

мультиплета J^P , должны быть близки. Если считать их одинаковыми для рассматриваемого октета барионов $J^P=(1/2)^+$, то, согласно (4), получаем

$$r_0^b = r_0^p \exp[-(B_a^b - B_a^p) + 3,17 \cdot 10^{-2} (\mu_b^2 - \mu_p^2)]. \quad (5)$$

Зарядовые радиусы, рассчитанные по формуле (5), представлены в табл. 2. Видно, что они весьма близки (с точностью $\sim 4\%$) к «правильным» значениям r_0 . Это обстоятельство может быть важным при планировании экспериментов для определения зарядовых радиусов гиперонов с помощью хорошо известного зарядового радиуса r_0 протона. Эксперименты могут быть проведены по схеме, обсужденной в [9]. В этой работе предложено анализировать треки жестких δ -электронов, образованных ультрарелятивистскими адронами в жидководородной пузырьковой камере. В [9] показано, что изучение энергетического спектра таких электронов позволяет получить надежную оценку B_s , B и ϵ . В области сверхвысоких энергий ($\gamma \gg 10^3$), когда $(B^b - B^p)$ стремится к $(B_a^b - B_a^p)$, с помощью формулы (5) может быть определен зарядовый радиус любых барионов (в том числе и нестабильных барионов — гиперонов), если по ходу эксперимента чередуется «облучение» камеры пучками этих барионов и протонными пучками.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Горячев Б. И., Линькова Н. В. // Ядерная физика. 1993. 56. С. 195.
 [2] Turner J. et al. // Phys. Rev. 1973. B8. P. 4053. [3] Saleem M. et al. // Phys. Rev. Lett. 1986. 57. P. 2633. [4] Arnold R. J. et al. // Ibid. P. 174. [5] Lepage G. P., Brodsky S. J. // Phys. Lett. 1979. B87. P. 359. [6] Samuel S., Moriarty K. J. M. Preprint CERN-TH.4396/86. 1986. [7] Горячев Б. И., Линькова Н. В. // Ядерная физика. 1989. 49. С. 1046. [8] Перкинс Д. Введение в физику высоких энергий. М., 1975. [9] Горячев Б. И., Линькова Н. В. // Ядерная физика. 1991. 54. С. 1663.

Поступила в редакцию
11.02.94

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1994. Т. 35, № 5

РАДИОФИЗИКА

УДК 535.4:621.396:677.71.001.24

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИЛЛИМЕТРОВОЙ И СУБМИЛЛИМЕТРОВОЙ ТЕХНИКИ

ЧАСТЬ 2. ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ. ГЕНЕРАТОРЫ ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В. П. Шестопалов *)

Подводятся итоги теоретических и экспериментальных исследований дифракционных решеток, элементов открытых волноводных систем и генераторов дифракционного излучения. Приводятся электродинамические характеристики базовых устройств и приборов, созданных на их основе.

§ 1. Дифракционные решетки

Современная теория дифракционных решеток (ДР), обобщенная в [1], посвящена изучению спектров решеток как открытых периодиче-

*) Институт радиофизики и электроники АН Украины, г. Харьков.

ских резонаторов (ОР) и открытых периодических волноводов (ОВ), выяснению роли решеток в формировании резонансного отклика структур на внешнее возбуждение монохроматическими и квазипериодическими источниками, а также источниками нестационарных сигналов. Построение несамосопряженной спектральной теории одномерно-периодических ДР, как и в случае ОР [2], с помощью анализа операторов и мероморфных оператор-функций базируется на преобразовании исходной задачи для дифференциального уравнения в частных производных к операторному уравнению фредгольмовского типа, что позволяет качественно и количественно анализировать свободные колебания поля в периодических ОР, исследовать возбуждение колебаний и ДР, близких к свободным. Анализ особенностей аналитического продолжения резольвент дифракционных задач в область комплексных значений параметров создает основу и для изучения процессов возбуждения ДР различными источниками.

Экспериментальное исследование ДР ограничим рассмотрением преобразования поверхностных волн в объемные (и наоборот). Последнее требует проведения измерений как в ближней, так и в дальней зоне. Специфика миллиметровых (мм) и субмиллиметровых (субмм) волн и применение в схеме измерений эффекта преобразования поверхностных волн в объемные позволяет создать для этих целей эффективные измерительные стенды и буквально «на столе» (в отсутствие безэховых камер) надежно провести весь комплекс измерений.

Теория

Постановка классической краевой задачи дифракции для ДР с квазипериодическим монохроматическим источником такая же, как и в случае ОР (см. [2]) с добавлением условий периодичности. В спектральной теории необходимо «продолжить» задачу дифракции в область комплексных частот κ , определяя при этом границы изменения области κ и переформулируя условие излучения для каждой точки этой области. При этом можно доказать, что каноническая функция Грина естественным образом аналитически продолжается с действительной оси $\text{Im } \kappa = 0$ на поверхность Римана, состоящую из плоскостей κ , разрезанных вдоль определенных линий. Определим резольвентное множество задачи дифракции как множество P точек κ , принадлежащих поверхности Римана, в которых решение существует и единственно; дополнительное к P множество Ω назовем спектральным (спектром). При этом точечный спектр однородных уравнений Гельмгольца с соответствующими граничными условиями и условиями на бесконечности совпадает со всем спектром исходной задачи, а нетривиальное решение этих уравнений совпадает с собственными колебаниями ДР. Качественные характеристики спектра ДР можно получить на основе теории мероморфных оператор-функций и, в частности, доказать, что спектр исходной краевой задачи для ДР из металлических брусьев является счетным множеством изолированных в конечной части поверхности Римана точек, в которых резольвента (функция Грина и решение задачи) имеет полюсы конечного порядка. Основными при этом являются вопрос о существовании комплексных значений κ на поверхности Римана и постановка условия излучения на бесконечности, выделяющего единственное решение задачи дифракции. Полученные таким образом данные о спектре позволяют рассматривать ДР как обычные ОР с физически правильными собственными характеристиками: спектр свободных колебаний не пуст и является дискретным (точки спектра представляют со-

бой полюсы ядер разрешающих операторов стационарных краевых задач).

Модельные задачи спектральной теории ДР и численные эксперименты дают полную картину рассеянных ДР полей. С этой целью методом полуобращения развиты различные подходы в решении конкретных задач. В частности, показано [1], что множество Ω собственных частот ДР волноводного типа является дискретным, что позволяет установить механизм формирования свободных (и вынужденных) колебаний таких ДР, разработать способы классификации колебаний и подробно (с помощью теории морсовских критических точек) изучать явление междутиповых колебаний. Остановимся подробнее на последней проблеме.

Установлено, что плавное изменение спектральных характеристик при вариации геометрических и материальных параметров ДР нарушается в зоне «взаимодействия» свободных колебаний, отвечающих разным частотам, т. е. при сближении частот ω_1 и ω_2 в метрике соответствующего комплексного пространства. В результате взаимодействия происходит не только обмен собственными частотами, но и изменение типов колебаний, их добротностей, конфигурации полей. Явление междутиповых колебаний можно трактовать как реакцию неидеальной ДР на приближение ее к неустойчивому состоянию, т. е. к состоянию, когда малое «шевеление» несектрального параметра приводит к катастрофическим изменениям всей системы. Теория этого явления базируется на изучении морсовских критических точек дисперсионного уравнения ДР [3].

Эксперимент

Ограничимся случаем преобразования поверхностных волн в объемные нормальными и скошенными решетками. Изучение спектральных, амплитудно-фазовых и поляризационных характеристик электромагнитных полей при трансформации поверхностных волн в объемные связано с определением их антенных свойств, что требует измерения ближних и дальних полей. Соответственно должен быть выбран экспериментальный метод исследования и, следовательно, экспериментальная установка (с учетом особенностей мм- и субмм-волн). При этом для измерений (и в самой установке!) используется эффект преобразования поверхностных волн в объемные [4, 5]. Такая антенная система состоит из двух узлов: диэлектрического волновода (ДВ) (источник поверхностных волн) и рассеивателя (ДР). Заметим, что ДВ является волновым аналогом электронного потока; поэтому проводимые эксперименты также важны и для дифракционной электроники (при разработке генератора дифракционного излучения (ГДИ) [6]).

Ближние и дальние поля можно определять на экспериментальном стенде. Дальние поля измеряются методом подвижной антенны, а ближние — различными зондовыми методами. Среди важных результатов отметим следующие. Направление главного максимума диаграммы направленности и пространственного распределения поля в дальней зоне определяется степенью связи ДВ и ДР, которая варьируется в зависимости от прицельного расстояния и угла наклона ДР по отношению к планарному ДВ, периода решетки, ее коэффициента заполнения и свойств ДВ. Установлено, что с помощью специально подобранной решетки и типа ее (клиновидной) связи с ДВ можно добиться почти 100%-го преобразования поверхностной волны в объемную, а для скошенной ДР в зависимости от угла α поворота ДР относительно на-

правления распространения поверхностной волны в планарном ДВ возможна полная трансформация поверхностной волны в объемную (для скошенной решетки ярко проявляются поляризационные эффекты). Измерения ближнего поля для системы ДВ+ДР на одном периоде ленточной решетки показали, что существуют области пространства (например, для решетки с периодом $l=4$ мм и шириной лент 0,8 мм и ДВ с $\beta=0,79$ при $\lambda_0=4,2$ мм, где λ_0 — длина волны в свободном пространстве), в которых возникают особенности рассеянного поля (при излучении двух объемных волн с $n=-1, -2$, где n — индекс пространственной гармоники решетки) — вихри поля и линии равных фаз, перпендикулярные плоскости ДР (эти линии соответствуют фазовым фронтам поверхностных волн ДВ).

§ 2. Применение открытых структур в технике мм- и субмм-волн

Приведенные в работе [2] результаты показали, что физической основой техники мм- и субмм-волн может быть процесс преобразования волн открытых электродинамических систем: ДР, ОР и ОВ, которые необходимо определенными способами эффективно возбуждать. Важно, что каждый из указанных элементов должен сочетаться с другим; такие элементы с соответствующими активными и пассивными неоднородностями (электронный поток, твердотельные генераторы, сверхрешетки и др.) становятся теми исходными узлами, на которых проектируется сложная радиосистема, пригодная для решения практических задач.

Рассмотрим сочетание ОР с ДР, описанное в [4, 5]. Несмотря на кажущуюся простоту, такое сочетание содержит множество различных комбинаций. Если такую структуру возбуждать электронным потоком, движущимся вблизи ДР, нанесенной на одно из зеркал ОР (в другом зеркале имеется отверстие связи), то при возникновении дифракционного излучения ОР возбуждается. При помещении в ОР с ДР диода Ганна получаем квазиоптический твердотельный прибор. Из ОР и ДР можно построить эффективный двухчастотный открытый высокочастотный резонансный контур для радиоспектрометров мм- и субмм-волн. Аналогично создаются сложные устройства типа ОВ с ДР, ОВ с ОР и даже ОР с ДР и ОВ, которые могут работать как в пассивном, так и в активном режиме. В итоге именно такие комбинации наиболее важны при освоении мм- и субмм-диапазонов волн.

Дифракционная электроника. Генераторы дифракционного излучения

Разработка техники мм- и субмм-волн на основе ОР, ОВ и ДР прежде всего связана с созданием когерентного генератора электромагнитных колебаний — ГДИ [4—7]. Принцип его действия основан на явлении дифракционного излучения, возникающего при равномерном и прямолинейном движении электронов вблизи ДР, занимающей 10—15% поверхности зеркала ОР. ГДИ представляет собой автогенератор, в котором электромагнитные колебания возникают и поддерживаются дифракционным излучением, а обратная связь осуществляется ОР, представляющим собой высокочастотный резонансный контур. Возникшее в ОР высококогерентное электромагнитное поле через элемент связи (щель или квазиоптическое отверстие в зеркале) поступает в нагрузку. ГДИ успешно используется около 30 лет. Разработаны многочислен-

ные их модификации. Такие генераторы помимо большого уровня мощности и перестройки частоты обладают высокой стабильностью колебаний, малыми шумами, отсутствием побочных излучений во всем мм-диапазоне и длинноволновой части субмм-диапазона. Разнообразные режимы работы ГДИ — пролетный, отражательный, импульсный, автодинный — позволяют использовать его при решении многих задач науки и техники, так как его пусковые, энергетические, частотные, спектральные и флуктуационные характеристики существенно лучше, чем у известных классических электронно-вакуумных приборов.

В работах [6, 8] построена теория и приведены результаты экспериментов по изучению взаимодействия электронного потока с полем ОР при произвольном распределении поля на ДР, что позволило определить пусковой ток J_s и стартовую частоту ω возбуждаемых колебаний ГДИ. Для одномодового режима работы пролетного ГДИ в пределах зоны генерации ток J_s минимален в области максимального инкремента нарастания колебания. Возбуждение ГДИ на высших модах колебаний приводит к изменению J_s в 1,5—2 раза. Значительное влияние на условия возбуждения ГДИ и его параметры оказывает фокусирующее магнитное поле H_0 , определяющее форму траектории движения электронов. При увеличении H_0 и $J_{s\text{ min}}$ уменьшается степень взаимного влияния конкурирующих и основного колебаний. Из нелинейной теории ГДИ следует, что мощность генерации, КПД, диапазон перестройки частоты существенно зависят от параметров ДР и ОР. Применение неоднородных ДР и ОР со специальными поверхностями зеркал приводит к значительному улучшению свойств ГДИ (например, в 4-мм диапазоне КПД можно довести до 10%, комбинированную перестройку увеличить в два раза). Экспериментально установлено, что уровень амплитудных шумов классических вакуумных приборов в мм-диапазоне в среднем на 25—30 дБ выше аналогичных флуктуаций ГДИ и при длине волны $\lambda_0=4,2$ мм составляет вблизи несущей частоты около —130 дБ.

Отражательный ГДИ, механизм работы которого основан на эффекте дифракционного излучения, возбуждаемого электронным потоком, многократно взаимодействующим с полем ОР, позволяет объединить в одном приборе свойства пролетных ГДИ и клистронов. В таких ГДИ реализуются качественно новые режимы возбуждения колебаний, расширяются их функциональные возможности. Одной из особенностей отражательных ГДИ является возможность управления процессом энергообмена путем изменения углов пролета электронов в пространстве взаимодействия (Φ_s) и в поле отражателя (θ_R). Это приводит к существованию трех режимов возбуждения колебаний: режим A — изменение характеристик прибора в зависимости от параметра Φ_s ; режим R — изменение параметров ГДИ в зависимости от θ_R (при заданном Φ_s); режим «чистого» синхронизма (клистронный), который реализуется при $\Phi_s=0$ и изменяющемся θ_R (где пролетный ГДИ не работает). Существенно, что в режиме R можно осуществлять «безмощностное» управление характеристиками ГДИ. Результирующая мощность отражательного ГДИ определяется значениями парциальных мощностей, связанных с различными механизмами образования составляющих конвекционного тока. Возможность мощностного и безмощностного (режим R) управления работой отражательного ГДИ существенно расширяет рамки его применения. Если учесть, что для $f^0 \approx 75$ ГГц J_s уменьшается в 5—6 раз в режиме A и в 1000 раз в режиме R , то становятся очевидными уникальные свойства отрицательных ГДИ.

При импульсном возбуждении ГДИ возможно при сравнительно низких напряжениях (до 15 кВ) добиться высококачественных импульсов излучения. Исследования таких генераторов в 2-мм диапазоне обнаружили ряд особенностей, характерных не только для начальной стадии установления колебаний, но и в целом для процессов возбуждения импульсного автогенератора с высокой добротностью ОР (порядка 1500—5000). При таких добротностях ОР минимальная длительность прямоугольного импульса генерации $t_{\min} \approx (1-2) Q/f_0$. Путем изменения тока электронного потока, ускоряющего напряжения, типа возбуждаемого колебания ОР, длины пространства взаимодействия (пятна поля на решетке) можно получить в ГДИ импульс генерации с минимальным временем установления колебания (10—15 нс в 4-мм диапазоне).

В разработанных импульсных ГДИ со сферо-цилиндрическими зеркалами ОР ($Q \approx 3000$), однородной ДР, диодной пушкой, формирующей импульсный ленточный электронный поток и питающейся от импульсного модулятора с внешним запуском, удалось получить импульсы генерации длительностью $0,02 \div 10$ мкс с высоким качеством спектра, повышенной стабильностью несущей частоты и увеличенной мощностью (при ускоряющем напряжении 7 кВ выходная мощность для импульсов длительностью 0,1 мкс достигает 100 Вт и КПД $\sim 3\%$; если же напряжение повышено до 11 кВ, а длительность импульса $0,5 \div 5$ мкс, то мощность ~ 1 кВт и КПД $\sim 8\%$). Качество спектров импульсов дифракционного излучения, возбуждаемых в импульсном ГДИ, выше, чем в других приборах О-типа.

Автодинный эффект в ГДИ, как и в других типах генераторов, заключается в их реакции на собственный сигнал, отраженный от объекта, и проявляется в изменении внутренних характеристик ГДИ: амплитуды поля ОР, частоты генерации и значения тока пучка. ГДИ-автодины разделяются на автодины с внешним и внутренним детектированием сигналов. Внешними полупроводниковыми детекторами регистрируют изменение амплитуды и частоты генерации. Изменение тока электронного потока, вызванного принимаемым сигналом, осуществляется внутренним электронным детектором. Анализировать режимы ГДИ-автодина можно с помощью уравнения, описывающего динамические процессы в одномодовом генераторе при воздействии на него сигнала с частотой, близкой к частоте генерации. При этом установлено, что чувствительность и коэффициент усиления k_a ГДИ-автодина при внутреннем детектировании увеличиваются, если производная от тока по амплитуде в области коллектора будет значительно превышать 1 (наибольшей величины k_a достигает на краях зоны генерации в окрестности точек бифуркации, а максимальная чувствительность к внешнему воздействию достигается при $k_a \approx 1$).

Для практических применений ГДИ-автодинов значительный интерес представляют их амплитудные и частотные характеристики, которые являются периодическими функциями фазы отраженного сигнала и существенно зависят от внутренних параметров ГДИ и коэффициента отражения от объекта. Установлено, что ГДИ благодаря самой низкой крутизне электронной перестройки устойчиво работает вблизи точек срыва генерации, что позволяет даже при стандартных источниках питания достигать высоких значений автодинного усиления. Конструкция отражательного ГДИ-автодина, для которого имеет место более высокая чувствительность к отраженному сигналу при напряжениях, соответствующих центру пролетной зоны, наилучшим образом соответствует системе взаимодействия в электронном детекторе; в качестве регистрирующего элемента здесь используется система диодов, обладаю-

Тип прибора	Длина генерируемой волны, мм	Выходная мощность, Вт	Электронная перестройка частоты МГц	Крутизна перестройки		Масса магнита		Масса оптимальных постоянных магнитов, кг	Магнитное поле, Тл
				по напряжению, МГц/В	по току, МГц/мА	Альника, кг	Редкоземельные, кг		
ГДИ-1	0,8—1,1	0,2—0,8	25	0,5—0,7	0—0,7	96	12	8,0	0,7
ГДИ-1,5 А Б	1,1—1,4 1,4—1,8	0,3—1 0,7—1,2	25	0,5—0,7	0—0,6		12	8,0	0,7
ГДИ-2 А Б	1,7—2,1 2,1—2,6	0,5—2,5 0,6—3,0	30	0,4—0,6	0,1—0,5	36	7,0	3,0	0,5
ГДИ-3 А Б	2,5—3,2 3,1—3,9	1,0—5,0 2,0—8,0	35	0,3—0,5	0,1—0,3	36	7,0	3,0	0,5
ГДИ-4 А Б	3,8—4,8 4,7—5,9	3,0—10 5,0—15	40 60	0,2—0,4 0,1—0,3	0,2—0,4 0,1—0,3	18 18	4,0 4,0	2,0 2,0	0,4 0,4
ГДИ-6 А Б	6,0—7,0 7,0—8,0	6,0—20 10—50	60	0,1—0,3	0,1—0,3	18	4,0	2,0	0,4

щая высокой чувствительностью к возмущениям скоростей в электронном потоке, вызванным внешними сигналами (к достоинствам этой системы следует также отнести простоту устройства, малые габариты, тепловую и электрическую прочность).

Приведенные выше результаты режимов работы ГДИ составляют основу для разработки пакетированных генераторов, для которых существенным является устойчивость и надежность, совместимость с другими приборами и большой срок службы при малых габаритах и массе. Выходные характеристики пакетированных ГДИ существенно зависят от свойств тонких электронных потоков и способов их фокусировки постоянными магнитами. На основании теоретических и экспериментальных исследований свойств ГДИ, действующих при непрерывной откачке и в отпаянных конструкциях, выработаны рекомендации для создания наиболее эффективных их типов, что позволило в условиях опытного производства изготавливать пакетированные ГДИ, перекрывающие весь мм-диапазон волн. Эти приборы по сравнительно низкой цене поставляются во все заинтересованные организации нашей страны. В таблице приведены параметры пакетированных ГДИ, перекрывающих мм-диапазон при рабочем токе 0,1—0,14 А, ускоряющем напряжении 2,4—3,9 кВ и магнитном зазоре ~ 40 мм (ГДИ работают в непрерывном режиме). На базе ГДИ развились новые научно-технические направления: ГДИ-спектроскопия, ГДИ-радиолокация, ГДИ-накачка квантовых усилителей и атомных ядер.

Элементная база мм- и субмм-волн

Под элементной базой мм- и субмм-техники, основанной на использовании открытых электродинамических систем, подразумеваем определенные устройства, которые выполняют одно функциональное действие, связанное, например, только с генерированием колебаний, формированием полей в заданных объемах, их канализацией и т. д. Важно, что отдельно взятые устройства должны служить элементами более сложных радиосистем.

Рассмотрим различные элементы, основанные на использовании ОР. В качестве одного из них может служить сложный ОР, используемый в ГДИ, другие содержат ОР с различными пассивными и активными неоднородностями. Простейшей из них является подвижный металлический поршень, с помощью которого осуществляется управление параметрами резонансного волнового пучка ОР. Проведенные эксперименты для полусферического ОР, образованного круглыми медными зеркалами, в 4-мм диапазоне волн показали, что по мере движения поршня от положения «заподлицо» с поверхностью зеркала наблюдается деформация кривизны волнового фронта резонансного пучка — искажение фронта в центральной части повторяет форму поршня вблизи поверхности фронта и ослабевает по мере удаления к противоположному зеркалу. При изменении положения поршня возмущение поля возрастает и приводит к срыву резонансных колебаний.

Представляет интерес исследование слабых фазовых объектов, управляющих лишь фазовыми параметрами поля ОР, в частности определение пространственного распределения их показателя преломления. Количественной характеристикой объектов является относительный фазовый сдвиг, обусловленный временной задержкой электромагнитной волны при прохождении исследуемой неоднородности. Метод фазовых измерений в резонансных квазиоптических пучках обладает высокой чувствительностью, что позволяет использовать его для изучения про-

цессов в газодинамике, дефектоскопии, неразрушающего контроля качества тонких пленок, нитей, волокон при разработке различных технологических процессов в микроэлектронике, вакуумной, текстильной промышленности. ОР также эффективны для определения свойств анизотропных диэлектриков, а также различных активных полупроводниковых элементов. Для электрических измерений разработаны проточные кюветы на базе ОР, с помощью которых определяется комплексная диэлектрическая проницаемость слабопоглощающих жидкостей [4, 5].

Рассмотрим основные характеристики цилиндрической и зеркальной щелевых линий [2]. При подготовке элементной базы любой линии передачи важна разработка условий их возбуждения, которое обычно осуществляется через волноводно-щелевые переходы; здесь приходится сопрягать закрытую линию с открытой. Переход от стандартного волновода к цилиндрической линии выполняется через симметричный и несимметричный Н-образный волновод, а к зеркальной линии — через симметричный П-образный волновод. Перекачку энергии в зеркальную линию можно осуществить из любой линии поверхностных волн, например из диэлектрического волновода. Наиболее радикальный способ возбуждения зеркальной щелевой линии базируется на использовании генератора, созданного на ее же основе.

Поверхностный характер волны зеркальной щелевой линии позволяет проектировать эффективные направленные ответвители. Такой ответвитель легко изготовить на единой проводящей подложке, обеспечивающей жесткость конструкции. Расчет ответвителей на базе ОВ проводится методом поперечного резонанса, который позволяет определить длину отрезка связанных линий, необходимую для получения заданного коэффициента ответвления. Ответвители, созданные в 4-мм диапазоне, позволяют осуществить полную перекачку энергии с одного плеча в другое при потерях 0,6 дБ (при этом длина ответвителя ~ 40 мм).

Важными функциональными элементами волноведущего тракта являются отражатели, резонаторы на основе ОВ, детекторные секции. Простейшим короткозамыкателем на основе цилиндрической (или зеркальной) щелевой линии может служить проводящий диск, подпаянный к торцу линии; его коэффициент отражения составляет 0,95 в мм-диапазоне. Для построения резонатора, механически перестраиваемого по частоте, необходимо разработать конструкцию подвижного короткозамыкающего отражателя, в качестве которого могут служить проводящие экраны, расположенные в области щели цилиндрической линии. Наиболее эффективными оказались экраны, которые реактивно закорачивают щели ОВ.

На базе зеркальной щелевой линии сконструированы эффективные диодные промежутки для включения полупроводниковых диодов любого функционального назначения: детекторных, модуляторных, генераторных и др.

Практический интерес представляют элементы мм- и субмм-техники на базе ДР, и прежде всего — устройства для возбуждения планарного диэлектрического волновода. Обычно в интегральной оптике для этих целей используют призмённые и решеточные элементы. Планарная технология основывается на организации связи между линейными и планарными диэлектрическими волноводами посредством плавных или рупорно-параболических переходов. Эффективным является переход, осуществляемый посредством скошенной ДР типа гребенки. Фазовая структура поля этого перехода в плоскости решетки полностью совпадает с линиями равных фаз планарного диэлектрического волновода.

В данной схеме связь осуществляется на основной пространственной гармонике ДР. С помощью скошенной ДР в планарном волноводе можно осуществить различные варианты формирования пучков, что необходимо для создания устройств фокусировки, фильтров и неотражающих опор в рамках интегральных диэлектрических схем мм-диапазона.

Систематические исследования преобразования поверхностных волн в объемные позволили определить оптимальные условия ввода (вывода) энергии в диэлектрический волновод с помощью ДР. Эксперименты, проведенные на длине волны $\lambda_0 \approx 5$ мм, показали, что возбуждение волновода элементом связи ДР, находящимся на прицельном расстоянии от волновода, носит экстремальный характер.

Антенны мм- и субмм-волн на основе ОВ и ДР

Режим быстрой вытекающей волны цилиндрической или зеркальной щелевой линии положен в основу создания малогабаритных антенн мм-волн. Свойства цилиндрического (или зеркального) щелевого излучателя зависят от его длины L . Для длинного излучателя ($L > 10\lambda_0$) имеет место черенковское излучение с углом раскрытия 2α (излучение происходит на H_{00} -типе колебания). При этом α зависит от длины волны возбуждающего поля λ_0 , что позволяет осуществить частотное сканирование луча от $\alpha=0$ (при $\lambda_0=\lambda_{tr}$) до $\alpha=90^\circ$ (при $\lambda_0=\lambda_{cr}$) с частотно-угловой чувствительностью A_r . Последняя в квазистатическом приближении не зависит от геометрических параметров излучателя и определяется только эффективной диэлектрической проницаемостью ϵ_{ef} , что связано с черенковским механизмом излучения. Частотные сканеры на основе цилиндрического и зеркального щелевых излучателей имеют высокую чувствительность, поперечные габариты $\sim 0,1\lambda_0$. Короткие цилиндрические излучатели имеют $L \approx 5\lambda_0$, их диаграмма направленности теряет форму черенковского конуса, ее форма слабо зависит от λ_0 , и излучение становится осевым ($\alpha=0$). Если для такого излучателя $\epsilon=1$, то он в одномодовом режиме перекрывает весь мм-диапазон. Поэтому короткий цилиндрический щелевой излучатель является слабонаправленным и широкодиапазонным. Проведены систематические исследования [5, 6] по согласованию зеркального щелевого излучателя с полем параболического рефлектора, а также изучены зеркальные антенны с облучателем в виде матрицы зеркальных щелевых излучателей. Установлена высокая эффективность таких облучателей для оригинальных зеркальных антенн, а также для проектирования активных фазированных решеток, элементами которых являются цилиндрические или зеркальные щелевые излучатели.

Разработаны [6] приемно-передающие антенны мм-диапазона на основе ДР с высоким коэффициентом развязки. Здесь также используется эффект преобразования поверхностных волн в объемные (и наоборот). Рассмотрим, например, ДР и расположенные на ней два одинаковых диэлектрических волновода с осями, перпендикулярными образующим ДР. Пусть по одному из волноводов распространяется поверхностная волна, которая при определенных условиях излучается в виде объемной волны, формируя в свободном пространстве диаграмму направленности. Если в дальней зоне поместить рассеиватель, то часть энергии отразится от него в обратном направлении и возвратится на решетку. В соответствии с теоремой взаимности во втором волноводе отраженная препятствием волна возбудит волноводную моду. Таким образом, открытая система «ДР + два диэлектрических волновода» представляет собой приемно-передающую антенну. Эксперименты, прове-

денные в 4-мм диапазоне, показали, что коэффициент передачи передающего канала $\sim 0,98$, а развязка составляла -70 дБ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сиренко Ю. К., Шестопапов В. П. Динамическая теория решеток. Киев, 1989. [2] Шестопапов В. П. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1994. 35, № 4. С. 3. [3] Шестопапов В. П. Морсовские критические точки дисперсионных уравнений. Киев, 1992. [4] Шестопапов В. П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники. Т. 1: Открытые структуры. Киев, 1985. [5] Шестопапов В. П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники. Т. 2: Источники. Элементная база. Радиосистемы. Киев, 1985. [6] Шестопапов В. П., Вертий А. А., Ермак Г. П. и др. Генераторы дифракционного излучения / Под ред. В. П. Шестопапова. Киев, 1991. [7] Шестопапов В. П. Дифракционная электроника. Харьков, 1976. [8] Шестопапов В. П. // ДАН СССР. 1981. 262, № 5. С. 1116.

Поступила в редакцию
07.02.94

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1994. Т. 35, № 5

УДК 531.35

ДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ РАДИОСВЯЗИ

Е. Ф. Томилин

(кафедра физики Земли)

Физическая основа работы антенн системы радиосвязи объясняется с помощью анализа взаимодействия точечных электрических зарядов, учитывающего скорости зарядов и скорость распространения поля в вакууме. На примерах электрической и магнитной антенн показано, что радиосвязь осуществляется в результате динамического взаимодействия электрических зарядов материала передающей и приемной антенн. Приведены соотношения, определяющие взаимодействие движущихся точечных электрических зарядов. Статья представляет методический интерес, и ее результаты могут найти применение в научных исследованиях и в инженерной практике.

Электрические антенны

Обращаясь к теории радиосвязи, ограничимся рассмотрением лишь физической основы работы антенн в радиоканале. Диссипативными потерями и дифракционным рассеянием энергии на трассе распространения будем пренебрегать (приближение идеальной радиосвязи). Постановка такой задачи определяется необходимостью поиска более простых, нежели существующие [1—3], моделей радиосвязи.

В предлагаемой работе удалось установить основные закономерности процесса радиосвязи, т. е. механизм передачи энергии радиосигналов в пространстве между антеннами, на основе анализа движения зарядов в антеннах. В качестве передающей и приемной антенн вначале рассмотрим симметричные полуволновые вибраторы (диполи). Это позволяет на примере простейших антенн раскрыть физическую сущность явления, используя относительно простой математический аппарат.

На передающей стороне системы радиосвязи (рис. 1), на выходе передатчика, к внутренним концам вибраторов подводится эдс ВЧ-колебаний, которая записывается в виде $V \sin \omega t$ (на рис. 1 источник эдс не показан).