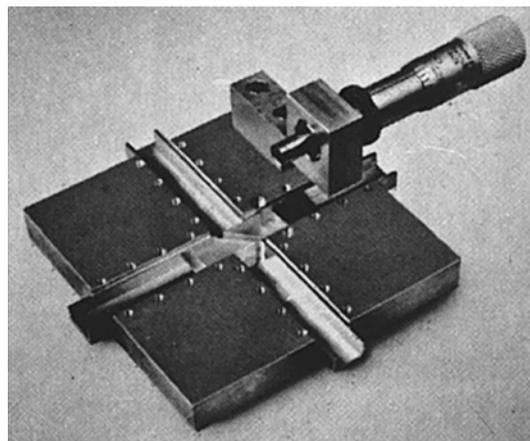


Рис. 20. Направленный ответвитель на основе прямоугольного сверхразмерного волновода с волной H_{10} сечением 7.2×3.6 мм² ($f = 345$ ГГц). (Репродукция из работы [86])

призмой, а также фильтры на основе пакетов диэлектрических пластин [85, 86], предназначенные для работы на частоте 345 ГГц. Аналогичные разработки представлены в публикации [87]. Исследованные в работе [82] 90° -изгибы СВВ прямоугольного сечения в виде сочленения двух перпендикулярных волноводов, в пересечении которых устанавливается плоское отражающее зеркало, использованы при создании переключателя каналов. Различные комбинации многогранных отражателей позволили реализовать фазовращатели и балансные схемы [82, 87]. СВВ прямоугольного сечения использовался как базовая линия передачи в различных системах миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, разработанных в Научно-исследовательском радиофизическом институте при Горьковском университете (НИРФИ), а затем в Институте прикладной физики АН СССР (в настоящее время ИПФ РАН, Нижний Новгород). В частности, был разработан интерферометр [88] на основе СВВ сечением 23×10 мм² для диапазона длин волн $1 \div 4$ мм. Основным узлом интерферометра является крестообразное разветвление, в пересечении осей которого установлен отражатель в виде металлического куба для деления на две равных части волны, падающей со стороны каждого плеча. Использованию интерферометров Маха-Цендера, выполненных на основе сверхразмерных волноводов сечением 23×10 мм² и 11×5.5 мм² в супергетеродинных радиометрах для диапазонов длин волн $1.1 \div 1.6$ мм и $0.8 \div 1.0$ мм посвящена работа [89].

4.3. Волновод круглого сечения с волной H_{11}

По своим характеристикам СВВ круглого сечения с волной H_{11} сравним с СВВ прямоугольного сечения с волной H_{10} и также используется при построении антенно-фидерных систем миллиметрового диапазона [90]. Исследования показали, что затухание в таком волноводе может быть достаточно низким и, в частности, в 3-мм диапазоне волн при диаметре волновода 24 мм не превышает 0.1 дБ/м [91], а в качестве возбудителей могут быть использованы плавные переходы как с линейной, так и нелинейной формой образующей. При этом необходимо иметь в виду, что для несимметричных типов колебаний в волноводе круглого сечения возможно поляризационное вырождение и при наличии неоднородностей в волноводном канале (например, отрезок с незначительной эллиптичностью) происходит преобразование волны H_{11} в волны высших типов и возбуждение волны H_{11} с ортогональной поляризацией. В работе [80] рассмотрены условия, при которых преобразование типов волн в СВВ круглого сечения с волной H_{11} может быть сведено к минимуму, и показано, что наряду с технологическими требованиями минимальной деформации стенок волновода важно обеспечить минимальную длину отрезка волновода с неоднородностью, где осуществляется передача энергии между типами волн. По этой причине применение подобных систем в случае протяженных участков тракта из-за конструктивных сложностей не представляется возможным. В то же время в тех случаях, когда длина тракта с учетом полного набора всех элементов удовлетворяет требованиям, сформулированным в работе [80], СВВ круглого сечения с волной H_{11} может быть использован в системах различного назначения.

Именно эта концепция была реализована в Институте радиофизики и электроники АН УССР (в настоящее время ИРЭ им. А. Я. Усикова НАНУ, Харьков) при построении целого ряда антенно-фидерных трактов двухмиллиметрового диапазона для систем с импульсным и непрерывным излучением [92, 93]. В этих системах в качестве облучателя антенны использовался открытый конец СВВ, что исключает возможность возникновения резонансных явлений на паразитных типах колебаний [94]. При этом наряду с элементами общего применения (делители, преобразователи поляризации и т. д.) были разработаны устройства специального назначения (облучатели зеркальных антенн, сканирующие устройства, вращающиеся сочленения, антенные переключатели различного типа и т. д.). В частности, для приема-передающей системы на основе СВВ круглого сечения диаметром 20 мм с

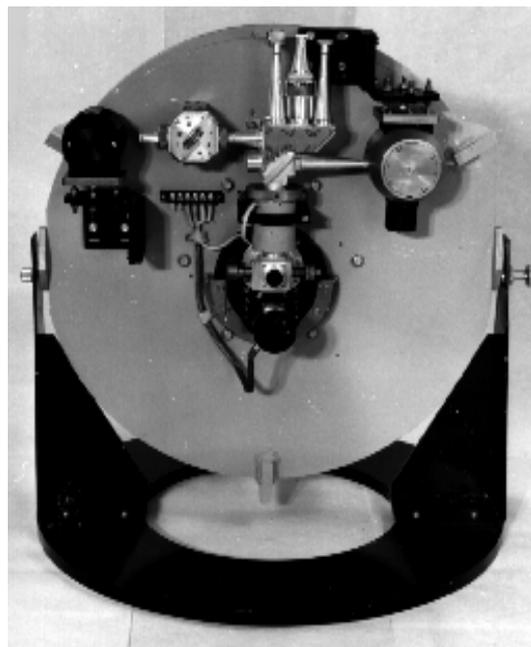


Рис. 21. Тракт одноантенного приемно-передающего устройства 2-мм диапазона, выполненный на основе круглого сверхразмерного волновода диаметром 20 мм с волной H_{11}

волной H_{11} был разработан и исследован в 2-мм диапазоне волн ферритовый антенный переключатель [95]. Особенностью устройства является использование метода согласования [96, 97] с применением многослойных ферритовых структур, выполненных в виде гиротропных резонаторов Фабри-Перо, что позволило достигнуть высоких параметров приемно-передающей системы в целом. Общий вид тракта, размещенного с тыльной стороны двузеркальной антенны, приведен на рис. 21. Большинство функциональных элементов выполнено в виде единой малогабаритной конструкции, что исключает применение фланцевых соединений, укорачивает суммарную длину устройства и чрезвычайно важно при создании подобных систем. В работе [95] также рассмотрены возможности реализации антенного переключателя оптоэлектронного типа, в котором коммутация каналов осуществляется при помощи полупроводникового лазера, световой импульс которого поступает на полупроводниковую пластину, установленную в диагональном сечении крестообразного разветвления СВВ.

Существенным недостатком, присущим металлическим СВВ, является отсутствие свойства самофильтрации для волн высших типов, что в некоторых случаях требует принятия специальных мер.

5. Лучевые волноводы

С точки зрения построения канализирующей системы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов чрезвычайно продуктивной оказалась идея передачи электромагнитных волн в виде волнового пучка, характеристики которого задаются соответствующим распределением фазы в поперечном сечении через периодические интервалы вдоль оси системы. Существенным стимулом для развития такого подхода явилось предложение об использовании в качестве резонатора для лазера интерферометра Фабри-Перо, высказанное в 1958 г. независимо Р. Дике [98], А. М. Прохоровым [99], а также А. Шавловым и Ч. Таунсом [100]. Вскоре для подобной системы была разработана теория резонаторов со сферическими зеркалами, где моды представляются в виде волновых пучков [101-103]. Аналогичный подход был осуществлен Дж. Губо [104], который предложил линию передачи в виде многократно повторяющихся пучков электромагнитных колебаний, формируемых системой эквидистантных фазовых корректоров, представляющей собой последовательность линз, и назвал ее лучевым волноводом или лучеводом (beam waveguide).

5.1. Линзовые и диафрагменные лучеводы

В работе [104] Губо разработал метод математического описания поля волнового пучка, которое представляется в виде совокупности плоских волн, направления распространения которых лежат внутри малого конуса вблизи оси системы, а решение волнового уравнения в квазиоптическом приближении позволяет получить распределение поля в поперечном сечении в виде произведений функций Гаусса-Эрмита (в декартовой системе координат) или Гаусса-Лягерра (в цилиндрической системе координат). Введенные при этом характерные параметры – радиус пучка (или пятна поля) и радиус кривизны фазового фронта – имеют глубокий физический смысл, а представление поля в виде интеграла Фурье позволяет рассмотреть преобразования пучка различными системами оптического типа [105, 106]. При подобном рассмотрении распространения волнового пучка, наряду с геометрикооптическим рассмотрением процесса коррекции фазы линзой, для описания изменения структуры поля привлекаются типично дифракционные представления.

Первые экспериментальные исследования [107], проведенные в диапазоне длин волн 1.25 см, продемонстрировали перспективность линзового лучевода, а изготовленная при этом модель системы (рис. 22) состояла из пенополистироловых линз диаметром 20 см, удаленных друг от друга на расстояние 1 м (количество линз в линии не превыша-

ло 10). В работе [47] приведены результаты исследования лучевода в диапазоне частот 75 ГГц, а также целого ряда устройств на его основе (волновоодно-лучевые переходы с пирамидальным и бимодальными рупорами, преобразователи типов волн, поглощающий и поляризационный аттенюаторы,

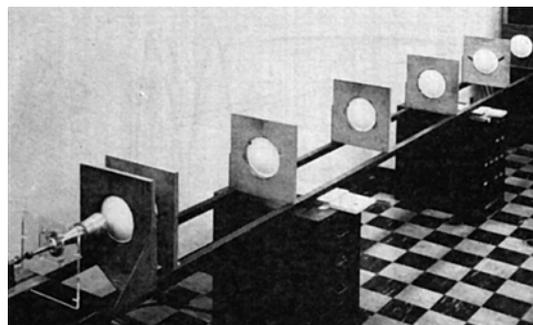


Рис. 22. Экспериментальная модель линзового лучевода Губо. (Репродукция из работы [107])

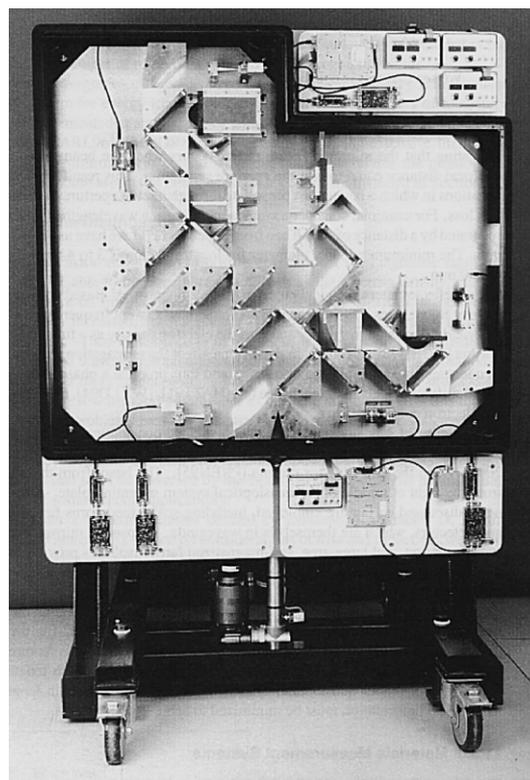


Рис. 23. Квазиоптическое двухволновое приемное устройство, используемое в системе диагностики плазмы. (Репродукция из работы [11] с любезного разрешения профессора П. Ф. Голдсмита)

диэлектрический делитель луча, измеритель коэффициента отражений). В последующие годы это направление исследований активно разрабатывалось: были детально изучены свойства волновых пучков, разработан целый ряд приборов и устройств для подобной линии передачи, реализованы принципы линзового лучевода при построении квазиоптических измерительных комплексов для диагностики плазмы, измерения параметров материалов, квазиоптических антенно-фидерных систем для установок дистанционного зондирования и радиолокационных исследований, а также других важных приложений. Многолетние результаты различных научных школ подробно изложены в монографии [11]. В частности, на рис. 23 представлена фотография двухволновой приемной системы для диагностики плазмы, а на рис. 24 – передающий и приемный каналы квазиоптической установки для исследования материалов [11].

Недостатком линзового лучевода является поглощение энергии пучка в диэлектрике и отражение от поверхности линзы. Хотя потери на отражение от одной линзы составляют малую величину (например 0.02 дБ в работе [107]), при создании протяженных многолинзовых трактов этот фактор может отрицательно влиять на характеристики системы в целом. Одной из возможностей устранения отраже-

ний является использование линзы, предложенной в [108]. В этом случае линзы специальной формы (эллиптический параболоид) повернуты относительно оси пучка на угол Брюстера и обеспечивают фазовую коррекцию, эквивалентную коррекции обычной линзы. Экспериментальный макет линзового лучевода такого типа была осуществлен в ИРЭ РАН и исследован в субмиллиметровом диапазоне ($\lambda = 0.9 \div 0.7$ мм) [109]. Линия состояла из 22 полиэтиленовых линз толщиной 3.2 мм, установленных на расстоянии 10 см друг от друга, и обеспечивала погонные потери не более 1.7 дБ/м. Лучеводы из неотражающих линз впоследствии были использованы при создании измерительных установок и разработке методов лучевой спектроскопии для исследования свойств различных сред, в том числе слабопоглощающих диэлектриков, ферритовых, полупроводниковых, жидких, газообразных, строительных и бытовых материалов [14, 110].

Разновидностью линзового лучевода является диафрагменная линия. В работе [111] в диапазоне длин волн $\lambda = 4 \div 8$ мм рассмотрен лучевод с диафрагмами в виде прямоугольных отверстий, а в [109] приведены результаты исследования линии ($\lambda = 0.9 \div 0.7$ мм), в которой использованы металлические ирисовые диафрагмы, обеспечиваю-

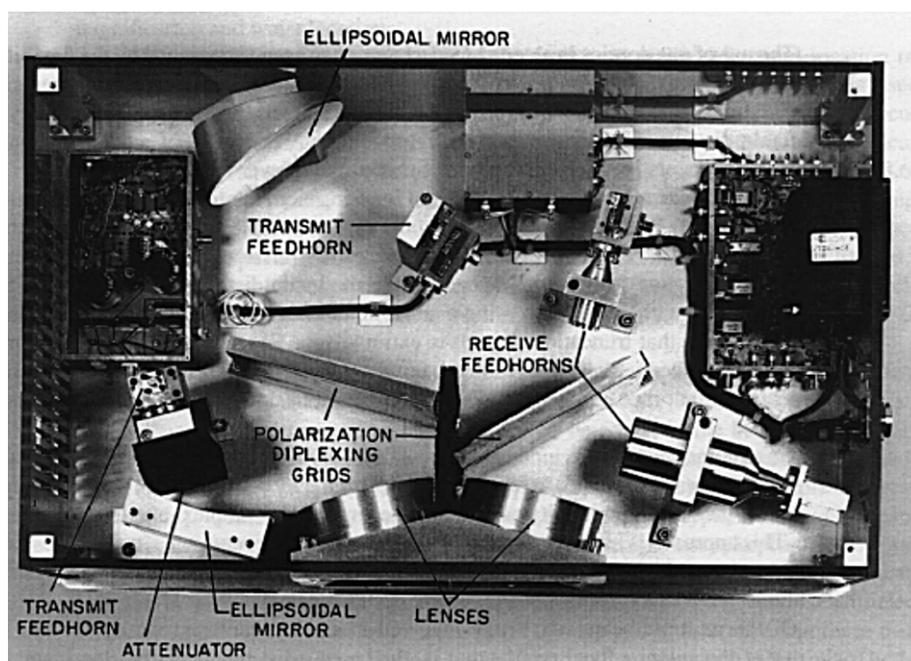


Рис. 24. Передающий и приемный каналы квазиоптической измерительной системы для исследования материалов. (Репродукция из работы [11] с любезного разрешения профессора П. Ф. Голдсмита)

шие плавную регулировку размеров отверстия. При этом расстояние между диафрагмами равнялось 12 см, а погонные потери для данной системе составляли 2.2 дБ/м. Диафрагменный лучевод по сравнению с линзовым имеет большие потери и становится конкурентоспособным лишь на волнах короче 0.5 мм из-за возрастания потерь в материале линз [14].

Потери из-за поглощения в линзах могут быть снижены при использовании современных слабопоглощающих материалов (например, для фторопласта Ф-4 без термообработки, тангенс угла потерь $\text{tg}\delta = 0.27 \cdot 10^{-3}$) [14], однако полностью исключить этот вид потерь можно только в случае зеркальной линии, которая является аналогом линзового лучевода.

5.2. Зеркальный лучевод

Зеркальные лучеводы были предложены в работе [112], а роль фазового корректора в данном случае выполняет зеркало в виде участка поверхности эллипсоида вращения, хотя вполне допустима и более простая форма поверхности (например сферическая [113]). Естественно, что амплитудное распределение в поперечном сечении пучка, сформированного таким образом, имеет более сложную картину, чем в случае осесимметричного лучевода, что необходимо учитывать при компоновке системы в целом. В работе [114] в 4-мм диапазоне был исследован зеркальный лучевод, в котором использовались эллиптические зеркала, а потери на одну итерацию составляли 0.015 дБ. Недостатком подобной линии передачи является достаточно громоздкая конструкция и очень высокая чувствительность к юстировке зеркал. В этом смысле предпочтительной является разновидность зеркального лучевода [115], в которой зеркала объединены в пары и образуют фиксированный узел (перископическая линия). При расстоянии между зеркалами в каждой паре существенно меньшем, чем их фокусное расстояние, фазовая коррекция такого элемента равна сумме фазовых коррекций каждого зеркала. Поворот устройства, образованного парой фиксированных зеркал, приводит к параллельному смещению оси пучка, а не к его повороту, и система в целом является менее чувствительной к перекосу фазовых корректоров. Экспериментальные исследования подобной линии были осуществлены в видимой области оптического диапазона ($\lambda = 0.63$ мкм) [116] и показали перспективность этого направления исследований. Тем не менее отмеченные недостатки технического характера являются основным препятствием на пути широкого использования зеркальных лучеводов как

линии передачи миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Одним из немногих, но ярких применений таких линий является развитие упомянутых выше лучеводных систем питания двухзеркальных сканирующих антенн наземных станций спутниковой связи (рис. 25) [117, 118], в которых построение многозеркальных трактов различной конфигурации позволяет обеспечить многочастотный режим работы.

6. Лучеводы (волноводы) класса “полый диэлектрический канал”

В ряде случаев к канализирующей системе предъявляются требования, которые не могут быть удовлетворены при использовании линзовых и зеркальных лучеводов. В частности, при создании широкодиапазонных измерительных приборов, интерферометров для диагностики горячей плазмы в экспериментальных установках термоядерного синтеза и трактов систем специального назначения базовая линия передачи наряду со специфическими электродинамическими характеристиками (отсутствие периодических изменений амплитудно-фазовых характеристик поля вдоль линии передачи, симметрия амплитудно-фазовых характеристик поля в двух ортогональных плоскостях, линейная поляризация поля, самофильтрация колебаний высших типов, высокая степень экранировки, широкий диапазон рабочих частот и низкое



Рис. 25. Лучеводная система питания двухзеркальной антенны наземной станции спутниковой связи. (Репродукция из работы [117])

затухание основной моды [15]) должна удовлетворять целому ряду конструктивных и механико-климатических требований. В первую очередь это касается корпуса линии передачи, который должен одновременно служить экраном, несущей конструкцией для функциональных элементов, а также противостоять механическим и климатическим воздействиям. В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют волноведущие системы класса “полый диэлектрический канал”. (В данном случае не существует единого мнения по поводу названия той или иной разновидности линии передачи; различные авторы используют термины “канал”, “лучевод”, “волновод”, поэтому в дальнейшем будем использовать авторскую терминологию.) Подобные волноведущие системы представляют собой круглый или прямоугольный канал большого (по сравнению с длиной волны) поперечного размера, образованный граничными структурами различного типа – диэлектрической, слоисто-диэлектрической или металл-диэлектрической. Несмотря на отличие граничных структур, эти системы обладают рядом типичных свойств (структура полей, постоянные распространения, локализация основного типа колебаний во внутреннем канале), обусловленных наличием диэлектрической границы канала, что позволяет объединить их в общий класс.

6.1. Полый диэлектрический лучевод

В 1964 г. Е. А. Маркатили и Р. А. Шмельцером была опубликована работа [119], в которой как развитие задачи [43] была рассмотрена теоретическая модель структуры в виде цилиндрического канала в безграничном диэлектрике при больших поперечных размерах канала. Для такой волноведущей системы был проведен анализ основных типов волн, постоянных распространения и затухания и подробно рассмотрена низшая гибридная волна EH_{11} , имеющая минимальное затухание, применительно к передаче энергии оптического диапазона на дальние расстояния.

В период с 1963 по 1971 г. в ИРЭ НАНУ был осуществлен ряд научно-исследовательских работ, направленных на разработку базовой линии передачи и комплекта измерительных устройств субмиллиметрового диапазона волн. Уже на первом этапе [120] была сформулирована концепция полового диэлектрического лучевода (ПДЛ), изготовлен экспериментальный образец, а результаты его исследования впоследствии опубликованы в [121, 122]. Конструктивно ПДЛ выполнен в виде трубы из фенотласта (внутренний диаметр 20 мм, толщина 5 мм), помещенной в несущую металлическую трубу с соединительными фланцами. При этом были разработаны два варианта конструкции: с

гладкой внутренней поверхностью и с продольными ребрами треугольного поперечного сечения. Применение фенотласта, обладающего значительными потерями ($\epsilon = 2.3$; $\text{tg} \delta \approx 0.1 \div 0.05$), позволяет исключить влияние металлической трубы, а использование ребристой поверхности канала приводит к снижению эффективной диэлектрической проницаемости до значения $\tilde{\epsilon} = 1.5$ и способствует эффективному подавлению высших типов колебаний. Экспериментальные исследования ПДЛ были проведены в диапазоне $\lambda = 0.8 \div 1.6$ мм и показали, что в субмиллиметровом диапазоне ($\lambda < 1$ мм) погонные потери в полном диэлектрическом лучевом не превышают 1 дБ/м. На основе ПДЛ был осуществлен полный комплект квазиоптических радиоизмерительных устройств, включающий в себя волноводно-лучевые переходы, оконечные согласованные и подвижные нагрузки, отражатели, поляризаторы, переходы с регулируемым и нерегулируемым углом излома, телескопические и вращающиеся сочленения, волномеры, поляризационные аттенюаторы, фазовращатели, сдвигатели частоты, диэлектрические и поляризационные делители луча, измерители коэффициента отражения, согласующие трансформаторы, амплитудные модуляторы, электромеханические переключатели направления луча, балансные смесители, дуплексные устройства, преобразователи поляризации, измерители мощности (рис. 26) [15, 123]. Наряду с устройствами общего применения были разработаны ферритовые и полупроводниковые приборы [124], радиоизмерительные комплексы для научных и прикладных исследований (интерферометры, поляриметры, дефектоскопы и др.), а также элементы антенно-фидерных трактов для радиолокационных систем коротковолновой части миллиметрового диапазона [125].

Широкий диапазон механических воздействий, в котором разработанные приборы обеспечивают высокие электродинамические характеристики, позволил создать на их основе лучеводные многоканальные интерферометры для определения концентрации электронов горячей плазмы в установках для исследования управляемого термоядерного синтеза типа Токамак. В частности, на рис. 27 приведена фотография установки Токамак Т-10 в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова, на которой на переднем плане показан квазиоптический лучеводный тракт 9-канального интерферометра ($\lambda = 0.9$ мм) [126].

Дальнейшие исследования показали, что электродинамические характеристики ПДЛ позволяют использовать его для формирования поля в методе



Рис. 26. Комплект квазиоптических измерительных устройств на основе полого диэлектрического лучевода. (Фотография любезно предоставлена В. К. Киселевым)

квазиоптического волноводного моделирования. Микрокомпактный полигон – средство осуществления этого метода – предназначен для изучения в лабораторных условиях характеристик рассеяния различных физических объектов в коротковолновой части миллиметрового и в субмиллиметровом диапазонах волн [127, 128]. В этом случае исследуемый объект или его масштабная модель помещаются внутрь ПДЛ, а по измеренным параметрам рассеяния рабочей волны EH_{11} определяется радиолокационное сечение рассеяния объекта в свободном пространстве. Найден критерии, при которых ПДЛ обеспечивает формирование необходимого амплитудно-фазового распределения падающего поля.

6.2. Металло-диэлектрические волноводы

Волноводящая система с металло-диэлектрической граничной структурой была предложена сотрудниками ИРЭ РАН как линия передачи с малыми потерями в работе [129] и подробно исследована в [130]. Металло-диэлектрический волновод (МДВ) в общем случае представляет собой металлическую трубу прямоугольного или круглого сечения с большими поперечными размерами; на внутреннюю поверхность трубы нанесена пленка из диэлектрика с малыми потерями (импедансная граница). При этом, как правило, используется пленка нерезонансной толщины, а при

скользящем падении парциальных плоских волн на стенку волновода (что имеет место для волн низших типов) омические потери существенно ниже, чем в металлических СВВ прямоугольного (волна H_{10}) и круглого (волна H_{11}) сечения. В то же время для волн высших типов в МДВ проявляется свойство самофилтрации.

6.2.1. Металло-диэлектрический волновод круглого сечения

Как и в полом диэлектрическом лучеводе, рабочим типом колебаний МДВ круглого сечения является низшая гибридная волна EH_{11} . В работе [130] показана возможность реализации малых затуханий в подобной системе, а в дальнейшем [131] приведен подробный анализ ее свойств. В частности, оценены погонные потери в МДВ диаметром 40 мм, которые при $\lambda = 2$ мм и толщине диэлектрического покрытия $d = 0.25$ мм ($\epsilon = 2.3$, $\text{tg}\delta = 2 \cdot 10^{-4}$) составляют 3.7 дБ/км, а также рассмотрены особенности возбуждения.

Как альтернативу разработкам с использованием ПДЛ [123] можно рассматривать создание в ИРЭ НАНУ устройств и систем на основе МДВ круглого сечения диаметром 20 мм, на внутреннюю поверхность которого нанесен слой фторопласта толщиной 0.2 мм. Такая геометрия волновода позволила максимально использовать имею-

щиеся технические решения без существенных конструкторских доработок. В частности, в работе [132] рассмотрен квазиоптический тракт супергетеродинного приемника со сверхвысокой промежуточной частотой (0.3 ГГц), предназначенный для работы в диапазоне $\lambda = 1.3 \div 2.2$ мм. Устройство включает в себя полуволновый и четвертьволновый поляризационные интерферометры, волномер бегущей волны, поляризационный аттенюатор и выполнено в виде единого модуля. Анало-

гичные конструкции были реализованы для антенно-фидерных систем и смесительных устройств в составе измерительных комплексов для диагностики высокотемпературной плазмы.

6.2.2. Металло-диэлектрический волновод прямоугольного сечения

МДВ прямоугольного сечения обычно реализуется в двух вариантах: с диэлектрическим покрытием на двух противоположных стенках волновода

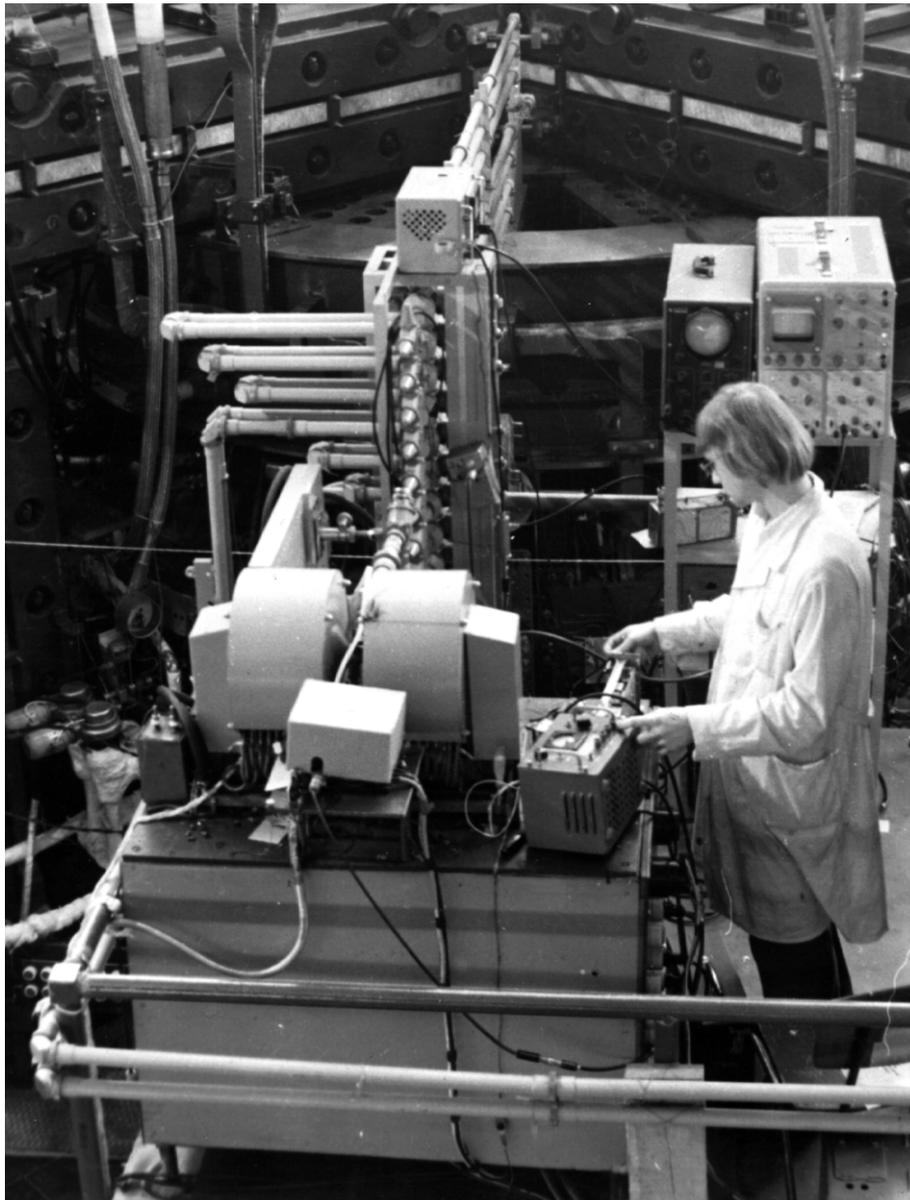


Рис. 27. Квазиоптический лучеводный тракт 9-канального интерферометра для диагностики горячей плазмы на установке Токамак Т-10. (Фотография любезно предоставлена В.К. Киселевым)

или на всех четырех. При этом второй случай позволяет обеспечить передачу волн ортогональной поляризации с малыми потерями и используется в устройствах, в которых осуществляется преобразование одного типа поляризации в другой. Рабочим типом колебаний в таком волноводе является продольная магнитная волна LM_{11} , которая характеризуется практически плоским фазовым фронтом, линейной поляризацией и амплитудным распределением с максимумом на оси волновода, плавно спадающим к его стенкам, симметричным в ортогональных плоскостях [133]. Экспериментальные исследования потерь в МДВ прямоугольного сечения были проведены в диапазонах волн 8 и 2 мм [134]. В частности, в 2-мм диапазоне использовался волновод сечением 10×23 мм² со слоями полиэтилена ($\epsilon = 2.3$; $\text{tg } \delta = 5 \cdot 10^{-4}$) толщиной 0.55 мм на узких стенках, а измеренные при этом потери составили 0.03 дБ/м. На основе такого волновода в ИРЭ РАН были разработаны элементы и устройства (возбудитель, волноводные изломы, фильтры высших типов волн, вращающееся сочленение, ферритовые устройства) [133, 135], которые использовались при создании антенно-фидерных систем 2-мм диапазона. В дальнейшем работы по созданию систем на основе МДВ прямоугольного сечения нашли развитие в Институте радиофизики и электроники АН Армянской ССР (впоследствии ИРФЭ Армянской АН, Ереван) [136], где также был реализован приемный модуль 2-мм диапазона, СВЧ узел которого выполнен в единой модульной конструкции [137].

В ИРЭ НАНУ на основе МДВ квадратного сечения был разработан полный комплект квазиоптических устройств, предназначенных для построения радиоизмерительных схем коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. При этом использовался волновод двух размеров: 14×14 мм² для диапазона $\lambda = 1.15 \div 3$ мм и 10×10 мм² для диапазона $\lambda = 0.7 \div 1.7$ мм [138]. В состав комплекта входят отрезки волновода, возбудители, угловой переход, вращающееся сочленение, неотражающая нагрузка, линейный поляризатор, преобразователь поляризации, поляризационный аттенюатор, фазовращатель, резонансный частотомер, диэлектрический и поляризационный делители мощности, подвижный отражатель, двугранный уголкоый отражатель, амплитудный модулятор и ферритовый вентиль. МДВ квадратного сечения 14×14 мм² использовался также при создании тракта одноантенной РЛС 2-мм диапазона с круговой поляризацией зондирующего сигнала и балансных мостов различного типа [139].

7. Заключение

Со времени проведения первых опытов Герца квазиоптика сформировалась как одно из важнейших направлений современной радиофизики, включающее в себя развитый математический аппарат, методы физических исследований, способы канализации электромагнитной энергии, принципы построения функциональных элементов и самые разнообразные приложения. Важнейшим стимулом для ее развития явилось освоение миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, где создание традиционной техники на основе одноволновых волноводов ограничено возрастанием затухания в волноводе и повышенными требованиями к технологии изготовления элементов и узлов тракта. В то же время для самых разнообразных линий передачи квазиоптического типа создана элементная база, способная решать все необходимые функциональные задачи, а параметры разработанных приборов не уступают, а во многих случаях превосходят характеристики волноводных аналогов. При этом принципы построения функциональных устройств оказались общими для квазиоптических линий передачи, характеризующихся линейной поляризацией рабочего типа колебаний, таких как линзовые лучеводы, сверхразмерные металлические волноводы, диэлектрические и металло-диэлектрические волноводы (лучеводы).

Значительный вклад в разработку данной проблемы, как в части решения фундаментальных вопросов, так и в практическом освоении миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов внесли радиофизики стран бывшего Советского Союза, среди которых следует выделить коллективы ИРЭ РАН, ФИ им. П. Н. Лебедева РАН, ИОФ РАН, ИПФ РАН, НИРФИ, ИРЭ НАНУ, ИРФЭ Армянской АН. Свидетельством признания этого факта в научном сообществе является присуждение премии международного общества IEEE MTT Society (теория и техника СВЧ) за 2000 год в номинации "Microwave Pioneer Award" украинскому ученому Евгению Митрофановичу Кулешову за разработку полого диэлектрического лучевода и измерительной техники коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн [140]. Эта разработка была осуществлена в период 1964-1972 гг. под руководством Е. М. Кулешова в отделе квазиоптики ИРЭ НАНУ.

В заключение автор считает своим долгом выразить глубокую признательность сотрудникам ИРЭ им. А. Я. Усикова НАН Украины В. К. Киселеву, Е. М. Кулешову, М. С. Яновскому за интерес

к работе, критические замечания, полезные рекомендации и предоставленные материалы. Автор обязан профессору П. Ф. Голдсмиту (National Astronomy and Ionospheric Center, Cornell University, Ithaca, USA) любезным разрешением на репродуцирование фотографий из его книги. Автор выражает благодарность Museo di Fisica, Dipartimento di Fisica, Universita degli Studi di Bologna (Italy) за разрешение на репродуцирование фотографий экспозиции работ А. Риги.

Литература

1. Из предыстории радио. Сб. статей под ред. Л. И. Мандельштама. Москва-Ленинград, Изд-во АН СССР, 1948, 472 с.
2. J. F. Ramsey. Proc. IRE. 1958, **46**, No. 2, pp. 405-415.
3. В. П. Борисов, В. Н. Сретенский. Радиотехника. 1995, №4-5, с. 10-15.
4. J. C. Bose. Collected Physical Papers. New York, Longmans, Green and Co, 1927.
5. A. F. Harvey. Proc. IEE (London). 1959, **106**, part B, No. 26, pp. 141-157.
6. А. Ф. Харвей. Техника сверхвысоких частот. Т. 1. Москва, Советское радио, 1965, 784 с.
7. А. Е. Саломонович. Успехи физических наук. 1962, **77**, вып. 4, с. 589-596.
8. Н. А. Ирисова. Вестник АН СССР. 1968, №10, с. 63-71.
9. D. T. Emerson. IEEE Trans. 1997, **MTT-45**, No. 12, pp. 2267-2273.
10. D. L. Sengupta, T. K. Sarkar, and D. Sen. Proc. IEEE. 1998, **86**, No. 1, pp. 235-243.
11. P. F. Goldsmith. Quasioptical Systems: Gaussian Beam Quasioptical Propagation and Applications. New York, IEEE Press, 1998, 412 pp.
12. Квазиоптика. Под ред. Б. З. Каценеленбаума и В. В. Шевченко. Москва, Мир, 1966, с. 189-209.
13. Техника субмиллиметровых волн. Под ред. Р. А. Валитова. Москва, Советское радио, 1969, 480 с.
14. Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах: методы и техника. Под ред. Р. А. Валитова и Б. И. Макаренко. Москва, Радио и связь, 1984, 296 с.
15. Е. М. Кулешов. Измерения в субмиллиметровом диапазоне радиоволн. (Глава 8) В кн: Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн. Под ред. А. Я. Усикова. Киев, Наукова думка, 1986, с. 140-157.
16. Сканирующие антенные системы СВЧ. Под ред. Г. Т. Маркова и А. Ф. Чаплина. Т. 1. Москва, Советское радио, 1966, 536 с.
17. Н. М. Цейтлин. Антенная техника и радиоастрономия. Москва, Советское радио, 1976, 352 с.
18. С. Корнблит. СВЧ оптика. Оптические принципы в приложении к конструированию СВЧ антенн. Москва, Связь, 1980, 360 с.
19. А. Б. Догадкин. Зарубежная радиоэлектроника. 1964, №9, с. 71-97.
20. Е. Ф. Ищенко. Открытые оптические резонаторы: некоторые вопросы теории и расчета. Москва, Советское радио, 1980, 208 с.
21. В. П. Шестопалов. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники. Т. 1. Открытые структуры. Киев, Наукова думка, 1985, 216 с.
22. А. И. Фисун, О. И. Белоус. Зарубежная радиоэлектроника: успехи современной радиоэлектроники. 1999, №4, с. 41-64.
23. H. Hertz. Ann. Phys. Chem. (Leipzig), 1989, **Bd. 36**, s. 769-783.
Русский перевод: В кн.: 50 лет волн Герца. Отв. ред. В. К. Аркадьев. Москва-Ленинград, Изд-во АН СССР, 1938, с. 120-135.
24. A. Righi. Mem. Acad. (Bologna). 1894, **4**, pp. 487-591.
Русский перевод: Опыты Герца с колебаниями малых длин волн. В кн.: [1], с. 387-397.
25. P. N. Lebedev. Ann. Phys. (Leipzig), 1895, **Bd. 56**, s. 1-17.
26. П. Н. Лебедев. Журнал русского физико-химического общества. 1895, **XXVII**, часть физическая, отдел первый, вып. 7, с. 213-220.
27. П. Н. Лебедев. Физическое обозрение (Варшава). 1901, **2**, №2, с. 49-60, 217-230.
28. Научная переписка П. Н. Лебедева. Отв. ред. В. А. Фабрикант. Москва, Наука, 1990, 500 с.
29. Л. Лодж. Творение Герца. В кн.: [1], с. 424-443.
30. J. A. Fleming. The Principles of Electric Wave Telegraphy and Telephony. New York, Longmans, Green and Co, 1906.
31. O. J. Lodge and J.L. Howard. Nature, 1889, **40**, p. 94.
Русский перевод: Об электрическом излучении и его концентрации с помощью линз. В кн.: [1], с. 375-384.
32. A. Righi. The Optics of Electric Oscillations. N. Zanichelli, Bologna, 1897.
33. J. C. Bose. Electrician. 1896, **37**, October, p. 788.
34. J. C. Bose. U. S. Patent 755840, March 29, 1904.
35. G. F. Hull. Phys. Rev. 1897, **5**, October, p. 231.
36. J. C. Bose. Electrician. 1895, **36**, December, p. 29.
37. J. C. Bose. Proc. Roy. Soc. 1898, **63**, December, p. 146.
38. A. Garbasso and E. Aschkinass. Ann. Phys. (Leipzig), 1894, **Bd. 53**, s. 534.
39. M. Birkeland. Comp. Rend. Acad. Sci. (Paris). 1894, June.
40. A. D. Cole. Phys. Rev. 1898, **7**, November.
41. E. Branly. Compt. Rend. Acad. Sci. (Paris). 1899, October.
42. G. Marconi. British Patent Specification. No. 12,039, June 2, 1896.
43. Дж. А. Стреттон. Теория электромагнетизма. Москва-Ленинград, ОГИЗ, 1948, 539 с.
44. H. G. Booker and P. C. Clemmov. Proc. IEE (London). 1950, **97**, pt. III., p. 11.
45. Э. Л. Бурштейн. Радиотехника и электроника. 1958, **3**, №2, с. 186-189.
46. А. М. Покрас. Вопросы радиоэлектроники. Серия X. Техника радиосвязи. 1960, вып. 8. с. 49-55.
47. А. Н. Ахизер. Исследование приборов в квазиоптических пучках. Труды метрологических институтов СССР. Издательство Комитета стандартов, мер и из-

- мерительных приборов при Совете министров СССР. Москва, 1969, вып. 99 (159), 95 с.
48. R. G. Fellers. *Microwave Journal*. 1962, **5**, No. 5, pp. 80-86.
Русский перевод: *Зарубежная радиоэлектроника*, 1962, №11, с. 89-100.
49. J. F. Ramsey and W. F. Gunn. *Marconi Review*. 1955, **18**, No.1, pp. 29-33.
50. G. Lamb. *Hydrodynamics*. New York, Dover Publication, 1945.
Русский перевод: Г. Ламб. *Гидродинамика*. Москва, Гостехиздат, 1947, 928 с.
51. Л. А. Вайнштейн. К электродинамической теории решеток. В кн.: *Электроника больших мощностей*. Москва, Наука, 1963, №2, с. 26-74.
52. В. П. Шестопалов, Л. Н. Литвиненко, С. А. Масалов, В. Г. Сологуб. *Дифракция волн на решетках*. Харьков, ХГУ, 1973, 272 с.
53. В. П. Шестопалов, А. А. Кириленко, С. А. Масалов, Ю. К. Сиренко. Резонансное рассеяние волн. Т. 1. *Дифракционные решетки*. Киев, Наукова думка, 1986, 232 с.
54. A. A. Volkov, V. P. Gorshunov, A. A. Igrsov, and G. V. Kozlov. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 1982, **3**, No. 1, pp. 19-43.
55. А. А. Костенко. *Радиофизика и радиоастрономия*. 1997, **2**, №3, с. 323-332.
56. V. A. Lengyel. *Proc. IRE*. 1949, **37**, No. 11, pp. 1242-1244.
57. E. G. Goodall and J. A. C. Jackson. *Marconi Review*. 1957, **XX**, No. 125, pp. 51-59.
58. W. Culshaw. *Proc. Phys. Soc.* 1950, **63B**, p. 393.
59. W. Culshaw. *Proc. Phys. Soc.* 1953, **66B**, p. 597.
60. W. Culshaw. *Proc. IEE (London)*. 1953, **100**, pt. II, p. 5.
61. F. Sobel, F. L. Wentworth, and J. C. Wiltse. *IRE Trans.* 1961, **MTT-9**, No. 6, pp. 512-518.
62. Е. А. Виноградов, Н. А. Ирисова, Т. С. Мандельштам, Т. А. Шмаонов. *Приборы и техника эксперимента*. 1967, №5, с. 192-195.
63. D. Veron, J. Certain, and J. P. Crenn. Preprint EUR-CEA-FC-799. Fontenay-au-Roses, France, 1975, p. 18.
64. С. И. Тетельбаум. *Электричество*. 1945, №5, с. 43-46.
65. M. I. Willinski. *ARS Journal*. 1959, **29**, No. 8, pp. 601-603.
66. R. W. Bickmore. *Proc. IRE*. 1961, **48**, No. 3, pp. 366-367.
67. В. А. Ванке, Л. В. Лесков, А. В. Лукьянов. *Космические энергосистемы*. Москва, Машиностроение, 1990, 144 с.
68. И. В. Лебедев. *Радиотехника*. 1995, № 4-5, с. 74-78.
69. M. I. Willinski. *Spaceflight*. 1966, **8**, No. 6, pp. 217-225.
Русский перевод: *Экспресс-информация. Радиотехника сверхвысоких частот и квантовая радиотехника*. Москва, ВИНТИ, 1966, №43, Реферат 135.
70. W. S. Brown. *Wire and Radio Communs.* 1964, **82**, No. 11, pp. 76-79, 88-89.
Русский перевод: *Экспресс-информация. Радиотехника* сверхвысоких частот и квантовая радиотехника. Москва, ВИНТИ, 1965, №17, Реферат 109.
71. А. М. Покрас. *Беспроводные линии передачи*. Москва, Связь, 1967, 255 с.
72. Б. З. Каценеленбаум. *Радиотехника и электроника*. 1963, **8**, №7, с. 1111-1119.
73. Р. Б. Ваганов. Препринт ИРЭ АН СССР. Москва, 1972, №91, 36 с.
74. А. В. Фойгель. *Радиотехника и электроника*. 1973, **18**, №11, с. 2276-2283.
75. В. А. Боровиков, Б. Е. Кинбер. *Геометрическая теория дифракции*. Москва, Связь, 1976, 248 с.
76. В. А. Боровиков, А. Г. Эйдус. *Радиотехника и электроника*. 1976, **21**, №1, с. 47-56.
77. В. П. Шестопалов, А. А. Кириленко, Л. А. Рудь. *Резонансное рассеяние волн. Т. 2. Волноводные неоднородности*. Киев, Наукова думка, 1986, 216 с.
78. S. E. Miller. *Proc. IRE*. 1953, **41**, No. 3, pp. 348-358.
79. *Волноводные линии передачи с малыми потерями. Сборник статей под ред. В. Б. Штейншлейгера*. Москва, ИЛ, 1960, 480 с.
80. Р. Б. Ваганов, Р. Ф. Матвеев, В. В. Мериакри. *Многоволновые волноводы со случайными неоднородностями*. Москва, Сов. Радио, 1972, 232 с.
81. R. H. Garnham. *Optical and Quasi-optical Techniques and Components for Millimeter Wavelengths*. Royal Establishment. Malverne, England, R. E. E. Rpt. No. 3020, March 1958.
82. *Техника спектроскопии в дальней инфракрасной, субмиллиметровой и субмиллиметровой областях спектра*. Под ред. Т. М. Лифшица. Москва, Мир, 1970, 400 с.
83. Л. Н. Вершинина, В. В. Мериакри. *Радиотехника и электроника*. 1967, **12**, №10, с. 1815-1817.
84. J. S. Butterworth, A. L. Cullen, and P. N. Robson. *IEE (London)*. 1963, **110**, April-June, pp. 848-858.
85. J. J. Taub, H. J. Hindin, O. F. Hinckelmann, and M. L. Wright. *IEEE Trans.* 1963, **MTT-11**, No. 5, pp. 338-345.
Русский перевод: *Зарубежная радиоэлектроника*. 1964, №8, с. 111-122.
86. J. J. Taub. *Microwave Journal*. 1970, **13**, No. 11, pp. 57, 60-62.
Русский перевод: *Зарубежная радиоэлектроника*. 1971, №5, с. 119-125.
87. J. Bled, A. Bresson, R. Papoular, and J. G. Wegrowe. *Nouvelles Techniques L'Onde Electrique*. 1964, **44**, No. 442, pp. 26-35.
88. Л. В. Лубяко. *Приборы и техника эксперимента*. 1968, №5, с.130-132.
89. Л. И. Федосеев, Ю. Ю. Куликов. *Радиотехника и электроника*. 1971, **16**, №4, с. 554-560.
90. А. А. Метрикин. *Антенны и волноводы РРЛ*. Москва, Связь, 1977, 184 с.
91. H. E. King and J. L. Wong. *IEEE Trans.* 1971, **MTT-19**, No. 1, pp. 116-119.
92. A. A. Kostenko, S. P. Martinjuk, and G. I. Khlopov. *Proceedings of 2-nd International Kharkov Symposium "Physics and Engineering of millimeter and Submillimeter*

- Waves". Kharkov, June 7-10, 1994, **5**, pp. 472-475.
93. Генераторы дифракционного излучения. Под ред. В. П. Шестопалова. Киев, Наукова думка, 1991, 320 с.
94. Г. И. Хлопов. Препринт № 106. ИРЭ АН УССР, Харьков, 1978.
95. V. I. Bezborodov, A. A. Kostenko, G. I. Khlopov, and M. S. Yanovski. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 1997, **18**, No. 7, pp. 1411-1422.
96. А. А. Костенко. *Радиотехника и электроника*. 1981, **26**, №4, с. 502-509.
97. А. А. Костенко and G. I. Khlopov. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 1996, **17**, No. 10, pp. 11593-1605.
98. R. H. Dike. US Patent 2 851 652, September 9, 1958.
99. А. М. Прохоров. *ЖЭТФ*, 1958, **34**, №6, с. 1658-1659.
100. A. L. Shavlow and C. H. Townes. *Phys. Rev.* 1958, **29**, December, pp. 1940-1949.
101. A. G. Fox and T. Li. *Proc. IRE*, 1960, **48**, No. 11, pp. 1904-1905.
Русский перевод: В кн.: *Лазеры*. Под ред. М. Е. Жаботинского и Т. А. Шмаонова. Москва, ИЛ, 1963, с. 325-356.
102. G. D. Boyd and J. P. Gordon. *Bell Systems Technical Journal*. 1961, **40**, No. 2, pp. 489-508.
Русский перевод: Дж. Бойд, Дж. Гордон. В кн.: *Лазеры*. Под ред. М. Е. Жаботинского и Т. А. Шмаонова. Москва, ИЛ, 1963, с. 363-384.
103. G. D. Boyd and H. Kogelnik. *Bell Systems Technical Journal*. 1962, **41**, No. 7, pp. 1347-1369.
104. G. Goubau and F. Schvering. *IRE Trans.*, 1961, **AP-9**, No. 3, pp. 248-256.
Русский перевод: *Зарубежная радиоэлектроника*. 1961, №11, с. 3-15.
105. H. Kogelnik and T. Li. *Applied Optics*, 1966, **5**, No. 10, pp. 1550-1567.
Русский перевод: *Зарубежная радиоэлектроника*. 1967, №3, с. 95-113
106. Ж. Дешан, П. Маст. В кн.: [11], с. 189-209.
107. I. P. Christian and G. Goubau. *IRE Trans.*, 1961, **AP-9**, No. 3, pp. 256-263.
Русский перевод: *Зарубежная радиоэлектроника*. 1961, №11, с. 3-15.
108. В. В. Шевченко. *Радиотехника и электроника*. 1969, **14**, №10, с. 1764.
109. Л. Н. Вершинина, А. А. Лагунов, В. В. Шевченко. *Радиотехника и электроника*. 1968, **13**, №2, с. 346-348.
110. В. В. Мериакри, В. Н. Аплеталин, А. Н. Копнин, Г. А. Крафтмахер, М. Г. Семенов, Е. Ф. Ушаткин, Е. Е. Чиграй. В кн.: *Проблемы современной радиотехники и электроники*. Под ред. В. А. Котельникова. Москва, Наука, 1980, с. 164-180.
111. И. Кристиан, Дж. Губо. Некоторые результаты измерений диафрагмированного лучевого волновода. *ТИИЭР*. 1961, **49**, №11, с. 1941.
112. Б. З. Каценеленбаум. *Радиотехника и электроника*. 1963, **8**, №9, с. 1516-1522.
113. З. Б. Ваганов, Б. З. Каценеленбаум. В кн.: *Антенны*. 1966, №1, с. 22-33.
114. J. E. Degenford, M. D. Sirkis, and W. H. Steier. *IEEE Trans.* 1964, **MTT-12**, No. 4, pp. 445-453.
115. Р. Б. Ваганов, А. Б. Догадкин, Б. З. Каценеленбаум. *Радиотехника и электроника*. 1965, **10**, №9, с. 1672-1675.
116. А. А. Дяченко, О. Е. Шушпанов. *Известия вузов. Радиофизика*. 1968, **11**, №5, с. 707-713.
117. В. А. Claydon. *Marconi Review*. 1976, **39**, No. 201, pp. 81-116.
118. А. Я. Мирошниченко. *Зарубежная радиоэлектроника*. 1981, №7, с. 28-62.
119. E. A. Marcatili and R. A. Schmelzter. *Bell System Technical Journal*. 1964, **43**, No. 4, part 2, pp. 1783-1809.
120. Отчет о НИР "Исследование возможности создания радиоизмерительной аппаратуры приборов субмиллиметрового диапазона с использованием квазиоптических принципов" (шифр "Озеро"). Научный руководитель Е. М. Кулешов. ИРЭ АН УССР, Харьков, 1964.
121. А. с. 302054 (СССР). А. Н. Ахиезер, А. И. Горошко, Б. Н. Князьков, Е. М. Кулешов, Д. Д. Литвинов, Н. И. Толмачев, В. А. Щербов, М. С. Яновский. (приоритет от 28 ноября 1969 г.).
122. А. И. Горошко, Е. М. Кулешов. В кн.: *Радиотехника*. Харьков, ХГУ, 1972, вып. 21, с. 215-219.
123. Е. М. Кулешов, М. С. Яновский, Д. Д. Литвинов, В. А. Щербов, Б. Н. Князьков, А. И. Горошко, Н. И. Толмачев, В. В. Стенько, В. Л. Шумейко. В сб.: *Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума по распространению миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере Земли и планет*. Москва-Горький, 28-30 января 1976, с. 124-127.
124. Е. М. Кулешов, В. К. Кононенко, В. Н. Полупанов. *Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ*. 1976, №7, с. 55-59.
125. А. с. 363144 (СССР). Б. Н. Князьков, Е. М. Кулешов, Д. Д. Литвинов, В. П. Чурилов, М. С. Яновский. (приоритет от 7 июня 1971 г.).
126. А. А. Багдасаров, В. В. Бузанкин, Н. Л. Васин, Е. П. Горбунов, В. Ф. Денисов, Е. М. Кулешов, В. Н. Савченко, В. В. Хилиль, В. А. Щербов. В кн.: *Диагностика плазмы*. Под ред. М. И. Пергамента. Москва, Энергоиздат, 1981, с. 141-146.
127. В. К. Кисельов. *Доповіді НАН України*. 1995, №11, с. 999-1007.
128. V. K. Kiseliov and T. M. Kushta. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 1995, **16**, No. 6, pp. 1159-1165.
129. L. N. Vershinina, Yu. N. Kazantzev, V. V. Meriakri, and V. V. Shevchenko. В сб.: *European Microwave Conference Handbook*. Kent, 1969, p. 174.
130. Ю. Н. Казанцев. *Радиотехника и электроника*. 1970, **15**, №1, с. 207-209.
131. Ю. Н. Казанцев, О. А. Харлашкин. *Радиотехника и электроника*. 1984, **29**, №8, с. 1441-1450.
132. В. И. Безбородов, Б. Н. Князьков, Е. М. Кулешов, М. С. Яновский. *Известия вузов. Радиоэлектроника*. 1989, **32**, №3, с. 29-33.
133. Ю. Н. Казанцев, О. А. Харлашкин. 1978, **23**, №10, с. 2060-2068.

134. Ю. Н. Казанцев, О. А. Харлашкин. Радиотехника и электроника. 1971, **16**, №5, с. 1063-1065.
135. М. Ц. Айвазян, Ю. Н. Казанцев, О. А. Харлашкин. В сб.: Тезисы докладов III-го Всесоюзного симпозиума по миллиметровым и субмиллиметровым волнам. Горький, 1981, т. 1, с. 106-107.
136. R. S. Avakian, K. R. Agababian, M. Ts. Aivazian, Yu. N. Kazantsev, and R. M. Martirosian. Proceedings of 16th International Conference on Infrared and Millimeter Waves. Lausanne, Switzerland, 1991, pp. 642-643.
137. R. S. Avakian and K. R. Agababian, G. G. Gabrielian et al. Proceedings of 16th International Conference on Infrared and Millimeter Waves. Lausanne, Switzerland, 1991, pp. 626-627.
138. В. И. Безбородов, В. К. Киселев, Б. Н. Князьков, Е. М. Кулешов, В. Н. Полупанов, М. С. Яновский. В сб.: Материалы 7-ой международной крымской конференции "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'97), Севастополь, Украина, 15-18 сентября 1997, **2**, с. 630-631.
139. V. I. Bezborodov, V. K. Kiseliov, B. N. Knyaz'kov, E. M. Kuleshov, V. P. Churilov, and M. S. Yanovsky. В сб.: Proceedings of 2-nd International Kharkov Symposium "Physics and Engineering of millimeter and Submillimeter Waves". Kharkov, June 7-10, 1994, vol. 5, pp. 476-478.
140. Microwave Pioneer Awards. IEEE Microwave Magazine. 2000, **1**, No. 1, March, p. 75.

Quasioptics: Historical Preconditions and Modern Trends of Development

Alexei A. Kostenko

The modern level of the development of quasioptical techniques is presented in all the variety of transmission lines used. The applications of quasioptical systems are considered with allowance for the specific features of the particular scientific problems. Descriptions is carried out from the very beginning, starting from the pioneer research of the "Hertz waves". The contribution is enlightened of scientists and engineers from the former Soviet Union countries in the development of quasioptical techniques.