

**ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЧЕТВЕРТЬСФЕРИЧЕСКОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
РЕЗОНАТОРА ЩЕЛЬЮ СВЯЗИ В ЗЕРКАЛЕ**

А. Е. Когут

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова, НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: kogut@ire.kharkov.ua*

Показано, что в отличие от полусферического диэлектрического резонатора, возбуждаемого на модах шепчущей галереи щелью связи в зеркале, спектральные и энергетические характеристики четвертьсферического диэлектрического резонатора, а также распределение резонансных полей колебаний существенно зависят от положения щели связи по азимутальной координате. В четвертьсферическом резонаторе возможно существование колебаний и в случае открытого одного плоского основания. Изучены характеристики такого диэлектрического резонатора. Показано, что четвертьсферический диэлектрический резонатор может служить базой сумматора мощности для суммирования мощностей более двух диодов Ганна. Исследован режим взаимной синхронизации колебаний двух и трех диодов Ганна в четвертьсферическом резонаторе. Ил. 8. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: четвертьсферический диэлектрический резонатор, колебания шепчущей галереи, щель связи, сумматор мощности.

Интерес к диэлектрическим резонаторам (ДР), возбуждаемым на колебаниях шепчущей галереи (ШГ), во многом определяется их прикладным назначением, а именно, их использованием в качестве высокооборотных колебательных систем различных активных устройств миллиметрового диапазона (генераторов, сумматоров мощности, преобразователей частоты и т. д.), а также измерительных ячеек диэлектрометров для исследования электрических свойств как твердых тел, так и жидкостей [1-8]. Исследования характеристик генераторов с различными по форме диэлектрическими структурами в ДР в виде полусферы, полудиска и цилиндра показали, что наибольшая мощность выходного сигнала и наилучшая стабильность частоты генерации достигаются в генераторе на основе полусферического ДР как наиболее высокооборотного [1, 3]. Кроме того, в таком ДР осуществлялась взаимная синхронизация колебаний двух диодов Ганна, расположенных в отверстиях на металлическом зеркале ДР на диаметрально противоположных сторонах полусферы, и суммирование их мощностей с наибольшим коэффициентом суммирования, равным 0,95. В полудисковом и цилиндрическом ДР также осуществлялось суммирование мощностей двух диодов Ганна с меньшими коэффициентами суммирования, равными 0,90 и 0,84 соответственно [9]. Однако форма области локализации резонансного поля на поверхности полусферического ДР в виде неоднородного по размерам пояса ограничивает дальнейшее использование этого резонатора как базовой резонаторной ячейки сумматоров мощностей большего числа диодов (более двух), расположенных на металлическом зеркале. Взаимная синхронизация колебаний и суммирование мощностей трех диодов Ганна были получены в генераторе на основе цилиндриче-

ского ДР, возбуждаемого на низших аксиальных EH -колебаниях с аксиальным индексом, равным 1 [9]. К недостаткам этого резонатора следует отнести густой частотный спектр, поскольку в таком ДР одновременно могут возбуждаться колебания с аксиальными индексами от 1 до 5. Кроме того, конструктивные особенности генератора на основе цилиндрического ДР не позволяли осуществить эффективную связь всех диодов Ганна при расположении их вдоль аксиальной координаты с резонансными полями возбуждаемых колебаний. Только один из трех диодов мог находиться в максимуме интенсивности резонансного поля. Два остальных диода располагались на спадающем участке поля, обеспечивая худшую эффективность связи с ДР, а следовательно и меньшую мощность генерации. Следствием этого стало понижение коэффициента суммирования мощностей трех диодов по сравнению с двухдиодной генерацией в таком ДР. Коэффициент суммирования мощностей трех диодов Ганна в цилиндрическом ДР составил 0,80. В связи с этим поиск и исследования «новых» по форме высокооборотных ДР, возбуждаемых на колебаниях ШГ, является одной из актуальных задач повышения мощности и стабильности частоты генерации в миллиметровом диапазоне длин волн. Следует заметить, что, основываясь на результатах предыдущих исследований, наиболее перспективными для генераторов и сумматоров мощности являются резонаторы, содержащие элементы сферической поверхности, которая обеспечивает высокую добротность [10].

К числу таких резонансных структур следует отнести четвертьсферический ДР, обладающий близкими к полусферическому ДР электродинамическими свойствами [9]. Переход к такому ДР осуществляется посредством замены

одной половины полусферы металлическим зеркалом (рис. 1).

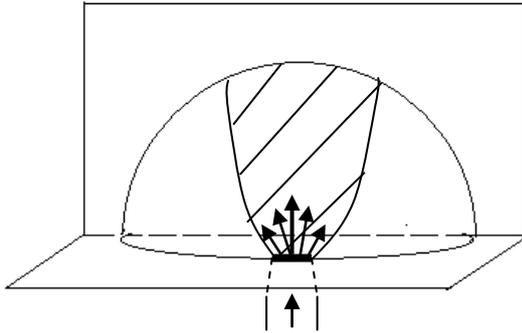


Рис. 1. Четвертьсферический ДР, возбуждаемый щелью связи в зеркале (заштрихованной области соответствует область локализации резонансного поля при азимутальной координате щели связи $\varphi_i=0^\circ$)

Сечение полусферы осуществляется вдоль оси симметрии перпендикулярно металлическому зеркалу, на котором располагается полусфера. Таким образом четвертьсферический ДР представляет собой четвертьсферическую по форме диэлектрическую структуру, ограниченную двумя взаимноортогональными плоскими металлическими зеркалами. В таком ДР щелью связи в одном из зеркал, которую образует открытый конец сужающегося металлического волновода, могут возбуждаться либо E -, либо H -колебания в зависимости от ориентации щели связи по отношению к радиусу четвертьсферы. Ранее не были проведены детальные исследования распределения резонансных полей колебаний в таких ДР.

1. Четвертьсферический ДР с двумя зеркалами. Известно, что спектральные характеристики E -колебаний и распределение их полей в четвертьсферическом ДР существенно зависят от положения щели связи вдоль азимутальной координаты φ , расположенной в одном из зеркал ДР [9]. Из рис. 1 видно, что для различия металлических зеркал четвертьсферического ДР удобно воспользоваться их различным расположением вдоль полярной координаты Θ . Для удобства металлическое зеркало со щелью связи в дальнейшем будем характеризовать полярной координатой $\Theta_3=0^\circ$, а однородное металлическое зеркало - $\Theta_3=90^\circ$. При азимутальной координате щели связи $\varphi_i=0^\circ$ и $\Theta_i=0^\circ$ (данное положение щели связи соответствует рис. 1) в четвертьсферическом ДР возбуждаются E -колебания с удвоенным по сравнению с полусферическим ДР периодом сетки резонансных частот. Области локализации полей колебаний подобны неоднородному по ширине пояску, расположенному вдоль полярной координаты Θ (рис. 1), наблюдаемому также в полусфе-

рическом ДР. Для четвертьсферы радиусом 39 мм в 8-мм диапазоне длин волн период сетки резонансных частот составляет около 1,8 ГГц. Спектр резонансных колебаний ШГ четвертьсферического ДР вырожден по частоте также как и спектр полусферического ДР. С одинаковыми резонансными частотами возбуждаются колебания с разным значением азимутального индекса. Как было показано в работе [9], кратность возбуждаемых с одинаковыми частотами колебаний зависит от параметров элемента возбуждения колебаний и параметров резонатора. Смещение источника в четвертьсферическом ДР из точки с координатой $\varphi_i=0^\circ$ приводит к снятию частотного вырождения. На близких частотах возбуждаются колебания с азимутальными индексами m , равными 1, 2 и 3. Области локализации их резонансных полей на сферической поверхности представляют собой фигуры, подобные представленным на рис. 2, а в виде заштрихованных областей. Согласно представлениям геометрической оптики поля колебаний локализируются в областях, образованных волноведущими каналами на сферической поверхности четвертьсферического ДР. Им соответствует распространение пучка волн, исходящих из источника, затем отражающихся от металлического зеркала с $\Theta_3=90^\circ$ и фокусирующихся на зеркале с $\Theta_3=0^\circ$. Фокусировку волн ШГ в четвертьсферическом ДР обуславливает сама сферическая поверхность ДР. Ранее данный эффект уже наблюдался в полусферическом ДР. Поля возбуждаемых колебаний ШГ разделены согласно величине их азимутального индекса. Более широкую область занимает поле колебания с $m = 2$. Граница области локализации поля этой моды на рис. 2,а схематически представлена пунктиром. Область локализации резонансного поля колебания с $m = 3$ на рис. 2,а не представлена. Следует отметить, что тенденция увеличения размеров области локализации резонансного поля на поверхности диэлектрической четвертьсферы с ростом азимутального индекса колебаний подтверждается и для колебания с $m = 3$, поскольку его резонансное поле занимает более широкую область сферической поверхности ДР, чем поле колебания с $m = 2$.

Обращают на себя внимание области сужения резонансных полей на металлическом зеркале со щелью связи. Их протяженность соответствует примерно размерам щели связи. Данные области характеризуются высокой концентрацией резонансного поля, т. е. высокой интенсивностью. На зеркале с $\Theta_3=90^\circ$ резонансное поле занимает широкую область.

Видно, что такая структура резонансных полей в четвертьсферическом ДР создает перспективные предпосылки для расположения нескольких диодов (более двух) на двух металличе-

ских зеркалах в колебательных системах сумматоров мощности.

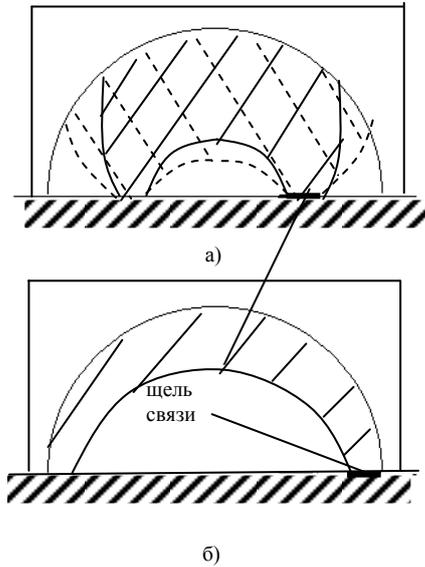


Рис. 2. Области локализации резонансных полей при $0^\circ < \varphi_i < 90^\circ$ (а) и при $\varphi_i = 90^\circ$ (б)

К недостаткам такой системы следует отнести густой спектр колебаний, поскольку на близких резонансных частотах могут возбуждаться колебания с разными азимутальными индексами. Для достижения взаимной синхронизации диодов и более эффективной связи диодов Ганна с резонансными полями колебаний необходимы дополнительные исследования зависимостей резонансных свойств четвертьсферического ДР от условий его возбуждения, а именно, от выбора расположения щели связи по азимутальной координате. К их числу следует отнести исследования спектральных и энергетических характеристик, их зависимость от азимутальной координаты щели связи, а также возможность разрежения спектра четвертьсферического ДР.

В эксперименте исследуется ДР в виде фторопластовой четвертьсферы радиусом 39 мм, ограниченной двумя плоскими медными зеркалами, расположенными ортогонально друг другу. Возбуждение колебаний осуществляется щелью связи размерами $7,2 \times 1,0 \text{ мм}^2$, которую на зеркале может образовывать либо открытый конец полого металлического волновода, либо выходное отверстие диодного модуля. В эксперименте имеется возможность ориентировать щель связи как перпендикулярно, так и параллельно радиусу четвертьсферы, возбуждая тем самым либо E -, либо H -колебания соответственно, а также плавно менять ее азимутальную координату φ_i путем поворота четвертьсферы вместе с зеркалом с $\Theta_3 = 90^\circ$ относительно щели связи в зеркале с $\Theta_3 = 0^\circ$.

Проследим динамику изменения резонансных частот E -колебаний на примере зависимости усредненного значения периода Δf сетки резонансных частот от величины φ_i . Данная зависимость является информативной с позиций качественной оценки распределения полей колебаний и эффективного значения диэлектрической проницаемости среды в исследуемой области резонансного поля четвертьсферического ДР. Отметим, что видимое вырождение колебаний наблюдалось не во всем интервале изменений величины φ_i . Начиная с $\varphi_i \approx 30^\circ$, наблюдается снятие вырождения. В этом случае отдельно измерялись резонансные частоты колебаний с $m = 1, 2$ и 3. Результаты проведенных исследований представлены графически на рис. 3. На графике рис. 3 значение периода сетки резонансных частот при $\varphi_i = 0^\circ$ не показано. Как отмечалось ранее, при $\varphi_i = 0^\circ$ период сетки резонансных частот превышает почти в два раза его усредненное по φ_i значение и составляет около 1,8 ГГц. Это связано с тем, что траектории исходящих из щели связи волн и отраженных от зеркала с $\Theta_3 = 90^\circ$ совпадают. Волноведущий канал, возникающий на сферической поверхности ДР, имеет протяженность в два раза меньшую, чем при $\varphi_i \neq 0^\circ$.

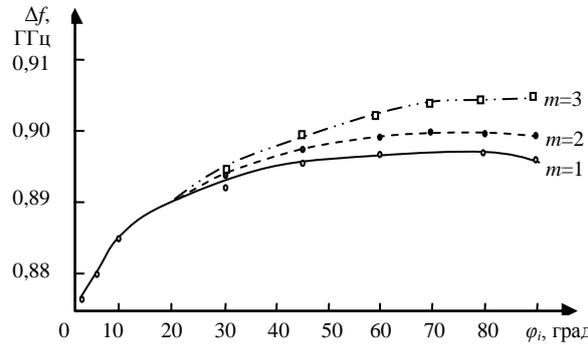


Рис. 3. Зависимость периода сетки резонансных частот для колебаний с разными азимутальными индексами от азимутальной координаты щели связи

Из рис. 3 видно, что с увеличением φ_i период сетки резонансных частот для всех колебаний с разными значениями азимутального индекса растет. Наибольший рост наблюдается в области малых значений азимутальной координаты щели связи. Такому росту периода сетки частот соответствует наиболее динамичное расширение области локализации L резонансного поля вблизи металлического зеркала с $\Theta_3 = 90^\circ$. В интервале значений φ_i от 0° до 10° значение величины L увеличивается более чем в два раза. Так, на резонансной частоте $f_n \approx 35,40 \text{ ГГц}$ протяженность L области локализации резонансного поля колебания с $m = 1$ на металлическом зеркале с $\Theta_3 = 90^\circ$ увеличивается от 26 до 55 мм. Дальнейшее увеличение величины φ_i

сопровождается увеличением значения величины L . При $\varphi_i \approx 30^\circ$ величина $L = 72$ мм, при $\varphi_i = 45^\circ$ $L = 78$ мм, при $\varphi_i > 45^\circ$ увеличение азимутальной координаты щели связи не приводит к значительному росту величины периода сетки резонансных частот. При этом и рост величины L незначителен. Мало того, при приближении щели связи к металлическому зеркалу с $\Theta_3 = 90^\circ$ ($\varphi_i \rightarrow 90^\circ$) наблюдается тенденция понижения величины Δf . Ширина области локализации резонансного поля на зеркале с $\Theta_3 = 90^\circ$ в данном случае наибольшая, поскольку пояс поля расположен вдоль всей плоскости зеркала (рис. 2,б). Можно предположить, что объяснение такому противоречию может быть получено с позиций геометрической оптики. При больших значениях азимутальной координаты щели связи ($\varphi_i > 45^\circ$) углы, образованные направлением падения (отражения) волн ШГ на металлическое зеркало с $\Theta_3 = 90^\circ$ и самим этим зеркалом, уменьшаются. Омические потери при этом снижаются, поскольку проникновение волн в окружающую среду уменьшается. С позиций представлений электродинамики резонансных структур следствием этому должно быть понижение интенсивности резонансного поля на плоскости металлического зеркала с $\Theta_3 = 90^\circ$. Подтверждением правильности сделанных предположений является исследование зависимости относительной величины интенсивности резонансного поля на границе диэлектрика от величины азимутальной координаты щели связи. Данная зависимость для колебаний с $m = 1, 2$ и 3 представлена графически на рис. 4. Относительная интенсивность резонансного поля на металлическом зеркале четвертьсферического ДР в эксперименте определялась как отношение возмущенных пробным телом амплитуд резонансных откликов при размещении пробного тела на ребре диэлектрической четвертьсферы и в области максимума интенсивности резонансного поля (метод пробного тела). Пробное маловозмущающее тело с размерами, значительно меньшими длины волны, размещалось по азимутальной координате для каждой моды колебаний в области пучности резонансного поля.

Из рис. 4 видно, что наименьших значений величина I_0 приобретает при расположении щели связи в точке с азимутальной координатой $\varphi = 90^\circ$. Именно такому расположению щели связи в приближении геометрической оптики соответствует наиболее пологое падение волн на металлическое зеркало. При этом крутизна кривой периода сетки резонансных частот, представленной на рис. 3, в интервале значений $\varphi_i \approx 90^\circ$ наименьшая.

Следует отметить, что качественное соответствие представленных на рис. 3 и 4 результатов исследований наблюдается и для высших азимутальных колебаний с $m = 2$ и 3 . При проведении

сравнительного анализа результатов исследований характеристик резонансных полей колебаний с $m = 1$ и высших азимутальных колебаний можно заключить, что большая ширина области локализации резонансных полей последних в области металлического зеркала определяет и большие значения периода сетки их резонансных частот.

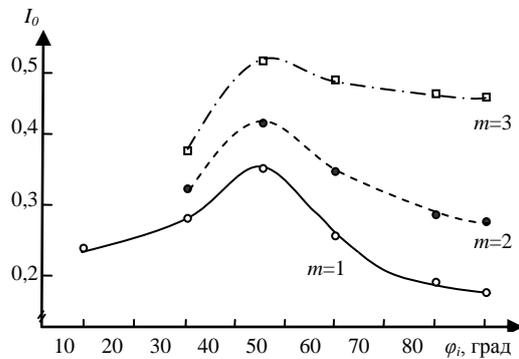


Рис. 4. Зависимость относительной интенсивности резонансного поля на ребре четвертьсферического ДР от азимутальной координаты щели связи

Различное влияние металлического зеркала на поля колебаний с разными азимутальными индексами вследствие различной интенсивности их резонансных полей на металлическом зеркале (рис. 4) послужило основной причиной снятия частотного вырождения. Интересно, что, как и отмечалось ранее, начальная точка снятия вырождения при перемещении щели связи по азимутальной координате соответствует начальной точке разветвления кривых интенсивности резонансных полей колебаний с разными значениями m на металлическом зеркале и периода сетки резонансных частот, представленных на рис. 4 и 3 соответственно.

Подтверждением правильности рассуждений о снижении омических потерь энергии колебаний при высоких значениях азимутальной координаты щели связи, приближавшейся к $\varphi_i = 90^\circ$, есть результаты исследования зависимости добротности Q_0 (метод измерения полного сопротивления) от величины φ_i . Данная зависимость для колебания с $m = 1$ представлена графически на рис. 5 в виде сплошной кривой.

В интервале значений величины φ_i от 0° до 30° добротность не определялась в связи с видимым снятием частотного вырождения колебаний с разными азимутальными индексами. В этом интервале значений азимутальной координаты щели связи резонансные отклики колебаний с $m = 1, 2$ и 3 располагались по шкале частот вблизи друг друга, при этом они частично перекрывались. При значениях азимутальной координаты щели связи $\varphi_i > 30^\circ$ расстояние по шкале частот между ними увеличивалось согласно данным, представленным на рис. 3.

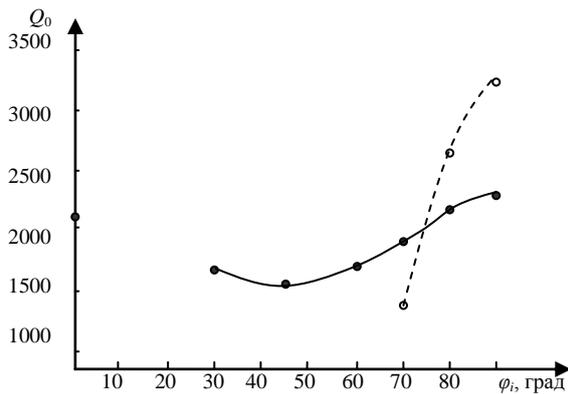


Рис. 5. Зависимость добротности от азимутальной координаты щели связи

Из рис. 5 видно, что наибольшие значения величина Q_0 приобретает при расположении щели связи в точке с азимутальной координатой $\varphi = 90^\circ$. Рост добротности в интервале значений величины φ_i от 45° до 90° свидетельствует о монотонном снижении омических потерь энергии колебаний. При $\varphi_i = 90^\circ$ они минимальны, что качественно согласуется с данными, представленными на графике интенсивности резонансного поля в области металлического зеркала (рис. 4). Также видно согласование результатов исследования добротности колебаний и распределения интенсивности их резонансных полей в области металлического зеркала при $\varphi_i = 45^\circ$, поскольку при этом значении азимутальной координаты щели связи наблюдаются наименьшие значения величины добротности и наибольшие значения интенсивности резонансного поля на металлическом зеркале.

Отметим, что с ростом азимутального индекса колебаний их добротность понижается при всех значениях азимутальной координаты щели связи. В среднем наблюдается снижение добротности колебаний с $m = 2$ на 23 % и колебаний с $m = 3$ на 35 % по сравнению с добротностью низших азимутальных колебаний с $m = 1$.

2. Четвертьсферический ДР, открытый со стороны одного плоского основания. Геометрическая модель четвертьсферического ДР, включающего щель связи с возможностью изменения ее азимутальной координаты, интересна еще и тем, что позволяет рассматривать ее с позиций геометрической оптики как резонансную структуру с одним металлическим зеркалом. Плоское основание диэлектрической четвертьсферы, на которое падает пучок волн ШГ, исходящих из щели связи, открыто (отсутствует металлическое зеркало с $\Theta_3 = 90^\circ$). В такой электродинамической модели открытое плоское основание играет роль отражателя волн ШГ. Используя

законы Снеллиуса, нетрудно определить угол полного внутреннего отражения волн на плоской границе раздела сред диэлектрик – воздух. Расчеты показывают, что для используемого материала диэлектрика с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2,08$ угол полного внутреннего отражения составляет 44° . Это означает, что в резонансной системе со щелью связи в зеркале и с открытым плоским основанием возможно существование колебаний ШГ при азимутальных координатах щели связи $\varphi_i > 46^\circ$. Ранее исследований электродинамических характеристик такой резонансной системы не проводилось.

Итак, в четвертьсферическом ДР с открытым одним плоским отражающим основанием экспериментально наблюдаются резонансные отклики E -колебаний при $\varphi_i > 55^\circ$. Расхождение теории с экспериментом, по-видимому, объясняется ограниченной чувствительностью приемной аппаратуры. Начиная с $\varphi_i = 60^\circ$, параметры резонансных откликов (в первую очередь амплитуда) позволяют измерять соответствующие характеристики колебаний ШГ. Первое, на что обращает внимание спектр такой резонансной структуры, это его разреженность по сравнению со спектром четвертьсферического ДР с двумя зеркалами. В спектре исследуемого резонатора присутствуют резонансные отклики колебаний с азимутальными индексами $m = 1$ и 2. При этом эффективность возбуждения высшего азимутального колебания ниже, чем в ДР с двумя зеркалами. Как видно из рис. 4, резонансные поля высших азимутальных колебаний в области расположения металлического зеркала имеют высокую интенсивность, значительно превосходящую интенсивность поля низшего азимутального колебания, что определяет высокие радиационные потери энергии в открытой резонансной системе. Вследствие этого колебание с $m = 3$ в открытом ДР не возбуждается. Эффективность возбуждения низшего азимутального колебания при переходе от ДР с двумя зеркалами к резонатору, открытому со стороны одного плоского основания, заметно увеличивается. Об этом говорят результаты измерения параметра связи подводящего волновода с резонансными полями колебаний в ДР и определение амплитуды резонансного отклика колебаний. Так, на резонансных частотах, близких к 36 ГГц, при постоянной азимутальной ($\varphi_i = 90^\circ$) и радиальной координатах щели связи (середина щели связи располагается на краю диэлектрической четвертьсферы) при переходе от ДР с двумя зеркалами к открытому со стороны одного плоского основания четвертьсферическому ДР параметр связи увеличивается от 0,43 до 0,48. Амплитуда резонансного отклика в единицах КСВН при этом увеличивается от 0,58 до 0,95. Об изменении

резонансных свойств рассматриваемой электродинамической системы говорит и изменение самих резонансных частот. Так, в случае, приведенном выше, резонансная частота выбранного E -колебания понижается на 200 МГц. Изменение спектральных характеристик при переходе от четвертьсферического ДР с двумя зеркалами к ДР, открытому со стороны одного плоского основания, наглядно демонстрирует осциллограмма, представленная на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что спектр колебаний четвертьсферического ДР разрежен по сравнению со спектром ДР с двумя зеркалами. При этом в открытом со стороны одного основания ДР резонансные отклики низшего азимутального колебания и колебания с $m = 2$ разнесены по частоте.

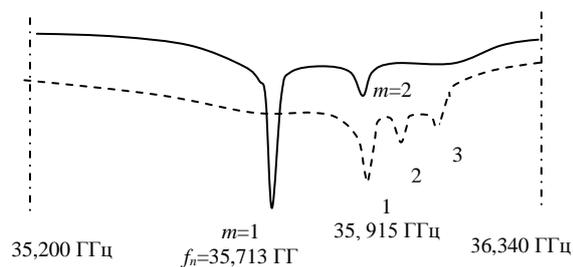


Рис. 6. Спектры четвертьсферических ДР с двумя зеркалами (пунктир) и с одним зеркалом (сплошная кривая)

Результаты измерения периода сетки резонансных частот ДР с одним зеркалом показали, что его усредненное значение при разных азимутальных координатах щели связи ниже, чем в ДР с двумя зеркалами. Так, при $\varphi_i = 90^\circ$ величина Δf для ДР с двумя зеркалами составляет 0,897 ГГц, а для ДР, открытого со стороны одного плоского основания, она равна 0,882 ГГц. Это свидетельствует о том, что в ДР с одним зеркалом резонансное поле более сосредоточено в области материала диэлектрика, чем в ДР с двумя зеркалами.

Результаты исследования распределения интенсивности резонансного поля на сферической поверхности четвертьсферического ДР с одним зеркалом показали, что по сравнению с ДР с двумя зеркалами интенсивность поля на плоской границе раздела сред диэлектрик – окружающая среда понижается. При $\varphi_i = 90^\circ$ в относительных единицах в ДР с одним зеркалом она составляет 0,10, в отличие от ДР с двумя зеркалами, для которого интенсивность резонансного поля на металлическом зеркале принимала значение 0,17. Следует заметить, при переходе от ДР с двумя зеркалами к резонатору, открытому со стороны одного плоского основания, изменяется и распределение интенсивности внутри области локализации резонансного поля. Напомним, что при $\varphi_i = 90^\circ$ область локализации резонансного поля на сферической поверхности четвертьсфе-

рического ДР с двумя зеркалами имеет вид неоднородного по ширине пояса (рис. 2,б), расположенного вдоль плоскости металлического зеркала (в направлении распространения волн ШГ в ДР). На резонансной частоте, близкой к 36 ГГц, максимальная ширина пояса поля $L = 21$ мм. Максимум интенсивности резонансного поля находится не на середине ширины пояса, а смещен от середины в сторону зеркала на 4 мм. При переходе к ДР, открытому со стороны одного плоского основания, поясок поля сужается и максимум интенсивности располагается на середине ширины пояса резонансного поля. Так, при $f_n \approx 36$ ГГц величина $L = 18$ мм и максимум интенсивности резонансного поля удален от плоской границы раздела сред диэлектрик – воздух на 9 мм. Из этого следует, что металлическое зеркало оказывает существенное влияние на поведение электродинамических характеристик четвертьсферического ДР.

Из приведенных выше результатов экспериментальных исследований и сравнительного анализа свойств ДР с двумя и одним зеркалом следует, что наибольшее влияние металлическое зеркало оказывает на резонансные поля колебаний при азимутальной координате щели связи $\varphi_i = 90^\circ$. Поясок поля по всей своей протяженности имеет области соприкосновения с металлической плоскостью зеркала. С позиций электродинамики ориентации щели связи ($\varphi_i = 90^\circ$), при которой возбуждаются в ДР E -колебания, соответствует расположение вектора напряженности электрического поля, направленного вдоль плоскости металлического зеркала. В области соприкосновения пояса резонансного поля с зеркалом вектор напряженности лежит в плоскости металлического зеркала. Величина токов проводимости, наводимых на металлическом зеркале, при этом наиболее существенна. Поэтому влияние металлического зеркала на электродинамические свойства резонансной системы в этом случае наиболее существенно.

Вызывает интерес исследование влияния металлического зеркала в резонансной системе с двумя зеркалами на поведение основной энергетической характеристики ДР – на величину его добротности. Для этого экспериментально исследовались добротности в ДР с одним зеркалом и проводился их сравнительный анализ с результатами определения величины Q_0 для ДР с двумя зеркалами. Результаты определения добротности в ДР, открытом со стороны одного плоского основания, представлены на рис. 5 в виде пунктирной кривой, соединяющей экспериментальные точки. Видно, что при приближении щели связи к точке с азимутальной координатой $\varphi = 90^\circ$ наблюдается резкий рост величины Q_0 . При $\varphi_i = 90^\circ$ добротность приобретает наибольшее значение, ко-

торое более чем в полтора раза превышает величину добротности в четвертьсферическом ДР с двумя зеркалами. При уменьшении азимутальной координаты щели связи добротность ДР с одним зеркалом резко уменьшается и уже при $\varphi_i=73^\circ$ становится меньше величины Q_0 в ДР с двумя зеркалами. Такое поведение кривой добротности для четвертьсферического ДР, открытого со стороны одного плоского основания, хорошо согласуется с представлениями геометрической оптики, поскольку возбуждение волн ШГ в ДР осуществляется при углах падения волн на плоскую границу раздела сред диэлектрик - воздух больших угла полного внутреннего отражения, и с представлениями электродинамики волновых процессов, поскольку уменьшение радиационных потерь энергии при излучении с открытого плоского основания четвертьсферы определяется снижением интенсивности резонансного поля на плоской границе раздела сред диэлектрик – окружающая среда.

Таким образом, проведенные исследования показали важную роль положения щели связи на металлическом зеркале четвертьсферического ДР как элемента возбуждения колебаний, с одной стороны, и как элемента управления электродинамическими характеристиками резонансной системы, с другой. Проведенные исследования являются основой и создают перспективные предпосылки для использования четвертьсферического ДР, управляемого щелью связи на зеркале, в качестве базового элемента сумматора мощности с использованием числа диодов больше двух. В целях повышения добротности ДР и разрежения спектра колебаний перспективным является использование четвертьсферического ДР, открытого со стороны одного плоского основания. К его недостаткам следует отнести ограниченный интервал возможных значений азимутальной координаты щели связи, при которых осуществляется возбуждение колебаний, и сильную зависимость добротности от величины φ_i .

3. Четвертьсферический ДР – базовый элемент трехдиодного сумматора мощности. Итак, проведенные исследования электродинамических свойств четвертьсферического ДР показали, что при определенных условиях его возбуждения несколькими твердотельными диодами либо диодными модулями он может выполнять функции колебательной системы высокостабильного генератора миллиметровых волн и базового элемента сумматора мощности при суммировании мощностей трех диодов. Для этого используются представления об особенностях распределения резонансных полей колебаний в четвертьсферическом ДР при его возбуждении локальным источником, находящимся на участке с азимутальной координатой $0^\circ < \varphi < 90^\circ$. Расположению

источника в этом интервале изменения величины φ соответствуют области локализации резонансных полей колебаний на сферической поверхности ДР, подобные представленным схематически на рис. 2,а. Эффект фокусировки волн ШГ в четвертьсферическом ДР, описанный ранее, создает предпосылки для расположения двух диодов (диодных модулей) в областях сужения области локализации резонансного поля (рис. 7). При этом с позиций электродинамических представлений они находятся в эквивалентных условиях, их позиции по азимутальной координате одинаковы и отличаются знаком азимутальной координаты. Перспективным для расположения третьего диода является область резонансного поля на втором зеркале ДР. Учитывая характер распределения поля на металлическом зеркале по азимутальной координате с максимумом интенсивности поля в середине ширины области локализации поля, наиболее перспективным для достижения наиболее эффективной связи третьего диода с резонансным полем в четвертьсферическом ДР является его расположение в точке с азимутальной координатой $\varphi=0^\circ$ и полярной координатой $\Theta=90^\circ$ (рис. 7).

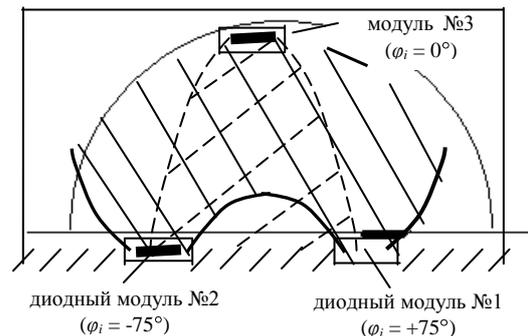


Рис. 7. Схематическое представление четвертьсферического ДР как базового элемента трехдиодного сумматора мощности

Диоды Ганна располагались в модулях на основе отрезков стандартных прямоугольных металлических волноводов с элементами крепежа диодов, их согласования, настройки, подвода питания и вывода мощности СВЧ электромагнитного поля. Поэтому в дальнейшем будем говорить о возбуждении четвертьсферического ДР диодными модулями. С позиций электродинамических представлений диодный модуль является низкодобротным колебательным контуром. Его связь с ДР осуществляется посредством щели связи с теми же размерами, что и при возбуждении резонатора внешним сигналом. На рис. 7 схематически представлена конструкция сумматора мощности трех диодных модулей. Для достижения высокой стабильности частоты генерации, которая пропорциональна добротности ДР, диодные модули №1 и №2 располагались в отверстиях на металлическом

зеркале с азимутальными координатами $\varphi_i = \pm 75^\circ$ по обе стороны симметрично относительно точки с азимутальной координатой $\varphi = 0^\circ$. Расположение диодных модулей №1 и №2 в точках с азимутальными координатами, имеющих большие значения, менее выгодно из-за того, что ширина области локализации резонансного поля на металлическом зеркале с диодным модулем №3 увеличивается. При этом интенсивность резонансного поля в области расположения диодного модуля №3 понижается, а следовательно его связь с полем колебаний в четвертьсферическом ДР ухудшается. Азимутальная координата диодного модуля №3, находящегося на втором зеркале четвертьсферического ДР, была $\varphi_i = 0^\circ$ и полярная координата $\Theta = 90^\circ$. Для разрежения спектра не использовалось ограниченное по размерам зеркало ДР с установленным на нем диодным модулем №3. Главной причиной этому является резкая зависимость добротности исследуемого ДР от азимутальной координаты источника возбуждения колебаний. Кроме того, ограниченное зеркало создает резкую границу раздела сред на поверхности ДР, которая приведет к появлению дополнительных дифракционных потерь энергии и, как следствие, к нежелательному ухудшению добротности.

Ниже приведен алгоритм операций по настройке диодных модулей на выбранную резонансную частоту четвертьсферического ДР и достижению взаимной синхронизации их колебаний.

Из рис. 7 понятно, что самостоятельная настройка диодного модуля №3, находящегося на позиции согласно рис. 7, для обеспечения взаимной синхронизации колебаний с диодными модулями №1 и №2 невозможна. Главной причиной тому является принципиальное различие позиций диодного модуля №3, с одной стороны, и диодных модулей №1 и №2, с другой. Как свидетельствуют результаты исследований распределения резонансных полей колебаний в четвертьсферическом ДР при различных азимутальных координатах щели связи формы областей локализации резонансных полей колебаний на сферической поверхности ДР при $\varphi_i = 0^\circ$ и $\varphi_i \neq 0^\circ$ имеют принципиальные различия. Граница области локализации поля колебаний, возбуждаемых диодным модулем №3, на рис. 7 схематически представлена пунктиром, а диодными модулями №1 или №2 – сплошной кривой. Существенно отличаются и резонансные частоты колебаний, поэтому для настройки диодного модуля №3 на выбранную резонансную частоту четвертьсферического ДР использовалась позиция, соответствующая положению диодного модуля №1 либо №2 ($\varphi_i = \pm 75^\circ$). После настройки диодный модуль №3 без подачи на него напряжения питания устанавливался на свою позицию согласно рис. 7, а его позицию

занимал диодный модуль №1 либо №2. Каждый из них настраивался на ту же частоту, и затем осуществлялась взаимная синхронизация колебаний диодных модулей №1 и №2. Вывод СВЧ мощности из сумматора мощности осуществлялся через диодный модуль №2. После обеспечения взаимной синхронизации колебаний диодных модулей №1 и №2 осуществлялось включение в цепь диодного модуля №3 при его параллельном питании относительно питания диодных модулей №1 и №2. Как было показано ранее [9], параллельное питание диодных модулей обеспечивает независимую электронную перестройку частоты каждого из них, что особо важно для обеспечения взаимной синхронизации колебаний отдельных диодных модулей. Точная настройка частоты генерации диодным модулем №3 на частоту одновременной генерации колебаний диодными модулями №1 и №2 осуществлялась при помощи реактивного поршня. Характеристики одно-, двухдиодной (диодными модулями №1 и №2) и трехдиодной генерации колебаний в четвертьсферическом ДР на частотах, близких к 36 ГГц, представлены графически на рис. 8.

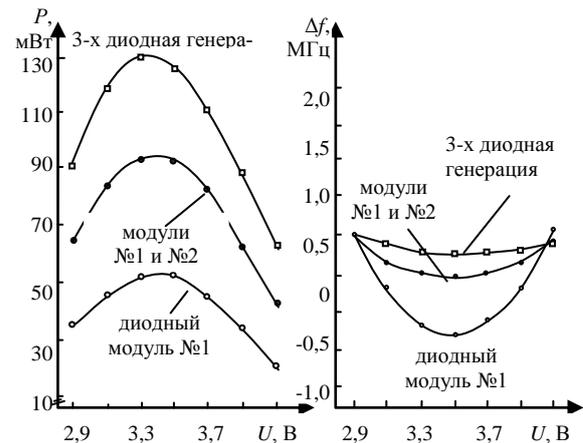


Рис. 8. Характеристики сумматора мощности на основе четвертьсферического ДР

На рис. 8 представлены зависимости мощности P генерации от напряжения U питания диодных модулей и электронная перестройка частоты (зависимость изменения частоты Δf генерации от напряжения U питания диодных модулей). Крутизна последней позволяет оценить стабильность частоты генерации по отношению к паразитному изменению напряжения питания диодного модуля. На рис. 8 не показаны мощности генерации диодными модулями №2 и №3 из-за того, что поведение кривой мощности подобно представленному на рис. 8. Отметим, что мощности генерации диодными модулями №2 и №3 при настройке напряжения на максимум мощности были несколько меньше, чем для диодного модуля №1, и равнялись 49 и 47,5 мВт

соответственно. Максимальная мощность генерации диодным модулем №1 в четвертьсферическом ДР составляла 52,3 мВт.

Из рис. 8 видно, что наибольший коэффициент суммирования мощностей двух и трехдиодных модулей достигается при их настройке по напряжению на максимум мощности. При напряжениях, соответствующих спадающим участкам мощности, коэффициент суммирования понижается при взаимной синхронизации колебаний двух диодных модулей (модули №1 и №2) от 0,93 до 0,91, а при суммировании мощностей трехдиодных модулей от 0,88 до 0,85. При обеспечении режима взаимной синхронизации колебаний двух и трехдиодных модулей максимум мощности по напряжению питания сдвигается в низковольтную область. Отметим, что по сравнению с генерацией в самой модульной конструкции диода Ганна, не связанной с четвертьсферическим ДР, а короткозамкнутой со стороны щели связи, выходная мощность в генераторе на основе четвертьсферического ДР в среднем понижалась на 9÷10%. Эти потери мощности в рассматриваемой генераторной конструкции тратились на связь с ДР. Однако более высокая добротность ДР по сравнению с низкодобротным колебательным контуром, представленным диодным модулем, обеспечивает лучшую стабильность частоты генерации. Так, электронная перестройка частоты в интервале изменения напряжения питания диодного модуля от 2,9 до 4,1 В составляет 1,3 МГц/В при генерации колебаний в четвертьсферическом ДР (рис. 8) и 56 МГц/В для короткозамкнутого диодного модуля. При обеспечении взаимной синхронизации колебаний нескольких диодных модулей крутизна электронной перестройки частоты понижается. Рост стабильности частоты генерации при увеличении числа синхронизируемых диодных модулей сопровождается сужением полосы электронной перестройки частоты. Так, при обеспечении режима взаимной синхронизации колебаний диодных модулей №1 и №2 полоса электронной перестройки частоты составила 0,45 МГц/В, а при взаимной синхронизации колебаний трехдиодных модулей – 0,15 МГц/В.

Сравнение данных о генерации колебаний двумя и тремя диодными модулями в четвертьсферическом ДР с полученными ранее характеристиками двухдиодной генерации в полусферическом ДР и трехдиодной генерации в цилиндрическом ДР показали, что коэффициент суммирования мощностей колебаний двухдиодных модулей и электронная перестройка частоты в четвертьсферическом ДР имеет незначительные различия по сравнению с полусферическим ДР. Генерация колебаний тремя диодными модулями в четвертьсферическом ДР позволяет увеличить коэффициент суммирования мощностей до 0,88 по сравнению с его значением, равным 0,84, при генерации колебаний тремя диодными

модулями в цилиндрическом ДР. При этом по сравнению с генерацией колебаний тремя диодами в цилиндрическом ДР улучшается и стабильность частоты. Изменение частоты генерации при изменении напряжения питания диодных модулей для цилиндрического ДР составило 0,25 МГц/В по сравнению с 0,15 МГц/В в четвертьсферическом ДР.

Интересно отметить наблюдаемый в четвертьсферическом ДР эффект «затягивания» частоты генерации диодного модуля №3 генерацией колебаний диодными модулями №1 и №2, работающими в режиме взаимной синхронизации колебаний. Как отмечалось ранее, самостоятельная генерация колебаний диодным модулем №3, находящимся на позиции согласно рис. 7, на частоте генерации диодными модулями №1 и №2 невозможна. Однако изменение электродинамических характеристик резонансной системы применительно к позиционному расположению диодного модуля №3 (распределение резонансных полей колебаний), навязанное вынужденными колебаниями диодных модулей №1 и №2, позволяет обеспечить взаимную синхронизацию колебаний трех диодных модулей.

Выводы. Представлены результаты исследования четвертьсферического ДР, возбуждаемого щелью связи в зеркале. Показано, что спектральные и энергетические характеристики колебаний шепчущей галереи, возбуждаемые в четвертьсферическом ДР имеют сильную зависимость от положения щели связи по азимутальной координате. Для разрежения спектра колебаний четвертьсферического ДР с двумя зеркалами предложен переход к четвертьсферическому ДР, открытому со стороны одного плоского основания. Изучены электродинамические характеристики такого резонатора. Четвертьсферический ДР является перспективным базовым элементом многодиодного сумматора мощности. Достигнута взаимная синхронизация колебаний трех диодных модулей в нем и исследованы характеристики трехдиодного сумматора мощности на основе четвертьсферического ДР.

1. *Kharkovsky S. N., Kirichenko A. Ja., Kogut A. E.* Solid-state oscillators with whispering-gallery mode dielectric resonators // *Microwave and Optical Techn. Letters.* - 1996. - 12, №4. - P.210 - 213.
2. *Кириченко А. Я., Харьковский С. Н.* Генерация электромагнитных колебаний мм диапазона полупроводниковыми диодами в квазиоптическом диэлектрическом резонаторе // *Изв. вузов. Радиоэлектроника.* - 1990. - 33, №10. - С.81 - 82.
3. *Харьковский С. Н., Когут А. Е., Кутузов В. В., Громов П. В.* Твердотельные генераторы КВЧ с квазиоптическими металло-диэлектрическими резонаторами // 7-ая Международн. Крымская конф.: Тр. конф. - 1997. - 2. - С.361-362.
4. *Guillon P., Jiao X.H., Auxemery P., Bermudez L.A.* Whispering-Gallery Modes Herald DR MM-Wave Use // *Microwave and RF.* - 1987. - 26, №9. - P.85-96.
5. *Костромин В. В., Быков Е. В., Гальперович Д. Я.* Исследование диэлектрических свойств неполярных полимеров в диапазоне частот 16-38 ГГц в интервале температур 4,2-300 К // *Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ.* - 1984. - №4. - С.52-59.

6. А.с. 991828 СССР, МКИ 4, G01 R27/26. Устройство для измерения параметров диэлектрических материалов / В. Ф. Взятыхшев, Б. И. Рябов, Г. Д. Якухин и др. // Открытия. Изобретения. - 1985. - №1. - С.121.
7. *Кириченко А. Я., Когут А. Е.* Генератор Ганна для измерения электрических характеристик жидкостей, стабилизированный диэлектрическим резонатором // Электромагнитные волны и электронные системы. - 2007. - 12, №2. - С.57-59.
8. Пат. України № 20863 від 15.02.07. на корисну модель "Квазиоптичний діелектрометр" / Губін О. І., Лавринович О. А., Черпак М. Т.
9. *Когут А. Е.* Колебания типа шепчущей галереи открытых металлодиэлектрических резонаторов, возбуждаемых сосредоточенными источниками излучения // Диссертация на соискание уч. степени кандидата физико-математич. наук: 01.04.03. Защищена 21.04.98. ДК № 001144. Харьков, 1998.
10. *Когут А. Е., Харьковской С. Н., Кутузов В. В.* Возбуждение колебаний типа шепчущей галереи в квазиоптических металлодиэлектрических резонаторах через щель связи в зеркале // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 1997. - 2, №1. - С.31-34.

TRANSFORMATION OF THE
ELECTRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF
THE QUARTERSPHERE DIELECTRIC
RESONATOR BY THE COUPLING SLOT
IN THE MIRROR

A. E. Kogut

It is shown, that as against the hemispherical dielectric resonator excited on the whispering gallery modes by the coupling slot in a mirror, spectral and power characteristics of the quartersphere dielectric resonator, and also distribution of resonant fields of modes depend on position of a coupling slot on azimuthal coordinate. The existence of the whispering gallery modes is possible in

the quartersphere dielectric resonator in the case of the open one plane basis

Characteristics of such dielectric resonator are investigated. It is shown, that the quartersphere dielectric resonator can form base of the power adder for summation of the power more than two Gunn diodes. The modes of mutual synchronization of oscillations of two and three diodes in the quartersphere resonator are investigated.

Key words: quartersphere dielectric resonator, whispering gallery modes, coupling slot, power adder.

ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЧВЕРТЬСФЕРИЧНОГО
ДІЕЛЕКТРИЧНОГО РЕЗОНАТОРА ЩІЛИНОЮ
ЗВ'ЯЗКУ В ДЗЕРКАЛІ

О. Є. Когут

Показано, що на відміну від півсферичного діелектричного резонатора, що збуджується на модах шепочучої галереї щілиною зв'язку в дзеркалі, спектральні та енергетичні характеристики чвертьсферичного діелектричного резонатора суттєво залежать від положення щілини зв'язку за азимутальною координатою. В чвертьсферичному резонаторі можливе існування коливань і у випадку, коли одна плоска основа резонатора відкрита. Вивчено характеристики такого діелектричного резонатора. Показано, що чвертьсферичний діелектричний резонатор може бути базою суматора потужностей більш ніж двох діодів Гана. Досліджено режим взаємної синхронізації коливань двох і трьох діодів Гана в чвертьсферичному резонаторі.

Ключові слова: чвертьсферичний діелектричний резонатор, коливання шепочучої галереї, щілина зв'язку, суматор потужності.

Рукопись поступила 3 октября 2007 г.