

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ,
МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ**

Научное направление:
«Проблемы современной радиотехники»

НАУЧНО – ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА

«ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН
В ОБЪЕМНЫЕ НА ПРОСТРАНСТВЕННО–РАЗВИТЫХ МЕТАЛИЧЕСКИХ
НЕОДНОРОДНОСТЯХ »

под девизом: «Излучение»

СУМЫ – 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
РАЗДЕЛ 1 ОБЩИЕ СВОЙСТВА ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАЮЩИХ СИСТЕМ	7
РАЗДЕЛ 2 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	16
2.1. Однорядные периодические системы	16
2.2. Двухрядные периодические системы	19
РАЗДЕЛ 3 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	27
ВЫВОДЫ	34
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	35

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ГДИ – генератор дифракционного излучения

ДВ – диэлектрический волновод

ДИ – дифракционное излучение

ДН – диаграмма направленности

ДР – дифракционная решетка

ЭВП – электровакуумный прибор

КСВ – коэффициент стоячей волны

K_{Π} – коэффициент передачи

ЛБВ – лампа бегущей волны

ЛОВ – лампа обратной волны

МКС – многосвязные квазиоптические системы

МСМ – миллиметровые и субмиллиметровые волны

НО – направленный ответвитель

ОР – открытый резонатор

ЭП – электронный поток

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вакуумная СВЧ электроника в основном развивается по пути создания мощных источников электромагнитного излучения [1-3], которые востребованы в радиолокации, системах связи, ускорительной технике, высокотемпературной обработке материалов, спектроскопии и т.д. Принципы построения таких приборов основаны как на классических методах преобразования энергии электронов в СВЧ поля (клистроны, магнетроны, ЛОВ, ЛБВ)), так и на радиационных эффектах, таких например, как черенковское, циклотронное и дифракционное излучения (черенковские ЛОВ, мазеры на циклотронном резонансе, лазеры на свободных электронах, оротроны и генераторы дифракционного излучения (ГДИ)). В течение последних десятилетий вакуумная СВЧ электроника характеризуется высокими темпами развития [4,5]. Внедрение новых принципов построения электровакуумных приборов (ЭВП), непрерывное совершенствование технологии их изготовления позволило значительно увеличить надежность этих приборов и реализовать их в миллиметровом – субмиллиметровом диапазонах (МСМ) волн. Несмотря на достигнутые успехи в создании мощных электровакуумных источников колебаний терагерцового диапазона волн [6,7], актуальным остается вопрос реализации низковольтных гетеродинных источников излучения, которые могли бы конкурировать с твердотельными генераторами. Кроме того, в этом направлении остается проблема создания элементной базы субмиллиметрового и инфракрасного диапазонов, которая требует применения принципиально новых физических и технологических решений, основанных, например, на использовании многосвязных квазиоптических систем (МКС) [8,9], которые по своим свойствам значительно отличаются от традиционных волноводных и резонаторных систем закрытого типа, используемых ранее для освоения длинноволновой области диапазона СВЧ.

Актуальность темы. Среди открытых структур, используемых в МКС, наряду с открытым резонатором (ОР) и открытым волноводом важное место занимают области связи, выполненные в виде дифракционных решеток различных модификаций (периодических металлических и

металлодиэлектрических структур), которые также могут быть использованы как самостоятельные элементы при построении антенных систем и элементной базы МСМ волн. При дифракции электромагнитных полей на дифракционной решетке (ДР) обычно осуществляется «двухактовое» преобразование волн, когда объемная (падающая) плоская волна преобразуется в объемные (рассеянные) однородные плоские и неоднородные (поверхностные) волны. Этот класс краевых задач подробно изучен в работе [10] и частично реализован в эксперименте [11,12]. Кроме того, значительный интерес представляют процессы преобразования поверхностных волн распределенных источников в объемные на периодических неоднородностях. Подобное явление наблюдается при равномерном и прямолинейном движении электронного потока (ЭП) вблизи металлических ДР или периодических металлодиэлектрических структур. При этом собственное поверхностное поле ЭП рассеивается на ДР, и хотя бы одна из его гармоник превращается в объемную волну дифракционного или черенковского излучений. Заметим, что превращение поверхностной волны ЭП на ДР в дифракционное излучение (ДИ) также является примером двухактового процесса дифракции. Кроме того, в МСМ технике важное место занимают эффекты, связанные с преобразованием ДР поверхностных волн диэлектрического волновода (ДВ). В этом случае поверхностные волны ДВ трансформируются с помощью ДР либо в поверхностные же волны ДВ, либо в объемные волны, отрывающиеся от них.

Поэтому задача системного анализа и исследования процессов преобразования поверхностных волн ДВ на периодических металлических неоднородностях является актуальной.

Цель и основные задачи исследования. Целью настоящей работы является определение оптимальных электродинамических характеристик однорядных и двухрядных ДР для построения на их основе новых модификаций функциональных устройств СВЧ.

Научная новизна работы. В работе систематизированы результаты исследований однорядных металлических ДР и проведено исследование двухрядных систем, на основании которых рассмотрены варианты выполнения квазиоптических направленных ответвителей и делителей мощности.

Практическое значение работы. Результаты работы могут быть использованы при разработке элементной базы устройств МСМ волн, а также при создании новых лабораторных работ по специальным курсам для студентов направления подготовки “физическая и биомедицинская электроника”. В настоящее время данные результаты вошли в отчет по госбюджетной теме № 0109U001378 и используются при изложении дисциплин “Теория поля” и “Радиофизические методы диагностики материалов”.

РАЗДЕЛ 1

ОБЩИЕ СВОЙСТВА ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАЮЩИХ СИСТЕМ

В качестве простейшего (однорядного) преобразователя поверхностных волн в объемные применяются разнообразные ДР, которые условно можно разбить на два класса: ДР на прохождение и отражательные ДР. Для первых ДР направленное излучение возникает в обоих полупространствах относительно решетки, а для вторых только в пространстве над решеткой. Развитые, математически строго обоснованные методы решения задач дифракции плоских (объемных) волн заданной частоты на периодических двухмерных решетках с металлическими элементами различного профиля идеальной проводимости позволили детально восстановить картину рассеянного поля в виде Фурье-составляющих амплитуд объемных или поверхностных волн [13].

В отличие от метода дисперсионных уравнений, в задачах дифракции получаются соотношения, определяющиеся через характеристики заданного падающего поля неоднородной волны и геометрических параметров решетки. Положительной особенностью дифракционного подхода является тот факт, что при решении возникающих краевых задач можно эффективно использовать строгий математический аппарат, развитый в теории дифракции обычных плоских волн.

Используемый дифракционный подход как в случаях ДВ, так и ЭП, предусматривает наличие внешнего рассеивающего металлического препятствия, находящегося в поле неоднородной волны. При этом волноведущая структура поверхностной волны остается регулярной, существующее расстояние от источника неоднородной волны до рассеивателя (прицельное расстояние) позволяет изменить степень связи в структуре источник – рассеиватель [10,14].

Наиболее наглядную динамику преобразования поверхностных волн в объемные можно проанализировать на примере плоской ленточной ДР, элементы которой расположены нормально к оси ДВ. Схематическое изображение такой системы с обозначением основных параметров

представлено на рис. 1.1 а. Многие свойства представленных систем являются характерными также для решеток из брусьев и отражательных ДР (рис. 1.1 б).

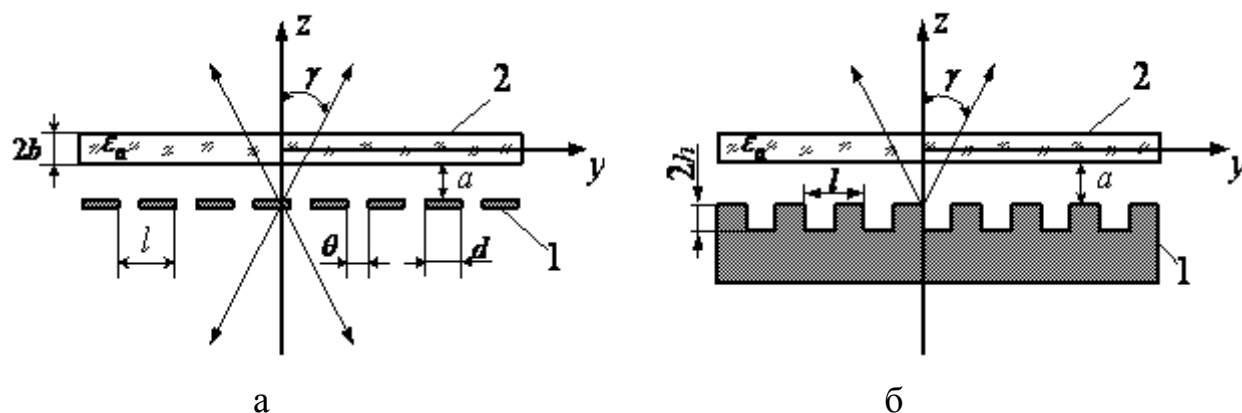


Рис. 1.1. Простейшие типы излучающих систем на базе ленточной (а) или отражательной (б) металлических дифракционных решеток: 1 – дифракционная решетка; 2 – распределенный источник излучения (ДВ или ЭП); l – период; d – ширина лент; θ – ширина щели; a – прицельное расстояние; $2b$ – толщина ДВ; $2h$ – глубина щелей; ϵ_g – диэлектрическая проницаемость ДВ. (Стрелками показаны некоторые из вариантов излучения объемных волн под углами γ)

При решении теоретической задачи предполагается, что вдоль ДВ с диэлектрической проницаемостью ϵ_g распространяется замедленная волна.

В процессе распространения заданная электромагнитная волна рассеивается на периодической неоднородности ленточной ДР. При этом возникает поле, существующее по обе стороны от плоскости решетки, излучение от которого условно показано стрелками на рис. 1.1 (в случае отражательной ДР излучение присутствует только в верхней полуплоскости рис. 1.1б).

Путем анализа результатов решения описанной выше задачи дифракции поверхностной волны ДВ на металлических периодических неоднородностях [15] целесообразно выделить следующие основные результаты, которые в дальнейшем используются при исследовании различных модификаций излучающих металлических ДР.

1. Условие излучения пространственных волн в системе ДВ – ленточная ДР (или решетка из брусьев прямоугольно сечения) определяется следующим соотношением [15]:

$$|\cos \gamma_n| = \frac{1}{k} \left(\alpha - \frac{2\pi n}{l} \right) \leq 1, \quad (1.1)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, l – период решетки; n – номер пространственной гармоники, которая излучается; γ_n – угол излучения гармоники с индексом $n < 0$; α – постоянная распространения; λ – длина волны.

Из соотношения (1.1) следует, что волны с $n \geq 0$, $|\cos \gamma_n| > 1$ представляют собой спектр неоднородных плоских волн, существующих вблизи решетки и распространяющихся вдоль оси Oy с фазовыми скоростями $v_\phi < c$. Для всех остальных волн с индексами $n < 0$ выполняется условие их излучения в окружающее пространство, что характеризует их как объемные волны ДИ. Таким образом, при рассеянии неоднородной волны планарного ДВ на периодическом рассеивателе в виде ленточной решетки поле дифракции представляет собой суперпозицию плоских волн, часть из которых уходит в свободное пространство под некоторыми углами, определяемыми из (1.1), в виде спектра объемных волн, а остальные волны локализованы вблизи рассеивателя в виде спектра медленных гармоник. Выбрав соответствующим образом параметры электродинамической структуры и распространяющейся вдоль ДВ поверхностной волны (l, α, k, n), можно добиться преобладания того или иного типа волн.

2. Для полупрозрачной решетки из брусьев прямоугольного сечения условие излучения также определяется соотношением (1.1), но при этом необходимо учитывать влияние толщины брусьев $2h$ на его интенсивность. Как показано в [14] оптимальное значение толщины брусьев определяется следующим выражением:

$$2h = N \frac{\lambda}{2} + \theta \frac{4}{\pi} \ln \sin \frac{\pi \theta'}{2}, \quad (N = 1, 2, \dots), \quad (1.2)$$

где θ соответствует обозначению на рис. 1.1 а, $\theta' = \theta/l$.

В решетке с оптимальным профилем по толщине брусьев $2h$ должно укладываться число полуволен, несколько меньшее целого числа. Поправка к полуволновой толщине $\Delta h = \theta \frac{4}{\pi} \ln \sin \frac{\pi \theta'}{2}$ одинакова для всех гармоник и определяется только геометрическими параметрами решетки вне зависимости от длины волны и угла излучения. Эта поправка максимальна при ширине щели $\theta \approx 0,3$ и достигает $\Delta h_{\max} \approx -0,77\theta = -0,23l$. Если по толщине брусьев укладывается нечетное число четвертей волн, то их амплитуды минимальны:

$$2h = (2N + 1) \frac{\lambda}{4} + \theta \frac{2}{\pi} \ln \sin \frac{\pi \theta'}{2}, \quad (N = 0, 1, 2, \dots). \quad (1.3)$$

3. В [10,14] показано, что одним из определяющих факторов, от которого зависит интенсивность излучения, является коэффициент заполнения полупрозрачных решеток из брусьев:

$$u = \cos \frac{\pi d}{l}. \quad (1.4)$$

Так, в случае предельных переходов $u \rightarrow 1$ (узкие ленты) и $u \rightarrow -1$ (узкие щели) комплексные амплитуды для первых излучающихся гармоник \tilde{b}_{-1} будут иметь следующий вид [15]:

$$u \rightarrow 1 \quad \tilde{b}_{-1} = \frac{1}{2} \frac{u - 1 + \frac{1}{2}(1 - u) \xi [\xi(1 - u) + u - 1]}{1 - (1 - u) \left(\frac{\xi^2}{2} + i \sqrt{k^2 - \xi^2} \right)}, \quad (1.5)$$

$$u \rightarrow -1 \quad \tilde{b}_{-1} = \frac{\xi \left[\left(\ln \frac{1+u}{2} + \pi \operatorname{ctg} \pi \xi \right) (u+1) + \frac{2u\xi}{1+\xi} + \frac{2(\xi-1)}{\xi} \right]}{2 \left\{ \frac{1}{1+\xi} + i\sqrt{\kappa^2 - \xi^2} \left[\ln \frac{1+u}{2} + \pi \operatorname{ctg} \pi \xi + \frac{2\xi^2 - 1}{\xi(1+\xi)} \right] \right\}}, \quad (1.6)$$

где $\kappa = kl/2\pi = l/\lambda$ – волновое число; ξ – параметр, содержащий характеристики неоднородной волны (диэлектрическую проницаемость и его ширину).

Из асимптотических выражений (1.5) и (1.6) следует, что в случае узких щелей рассеивателя ($u \rightarrow -1$) величина \tilde{b}_{-1} убывает значительно вследствие логарифмической особенности поведения знаменателя (1.6). Для узких лент ($u \rightarrow +1$) спадание амплитуды излучающейся гармоники более плавное, так как числитель (1.5) стремится к нулю как функция $(1-u)$. С физической точки зрения такое различие в характере поведения амплитуды с индексом $n = -1$ можно объяснить следующим. В случае узких щелей плотность токов смещения в щелях между лентами решетки возрастает при их сближении. При этом амплитуда излучающейся в свободное пространство волны должна нарастать. Однако при $u \approx -1$, амплитуда излучающейся гармоники обращается в нуль. Из этого следует, что в небольшом интервале изменения коэффициента заполнения ДР функция $\tilde{b}_{-1}(u)$ должна достигнуть своего максимума и обратиться в нуль, что и приведет к резкому изменению комплексной амплитуды \tilde{b}_{-1} . При $u \rightarrow 1$ плотность токов смещения мала, так как расстояние между лентами велико и стремится к нулю при его дальнейшем увеличении. Это и отражается в плавном убывании функции $\tilde{b}_{-1}(u)$, описываемой выражением (1.5), при подходе коэффициента заполнения к предельному значению $u = 1$.

4. Для отражательной ДР типа «гребенка» условия излучения, в первом приближении, также могут быть определены из соотношения (1.1), а угол максимального излучения связан с параметрами решетки и ДВ следующим соотношением [15]:

$$\cos \gamma_n = \frac{\lambda}{\lambda_g} + \frac{n}{\kappa}, \quad n = -1, -2, -3, \dots \quad (1.7)$$

Если различные типы волн не обладают одинаковой фазовой скоростью, количество главных лепестков диаграммы направленности структуры ДВ - ДР будет соответствовать количеству распространяющихся типов волн. В предположении, что излучается только гармоника с $n = -1$, по измеренным значениям l , λ и γ_n можно определить λ_g , т.е. относительные фазовые скорости каждого типа волн, что, в частности, используется при калибровке ДВ. Предполагая, что отражательная ДР – идеально проводящая, для каждого значения θ также можно подобрать резонансную глубину щелей, при которой амплитуда излучающейся волны будет максимальной:

$$h = (2N + 1) \frac{\lambda}{4} + \theta \frac{2}{\pi} \ln \sin \frac{\pi \theta'}{2}, \quad (N = 0, 1, 2, \dots). \quad (1.8)$$

Минимум излучения наблюдается при глубине щелей:

$$h = N \frac{\lambda}{2}, \quad (N = 1, 2, \dots). \quad (1.9)$$

В этом случае излучение отсутствует вообще. Таким образом, различие между величиной энергии излучения от гребенки с оптимальной глубиной щелей (1.8) и неоптимальной глубиной (1.9) еще более значительное, чем для полупрозрачной решетки из брусьев.

Максимально допустимое отклонение глубины щелей $\pm \Delta h$ от оптимального значения, при котором величина мощности излучения S_{-n} будет составлять не менее $\frac{1}{2}(S_{-n})_{\max}$ для углов излучения $\left| \gamma_n - \frac{\pi}{2} \right| \leq \frac{\pi}{4}$, определяется выражением [14]:

$$|\Delta h| \leq \lambda \frac{\theta'}{2\pi \sin \gamma_n}. \quad (1.10)$$

Это ограничение используется для определения допусков при изготовлении реальных решеток.

Рассмотренные резонансы диаграммы направленности (ДН) по глубине щелей получили название аномалий Вуда, которые связаны с появлением быстрых дифракционных гармоник, скользящих вдоль решетки со скоростью, близкой к скорости света [14].

Наиболее благоприятным для отражательных ДР является режим излучения, близкий к нормальному ($90^\circ < \gamma_{-1} < 130^\circ$). В этом секторе углов ширина ДН минимальна, существует только одна излучающая пространственная гармоника с $n = -1$ и отсутствуют условия дифракции Брэгга второго порядка ($l \neq \lambda_g$).

5. Успешное применение дифракционных решеток в приборах и устройствах МСМ диапазонов связано с правильным выбором габаритных размеров периодических структур. В электронике исследование минимально допустимых размеров решетки, при которых излучаемая мощность и угол излучения остаются практически такими же, как и в случае решетки больших размеров, приобретает важное практическое значение при миниатюризации электронных приборов и при уменьшении рабочих зазоров в магнитных фокусирующих системах. В измерительной технике необходимо учитывать влияние осевой длины решетки на величину угла излучения в приборах (волномеры, направленные ответвители, измерители коэффициента замедления волноводов поверхностных волн), использующих явление дифракции поверхностных волн на периодических структурах, поскольку измеренный угол излучения определяет точность работы таких приборов. В антенной технике актуальным является расчет характеристик антенных решеток конечной длины.

Таким образом, исследование влияния длины периодической структуры на характеристики дифракционных полей представляет собой самостоятельную и весьма важную задачу современной радиофизики, которая к настоящему времени в основном решается экспериментальными методами для конкретной

геометрии ДР. Так, в частности, приведенные в [14] экспериментальные результаты показали, что формирование лепестка диаграммы излучения с шириной $2\Delta\gamma^\circ \approx 5^\circ - 8^\circ$ возможно при количестве периодов $N \geq 20$. Данный результат коррелирует с эмпирическим соотношением для плоской антенной решетки синфазных линейных элементов [15], что может являться основой при ориентировочном выборе длины исследуемых ДР.

6. Как показано в [15], если от источника неоднородной плоской волны – планарного ДВ, находящегося в плоскости xOy , на некотором расстоянии a расположить ДР, повернутую на угол α от оси ДВ, то пространственное положение излучающейся части рассеянного поля будет определяться двумя углами: θ_n – углом в вертикальной плоскости, проходящей через оси y, z и φ_n – углом в горизонтальной плоскости, проходящей через оси y, x . При $\alpha = 0$ от решетки отрываются объемные волны, которые распространяются только в плоскости, проходящей через ось ДВ перпендикулярно плоскости ДВ. В случае «скошенной» решетки ($\alpha \neq 0$) пространственное распределение излучения имеет двухмерный характер. Не менее интересным для такой структуры является наличие критического угла:

$$\alpha_{кр} = \arccos \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\kappa\beta}{n} - \frac{n\beta}{\kappa} - \frac{\kappa}{n\beta} \right) \right]. \quad (1.11)$$

где $\beta = v/c = 1/\sqrt{\epsilon}$ – относительная скорость волны в волноводе, $\alpha = \pm\alpha_{кр}$, для которого рассеянное поле представляет неоднородную плоскую волну, распространяющуюся вдоль поверхности «скошенной» ДР. Следовательно, при $\alpha = \alpha_{кр}$ в открытой структуре ДВ и «скошенная» ДР наступает режим поверхностных волн и дальнейшее увеличение α приводит к брэгговской дифракции, для которой $\alpha_{бр} = \arccos \frac{n\beta}{2\kappa}$, $n = 1, 2, 3, \dots$ – порядок дифракции Брэгга. В этом режиме неоднородная поверхностная волна ДВ преобразуется в поверхностную волну ДР. Образовавшаяся новая поверхностная волна распространяется под углом $(180^\circ - \alpha)$ относительно распространения

исходной неоднородной волны. Степень преобразования одной волны в другую определяется продольными размерами ДР и связью ДВ со «скошенной» ДР. Теоретические и экспериментальные исследования такой системы подробно описаны в [15]. В нашем случае электродинамические характеристики таких систем интересны для двухрядных ДР при различной их ориентации относительно оси ДВ.

РАЗДЕЛ 2

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

2.1. Однорядные периодические системы

На основании вышеизложенного, для однорядных систем основополагающими являются экспериментальные и теоретические исследования их электродинамических свойств в заданном диапазоне частот с последующим использованием полученных результатов для исследования двухрядных и многорядных систем различных модификаций. С этой целью использовалась схема измерений рис. 2.1, а также металлические периодические структуры, основные параметры которых представлены в табл. 2.1. При расчете ДР использовались соотношения (1.1) - (1.8), в которых задавались усредненные параметры l , u , h и β_g относительно центральных частот f_0 4-х миллиметрового диапазонов волн, использованных в эксперименте.

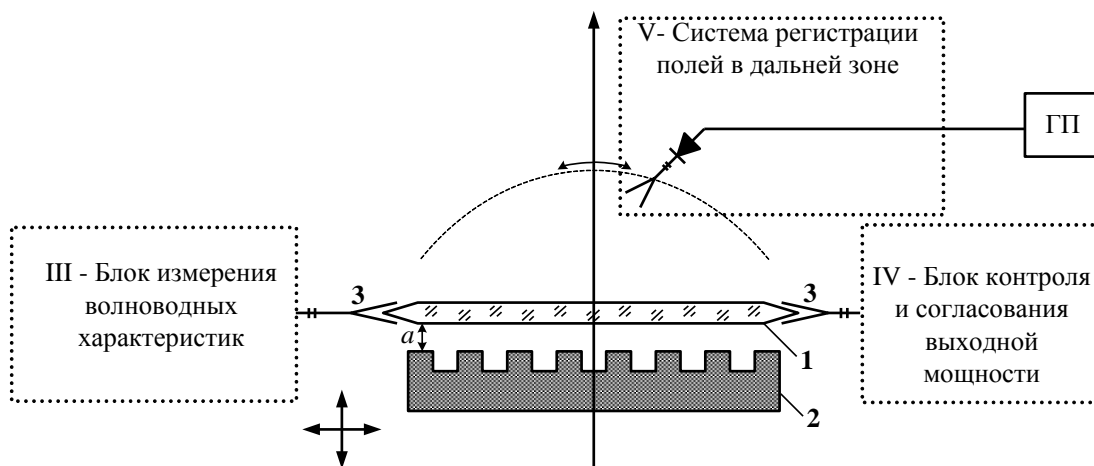


Рис. 2.1. Схема измерения пространственных и волноводных характеристик однорядных периодических неоднородностей : 1 - ДВ; 2 - ДР; 3 –согласованные переходы; ГП – графопостроительный элемент

Таблица 2.1

Параметры металлических периодических дифракционных решеток, которые были использованы для проведения эксперимента в 4-х миллиметровом диапазоне длин волн

Параметры ДР	период l , мм	коэффициент заполнения u	апертура- D , мм	длина- L , мм вдоль оси ДВ	$2h$, мм
Наименование ДР	диапазон длин волн 5-3,7 мм ($f_0 = 78$ ГГц, $\beta_e = 0,778$)				
Решетка из брусьев прямоугольного сечения	3	0	54	60	1
Отражательная ДР на плоском зеркале	3	0	54	60	2

Так, в частности, на рис. 2.2 представлены типичные диаграммы направленности излучающих систем из брусьев прямоугольного сечения (1) и отражательной ДР (2) на частоте 78 ГГц, которые использовались затем в двухрядных МКС. Установлено, что максимум мощности ДН соответствует углу $\gamma \approx 90^\circ$, а ее отклонение при отстройке от центральной частоты в заданном диапазоне $f = 60 - 80$ ГГц не превышает $\pm 10^\circ$, что соответствует расчетным параметрам решеток табл. 2.1. При этом значения прицельного параметра, составляли величину $a \approx 1$ мм. Волноводные характеристики такой системы и коэффициента передачи $\left(K_{II} = \frac{P_{вых}}{P_{вх}} \right)$ и коэффициента стоячей волны (КСВ) свидетельствовали об эффективном преобразовании поверхностной волны ДВ в объемную волну. Так, в частности, для сектора углов излучения $90^\circ \pm 10^\circ$ значения $K_{II} = 0,2$ и $КСВ = 1,3$.

Описанные в разделе 1 (пункт б) свойства металлических ДР при изменении их угловой ориентации, относительно оси ДВ, могут быть использованы при анализе двухрядных ДР с изменением их пространственной ориентации в плоскости осей x, y и регулировки уровня излучения в направлении оси z .

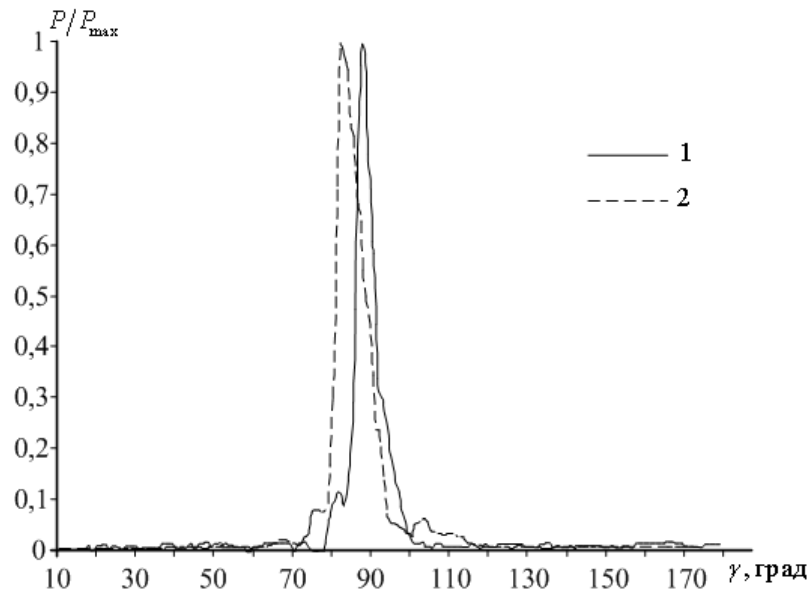


Рис. 2.2. Диаграммы направленности излучения решеток из брусьев (1), отражательной ДР (2) при трансформации поверхностной волны ДВ в объемную для сектора углов $\gamma = 90^\circ \pm 10^\circ$: $L = 60$ мм; $f_0 = 78$ ГГц; $\beta_g = 0,778$

Для дальнейшего сопоставления результатов двухрядных ДР с однорядными, на рис. 2.3 а представлены модель исследуемой системы и ее пространственные характеристики. Приведенная на рис. 2.3 а характеристика свидетельствует о перекачке объемных волн в поверхностные с увеличением угла α до критических значений $\alpha_{кр} \approx 45^\circ$, определяемых соотношением (1.11). При этом, амплитуда объемных (излучаемых) волн уменьшается практически по линейному закону, что свидетельствует о возможности создания на базе таких систем квазиоптических аттенуаторов.

Представленная на рис. 2.3 а пространственная характеристика излучающей системы подтверждается ее волноводными свойствами (рис. 2.3 б), которые демонстрируют эффективное преобразование поверхностных волн ДВ в объемные для области углов $\alpha \leq 45^\circ$.

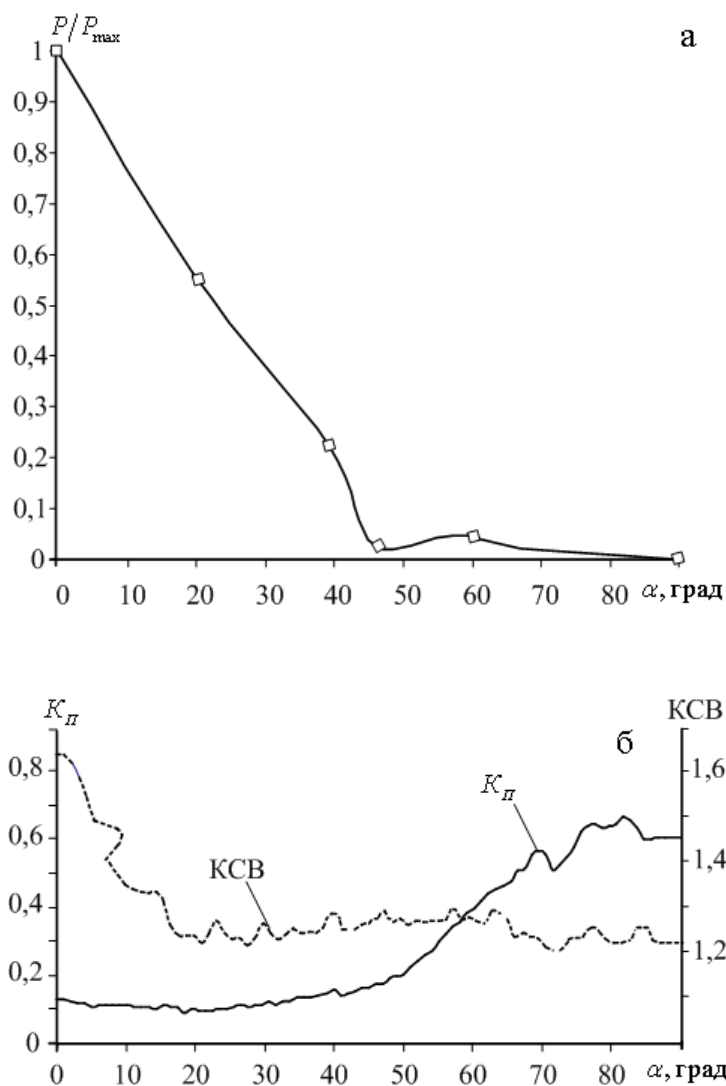


Рис. 2.3. Пространственные (а) и волноводные характеристики (б) излучающей системы из брусьев прямоугольного сечения при изменении угла поворота решетки α относительно оси ДВ

2.2. Двухрядные периодические системы

В общем случае локальные объекты в МКС в виде однорядных и двухрядных дифракционных решеток представляют собой фазовые неоднородности (для волны заданной поляризации) и одновременно являются фильтром, осуществляющим селекцию углового спектра излучения системы ДВ (ЭП) – ДР. При этом могут возникать сильные изменения в структуре полей МКС, что и объясняет неприводимость этих мод к базисным модам прямоугольной симметрии. Особенно сильных изменений следует ожидать, если вносимый в ОР объект обладает резонансными свойствами. Подобная

ситуация возникает при использовании в ОР двойной дифракционной решетки, расположенной на одном из зеркал резонатора. В [10] высказано предположение, что такую решетку целесообразно применять для увеличения эффективности взаимодействия ЭП с резонансным полем ОР. Однако полученные результаты, кроме факта возбуждения поля более сложной структуры, не подтвердили вышесказанное, на основании чего авторы сделали следующий вывод: «Из-за сложности рассматриваемой системы выделить доминирующие механизмы, ответственные за ухудшение свойств ОР, практически невозможно». Однако, в последующем, на основе двухрядных полупрозрачных ДР из брусьев и их комбинации с отражательными ДР, а также с периодическими МДС был предложен и реализован, в рамках экспериментального моделирования, ряд устройств электроники и техники СВЧ [10,12,16], которые указывают на целесообразность исследования двухрядных периодических структур.

Простейшим вариантом двухрядной системы является сочетание решеток из брусьев прямоугольного сечения, расположенных вдоль оси ДВ. Свойства каждой из решеток описаны в разделе 1 и являются основополагающими при анализе многосвязной системы, образованной двумя ДР, возбуждаемыми ДВ. Исследуемая ниже система схематически изображена на рис. 2.4 а и характеризуется тем, что нижняя решетка закреплена неподвижно на юстирующем устройстве, а верхняя ДР установлена с возможностью параллельного перемещения вдоль оси ДВ на величину Δd .

Такая система позволяет реализовать режимы преобразования поверхностных волн в объемные в двух направлениях по оси z и использовать ее в связанных ОР.

Поскольку данная система, при помещении в резонансную МКС, представляет собой фазовую неоднородность в виде фильтра селекции излучаемых волн, то целесообразным является исследование пространственных и волноводных характеристик с изменением фазовой коррекции волн, которая, исходя из вышеприведенного анализа, может быть достигнута как путем смещения ламелей решеток ДР вдоль оси y (Δd), так и изменением угла поворота (α) ДР относительно оси ДВ.

В частности, на рис. 2.4 а представлена зависимость мощности основного лепестка ДН от смещения ламелей ДР, которая подтверждает возможность плавной регулировки излучаемой мощности путем смещения ламелей ДР в пределах $\Delta d/\lambda = 0-0,6$ и наличие резонанса в области $\Delta d \approx \lambda/2$, что коррелирует с волноводными характеристиками системы рис. 2.4 б.

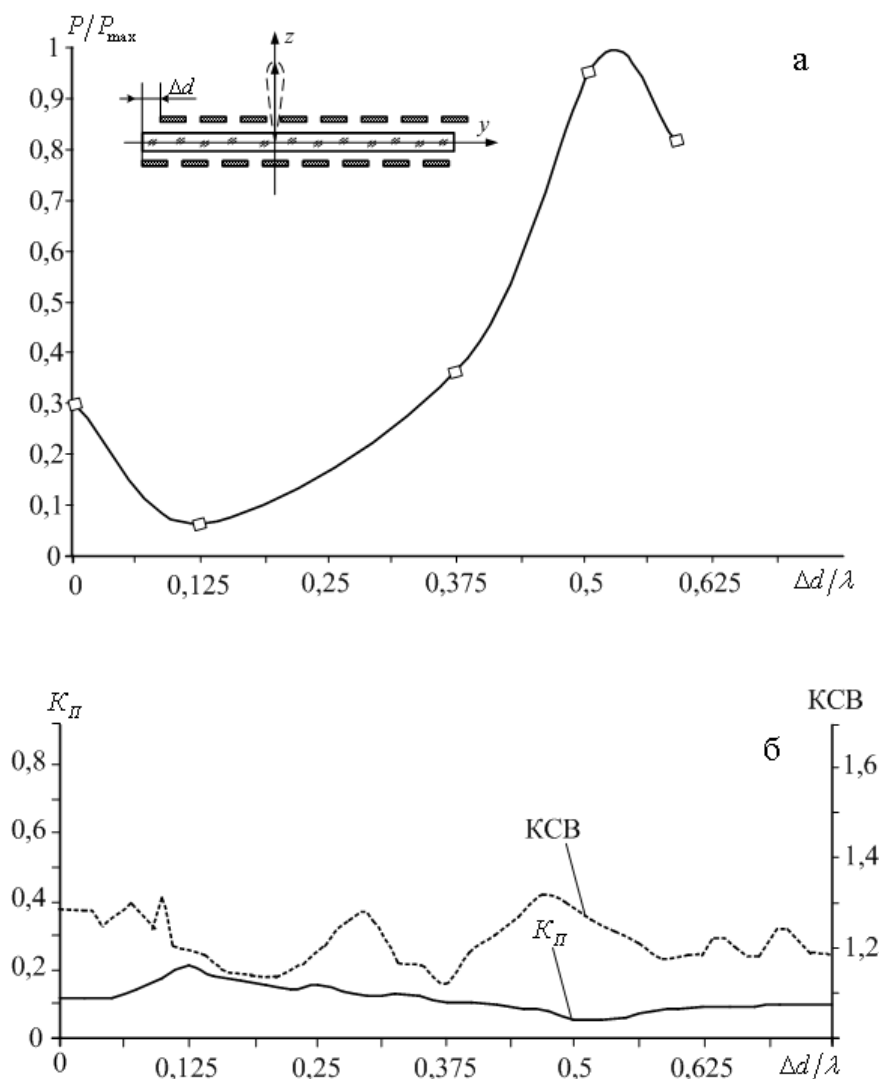


Рис. 2.4. Пространственные – а и волноводные – б характеристики двухрядной системы из брусьев прямоугольного сечения

Ближкий к линейному характер изменения излучаемой мощности от смещения ламелей Δd свидетельствует о возможности применения двухрядных решеток из брусьев при создании квазиоптических аттенуаторов и перестраиваемых делителей мощности, а резонанс в области $\Delta d/\lambda = 0,5-0,6$ может быть использован при селекции колебаний в связанных ОР.

Практический интерес, с точки зрения проверки описанного выше резонансного эффекта на двухрядных ДР из брусьев, представляют волноводные характеристики системы в заданном диапазоне частот ($f = 60 - 80$ ГГц), которые представлены на рис. 2.5.

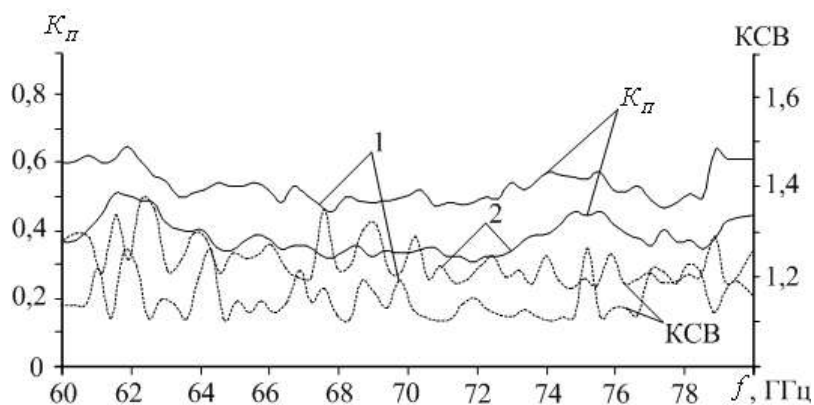


Рис. 2.5. Волноводные характеристики двухрядной ДР из брусьев в заданном диапазоне частот: 1 — $\Delta d/\lambda = 0,15$ — область минимального излучения; 2 — $\Delta d/\lambda = 0,6$ — область максимального излучения

Уменьшение среднего значения $K_{П} \approx 0,6$ в минимуме интенсивности излучения ($\Delta d/\lambda \approx 0,1 - 0,15$) до $K_{П} \approx 0,4$ при максимальной интенсивности излучения ($\Delta d/\lambda \approx 0,5 - 0,6$) подтверждает увеличение эффективности отбора энергии поверхностной волны ДВ при смещении брусьев решеток. При этом уровень значений КСВ системы изменяется в незначительных пределах ($КСВ = 1,1 - 1,3$), что свидетельствует о малой амплитуде дополнительной отраженной волны, возникающей за счет несогласованности поверхностных волн системы ДР — ДВ при фазовой корректировке двухрядной ДР.

Вторым параметром, определяющим уровень эффективности излучения двухрядной системы из брусьев является угол поворота α одной из решеток относительно оси ДВ. Физические аспекты его влияния на преобразование поверхностных волн в объемные кратко изложены в разделе 1 (пункт 6) и подтверждены в разделе 2 путем экспериментального моделирования (рис. 2.3). В частности, на рис. 2.6 а приведена типичная зависимость изменения уровня мощности излучения от угла поворота верхней решетки, которая

демонстрирует практически линейное уменьшение мощности излучения с увеличением угла поворота α , вплоть до значений $\alpha_{кр}$, определяемого по формуле (1.11). При этом важно отметить, что угол поворота верхней решетки незначительно влияет на волноводные характеристики системы (рис. 2.6 б), что свидетельствует о возможности эффективного ответвления части мощности в окружающее пространство при сохранении высоких показателей характеристик основного тракта.

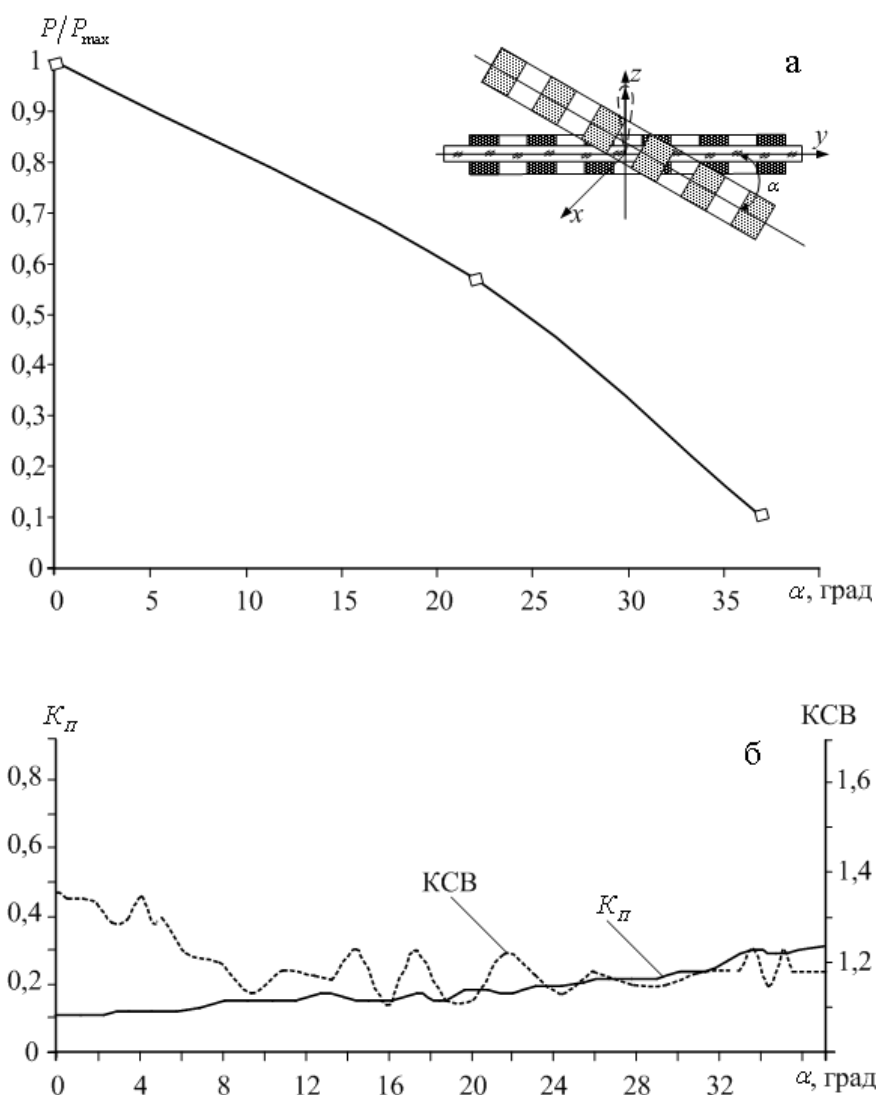


Рис. 2.6. Зависимость относительного значения ДН излучения от угла поворота верхней решетки – а; волноводные характеристики при изменении пространственной ориентации верхней решетки по углу α – б

Практический интерес, с точки зрения повышения отбора энергии от ЭП в приборах дифракционной электроники, представляют более сложные двухрядные ДР, выполненные в различных комбинациях: отражательная – полупрозрачная ДР [10], система двухрядных отражательных ДР [16]. Поскольку теория таких излучающих систем к настоящему времени не создана, то ключевым моментом в изучении их электродинамических свойств являются принципы экспериментального моделирования.

В частности, на рис. 2.7 схематически представлена двухрядная ДР, образованная отражательной и решеткой из брусьев прямоугольного сечения, а также ее пространственные и волноводные характеристики. Параметры исследуемых систем приведены в табл. 2.1. Из сравнения ДН излучения отражательной (1) и двухрядной (2) ДР следует, что их интенсивность, по сравнению с системой без дополнительной решетки из брусьев, возрастает на 40-30% (диаграммы направленности рис. 2.7 а). Волноводные характеристики исследуемой системы, представленные на рис. 2.7 б, свидетельствуют о более эффективном отборе мощности поверхностной волны ДВ по сравнению с однорядной системой. Это может быть использовано как в приборах типа ГДИ, так и в системах фильтрации объемных волн, путем смещения ламелей решеток вдоль оси y , о чем свидетельствуют результаты, для решеток из металлических брусьев.

При реализации ГДИ повышенных уровней мощности практический интерес представляют двухрядные отражательные ДР, которые располагаются в параллельных плоскостях относительно оси z открытого резонатора и образуют вдоль продольной оси движения ЭП (или поверхностной волны ДВ) цепочку связанных щелевых резонаторов [16]. Схематическое изображение такой системы и ее ДН излучения представлены на рис. 2.8. Из рисунка видно, что основной лепесток ДН расположен в области $\gamma \approx 90^\circ$, что коррелирует с ДН для однорядной системы, расположенной в плоскости по нормали относительно оси z . При этом такая система, как и двухрядная ДР из брусьев, обладает резонансными свойствами при смещении ее ламелей относительно оси y , что продемонстрировано на рис. 2.9: максимум интенсивности излучения находится в области $\Delta d/\lambda \approx \lambda/4$. Изменение условия резонансности

излучения двухрядных отражательных ДР, по отношению к двухрядным решеткам из брусьев, от значений $\Delta d \approx \lambda/2$ до значений $\Delta d \approx \lambda/4$ вытекает из соотношений (1.2) и (1.8), которые характеризуют максимальные значения ДН излучения по толщине брусьев решеток и резонансной глубины щелей отражательной ДР.

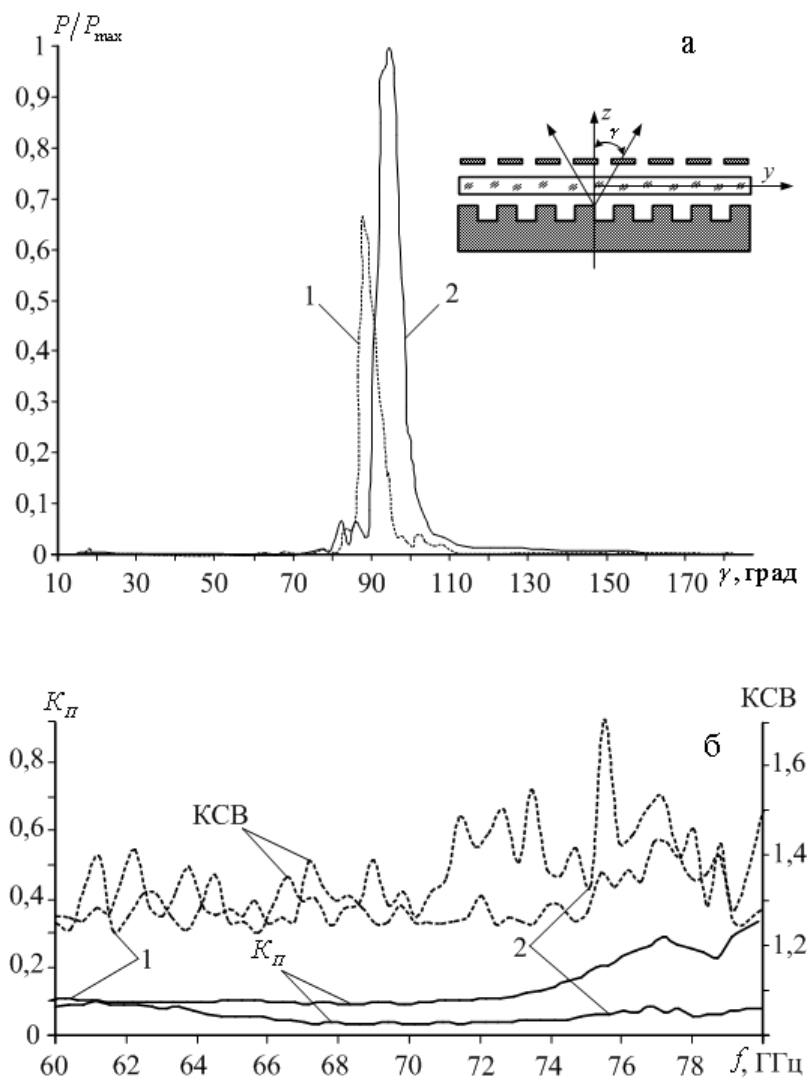


Рис. 2.7. Диаграммы направленности излучения отражательной (1) и двухрядной (2) ДР с ее схематическим изображением – а; волноводные характеристики отражательной (1) и двухрядной ДР в заданном интервале частот – б

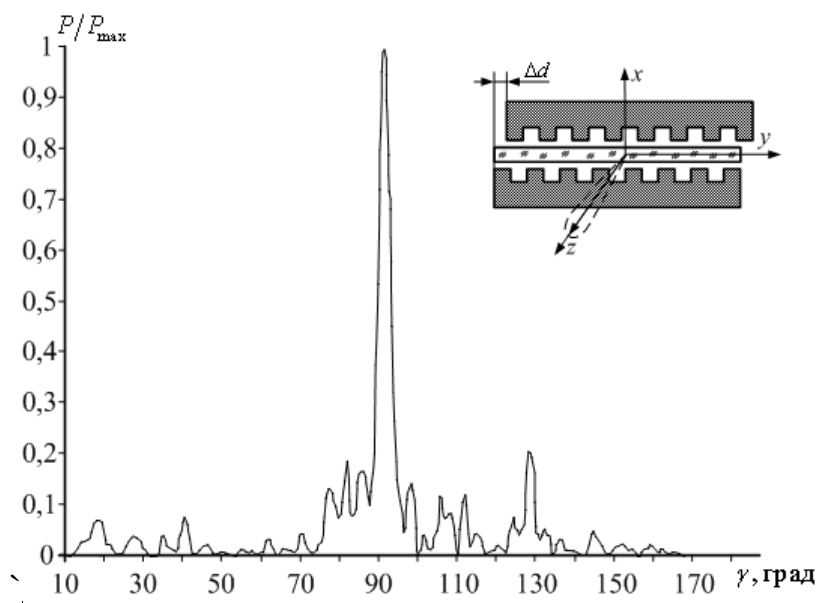


Рис. 2.8. Схематическое изображение двухрядной отражательной ДР и ее диаграмма направленности излучения

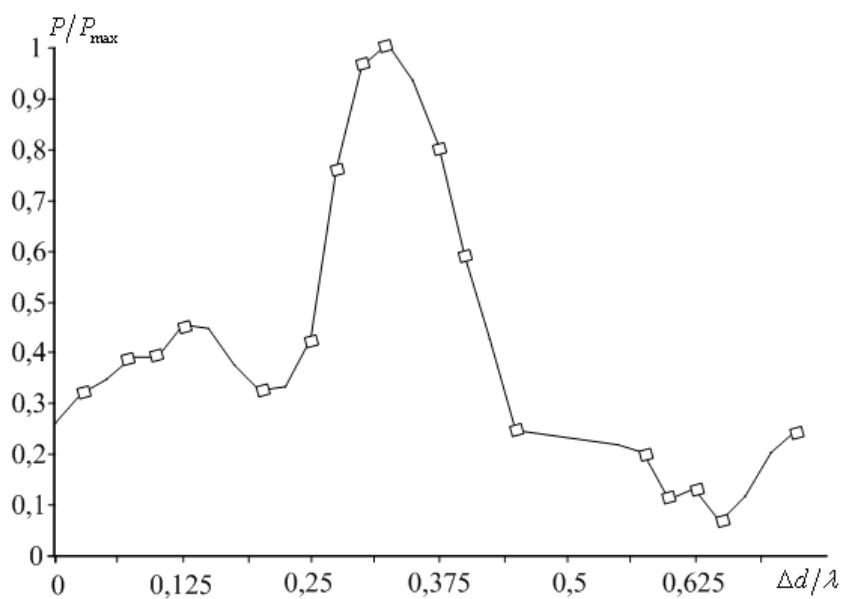


Рис. 2.9. Зависимость интенсивности ДН двойной ОДР от величины смещения ламелей решеток

РАЗДЕЛ 3

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

К основным устройствам СВЧ относятся источники и приемники электромагнитных колебаний, а также элементы измерительных трактов. В данном разделе реализованы несколько модификаций делителей и направленных ответвителей мощности, в которых используются обнаруженные экспериментально для излучающих систем новые свойства.

Направленные ответвители. Общий принцип построения направленных ответвителей (НО) основывается на использовании двух связанных между собой линий передачи энергии [8], по одной из которых проходит основной поток мощности, а во вспомогательной линии - интерференция и разделение прямых и обратных волн.

К настоящему времени в измерительных схемах МСМ диапазонов волн в зависимости от предъявляемых требований используется большое количество модификаций НО. Нами предложена и исследована конструкция НО на основе двух дифракционно-связанных линий передачи с распределенными источниками излучения, которые образованы периодическими структурами и расположенными вдоль них ДВ. На рис. 3.1 показана общая схема выполнения НО.

Основной тракт НО образован периодической структурой 1, вдоль продольной оси которой на расстоянии a расположен диэлектрический волновод 2. Аналогичным образом выполнен вторичный тракт, который также состоит из периодической структуры 3 и диэлектрического волновода 4. Периодические структуры нанесены на поверхности зеркал плоской или цилиндрической формы с апертурой D , оси которых расположены параллельно на расстоянии H и образуют квазиоптическую линию передачи, формирующую пучок пространственных волн. Один из излучателей системы установлен с возможностью плавного перемещения вдоль оси z , что позволяет изменять расстояние H и корректировать фазовые характеристики волн.

Принцип работы НО с дифракционной связью основан на возбуждении синфазных и противофазных пространственных волн. В результате

распространения этих волн вдоль продольной оси НО происходит обмен энергией между излучателями и ответвление части мощности во вторичный канал. Подробно результаты теоретических и экспериментальных исследований преобразования волн ДВ в пространственные и пространственных в поверхностные на периодических структурах изложены в разделе 1.

Остановимся на особенностях волновых процессов в предложенном квазиоптическом НО (рис. 3.1). При подаче на вход I СВЧ-сигнала в диэлектрическом волноводе 2 распространяется замедленная волна, которая рассеивается на периодической структуре 1. При этом возникает поле дифракции, которое представляет собой суперпозицию плоских волн, часть из которых уходит в объем НО под углами α в виде пространственных волн, а остальные локализованы вблизи решетки в виде медленных гармоник, распространяющихся к выходу волновода 2. Угол излучения пространственных волн определяется соотношением:

$$\alpha = \arccos(1/\beta_e + n/\kappa). \quad (3.1)$$

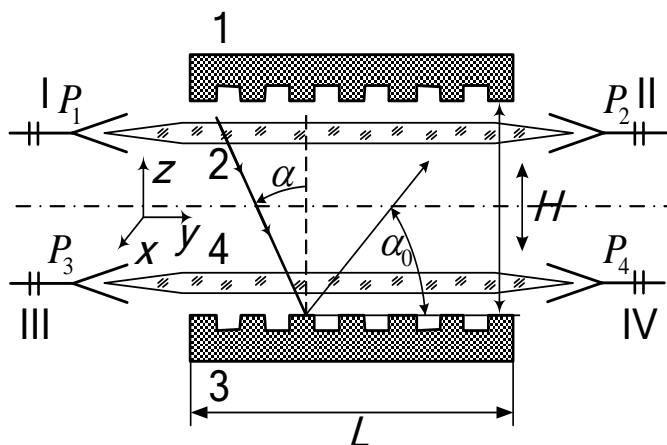


Рис. 3.1. Схематическое изображение конструкции НО на дифракционно-связанных линиях передачи: 1, 3 – периодические структуры, 2, 4 – диэлектрические волноводы; I–IV – плечи направленного ответвителя; P_1 – мощность на входе НО, P_3 – мощность обратной ответвленной волны, P_2 и P_4 – передаваемые мощности

Преобладания того или иного типа волн можно добиться выбором параметров излучателя: периода структуры, скорости волны в волноводе и прицельного параметра a .

Второй этап возбуждения системы рис. 3.1 заключается в падении сформированной под углом α пространственной волны на структуру 3. В результате дифракции полное поле над периодической структурой состоит из падающего и пространственных гармоник рассеянного поля.

Если $l < \lambda/(1 + \sin \alpha)$, то отражаться от структуры 3 под углом $\alpha_0 = 90^\circ - \alpha$ будет только нулевая пространственная гармоника, а остальное поле представляет собой суперпозицию поверхностных пространственных гармоник, распространяющихся вдоль решетки с фазовыми скоростями:

$$v_\phi = kc/(n + k \sin \alpha). \quad (3.2)$$

При $v_\phi \approx v_e$ в диэлектрическом волноводе 4 также возбуждается замедленная волна, которая на периодической структуре 3 трансформируется в пространственную волну. При последовательном преобразовании поверхностных волн в пространственные и пространственных в поверхностные вдоль оси отражателей направленного ответвителя формируются синфазные и противофазные волны, в результате интерференции которых часть падающей и отраженной мощности ответвляется во вторичный тракт.

Геометрические размеры рассмотренного НО выбираются из известных квазиоптики неравенств:

$$\frac{d^2}{H\lambda} \leq \left(\frac{H}{d}\right)^2, \quad L/\lambda \geq 10, \quad (3.3)$$

где $d = D/2$ – радиус апертуры (расстояние от продольной оси до периферии) отражательных зеркал; H – расстояние между зеркалами. Определяющие выполнение законов лучевой оптики в двухзеркальной квазиоптической системе.

Период структуры l выбирается из соотношения (3.1) для заданных значений λ, n, β_g и α . Значения прицельного параметра $a < \lambda$ корректируются экспериментально, путем исследования пространственных характеристик излучающих систем по критерию минимального паразитного воздействия ДВ на поле периодической структуры.

Приведем пример выбора параметров направленного ответвителя и его элементов в диапазоне частот $f = 30 - 37$ ГГц. В качестве источника поверхностной волны использовался полистироловый волновод сечением $7,2 \times 3,4$ мм², который на длине волны $\lambda = 9$ мм обеспечивал относительную скорость $\beta_g = 0,9$. Основной лепесток диаграммы излучения ($n = -1$) пространственной волны формировался под углом $\alpha \approx 70^\circ$, что из соотношения (3.1) соответствовало значению $l = 11,5$ мм. Длина волновода $L = 150$ мм и радиусы излучающих апертур $d = 30$ мм обеспечивали выполнение условий.

Экспериментальные исследования макета НО проводились на модифицированной установке рис. 2.1. В качестве примера на рис. 3.2 приведены характеристики описанной выше конструкции направленного ответвителя для двух расстояний между излучающими зеркалами.

Из приведенных на рис. 3.2 характеристик следует, что при расстояниях между излучателями $H = 65$ мм для заданного интервала частот значения коэффициента ослабления (P_4/P_2) находятся в интервале 3-12 дБ, а коэффициенты направленности (P_3/P_4) – в интервале 15-25 дБ. Улучшения выходных характеристик НО можно достигнуть корректировкой фазы распространяющихся волн при изменении H , что продемонстрировано графиками кривых 2 на рис. 3.2: $P_4/P_2 \approx 3 - 7$ дБ, $P_3/P_4 \approx 30$ дБ.

Установлено, что квазиоптические волновые свойства исследуемой системы сохраняются в интервале значений $H = (5 - 10)\lambda$, для которой выполняется неравенство (3.3).

В частности, на рис. 3.3 проиллюстрированы относительные зависимости уровней мощности $P_4/P_{4\max} = f(H)$ и $P_3/P_{4\max} = f(H)$, регистрируемых соответственно в плечах IV и III (рис. 3.1). Из графиков кривых видно, что

оптимальными с точки зрения развязки ответвленного и отраженного сигналов являются значения $H = 60 - 90$ мм. При значениях $H > 10\lambda$ происходит рост дифракционных потерь, и система становится критичной к юстировке зеркал.

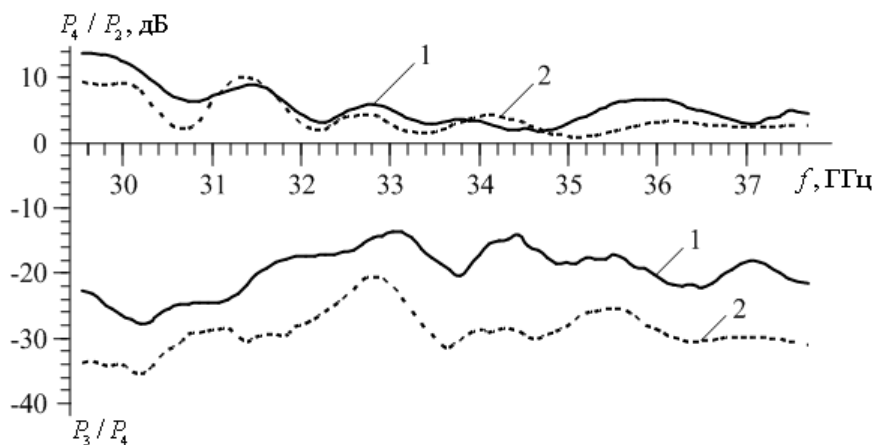


Рис. 3.2. Характеристики ответвителя при $H = 65$ мм (1) и $H = 80$ мм (2)

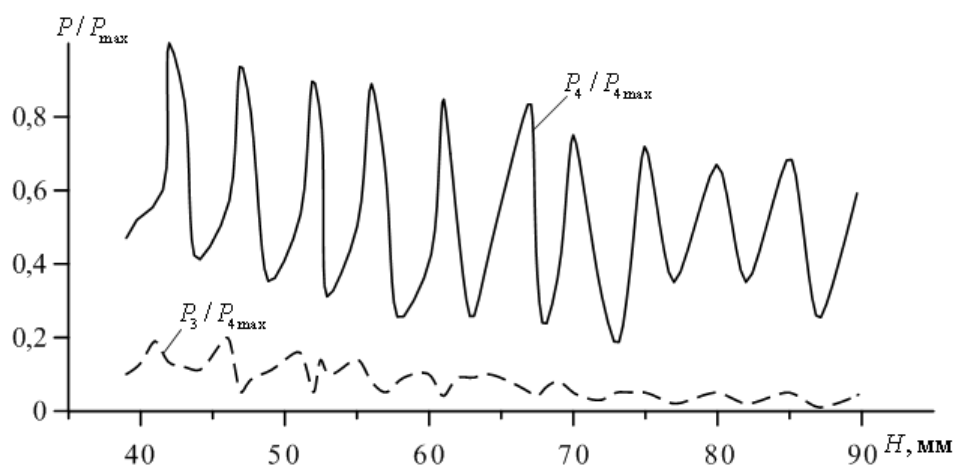


Рис. 3.3. Относительные значения уровней мощности во вторичном канале с изменением расстояния между зеркалами P_{\max} – максимальное значение мощности, поступающей во вторичный канал

Сравнивая характеристики представленного НО с ответвителями на связанных ДВ [17,18], можно сделать следующие выводы: параметры НО в рабочей полосе частот $\Delta f = 5$ ГГц сравнимы с параметрами ответвителя на эффекте направленного переизлучения сигнала с участка резкого излома ДВ [17] при значительно более простой конструкции. Данный направленный ответвитель имеет две возможности корректировки переходного ослабления

(путем изменения прицельного параметра a и расстояния между излучателями H), что снижает технологические требования на изготовление системы в МСМ диапазоне волн.

Делители мощности. Исходя из описанных в подразделе 2.2 электродинамических свойств двухрядных полупрозрачных ДР из брусьев прямоугольного сечения предложены и реализованы два типа квазиоптических делителей мощности, которые представлены на рис. 3.4 а, б.

В состав делителей мощности входит ДВ – 1, который включается в основной СВЧ тракт через согласующие переходы 2. Решетка из брусьев – 3 неподвижно закреплена относительно оси y , а решетка – 4 закреплена на специальном прецизионном устройстве, обеспечивающем линейное ее перемещение вдоль оси y с точностью $\Delta d = \pm 0,01$ мм (рис. 3.4 а), либо угловое перемещение вдоль оси x с точностью $\Delta \alpha = \pm 1^\circ$. Для фиксации отобранной из основного тракта мощности используются приемники излучения – 5, которые в МСМ диапазоне могут быть выполнены, например, в виде рупорных антенн.

На рис. 3.4 в, г приведены амплитудные и волноводные характеристики описанных выше делителей мощности, которые свидетельствуют о возможности 80% отбора мощности из основного тракта ($P_2 = 0,2P_1$) и деления ее поровну при симметричном расположении ДР относительно ДВ ($P_3 = P_4 = 0,4P_1$). При этом мощность в плече P_3 можно плавно регулировать либо путем смещения ламелей (Δd), либо углом поворота ($\Delta \varphi$) ДР – 4 при неизменной мощности P_4 .

Принцип работы таких делителей основан на трансформации поверхностной волны ДВ в объемную, которая возбуждается на решетке из брусьев и по уровню может регулироваться путем изменения фазовых соотношений медленных гармоник волн, возбуждаемых на двухрядной ДР, при смещении ее ламелей либо изменении угла поворота относительно оси ДВ. При расчете параметров двухрядных ДР целесообразно пользоваться соотношениями (1.1) - (1.6), которые подробно описаны в разделе 1 и основываются на общем анализе динамики преобразования поверхностных волн в объемные на периодических неоднородностях.

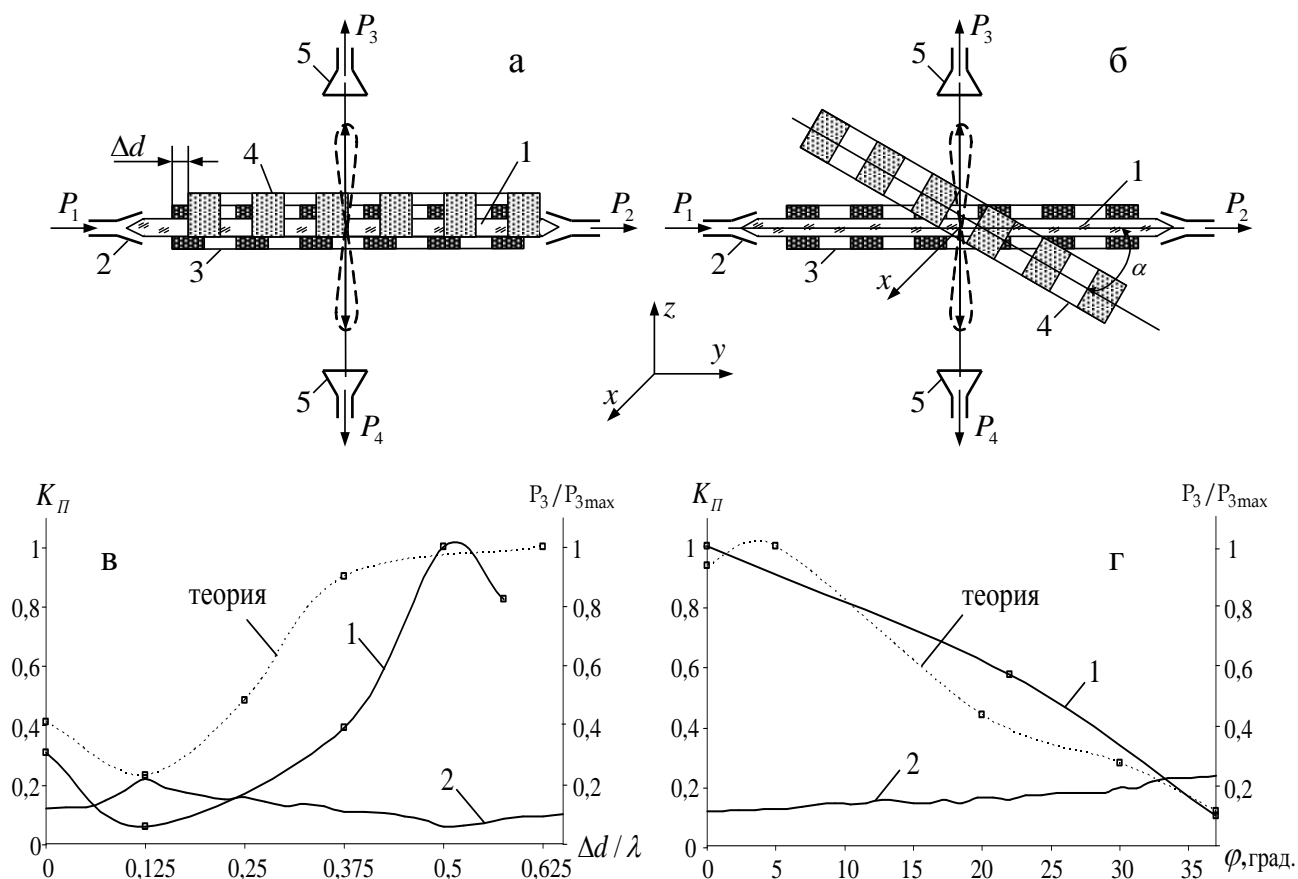


Рис. 3.4. Схемы выполнения и основные характеристики делителей мощности: а – схема выполнения делителя мощности с параллельным перемещением полупрозрачных ДР; б – схема выполнения делителя мощности при угловом перемещении ДР; в, г – зависимости амплитуды излучаемой мощности P_3 и K_{II} основного тракта от величины смещения брусьев и угла поворота ДР, соответственно, (1 – излученная мощность в относительных единицах, 2 – K_{II})

Численное тестирование полученных в работе результатов осуществлялось на примере расчета амплитудных характеристик делителей мощности рис. 3.4. Использовался метод конечных разностей, который в настоящее время является наиболее распространенным численным методом моделирования электромагнитных явлений в произвольной среде.

Данный метод позволяет получить не только качественные, но и количественные результаты, которые могут быть использованы при прогнозировании целесообразности использования заданных типов систем связи в МКС.

ВЫВОДЫ

В результате выполнения данной работы исследованы электромагнитные свойства однорядных и двухрядных излучающих периодических систем устройств в МСМ волн.

1. Путем анализа литературных источников сформулированы основные электродинамические свойства однорядных периодических металлических систем, которые легли в основу при построении двухрядных излучающих систем.

2. Для двухрядных ДР, выполненных в виде решеток из брусьев и отражательных ДР, установлена возможность фазовой корректировки интенсивности излучения путем смещения их ламелей относительно продольной оси ДВ. Показано, что максимальная амплитуда резонансного излучения для решеток из брусьев наблюдается при смещении ламелей $\Delta d \approx \lambda/2$, а отражательных ДР при $\Delta d \approx \lambda/4$.

3. Показана возможность эффективной регулировки излучаемой мощности для системы двухрядной ДР из брусьев путем изменения угловой ориентации одной из решеток относительно оси ДВ. Для такой системы определен критический угол поворота по полному преобразованию объемной волны в поверхностную, который соответствует расчетным значениям.

4. Для двухрядной системы типа отражательная ДР и полупрозрачная ДР из брусьев показана возможность увеличения интенсивности трансформации поверхностной волны в объемную на 30–40% по сравнению с однорядной.

5. Проанализирован принцип работы НО на основе двух дифракционно-связанных источников излучения, предложены и реализованы в конкретных схемах квазиоптические делители мощности, экспериментальные характеристики которых коррелируют с результатами численного анализа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Kleine-Ostmann Thomas. A Review on Terahertz Communications Research // Thomas Kleine-Ostmann, Tadao Nagatsuma // Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. – 2011. – Vol. 32, №2. – P. 143 – 171.
2. Вакуумная СВЧ электроника: Сборник обзоров. – Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2002. – 160 с.
3. Викулов И.П. Американская программа по СВЧ вакуумной электронике HiFIVE / И.П. Викулов, Н.В. Кичаева // Электроника: НТБ. – 2008. – №5. – С. 70 – 74.
4. R.K. Parker, R.H. Abrams, B.G. Danly, B. Levush. Vacuum Electronics. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 2002. – Vol. 50, №3. – P. 835–845.
5. V. Granatstain, R. Parker, C. Armstrong. Vacuum electronics at the dawn of the twenty-first century. Proc. IEEE. – 1999. – Vol. 87, № 5. – P. 702–716.
6. Federici J. Review of terahertz and subterahertz wireless communications // J. Federici, L. Moeller // Journal of Applied Physics. – 2010. – № 107. – P. 1063 – 1085.
7. Электромагнитные волны терагерцового диапазона. – Новосибирск: Программа фундаментальных исследований Президиума РАН (отчет). – №29, 2005. – 103 с.
8. Vorobjov G., Shulga Y., Zhurbenko V. Electromagnetic Waves. Edited by Vitaliy Zhurbenko. – Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, 2011. – 587 p.
9. Vorobyov G. S. Perspectives of application of new modifications of resonant quasi-optical structures in EHF equipment and electronics / G.S. Vorobyov, M.V. Petrovsky, A.I. Ruban, V.O. Zhurba at al. // Telecommunications and Radio Engineering. – 2007. – №66(20). – P. 1839 – 1862.
10. Шестопапов В. П. Генераторы дифракционного излучения / В. П. Шестопапов – К. : Наук. думка, 1991. – 320 с.
11. Воробьев Г. С. Моделирование волновых процессов в открытом волноводе с дифракционно-связанными источниками излучения / Г. С. Воробьев, А. С. Кривец, В. О. Журба, А. А. Рыбалко // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2008. – Т. 51, №11 – С. 3–12.
12. Воробьев Г.С. Моделирование пространственных волн распределенных источников излучения на планарных периодических металлодиэлектрических

структурах / Г.С. Воробьев, М.В. Петровский, А.А. Рыбалко, Ю.В. Шульга // Всеукраинский межведомственный научно – технический сборник "Радиотехника". – 2009. – № 159. – С. 327 – 335.

13. Шестоपालов В.П. Метод задачи Римана-Гильберта в теории дифракции и распространения электромагнитных волн / Шестоपालов В. П. – Харьков: ХГУ, 1971. – 400 с.

14. Шестоपालов В. П. Дифракционная электроника / Шестоपालов В. П. – Харьков: ХГУ, 1976. – 232 с.

15. Шестоपालов В. П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники / В. П. Шестоपालов. – К. : Наукова думка, 1985. – 216 с. – (Открытые структуры; т. 1), В. П. Шестоपालов. – К. : Наукова думка, 1985. – 256 с. – (Источники. Элементная база. Радиосистемы; т. 2).

16. Vorobjov G. S. Electrodynamic properties of coupled quasi-optical open cavities in sources of millimeter radiation / G. S. Vorobjov // Laser Physics. – 2000. – Vol. 10, №4. – P. 932–938

17. Техника субмиллиметровых волн / [Валитов Р.А., Дюбко С.Ф., Камышан В.В. и др.]; под ред. Р.А. Валитова. – М.: Сов. радио. – 1969. – 480 с.

18. Взятых В. Ф. Распределенная связь разных диэлектрических волноводов / В. Ф. Взятых, А. П. Меркурьев, Г. П. Раевский. – Труды МЭИ, 1974, вып. 194, С. 59–65.