

УДК 621.385.6

РЕЗОНАНСНЫЕ КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ В ТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОНИКЕ КВЧ (ОБЗОР)

Г.С. Воробьев, д-р физ.-мат. наук, профессор; М.В. Петровский, ассистент; В.О. Журба, аспирант
Сумский государственный университет

В работе кратко изложены основные свойства "классических" открытых резонаторов без неоднородностей как базовых устройств при определении особенностей новых модификаций резонансных структур миллиметровых и субмиллиметровых волн. Рассмотрены свойства открытых резонаторов с периодическими металлическими неоднородностями, связанных открытых резонаторов, а также различных модификаций резонансных открытых металлодиэлектрических структур. Определены пути дальнейших исследований новых модификаций резонансных квазиоптических структур с точки зрения оптимизации их выходных параметров.

ВВЕДЕНИЕ

В электронике и технике миллиметровых и субмиллиметровых (МСМ) волн в качестве резонансных систем широкое применение нашли открытые резонаторы (ОР), являющиеся важнейшими элементами целого ряда устройств [1-5]. В частности, на базе ОР с гладкими зеркалами (сфероидальными, полусферическими) создан ряд эффективных измерительных устройств МСМ-волн: резонансные волномеры с плоскими и вогнутыми металлическими зеркалами, эталоны частоты, резонансные системы приборов для исследования свойств веществ [1,6-8]. Полусферические и сфероцилиндрические ОР, на одном из зеркал которых расположена отражательная дифракционная решетка (ДР), используются при создании различных модификаций генераторов дифракционного излучения (ГДИ) [2,9-11], имеющих по сравнению с "классическими" приборами (ЛОВ, клистрон, магнетрон) повышенные значения стабильности частоты и уровня выходной мощности. На базе ОР с уголково-эшелетными зеркалами созданы эффективные полупроводниковые генераторы на диодах Гана и ЛПД, квазиоптические колебательные системы которых реализованы по схеме с реактивно-отражающим или проходным резонатором [12,13]. Широкое практическое применение в качестве колебательной системы открытые резонансные системы нашли в релятивистской электронике, на основе которых созданы различные модификации генераторов и усилителей [14-17].

Вместе с тем быстрое внедрение МСМ - волн в самые различные области науки и техники выдвигают новые требования к выходным параметрам и функциональным возможностям приборов этого диапазона.

Одним из путей дальнейшего развития таких устройств является модификация их электродинамической системы с целью расширения полосы пропускания и повышения эффективности преобразования энергии электронного потока (ЭП) в энергию излучения. При решении этих вопросов понадобились новые подходы, которые были предложены и реализованы в виде различных модификаций открытых электродинамических систем: связанных ОР [10,18,19], открытых волноводов (ОВ) [5,17,20-22], а также устройств с металлодиэлектрическими структурами (МДС) [23-26], на которых возможна реализация дифракционно-черенковских механизмов возбуждения волн [10]. Целесообразность таких решений обоснована в [27]. Однако отсутствие системного подхода к исследованию выше перечисленных устройств затрудняет их практическую реализацию.

Целью данного обзора являются сравнительный анализ электродинамических свойств "классических" открытых резонаторов с новыми модификациями резонансных квазиоптических структур и выработка на этой основе путей дальнейшего развития устройств МСМ - волн.

Исходя из поставленной цели, в данном обзоре кратко изложены основные свойства "классических" ОР без неоднородностей в качестве базовых устройств при определении особенностей новых модификаций резонансных структур МСМ - волн. Рассмотрены свойства ОР с периодическими металлическими неоднородностями связанных ОР, а также различных модификаций резонансных открытых металлодиэлектрических структур. Определены пути дальнейших исследований новых модификаций резонансных квазиоптических структур с точки зрения оптимизации их выходных параметров.

1 КЛАССИЧЕСКИЕ РЕЗОНАНСНЫЕ КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

К классическим резонансным квазиоптическим структурам можно отнести двухзеркальные открытые резонаторы без неоднородностей, которые приведены на рис. 1.

В простейшем случае открытый резонатор состоит из двух плоских

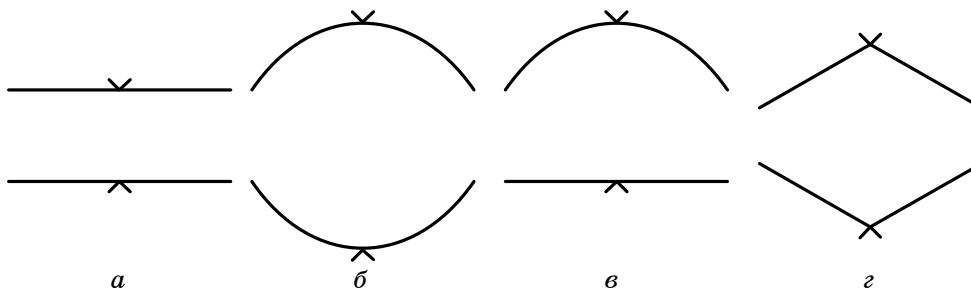


Рисунок 1 – Двухзеркальные открытые резонаторы без неоднородностей

бесконечно тонких дисков, расположенных параллельно друг другу так, что их оси симметрии совпадают (рис. 1а). Такой резонатор называется плоскопараллельным и является аналогом известного в оптике интерферометра Фабри-Перо.

Плоскопараллельные резонаторы обладают рядом ценных качеств: имеют разреженный спектр резонансных частот, однородное поле вдоль оси симметрии резонатора, длина волны в резонаторе мало отличается от

длины волны в свободном пространстве [1,4-6].

Однако сложность юстировки, сравнительно большие размеры, недостаточное разделение видов колебаний по потерям привели к тому, что более перспективными в МСМ - диапазонах являются резонаторы с отражателями, обладающими свойством квадратичной фазовой коррекции. Резонаторы такого типа получили название конфокальных и состоят из сферических зеркал, как показано на рис. 16. Такие резонаторы имеют большую разрешающую способность, чем плоскопараллельные. Кроме того, конфокальные резонаторы менее критичны к разъюстировке. Для резонатора со сферическими отражателями характерны значительно меньшие потери энергии на один проход по сравнению с открытым резонатором, имеющим плоские зеркала и такую же апертуру. Важным его преимуществом является большее разделение по потерям основного и высших видов колебаний [1,3-5], которые принято обозначать $ТЕМ_{mnq}$ [28], где индексы $m, n = 0, 1, 2, \dots$ описывают поперечные составляющие колебаний, а q - продольный индекс колебаний - определяет число полуволн, укладывающихся по оси ОР. Для резонатора с круглыми зеркалами резонансные расстояния или резонансные длины волн видов колебаний должны удовлетворять следующему соотношению:

$$\frac{2H}{\lambda} = q + \frac{1}{\pi} (m + 2n + 1) \arccos \sqrt{g_1 g_2}, \quad (1)$$

где H - расстояние между зеркалами; λ - длина волны в открытом резонаторе; $g_1 = 1 - \frac{H}{R_1}$; $g_2 = 1 - \frac{H}{R_2}$; R_1, R_2 - радиусы кривизны зеркал.

Ограничение апертур ОР вызывает потери на излучение в свободное пространство и слабо влияет на распределение полей в открытом резонаторе. Отсюда следует, чтобы потери были малы, поле должно быть сконцентрировано вблизи центра зеркала. Это, в свою очередь, накладывает ограничение на выбор соотношений между радиусами кривизны зеркал и расстоянием между ними. Для получения резонаторов, поле в которых достаточно быстро спадает при увеличении радиальной координаты, расстояние между зеркалами должно выбираться в интервалах

$$0 < g_1 g_2 < 1. \quad (2)$$

Последнее выражение называют условием "устойчивости" резонатора с квадратичной коррекцией.

Свойства колебаний различных видов в плоскопараллельных резонаторах (рис. 1а) и резонаторах со сферическими зеркалами (рис. 1б) существенно отличаются [1,3,4]. Распределение поля между плоскими пластинами в большой степени зависит от размеров последних, тогда как распределение поля на зеркале сферического профиля в основном определяется его кривизной и отношением $\frac{H}{R}$ расстояния между зеркалами к радиусу их кривизны.

Большое распространение в технике МСМ - волн получили также полусферические резонаторы, состоящие из одного плоского и одного сферического зеркал. Схематически такой резонатор представлен на рис. 1в. Известно, что в полусферическом ОР основными колебаниями являются азимутально-однородные колебания $ТЕМ_{m0q}$ [1,3]. Если пятно

поля на плоском зеркале значительно меньше его диаметра, то полусферические резонаторы могут быть с большой степенью точности заменены эквивалентными сферидальными резонаторами с удвоенным расстоянием между зеркалами, при этом распределения амплитуд в обоих типах резонаторов практически идентичны. Добротность колебаний полусферического ОР зависит от дифракционных потерь на краях плоского и сферического зеркал, омических потерь на тех же зеркалах, потерь на связь, потерь на затухание в среде.

В качестве колебательной системы можно также эффективно использовать ОР с зеркалами, выполненными в виде двугранных отражателей [1,4]. Двумерная модель такого резонатора представлена на рис. 1г. Резонатор с двугранными отражателями характеризуется очень малыми дифракционными потерями и сравнительно мало чувствителен к перекосам отражателей. В миллиметровом диапазоне его изготовление по сравнению с конфокальным резонатором проще.

В противоположность сферическому отражателю, который характеризуется линейной величиной – радиусом кривизны, двугранный отражатель характеризуется углом между его гранями α . Именно поэтому условия геометрической стабильности существенно различны в обоих случаях. Любой резонатор с двугранными отражателями стабилен при условии, что ширина грани достаточно велика.

Резонансные длины волн типов колебаний для резонатора с двугранными отражателями должны удовлетворять следующему соотношению:

$$\lambda = \frac{2H}{q} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{3\alpha(2m+1)}{4q} \right) \right]^{\frac{2}{3}}. \quad (3)$$

Из формулы видно, что в таком резонаторе не обнаруживается вырождение типов колебаний, кроме случайного.

На юстировке резонатора с двугранными отражателями не очень сильно сказываются малые повороты отражателей вокруг их вершины. Более серьезные потери могут быть вызваны недостаточной параллельностью ребер отражателей. Расположение зеркал под прямым углом друг к другу позволяет устранить эти потери. В таком случае каждая из двух плоскостей симметрии резонатора представляет собой совокупность резонаторов с двугранным и плоским отражателями. Такой резонатор имеет свойства, подобные полуконфокальному резонатору, и менее критичен к юстировке.

2 ОТКРЫТЫЕ РЕЗОНАТОРЫ С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

С целью использования описанных выше структур в электронике КВЧ было предложено ввести в полусферический ОР периодическую неоднородность типа дифракционной решетки (рис. 2). Такая электродинамическая система используется в генераторах дифракционного излучения.

Принцип действия ГДИ основывается на эффекте дифракционного излучения, возбуждаемого электронным потоком, который движется вблизи дифракционной решетки, расположенной в ОР [9,10,29-36]. При этом, взаимодействуя с дифрагированным на решетке падающим полем, реализуются режимы усиления и генерации электромагнитных волн. Следовательно, выходные характеристики ГДИ существенным образом определяются свойствами используемого ОР. Наличие периодической структуры в ОР ГДИ значительно видоизменяет характеристики описанных выше классических резонансных квазиоптических структур.

При выполнении плоского зеркала в виде отражательной ДР [32-36] существенно возрастают полные потери, в результате чего добротность для такой системы уменьшается почти в четыре раза. Снижение добротности происходит в результате дополнительных потерь, которые появляются при утечке энергии на излучение волноводных волн, распространяющихся по канавкам к краям зеркала, где коэффициент отражения не равен единице.

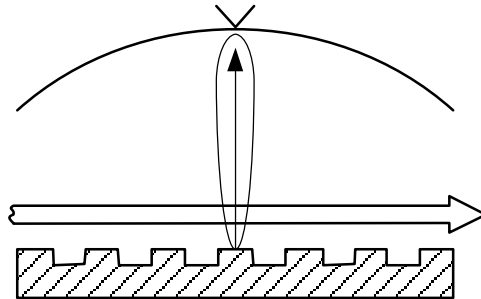


Рисунок 2 – Полусферический ОР с дифракционной решеткой

Поэтому был предложен полусферический ОР, у которого только центральная часть поверхности плоского зеркала покрыта дифракционной решеткой [9,10]. Такой резонатор имеет более разреженный спектр колебаний, потери на излучение зависят от параметров и ширины решетки. Изменяя ширину решетки, можно существенно изменять не только количество типов колебаний, возбуждаемых в ОР, но и управлять расстояниями, на которых могут появляться колебания более высокого порядка. Потери в ОР заметно зависят от соотношения периода решетки и длины рабочей волны. Путем изменения глубины канавок отражательной решетки максимальная добротность колебаний может изменяться в несколько раз.

В полусферическом ОР с локальной ДР основным является TEM_{20q} -тип колебания. Приведенные в [9,10] результаты исследований показали, что в такой системе возмущение за счет гребенки незначительно, если минимум в распределении поля находится над границей между решеткой и зеркалом. Это происходит при ширине ДР, большей или равной ширине главного лепестка поля TEM_{20q} -колебания.

При реализации полупроводниковых источников МСМ - волн и элементной базы широкое применение нашли уголково-эшелеттные ОР. На базе таких электродинамических систем в [37,38] предложены модификации квазиоптических твердотельных генераторов накачки со сферо-уголково-эшелеттными ОР, которые конструктивно реализованы по схемам с реактивно-отражающим и проходным резонаторами. Как показано в [12,13], колебательная система уголково-эшелеттного ОР имеет ряд особенностей: степень разрежения спектра уголково-эшелеттного ОР несколько меньше, чем спектра ОР с плоским эшелеттным зеркалом, однако в спектре имеются типы колебаний с аномально высокой добротностью, классифицируемые как квазиосновные типы колебаний; поле квазиосновных типов колебаний стянуто к оси ОР, и плотность их энергии больше, чем для основных и других типов колебаний; вблизи уголково-эшелеттного зеркала структура поля претерпевает трансформацию, и при вершине ОР она близка к структуре поля в прямоугольном волноводе; уголково-эшелеттное зеркало является многоступенчатым трансформатором импеданса.

Разнообразие устройств релятивистской электроники обусловило необходимость разработки специальных открытых резонансных электродинамических систем, обладающих повышенной электрической прочностью и эффективной селекцией типов колебаний. К таким резонансным системам относится кольцевой резонатор, представляющий собой совокупность зеркал, расположенных таким образом, чтобы луч, испытав отражения от резонаторных зеркал, замыкался сам на себя. Отличительной особенностью такого резонатора является разделение оптических лучей прямого и отраженных сигналов. По сути, в объеме резонатора реализуется режим бегущих волн. Кроме этого, появляется не менее двух дополнительных оптических ветвей, через которые могут включаться другие устройства. Эта особенность была использована в одном из вариантов лазера на свободных электронах (ЛСЭ) с каскадным повышением частоты [15]. В МСМ - диапазоне перспективным является использование также брэгговских резонаторов. Конструктивно они состоят из резонаторов Фабри-Перо, зеркала которых образуют зубчатые либо волнистые зеркальные поверхности. Такие резонаторы в основном применяются в конструкциях ЛСЭ [15,16,39,40]. Отличаясь многофункциональностью, брэгговский резонатор является многочастотной системой. Кроме того, для волны накачки, распространяющейся вдоль оси резонатора, система зеркал является высокоселективной замедляющей структурой.

3 СВЯЗАННЫЕ ОТКРЫТЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

В работах [10,32,41-45] предложены и частично исследованы устройства дифракционной электроники на связанных ОР, которые по сравнению с однорезонаторными ГДИ обладают рядом преимуществ: имеют более широкий диапазон электронной перестройки частоты, могут эффективно использоваться в качестве усилителей мощности и умножителей частоты. Связь ОР в таких устройствах может быть реализована либо через дифрагированное на краях зеркал поле [10,42,43], путем последовательного расположения резонаторов (рис. 3а), либо через дифрагированное на ленточных решетках поле [10,32,41], путем параллельного включения ОР (рис. 3б) относительно оси распределенного источника излучения. Таким источником в устройствах электроники является ЭП, а в случае экспериментального моделирования процессов возбуждения дифракционно-черенковского излучения (ДЧИ) – поверхностная волна одномодового планарного диэлектрического волновода (ДВ).

Система последовательно связанных ОР (рис. 3а) в простейшем случае представляет собой два полусферических резонатора с общим плоским зеркалом, выполненным в виде отражательной ДР. В случае системы параллельно связанных ОР (рис. 3б) между сферическими зеркалами располагаются ленточные дифракционные решетки.

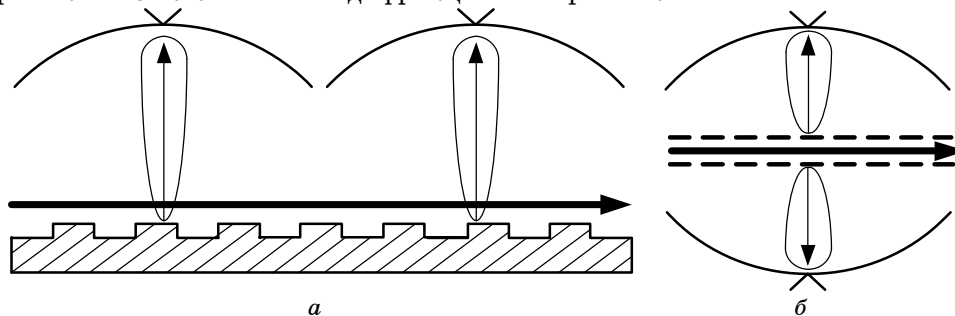


Рисунок 3 – Электродинамические системы на связанных ОР:
а – последовательное включение ОР; б – параллельное включение ОР

В [18,19,43-45] проведено моделирование волновых процессов в связанных ОР с источником излучения в виде планарного диэлектрического волновода. Для определения особенностей приведенных на рис. 3 электродинамических систем исследовались резонансные характеристики колебаний и спектры резонансных частот связанных ОР, которые характеризуют возможность возбуждения в данных резонансных системах ограниченного количества $ТЕМ_{mnq}$ типов колебаний. При этом базовыми являлись измерения аналогичных характеристик для одиночных полусферического и сфероидального ОР.

Показано, что полоса пропускания связанных ОР (рис. 3а) по сравнению с базовым резонатором возрастает почти в два раза и составляет величину $\Delta f \approx 250$ МГц в диапазоне частот $f=45-47$ ГГц. При этом резонансные кривые связанных ОР свидетельствуют о реализации эффективной связи через дифрагированные на периферии зеркал поля при настройке резонаторов на близкие частоты.

Результаты исследований системы (рис. 3б) свидетельствуют о том, что для сравнимых значений расстояний между зеркалами максимальную полосу пропускания в резонансной системе можно достичь при организации оптимальной связи двух ОР через ленточные ДР: полоса пропускания системы при параллельном включении ОР почти в 5 раз больше, чем при последовательном включении ОР. При этом добротность колебаний связанных ОР того же порядка, что и одиночных ОР [46].

Таким образом, установлено, что с точки зрения расширения полосы пропускания открытых резонансных систем предпочтительным является связанный ОР со связью через ленточные ДР, который в случае реализации на его основе устройств дифракционной электроники обеспечивает также минимальные габариты прибора вдоль оси ЭП.

В описанных выше резонансных системах преимущественно используются квазиоптические ОР, размеры зеркал которых составляют по радиусу кривизны $R \approx 20 - 30\lambda$, по апертуре $7 - 10\lambda$, что ограничивает практические возможности использования их в некоторых радиотехнических устройствах. Эти размеры можно существенно уменьшить путем применения малогабаритных ОР с короткофокусными зеркалами [10,47,48].

Спектральные характеристики и распределение внутренних резонансных полей для короткофокусных ОР указывают на возбуждение аксиально-симметричных колебаний, которые по своей структуре качественно совпадают с полями, формируемыми длиннофокусными отражателями. В [10] экспериментально установлено, что в спектре короткофокусных ОР присутствуют резонансные колебания при относительных расстояниях между зеркалами $\frac{H}{R} > 1$. Добротность этих резонансов невысока ($Q \approx 300-500$) из-за больших дифракционных потерь.

Для короткофокусных полусферических ОР с локально расположенной дифракционной решеткой на плоском зеркале в отличие от длиннофокусных ОР, во всем интервале расстояний присутствует основной тип $ТЕМ_{00q}$ - колебания, что указывает на перспективность их использования в электронике КВЧ.

В этом плане на основе системы рис. 3а в диапазоне частот $f = 43 - 98$ ГГц реализован двухкаскадный ГДИ [10,42]. Такой прибор образован двумя короткофокусными сферическими зеркалами и общим цилиндрическим зеркалом, вдоль продольной оси которого нанесена дифракционная решетка. Электронный поток формируется диодной пушкой и в сопровождении магнитного поля движется вдоль ДР,

возбуждая колебания в системе связанных ОР. В случае слабой связи между ОР прибор работает как многочастотный генератор на парциальных частотах, при наличии оптимальной связи – как широкополосный ГДИ на связанных ОР, у которого диапазон электронной перестройки частоты увеличился более чем в 1,5 раза по сравнению с однокаскадным ГДИ [49], что подтверждает результаты исследований [18,19].

В [32,41] предложен ГДИ на параллельно связанных ОР, электродинамическая система которого схематично показана на рис. 3б. Он состоит из двух полусферических ОР, связанных через щели двух идентичных ленточных ДР, между которыми движется ЭП. Если ток ЭП значительно больше пускового тока, то такой ГДИ работает как генератор. Если же на вход одного из резонаторов поступает сигнал от внешнего источника СВЧ-колебаний и не выполняется условие самовозбуждения, то он работает как усилитель. Кроме того, такой прибор, благодаря наличию двух связанных ОР, может выполнять функцию умножителя частоты [10,41].

В [18] описана система связанных резонаторов в виде ОР и объемного с подвижным короткозамыкающим поршнем, расположенным с противоположной стороны от щели связи. С помощью механической перестройки объемного резонатора при фиксированном значении расстояния между зеркалами ОР можно в достаточно широких пределах плавно изменять частоту генерации с перепадом уровня выходной мощности, не превышающим 3 дБ. Такая система связанных резонаторов обладает повышенной виброустойчивостью по сравнению с механической перестройкой частоты зеркалами ОР.

4 МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕЗОНАНСНЫЕ КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

Многосвязные системы, выполненные в виде ОР и ОВ, в объеме которых расположена МДС, позволяют реализовывать различные режимы трансформации энергии в зависимости от параметров электродинамической системы [23-26,50-54].

Простейшая электродинамическая система ОР с МДС схематически представлена на рис. 4а. Она образована металлическим экраном и диэлектрическим слоем с проницаемостью ϵ , на боковой поверхности которого нанесена ленточная дифракционная решетка [25,55]. Вдоль решетки расположен распределенный источник излучения, который в зависимости от параметров системы может возбуждать различные пространственные гармоники ДЧИ с номерами $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ и плотностью энергии S_n [10,25]. В частности, на рис. 4а показан вариант возбуждения черенковской ($S_{0\epsilon}$) и минус первой дифракционной ($S_{-1\epsilon}$) гармоник излучения в диэлектрик полубесконечной толщины, а также минус первой дифракционной гармоники излучения ($S_{-1\nu}$) в вакуум, которая может отражаться от металлического экрана и поступать в металлодиэлектрический канал. Для такой системы разработаны численные и экспериментальные методы моделирования различных режимов возбуждения ДЧИ [56-60], позволяющие определить количественные соотношения плотности энергии пространственных гармоник излучения и оптимизировать параметры электродинамической системы в соответствии с поставленной задачей.

Перспективной, с точки зрения реализации регенеративного и широкополосного усиления электромагнитных волн на пространственных гармониках дифракционного излучения (излучения Смита-Парселла), при движении нерелятивистского ЭП вдоль периодической структуры является система ОВ с МДС, представленная на рис. 4б. Для такой

системы развита линейная самосогласованная теория усиления электромагнитных волн на эффекте Смита-Парселла, учитывающая влияние диэлектрического слоя и толщины электронного потока на условия возбуждения колебаний в открытом волноводе [26,61-67]. Установлено, что путем изменения электродинамических параметров ОВ возможна реализация различных режимов возбуждения колебаний: режима излучения ДИ по нормали – регенеративный режим, режима бегущей объемной волны и режима поверхностных волн (ЛОВ, ЛБВ).

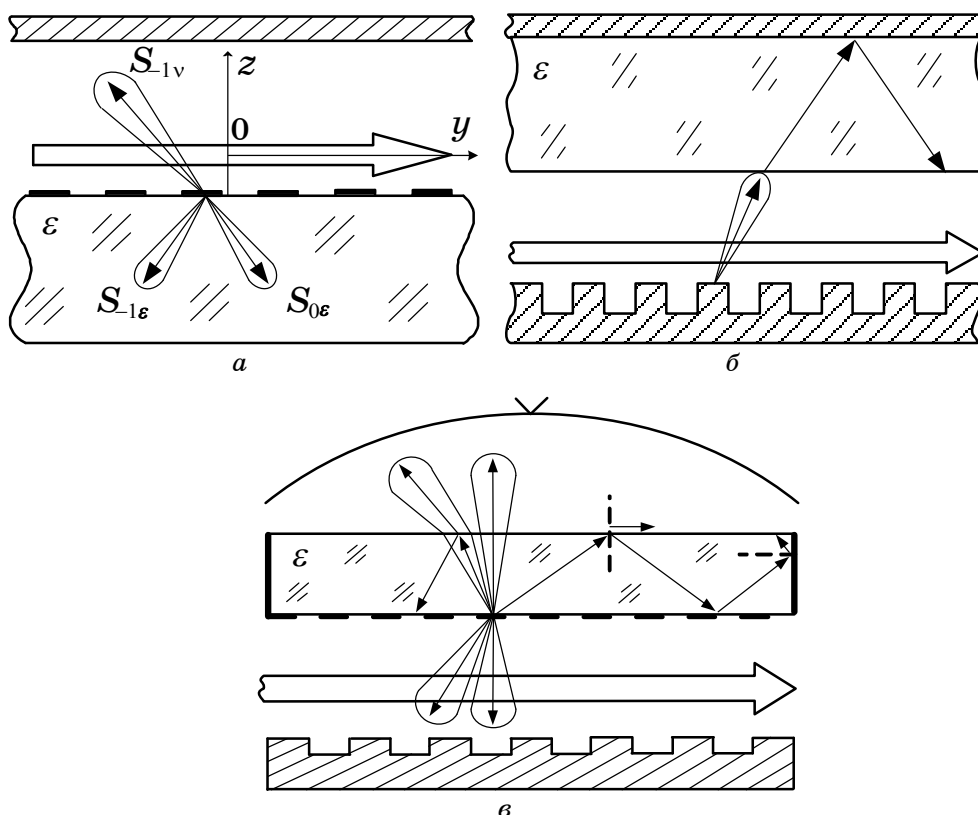


Рисунок 4 – Резонансные квазиоптические структуры с МДС

Естественным переходом от простейших резонансных систем (рис. 4а,б) к более сложным является открытый резонатор с МДС (рис. 4в), который образован, например, сферическим зеркалом с выводом энергии и плоским зеркалом с отражательной дифракционной решеткой [25]. Между зеркалами ОР расположена МДС, выполненная в виде диэлектрического резонатора. Такая электродинамическая система является базовой при создании дифракционно-черенковских генераторов [23,25]. На рис. 4в приведены возможные режимы возбуждения ДЧИ распределенным источником излучения, расположенным вблизи границы диэлектрической призмы с ленточной ДР. Подробное описание физики волнового моделирования ДЧИ в пространственно ограниченных МДС приведено в [68].

Установлено, что введение в открытый резонатор описанной выше МДС (рис. 4в) приводит к качественно новым электродинамическим свойствам такой системы [25]: при изменении параметров МДС возможна

реализация режимов затухания энергии в ОР, увеличения амплитуды колебаний и их добротности, селекции колебаний. Обнаруженные свойства такой системы находят объяснение в рамках физической модели ДЧИ для МДС конечной толщины [68] и известной концепции о представлении резонансного поля в виде углового спектра плоских волн [69-71]. Дальнейшие исследования таких систем [72-77] позволили предложить и обосновать конкретные схемы приборов дифракционной электроники с пространственно-развитыми резонансными структурами: дифракционно-черенковский генератор [25,74,76], черенковская ЛОВ [25,74].

5 МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАНСНЫХ КВАЗИОПТИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Возможность эффективного использования различных модификаций ОР в электронике и технике МСМ - волн связана с учетом влияния их свойств на электродинамические характеристики приборов. Поэтому такие исследования являются самостоятельной задачей, включающей в себя, как правило, следующие этапы: определение спектра колебаний, коэффициента передачи по мощности, добротности, амплитудного распределения поля между зеркалами. Данные характеристики для реальных систем можно изучить в основном экспериментально, поскольку теория ОР с различного рода металлическими и металлодиэлектрическими неоднородностями представляется сложной электродинамической задачей.

На практике измерение коэффициента передачи резонатора производится включением ОР на проход, при котором возбуждение системы происходит со стороны одного из зеркал [1,6,7,78]. Перемещая зеркала системы вдоль оси ОР либо изменяя частоту возбуждающих колебаний в заданном диапазоне, с помощью детекторной секции, сопряженной волноводным переходом с резонансным пространством, регистрируют мощность сигнала, который будет пропорционален коэффициенту передачи резонатора по мощности.

Измерение спектра открытого резонатора сводится к определению резонансных частот при фиксированных расстояниях между зеркалами либо к определению резонансных расстояний между зеркалами резонатора при фиксированных частотах источника колебаний [78,79]. Наиболее наглядно для анализа резонансных свойств ОР - спектр колебаний строится в координатах H от f , представляющий собой семейство типов колебаний, существование которых возможно в исследуемом резонаторе.

Еще одной важной характеристикой колебательной системы является её добротность. В общем случае добротность определяется формулой [1,7,31]:

$$Q = \frac{2\pi H}{\lambda \delta}. \quad (4)$$

Из соотношения (4) видно, что добротность ОР прямо пропорциональна расстоянию между зеркалами, то есть резонансному объему, и обратно пропорциональна суммарным потерям δ . В зависимости от того, что подразумевается под δ , потери нагруженного или ненагруженного резонатора, из этого соотношения определяется собственная или нагруженная добротности. Добротность нагруженного резонатора можно определить по его частотной характеристике. Сняв зависимость коэффициента передачи по мощности от частоты и измерив ширину

резонансной кривой Δf на уровне 0.5, добротность резонатора находят из соотношения

$$Q_n = \frac{f_0}{\Delta f}, \quad (5)$$

где f_0 – частота, соответствующая максимуму мощности резонансной кривой.

Схемное решение, позволяющее уменьшить ошибку измерений нагруженной добротности проходных резонаторов в несколько раз, реализуется с применением опорного резонатора для системы автоподстройки частоты генератора. При этом плавная перестройка частоты генератора осуществляется медленным перемещением одного из зеркал опорного ОР, синхронно с которым ведется регистрация коэффициента передачи исследуемого ОР [1,7].

Однако основное внимание в устройствах МСМ волн уделяется изучению структуры распределения электромагнитного поля, конфигурация которого играет решающую роль в системах, реализованных на основе ОР.

Для этой цели в [2,9,31,80] разработаны методы реактивного зондирования, позволяющие производить визуализацию электромагнитных полей в ОР, а также измерять относительные амплитуды распределения полей ОР. Суть метода заключается в том, что в резонансный объем вводится зонд в качестве отражающего или поглощающего тела, размер которого выбирается в зависимости от величины амплитуды измеряемого поля и чаще всего меньше длины волны резонансных колебаний – метод пробного тела [9]. Пробному телу сообщается некоторая траектория движения по плоскости внутри резонансного объема ОР. О структуре поля судят по характеристикам рассеянного зондом поля или по параметрам возмущенной системы: изменение добротности или, что эквивалентно, коэффициента передачи ОР. Используя зависимость коэффициента передачи резонатора от амплитуды поля в месте расположения зонда, измеряют амплитудное распределение поля ОР.

В [9,10] показано, что эффективным способом исследования новых модификаций электродинамических систем устройств дифракционной электроники является метод экспериментального моделирования, при котором излучение электронной волны тока пространственного заряда ЭП моделируется излучением поверхностной волны планарного диэлектрического волновода, расположенного вблизи дифракционной решетки. При равномерном и прямолинейном движении электронного потока собственное его поле имеет вид плоской волны, подобную волну можно сформировать плоским диэлектрическим волноводом. Часть мощности, распространяющейся вдоль волновода, сосредоточена в наружной по отношению к нему области в виде поверхностного поля медленных волн, обуславливая его дифракцию на элементах периодической структуры. Это позволяет при помощи только волновых полей моделировать эффект дифракционного излучения. В результате энергия медленных волн преобразуется в энергию быстрых пространственных гармоник, излучаемую в окружающее пространство.

В [10] дано теоретическое обоснование этого метода при условии возбуждения пространственных гармоник излучения на МДС. Установлено, что при трансформации поверхностной волны ДВ в объемные, как и в случае с ЭП, возможны различные режимы излучения, наиболее характерные из которых можно наглядно проанализировать путем построения диаграмм Бриллюэна для различных значений

диэлектрической проницаемости среды [81]. Так, путем варьирования параметров диэлектрического волновода, решетки и диэлектрической среды можно реализовать модели черенковского, дифракционного либо дифракционно-черенковского излучений.

На основании такого подхода экспериментальное исследование эффекта дифракционного излучения позволяет определить при данных параметрах системы число пространственных гармоник, направление их максимального излучения, зависимость мощности от длины волны, поляризации и от прицельного расстояния [9,10].

Кроме описанных выше экспериментальных методов исследования резонансных квазиоптических структур, существует широкий класс теоретических методов расчета, базирующихся как на аналитическом, так и на численном решении, которые позволяют качественно и количественно предсказать физические процессы, происходящие в данной исследуемой системе.

В частности, для описанных выше классических резонансных квазиоптических структур (рис. 1) Фоксом и Ли решена задача определения распределения полей, спектра резонансных частот и радиационных потерь, обуславливающих совместно с джоулевыми потерями ненагруженную добротность резонатора [1], которая сводилась к решению однородного интегрального уравнения Фредгольма второго рода. Для решения этого уравнения Фокс и Ли избрали итерационную методику.

В [82] Cullen развита скалярная и векторная теории как базового ОР, так и ОР с неоднородностью в виде диэлектрической пластины, помещенной между зеркалами резонатора. Полученные в аналитическом виде формулы связывают параметры ОР и диэлектрика с частотами колебаний резонатора, что позволяет учесть влияние диэлектрического слоя на спектр колебаний базового ОР. На основе векторной теории, где берется полный учет дифракционных эффектов, для базового сфероидального ОР получена точная формула резонансной частоты основной моды TEM_{00q} , а для ОР с диэлектрическим слоем получены трансцендентные уравнения, связывающие частоты симметричных и антисимметричных мод TEM_{00q} - типов колебаний [83], которые позволяют учесть его влияние на спектр колебаний базового ОР.

В настоящее время с возросшим быстродействием персональных компьютеров широкое применение находит метод конечных разностей во временной области FDTD (Finite-Difference Time-Domain), который является одним из основных методов численного решения электродинамических задач [84,85]. Метод FDTD универсален – он может быть с успехом применен практически во всех задачах электродинамики, требующих численного решения.

Частотные характеристики исследуемого объекта могут быть получены с помощью дискретного преобразования Фурье или условно, путем задания квазигармонического источника и выполнения расчетов до выхода на установившийся режим. Кроме простоты постановки, метод FDTD обладает несомненными преимуществами в плане моделирования электродинамических объектов с неоднородными, анизотропными и нелинейными средами с произвольными формами границ.

В своей классической постановке метод FDTD основан на дискретизации уравнений Максвелла, записанных в дифференциальной пространственно-временной формулировке [86].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе систематизированы результаты исследований как классических открытых резонансных структур, являющихся базовыми

при построении новых модификаций колебательных систем приборов и устройств МСМ - волн, так и более сложных электродинамических систем с пространственно-развитыми периодическими структурами: связанных ОР, открытых резонаторов и волноводов с МДС. Показано, что связанные ОР имеют более широкий диапазон перестройки частоты при сохранении высоких значений добротности колебаний. Многосвязные системы, выполненные в виде ОР и волноводов с МДС, обладают качественно новыми свойствами: путем изменения параметров МДС возможна реализация режимов затухания энергии либо увеличения амплитуды колебаний и их селекции.

Кратко проанализированы методы экспериментальных и теоретических исследований резонансных квазиоптических структур: метод пробного тела, метод волнового моделирования, векторной теории и численного решения методом конечных разностей во временной области FDTD. Совокупность этих методов позволяет эффективно проводить анализ волновых процессов в сложных резонансных структурах, содержащих дисперсионные элементы, такие, как отражательные и ленточные дифракционные решетки, а также металлодиэлектрические структуры.

На основании проведенного обзора можно сделать вывод о целесообразности проведения дальнейших исследований резонансных открытых электродинамических систем с пространственно-развитыми структурами, как перспективных элементов при создании новых приборов и устройств МСМ - волн.

SUMMARY

In the article basic properties of the "classical" open resonators without discontinuity are briefly expounded, as base devices at determination of features of new modifications of resonances structures of millimetric and submillimetric waves. Properties of the open resonators with periodic metallic discontinuity, coupled opened resonators and also different modifications of the resonances open metal-dielectric structures are considered. The ways of further researches of new modifications of resonances quasioptical structures are certain from point of optimization of their out parameters.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техника субмиллиметровых волн / Р.А. Валитов, С.Ф. Дюбко, В.В. Камышан и др. / Под ред. Р.А. Валитова. – М.: Сов. радио, 1969. – 480 с.
2. Шестопапов В.П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники. Т.1. Открытые структуры – К: Наукова думка, 1985.– 216 с. – Т.2. Источники, элементная база. Радиосистемы. – К: Наукова думка, 1985.– 256 с.
3. – 256с. – (Вайнштейн Л.А. Открытые резонаторы и открытые волноводы. – М.: Сов. радио, 1966. – 475 с.
4. Квазиоптика / Под ред. Б.З. Каценеленбаума и В.В. Шевченко. – М.: Мир, 1966. – 428 с.
5. Вайнштейн Л.А. Теория дифракции. Электроника СВЧ. – М.: Радио и связь, 1995. – 600 с.
6. Милованов О.С., Собенин Н.П. Техника сверхвысоких частот. – М.: Атомиздат, 1980. – 464 с.
7. Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах: Методы и техника / Под ред. Р.А. Валитова, Б.И. Макаренко. – М.: Радио и связь, 1984. – 296 с.
8. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. – М.: Высшая школа, 1970. – 440 с.
9. Шестопапов В.П. Дифракционная электроника. – Харьков: Изд-во Харьковского университета, 1976. – 232 с.
10. Генераторы дифракционного излучения / Под ред. В.П.Шестопапова. – Киев: Наук. думка, 1991. – 320 с.
11. Ваврич Д.М., Третьяков О.А. Теория резонансных усилителей с распределенным взаимодействием О-типа. – К.: Наукова думка, 1989. – 152 с.
12. Белоус О.И., Булгаков Б.М., Фисун А.И., Фурсов А.М. Оптимизация параметров малошумящего квазиоптического ГЛПД с открытой сферо-уголково-эшелеттной системой // Труды Всесоюзного совещания "Малошумящие генераторы СВЧ. Состояние разработок и перспективы применения в метрологии". – Иркутск, 1991. – С. 38.

13. Сухоручко О.Н., Ткаченко В.И., Фисун А.И. Моделирование элементов входного малошумящего тракта с параметрическим усилением сигнала // Прикладная радиоэлектроника. – 2003. – №2. – С. 163 – 167.
14. Теория черенковских усилителей и генераторов на релятивистских пучках взаимодействий / В.А. Балакирев, Н.И. Карбушев, А.О. Островский, Ю.В. Ткач. – Киев: Наукова думка, 1993. – 192 с.
15. Кулиш В.В. Физика лазеров на свободных электронах. Общие положения / ХПИ Сумский филиал. – Сумы, 1990. – 192 с. – Рус. – Деп. в УкрНИИНТИ 5.09.90, №1526 – Ук90. – Реф. в Гос. респ. научн.-техн. библи. УССР, 1990.
16. Гинзбург Н.С., Сергеев А.С., Песков Н.Ю. О возможности использования двумерных брэгговских структур в ЛСЭ-усилителе, запитываемом ленточным электронным потоком // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т.25, Вып. 19. – С. 87 – 95.
17. Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. – М.: Сов. радио, 1973. – 400 с.
18. Vorobjov G.S. Electrodynamic properties of coupled quasi-optical open cavities in sources of millimeter radiation // Laser Physics. – 2000. – Vol.10, №4. – P. 932 – 938.
19. Воробьев Г.С. Экспериментальное моделирование условий возбуждения колебаний в электродинамической системе связанных открытых резонаторов // Украинский физический журнал. – 2001. – Т.4, №10. – С. 1043 – 1046.
20. Экспериментальные исследования преобразования поверхностных волн в объемные в открытом волноводе / А.А. Вертий, Г.С. Воробьев, И.В. Иванченко и др. // Изв. вузов. Радиофизика. – 1988. – Т.31, №6. – С.1242 – 1254.
21. Воробьев Г.С., Рубан А.И., Шматько А.А. Линейная теория нерезонансного усилителя КВЧ с распределенным взаимодействием на эффекте Смита-Парселла // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1999. – Т.42, №6. – С. 67 – 70.
22. Воробьев Г.С., Рубан А.И., Кривец А.С., Шматько А.А. Теоретический анализ условий возбуждения колебаний в усилителе с распределенным взаимодействием на эффекте Смита-Парселла // Вісник Сумського державного університету. – 1999. – №1(12). – С. 28 – 33.
23. Исследование возможности повышения эффективности взаимодействия электронов с СВЧ полями в резонансных приборах О-типа / Г.С. Воробьев, А.В. Нестеренко, К.А. Пушкарев, А.И. Цвык / Под ред. проф. В.В. Кулиша // Современные проблемы прикладной физики. – К.: НМК ВО. – 1992. – С. 101 – 117.
24. Применение металлодиэлектрических периодических структур в электронике КВЧ / Г.С. Воробьев, О.С. Макеев, К.А. Пушкарев, А.И. Цвык // Вісник Сумського державного університету. – 1996. – №1(5). – С. 17 – 22.
25. Моделирование черенковского и дифракционного излучений на периодических металлодиэлектрических структурах (обзор) / Г.С. Воробьев, А.С. Кривец, М.В. Петровский, А.И. Рубан, А.И. Цвык // Вісник Сумського державного університету. – 2003. – №10(56). – С. 110 – 130.
26. The Smith-Pursell Effect Amplification of the Electromagnetic Waves in an Open Waveguide with a Metal-Dielectric Layer / G.S. Vorobyov, A.S. Krivets, M.V. Petrovsky, A.I. Tsvyk, A.A. Shmatko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2003. – №59(10,11, and 12). – P. 80 – 92.
27. Воробьев Г.С., Цвык А.И. Приборы дифракционной электроники с пространственно-развитыми структурами (обзор) // Вісник Сумського державного університету. – 2002. – №5(38) – 6(39). – С. 158 – 171.
28. Почанина И.Е. О классификации типов собственных колебаний открытых волноводных резонаторов // Электродинамика открытых структур мм и субмм диапазонов: Сб. научных трудов. – Харьков: ИРЭ НАНУ, 1990. – С. 109 – 119.
29. Генератор дифракционного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн / И.М. Балаклицкий, Б.К. Скрынник, О.А. Третьяков и др. // УФЖ. – 1969. – Т.14, №4. – С. 539 – 552.
30. Цвык А.И. Электронно-волновая теория дифракционного излучения // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1985. – №12. – С. 53 – 58.
31. Шматько А.А., Одаренко Е.Н. Электроника сверхвысоких частот. – Харьков: Факт, 2003. – 248 с.
32. А.С. 593589 СССР, МКИ H01J 25/00. Оротрон / И.М. Балаклицкий, Г.С. Воробьев, А.И. Цвык // Открытия. Изобрет. – 1981. – №33. – С. 327.
33. Marshall E.M., Philips P.M., Walsh J.E. Planar orotron experiments in millimeter wavelength band / IEEE Transactions on Plasma Science. – 1998. – Vol. 16, №2. – P. 199 – 205.
34. Нестационарные процессы в оротроне с дифракционным выводом излучения / Н.С. Гинзбург, Н.А. Завольский, В.Е. Запелов и др. // ЖТФ. – 2000. – Т.70, Вып. 4. – С. 99 – 104.
35. Broadband orotron operation at millimeter and sub-millimeter waves / V.L. Bratman, B.S. Dumesl, A.E. Fedotov and others // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 2002. – №23(11). – P. 1595 – 1601.

36. Оротрон: перспективы продвижения в субмиллиметровый диапазон длин волн / Ф.С. Русин, В.Л. Братман, А.Э. Федотов // Вакуумная СВЧ электроника: Сборник обзоров. – 2002. – С. 121 – 124.
37. Belous O.I., Fisun A.I., Sukhoruchko O.N. Synthesis of Basic Components of a Low-Noise Input Circuit for Millimeter Wavelengths // Telecommunication and Radio Engineering. – 2003. – Vol. 59, № 1-2. – P. 111 – 118.
38. Сухоручко О.Н., Белоус О.И., Касьяненко А.П., Фисун А.И. Параметрическое усиление сигналов в миллиметровом диапазоне длин волн // 13-я Международная крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо’2003). – Севастополь: Вебер, 2003. – С. 141 – 143.
39. Высокоэффективный узкополосный мазер на свободных электронах на основе брегговского резонатора со скачком фазы / Н.Ю. Песков, Н.С. Гинзбург, А.А. Каминский и др. // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т.25, Вып. 11. – С. 19 – 28.
40. Моделирование планарного ЛСЭ-усилителя с ленточным релятивистским электронным пучком / Н.С. Гинзбург, Р.М. Розенталь, Н.Ю. Песков и др. // ЖТФ. – 2001. – Т.71, Вып. 12. – С. 58 – 61.
41. А.С. 749278 СССР, МКИ H01J 25/00. Генератор дифракционного излучения / И.М. Балаклицкий, Г.С. Воробьев, А.И. Цвык и др. // Открытия. Изобрет. – 1982. – №35. – С. 306.
42. Воробьев Г.С., Нестеренко А.В., Цвык А.И. Экспериментальное исследование одно- и двухкаскадных устройств дифракционной электроники // В кн. IV Всесоюзный симпозиум по мм и субмм волнам: Тез. докл. – Харьков, 1984. – Т.1. – С. 54.
43. Vorobjov G.S., Ruban A.I., Tsvyk A.I. Simulation of excitation mechanisms of oscillation in diffraction electronics devices on coupled open resonators // International Symposium Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves. – Kharkov. – 1998. – P. 194 – 195.
44. Исследование связанных открытых резонаторов со связью через дифракционные решетки / Г.С. Воробьев, Р.И. Куц, К.А. Пушкарев, А.И. Рубан // Тез. докл. научно-техн. конф. "Техника и физика электронных систем и устройств". – Сумы: СумГУ, 1995. – Ч.2. – С. 226.
45. Рубан А.И. Електромагнітні взаємодії просторових гармонік черенковського та дифракційного випромінювань в електродинамічних системах пристроїв край високих частот: Автореф. дис... канд. фіз.-мат. наук: 01.04.01 / Сумський держ. ун-т. – Суми, 1999. – 19 с.
46. Белоусов Е.В., Корж В.Г., Кошпаренко В.Н., Майстренко Ю.В. Связанные резонаторы в диэлектрометрии тонких пленок // Радиофизика и электроника. – 1997. – Т.2, №1. – С. 39 – 42.
47. Вертий А.А., Воробьев Г.С., Иванченко И.В. и др. Миниатюризация устройств дифракционной электроники // В кн.: X Всесоюзная научная конференция по электронике СВЧ: Тез. докл. – Минск. – 1983. – С. 125 – 126.
48. Нестеренко А.В., Цвык А.И., Шестопапов В.П. Миниатюризация генератора дифракционного излучения // Докл. АН СССР. – 1984. – 277, №1. – С. 84 – 88.
49. Андросов В.П., Вертий А.А., Кузьмичев И.К. и др. Исследование процессов усиления в регенеративном усилителе на базе ГДИ // Электроника миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. – Киев: Наукова думка, 1988. – С. 13 – 17.
50. Экспериментальное моделирование волновых процессов в усилителе на эффекте Смита-Парселла / Г.С. Воробьев, А.С. Кривец, М.В. Петровский, А.И. Рубан // Вісник Сумського державного університету. – 2002. – №5(38). – 6(39). – С. 117 – 124.
51. Моделирование трансформации поверхностных волн электронного потока в объемные волны на металлодиэлектрических электродинамических структурах / Г.С. Воробьев, О.С. Макеев, К.А. Пушкарев, А.И. Цвык // Вісник Сумського державного університету. – 1996. – №2(6). – С. 28 – 32.
52. Пушкарьов К.О. Дослідження дифракційно-черенковського випромінювання електронного потоку у відкритих метало-діелектричних структурах: Автореф. дис... канд. фіз.-мат. наук: 01.04.04, 01.04.01 / Сумський держ. ун-т. – Суми, 1997. – 23с.
53. Simulation of the excitation processes of diffraction-cerenkov radiation by the electron beam space charge waves on metal-dielectric periodic structures / G.S. Vorobjov, K.A. Pushkaryov, A.I. Ruban, A.I. Tsvyk // Third International Symposium Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves. – Kharkov. – 1998. – P. 196 – 197.
54. Черенковське та дифракційне випромінювання нерелятивістського електронного потоку на метало-діелектричних структурах / Г.С. Воробйов, К.О. Пушкарьов, А.І. Рубан та ін. // II Міжнародний Смакуловий симпозіум “Фундаментальні і прикладні проблеми сучасної фізики”. – Тернопіль: ТДТУ ім. І. Пулюя, 2000. – С. 203 – 204.
55. Аномальное дифракционное излучение в планарной резонансной структуре с металлодиэлектрической решеткой / Г.С. Воробьев, М.В. Петровский, А.И. Цвык, Э.М. Хуторян, Л.И. Цвык // Вісник Сумського державного університету. – 2005. – №4(76). – С. 159 – 173.
56. Scattering of electron stream waves on metal-dielectric periodic structures / G.S. Vorobyov, A.I. Tsvyk, K.A. Pushkaryov, and O.S. Makeyev // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 1996. – Vol.17, №10. – P. 1761 – 1768.

57. Воробьев Г.С., Пушкарев К.А., Цвык А.И. Численный анализ экранирующих свойств дифракционной решетки при возбуждении электронным потоком излучения на металлодиэлектрических структурах // Радиотехника и электроника. – 1997. – Т.42. – С. 738 – 740.
58. Энергетические характеристики пространственных гармоник дифракционно-черенковского излучения в периодических металло-диэлектрических структурах / Г.С. Воробьев, К.А. Пушкарев, А.И. Рубан, А.И. Цвык // Материалы 8-ой Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". – Севастополь: СГТУ. – 1998. – Т1. – С. 210 – 212.
59. Энергетические характеристики дифракционно-черенковского излучения в периодических металлодиэлектрических структурах / Г.С. Воробьев, К.А. Пушкарев, А.И. Рубан, А.И. Цвык // Изв. вузов. Радиозлектроника. – 1999. – Т.42, №10. – С. 62 – 66.
60. Черенковське та дифракційне випромінювання нерелятивістського електронного потоку на металодіелектричних структурах / Г.С. Воробйов, К.О. Пушкарьов, А.І. Рубан, О.І. Цвик // Фізичний збірник НТШ. – 2001. –Т.4. – С. 317 – 322.
61. Підсилення електромагнітних хвиль на ефекті Сміта-Парселла / Г.С. Воробйов, А.І. Рубан, О.С. Кривець, О.О. Шматько // Фізичний збірник НТШ. – 2001. –Т.4. – С. 323 – 330.
62. Возбуждение колебаний в усилителе на эффекте Смиа-Парселла с металлодиэлектрическим слоем / Г.С. Воробьев, А.С. Кривец, А.А. Шматько, Э.М. Хуторян // Вісник Сумського державного університету. – 2002. – №5(38)-6(39). – С. 110 – 116.
63. Воробьев Г.С., Кривец А.С., Шматько А.А., Петровский М.В. Волновые процессы в открытом волноводе с металлодиэлектрическим слоем // 12-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2002). – Севастополь: Вебер, 2002. – С. 145 – 146.
64. Кривец А.С., Воробьев Г.С., Петровский М.В., Победин А.Ю. Исследование условий возбуждения электромагнитных колебаний в открытом волноводе с металлодиэлектрическим слоем // Сборник научных трудов 6-го Международного молодежного форума "РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В XXI ВЕКЕ". – Харьков: ХНУРЭ, 2002. – Ч.1. – С. 86 – 87.
65. Кривець О.С., Петровський М.В. Електронно-хвильовий механізм підсилення коливань у відкритому хвильоводі з метало-діелектричним шаром // Всеукраїнська конференція молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики (ЕВРИКА 2002). – Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2002. – С. 160 – 161.
66. Електронно-хвильовий механізм підсилення коливань у відкритому хвильоводі з металодіелектричним шаром / О.С Кривець, М.В Петровський // Вісник Львівського університету. – 2004. – №37. – С. 123 – 131.
67. Воробьев Г.С., Кривец А.С., Петровский М.В., Шматько А.А. Электронно-волновые процессы в усилителе на эффекте Смиа-Парселла с металлодиэлектрическим слоем //14-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2004). – Севастополь: Вебер, 2004. – С. 209 – 210.
68. Воробьев Г.С. Волновое моделирование черенковского и дифракционного излучений в пространственно ограниченных металло-диэлектрических структурах // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2000. – Вып.116. – С. 12 – 20.
69. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ. – М.: Высш. шк., 1990. – 335 с.
70. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. – М.: Радио и связь, 1988. – 440 с.
71. Третьякова С.С., Третьяков О.А., Шестопалов В.П. Дифракция волновых пучков на плоских периодических структурах // Радиотехника и электроника. – 1972. – Т.17, №7. – С. 1366 – 1373.
72. Воробьев Г.С., Рубан А.И., Петровский М.В. Экспериментальное моделирование условий возбуждения колебаний в открытом резонаторе с металлодиэлектрической структурой //13-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2003). – Севастополь: Вебер, 2003. – С. 286 – 287.
73. Петровський М., Победин О. Експериментальні дослідження відкритих резонаторів з металодіелектричними структурами // Всеукраїнська конференція молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики (ЕВРИКА 2003). – Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2003. – С. 109.
74. Воробьев Г.С., Петровский М.В., Кривец А.С., Цвык А.И. О возможности применения периодических металлодиэлектрических структур в электронике КВЧ // 14-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2004). – Севастополь: Вебер, 2004. – С. 211 – 212.
75. Петровський М. Хвильові характеристики відкритих квазіоптичних систем з металодіелектричними структурами // Міжнародна конференція молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики (ЕВРИКА 2004). – Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2004. – С. 213 – 214.
76. Vorobjov G.S., Petrovsky M.V., Tsvyk A.I. // Features of spectral characteristics of open resonance electrodynamic systems with periodic metal-dielectric structures // The Fifth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves. – Kharkov, 2004. – P. 576 – 578.

77. Воробьев Г.С., Петровский М.В., Журба В.О., Крутько Ю.А. Перспективы использования пространственно-развитых резонансных структур в дифракционной электронике // 15-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2005). – Севастополь: Вебер, 2005. – С. 265 – 266.
78. Вальднер О.А., Милованов О.С., Собенин Н.П. Техника сверхвысоких частот. Учебная лаборатория. – М.: Атомиздат, 1974. – 232 с.
79. Чернушенко А.М., Петров Б.В., Малорацкий Л.Г. Конструирование экранов и СВЧ-устройств. – М.: Радио и связь, 1990. – 352 с.
80. Петрушин А.А., Балаклицкий И.М., Шестопапов В.П. Установка для изучения электромагнитных полей в открытых резонаторах миллиметрового диапазона // ПТЭ. – 1970. – №2. – С. 147 – 151.
81. Воробьев Г.С. Обоснование выбора режимов моделирования черенковского и дифракционного излучений на металлодиэлектрических структурах // Вісник Сумського державного університету. – 2000. – №16. – С. 60 – 64.
82. Cullen A.L. Millimeter-wave open-resonator techniques // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 1983. – Vol.10 – P. 233 – 281.
83. Cullen A.L., Yu P.K. Proc. R. Soc. A 366. – 1979. – P. 155 – 171.
84. Электродинамическое моделирование методом конечных разностей во временной области (FDTD) / Под. ред. В.Н. Малышева. – СПб.: Изд-во СПб. ГЭТУ "ЛЭТИ", 2000. – 76 с.
85. Чурюмов Г.И., Максимов И.С., Еремеев Д.Б. Математическое моделирование электромагнитных явлений методом конечных разностей. 1. Общие положения // Радиотехника. – 2003. – Вып.135. – С. 7 – 14.
86. Сиренко Ю.К. Моделирование и анализ переходных процессов в открытых периодических, волноводах и компактных резонаторах / ИРЭ НАН Украины. – Харьков: ЭДЭНА, 2003. – 363 с.

Поступила в редакцию 24 мая 2006 г.

УДК 519.814:519.17:004.738.5

СТАТИСТИКА СЛОЖНЫХ СЕТЕЙ (ОБЗОР)

*А.И. Олемской, д-р физ.-мат. наук, профессор; И.А. Олемской
Сумский государственный университет*

Проведен обзор статистических свойств сложных сетевых структур, включающий определение характеристик случайных графов, описание наиболее популярных моделей, построение соответствующих статистических ансамблей, обсуждение локальных и глобальных свойств и описание топологических фазовых переходов. В качестве приложения определены статистические характеристики одной из компьютерных сетей Интернета.

1 ВВЕДЕНИЕ

Сложные структуры сетевого типа охватывают широкий класс систем, имеющих важное практическое и научное значение. Наиболее популярными примерами таких структур являются:

- ячейки химических реакций, действующие по сетевому принципу;
- социальные системы, вершины которых представляют люди, являющиеся носителями определённых интересов и идей, а рёбра отвечают социальным связям между ними;
- всемирная паутина (английская аббревиатура WWW – от World Wide Web), представляющая виртуальную сеть гипертекстовых и иных документов, объединённых направленными гиперсвязями (по-английски они обозначаются как Uniform Resource Locator, аббревиатура URL, и представляют унифицированный указатель