

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СВЯЗАННЫХ БИКОНИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

О. О. ДРОБАХИН, Д. Ю. САЛТЫКОВ

В статье рассмотрена система связанных биконических резонаторов в качестве датчика для контроля параметров диэлектриков. С помощью численного моделирования показано, что связанные резонаторы имеют ряд преимуществ по сравнению с одиночными. Определение диэлектрической проницаемости может осуществляться не по абсолютному значению частоты, а по разности частот колебаний связанных резонаторов, что позволяет как минимизировать влияние различных внешних факторов, так и проводить измерения в режиме реального времени. Приближенная оценка значений $\operatorname{tg} \delta$ может быть получена по соотношению амплитуд пиков колебаний связанных резонаторов с исследуемым образцом и без него.

Ключевые слова: биконический резонатор, резонансная частота, добротность, диэлектрическая проницаемость.

1. БИКОНИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ

СВЧ полые резонаторы нашли широкое применение для определения электрофизических параметров материалов, в частности значения диэлектрической проницаемости [1-4]. Особое место среди применяемых типов резонаторов занимают открытые волноводные резонаторы с закритическими (запредельными) областями [5-12], в частности, биконические резонаторы (БКР), представляющие собой круглый волновод с линейно уменьшающимся по краям поперечным сечением (рис. 1). Размеры и рабочая частота резонатора подбираются таким образом, чтобы в сужающихся частях возникали условия отсечки для одного или нескольких высших типов колебаний. Вследствие этого в данных структурах создаются условия для возникновения резонансных колебаний за счет переотражений электромагнитных волн высших порядков от критических сечений, в которых выполняется условие отсечки. Наличие закритических участков позволяет практически без ущерба для качества резонансной системы создавать отверстия для внесения исследуемых образцов внутрь резонатора, при этом также снимается вопрос о перпендикулярности торцевых стенок, конический профиль резонатора обеспечивает снятие вырождения между колебаниями H_{01p} и E_{11p} .

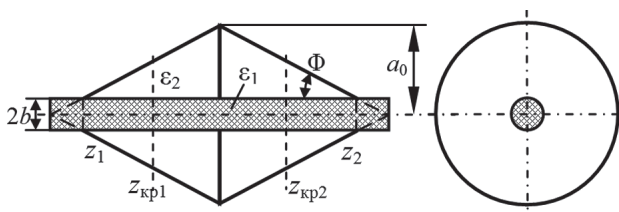


Рис. 1. Биконический резонатор с аксиальным диэлектрическим образцом

Таким образом, резонаторы указанного класса лишены тех недостатков, которые ограничивают применение регулярных цилиндрических

резонаторов и влекут снижение точности измерений. К такого сорта негативным факторам следует отнести: смещение резонансной частоты и резкое снижение добротности при создании отверстий в торцевых стенках цилиндрического резонатора для размещения исследуемых образцов; высокую чувствительность к нарушению перпендикулярности торцевых поверхностей резонатора относительно продольной оси; наличие частотного вырождения между колебаниями H_{01p} и E_{11p} . Последний фактор чрезвычайно важен, поскольку более низкодобротные электрические колебания E_{11p} возбуждаются на любых неоднородностях внутри резонатора, в частности, при возмущении поля исследуемым образцом, что в свою очередь приводит к снижению точности и однозначности измерений.

Существует достаточно большое количество работ, посвященных исследованиям параметров диэлектриков с помощью биконических резонаторов, например [13-17]. На рис. 1 показана простейшая схема датчика на основе биконического резонатора для контроля параметров диэлектриков. Исследуемый образец вводится вдоль оси резонатора через торцевые отверстия в сечениях z_1 и z_2 , расположенных в заууженной части резонатора за критическими сечениями $z_{кр1}$ и $z_{кр2}$ для рабочего типа колебаний. В качестве рабочих колебаний чаще всего, особенно, если речь идет об исследовании параметров материалов с достаточно большими потерями, применяются азимутально-симметричные колебания H_{01p} .

Биконические резонаторы, работающие на колебаниях H_{01p} , обладают высокой собственной добротностью $Q_0 \sim 10^5$, при этом критические сечения располагаются на значительном расстоянии от вершин конусов, что позволяет легко создавать отверстия для введения исследуемых образцов, практически не нарушая структуры поля в резонаторе.

К недостаткам биконических резонаторов следует отнести довольно сложный вид зависи-

мости параметров резонатора от свойств вносимого образца. Связано это, прежде всего, с тем, что внесение образца приводит к смещению местоположения критических сечений и, следовательно, удлинению рабочего объема резонатора.

Определенные перспективы для повышения точности и однозначности измерений возникают при увеличении количества информационных параметров, например, при анализе вызванных исследуемым образцом изменений характеристик не одного, а двух и более типов колебаний резонатора. Кроме того, применение схем сравнения позволяет заметно повысить точность и расширить диапазон измеряемых значений. Простейший вариант такой схемы можно реализовать с помощью двух связанных резонаторов. Возникающие при этом связанные колебания обладают как минимум вдвое большим числом информативных параметров и позволяют проводить сравнение параметров резонаторов с различным заполнением в режиме реального времени, что в свою очередь позволяет заметно снизить влияние внешних факторов (температуры, влажности и т.п.) на точность измерений. Преимуществом такого подхода является переход от абсолютного измерения частоты к измерению разности частот.

Цель данной работы заключается в исследовании возможностей применения связанных биконических резонаторов в измерительной технике, в частности, для контроля параметров диэлектриков.

2. ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ СВЯЗИ МЕЖДУ РЕЗОНАТОРАМИ

Простейший вариант схемы измерительного датчика на связанных БКР изображен на рис. 2. В качестве рабочих предполагались колебания типа H_{01p} . Резонаторы запитываются с помощью прямоугольных волноводов через тонкие диафрагмы с отверстиями круглого сечения радиуса r_c , которые размещены в области наибольшего сечения резонатора. Размещение отверстий связи в центральной части резонатора, где электромагнитное поле максимально, позволяет варьировать степень связи в широких пределах.

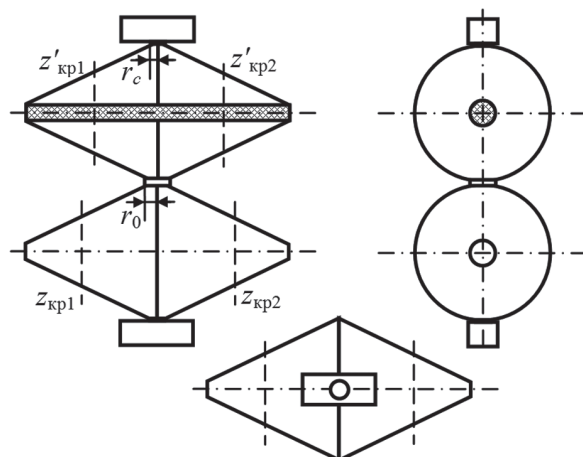


Рис. 2. Связанные биконические резонаторы

В данной работе для анализа характеристик связанных биконических резонаторов было проведено численное моделирование с помощью метода конечных элементов (МКЭ). В [16] на примере тестовой задачи показано, что применение МКЭ для расчета резонансных частот осесимметричных биконических резонаторов с частичным диэлектрическим заполнением обеспечивает относительное отклонение от результатов, полученных в рамках классической электродинамики методом частичных областей, не превышающее 0,1%.

В качестве модельной рассматривалась система из двух одинаковых связанных симметричных биконических резонаторов с максимальным радиусом $a_0 = 25$ мм и углом при вершине конуса $\Phi = 30^\circ$. Предполагалось, что материалом стенок является медь (удельная проводимость $\sigma = 58 \cdot 10^6$ См/м). Геометрические параметры резонаторов выбирались таким образом, чтобы рабочая частота находилась в диапазоне 9 – 10 ГГц при различном диэлектрическом заполнении резонаторов. Связь резонаторов с внешним трактом осуществлялась с помощью стандартных прямоугольных волноводов сечением 23×10 мм². Предполагалось, что резонансная система включалась в СВЧ-тракт по схеме «на проход», что позволяло одновременно рассматривать как частотные характеристики отражения со стороны каждого из резонаторов, так и характеристику прохождения (передачи) всей системы в целом.

Несмотря на то, что нагруженная добротность резонаторов, включенных по схеме «на отражение» несколько выше, чем в схеме «на проход», предпочтение было отдано последней, так как на практике значительно проще проводить экспериментальные исследования характеристики передачи высокодобротных систем, чем характеристики отражения. Кроме того, в схеме «на проход» более низкие добротности резонаторов позволяют получить более широкий рабочий диапазон частот для проведения измерений параметров диэлектриков.

Для реализации по возможности большей степени связи радиус отверстий связи с внешним волноводным трактом предполагался равным $r_c = 4,5$ мм. Резонансная частота колебания H_{011} одиночного биконического резонатора заданных размеров составляла 9,580 ГГц, нагруженная добротность при включении «на проход» составляла $Q \sim 12400$. Частотная характеристика прохождения системы из двух связанных биконических резонаторов, как и следовало ожидать, имеет два максимума. Радиус отверстия связи r_0 между резонаторами изменялся в пределах от 1 до 5 мм. Изменяя параметры элемента связи между резонаторами, можно регулировать как разность частот, так и ширину каждого из резонансных пиков.

Увеличение радиуса отверстия связи между резонаторами от $r_0 = 1$ мм до $r_0 = 3,5$ мм приводит к росту амплитуды коэффициента передачи на резонансных частотах от $\sim 0,03$ до $\sim 0,6$, при этом частоты пиков понижаются примерно на 10 МГц ($\sim 0,1\%$) от 9,5929 ГГц при $r_0 = 1$ мм до 9,5829 ГГц при $r_0 = 3,5$ мм. Разность частот связанных колебаний при этом увеличивается до 0,7 МГц. Дальнейшее увеличение отверстия связи до $r_0 = 5$ мм приводит лишь к изменению частотного интервала между пиками при сохранении практически неизменного уровня коэффициента передачи на резонансных частотах $s_{21} = 0,58 - 0,59$. Увеличение радиуса отверстия связи свыше 5 мм приводит к возрастанию как разности частот, так и их абсолютного значения, причем при этом нарушается монотонность зависимости изменения частот пиков от степени связи.

Обобщая приведенные результаты, можно утверждать, что для применения системы двух связанных БКР в качестве датчика измерительных систем необходимо, чтобы связь резонаторов была в достаточной мере сильной. Наличие такой связи приводит к появлению двух в достаточной мере разнесенных по частоте пиков при значении коэффициента передачи на связанных частотах $s_{21} > 0,5$. Для рассмотренной модели эти условия выполняются при значениях радиуса отверстия связи между резонаторами $r_0 = 3,5 - 5,0$ мм.

Например, для $r_0 = 5$ мм пики в частотной характеристике коэффициента передачи наблюдаются при $f_1 = 9,5705$ ГГц и $f_2 = 9,5758$ ГГц, разность частот — $\Delta f = 5,3$ МГц, значение самого коэффициента передачи на этих частотах составляет приблизительно $s_{21} = 0,59$. С уменьшением радиуса отверстия связи до $r_0 = 4$ мм при сохранении значения коэффициента передачи пиков на уровне $s_{21} = 0,58$, частоты, при которых наблюдаются пики, изменяются и приобретают значения $f_1 = 9,5799$ ГГц и $f_1 = 9,5817$ ГГц, то есть разность частот уменьшается до $\Delta f = 1,8$ МГц, что соответственно приводит к перекрытию пиков и невозможности определения ширины каждого из пиков в отдельности. При $r_0 = 3$ мм происходит практически полное (визуальное) слияние пиков на частоте, совпадающей с резонансной частотой одиночного резонатора $f_0 = 9,5845$ ГГц, при уровне коэффициента передачи в пике $s_{21} = 0,56$. Дальнейшее уменьшение отверстия связи приводит к резкому падению значения коэффициента передачи и, следовательно, уровня сигнала на выходе, так при $r_0 = 2$ мм коэффициент передачи составляет $s_{21} = 0,072$, а при $r_0 = 1$ мм — $s_{21} = 0,032$.

3. ВЛИЯНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАПОЛНЕНИЯ

Внесение в один из резонаторов диэлектрического образца приводит к разделению единого пика передаточной характеристики, который наблюдается в отсутствие диэлектрического образца

при $r_0 = 3$ мм. Разность частот пиков пропорциональна степени заполнения резонатора диэлектриком и зависит от значений диэлектрической проницаемости, геометрических размеров образца, соотношения энергий электромагнитного поля, сосредоточенных в объеме диэлектрика и свободной области резонатора. При этом один пик характеристики $f_2 = 9,5846$ ГГц, соответствующий пустому резонатору, остается практически неизменным, сохраняется как местоположение пика на оси частот, так и ширина пика, а пик, соответствующий резонатору с образцом, заметно смещается по частоте и меняется по амплитуде. Таким образом, пик, соответствующий пустому резонатору, при проведении измерений может выступать в роли опорного. При известных геометрических размерах образца разность частот пиков позволяет оценивать действительную часть диэлектрической проницаемости, амплитуды пиков — уровень потерь материала ($\text{tg } \delta$). Естественно, что при внесении исследуемого материала резко уменьшается коэффициент передачи на всех частотах, в том числе и соответствующей пику для пустого резонатора, однако вносимое затухание сказывается на амплитуде этого пика несколько слабее.

Анализ характеристики передачи рассматриваемой системы двух связанных БКР с внесенным в один из них диэлектрическим цилиндрическим образцом из фторопласта ($\epsilon = 2,08$, $\text{tg } \delta = 0,001$) различного радиуса показал, что при радиусе отверстия связи $r_0 = 3$ мм внесение цилиндрических образцов небольшого диаметра ($r_d = 0,5 - 1$ мм) приводит лишь к некоторому расширению общего пика характеристики, при достижении радиуса образцов значений $r_d = 1,5 - 2$ мм наблюдается заметное расщепление пика, однако при этом сильно падает уровень коэффициента передачи, что не может не сказаться на точности оценки параметров исследуемых образцов на практике. Так для рассмотренной модели максимум передаточной характеристики для образцов радиусов $r_d = 0,5$ мм и $r_d = 1,0$ мм коэффициент передачи s_{21} на частотах максимумов пиков составлял $0,36 - 0,40$, при $r_d = 1,5$ мм — $0,167$, а при $r_d = 3,0$ мм — уже всего $0,016$.

Естественно, что для материалов с большей проницаемостью четкое раздвоение пиков происходит при меньших диаметрах образца. Однако при этом и снижение уровня сигнала на выходе также будет более заметным.

На рис. 3 показаны графики зависимости значений резонансных частот колебаний типа H_{011} в рассмотренных связанных биконических резонаторах от диэлектрической проницаемости вносимого образца для двух значений радиуса отверстия связи $r_0 = 3$ мм (сплошная линия) и $r_0 = 5$ мм (пунктир).

Общий характер поведения указанных кривых идентичен, влияние степени связи приводит лишь к некоторому изменению значений резо-

нансных частот (на 0,1%). Зависимость частоты резонатора с исследуемым образцом при изменении проницаемости в 2–3 раза носит практически линейный характер, при изменении же в более широких пределах (1–9) нарушение линейности характеристики не превышает 0,2%.

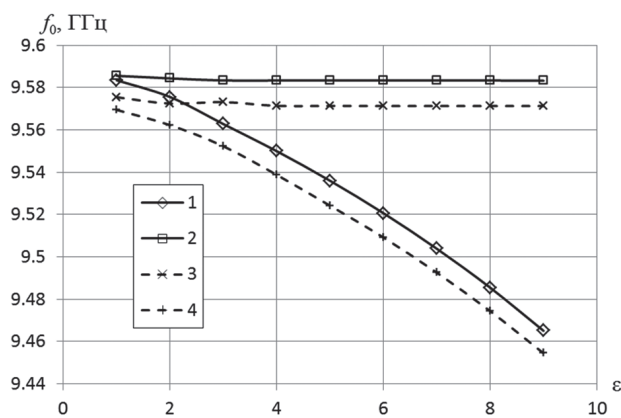


Рис. 3. Зависимость резонансных частот связанных БКР: 1 – f_1 , $r_0 = 3$ мм; 2 – f_2 , $r_0 = 3$ мм; 3 – f_1 , $r_0 = 5$ мм; 4 – f_2 , $r_0 = 5$ мм

Еще более высокую степень линейности имеет зависимость разности частот соответствующих двух пиков от проницаемости образца. На рис. 4 показаны данные зависимости для рассматриваемых резонаторов с отверстиями связи радиусами 3 и 5 мм.

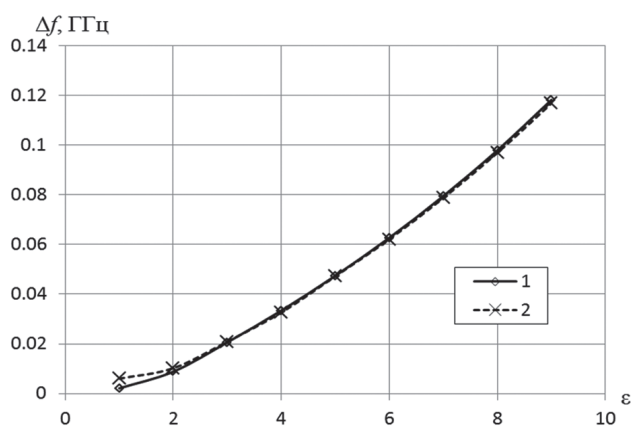


Рис. 4. Зависимость разности частот связанных колебаний БКР: 1 – $r_0 = 3$ мм; 2 – $r_0 = 5$ мм

Характерно, что обе кривые практически совпадают, т.е. влияние величины связи практически не сказывается на крутизне характеристики, а, следовательно, чувствительности и точности измерений. Расхождения наблюдаются лишь при малых значениях проницаемости ($\epsilon < 2$), в этом случае увеличение связи приводит к некоторому уменьшению наклона и чувствительности измерительной установки.

При определении диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) точность измерений напрямую связана с точностью определения добротности резонатора, что является достаточно сложной задачей как для больших ее значений, так и особенно,

если добротность слишком мала, в этом случае ее определение становится практически невозможным.

На рис. 5 показаны зависимости добротностей колебаний рассматриваемых связанных биконических резонаторов от $\text{tg}\delta$ для отверстий связи радиусами 3 мм (сплошная линия) и 5 мм (пунктир), диэлектрическая проницаемость образца, как и ранее, была 2,08, радиус 2,5 мм. В случае большой связи ($r_0 = 5$ мм) добротность обоих колебаний сохраняется одинаковой при внесении образцов с $\text{tg}\delta < 0,01$ и определяется только потерями в стенках резонаторов

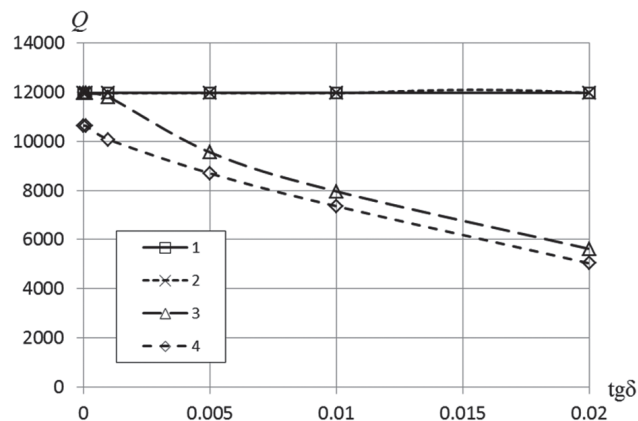


Рис. 5. Зависимость добротности колебаний типа H_{011} связанных биконических резонаторов от $\text{tg}\delta$: 1 – f_1 , $r_0 = 3$ мм; 2 – f_1 , $r_0 = 5$ мм; 3 – f_2 , $r_0 = 3$ мм; 4 – f_2 , $r_0 = 3$ мм

В случае использования связанных резонаторов величину потерь можно приближенно оценивать по соотношению амплитуд пиков связанных колебаний нагруженного и ненагруженного резонаторов, при этом в значительной мере отпадает необходимость в определении добротности. На рис. 6 показаны зависимости амплитуд пиков частотной характеристики рассматриваемых связанных БКР для отверстий связи радиусов 3 мм (рис. 6, а) и 5 мм (рис. 6, б).

На рис. 7 показаны графики зависимости отношения t_1/t_2 амплитуд пиков частотной характеристики связанных БКР от $\text{tg}\delta$.

Из графиков видно, что зависимость сильнее выражена для малых значений $\text{tg}\delta < 0,01$. При больших значениях $\text{tg}\delta$ зависимость становится более плавной, амплитуда пика становится малой и стремится к нулю. Даже при достаточно большом отверстии связи ($r_0 = 5$ мм) амплитуды пиков, в отличие от значений добротности, заметно отличаются друг от друга при $\text{tg}\delta < 0,01$. Таким образом, можно ожидать, что отношение амплитуд связанных колебаний в качестве измерительного параметра позволяет более точно по сравнению с добротностью оценивать малые уровни потерь.

Увеличение степени связи резонаторов приводит к возрастанию абсолютного значения ам-

плитуд резонансных пиков, для рассмотренных отверстий связи амплитуды пиков отличаются практически на порядок, и некоторому увеличению крутизны графиков на начальном участке ($\text{tg} \delta < 0,01$), что в свою очередь позволяет упростить и повысить точность измерения $\text{tg} \delta$ для диэлектриков с малыми потерями.

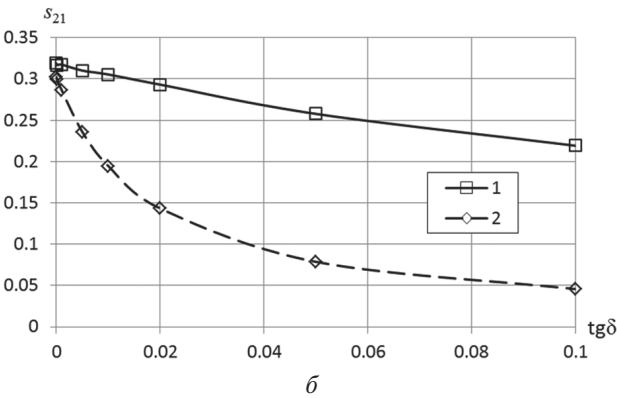
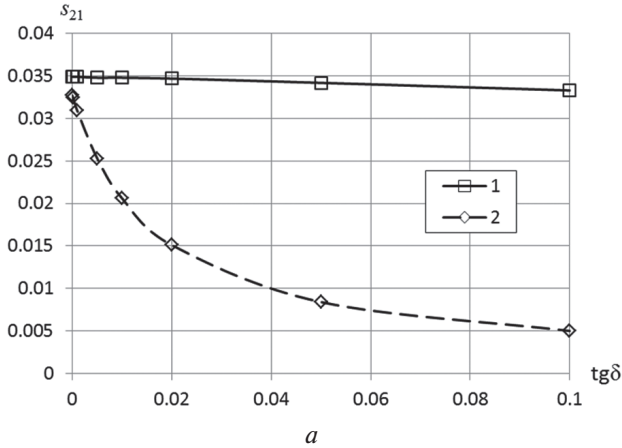


Рис. 6. Зависимость коэффициента передачи на резонансных частотах связанных БКР от $\text{tg} \delta$ для $r_0 = 3$ мм (а) и $r_0 = 5$ мм (б): 1 – f_1 ; 2 – f_2

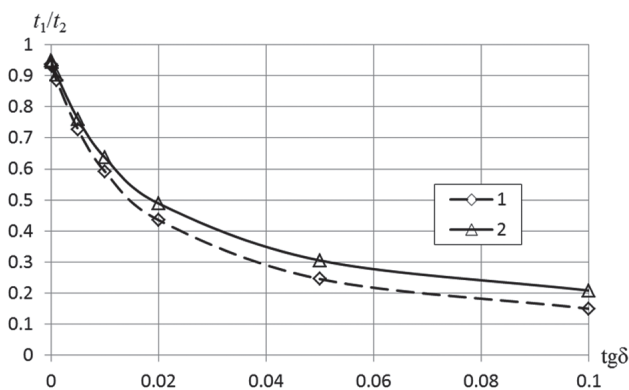


Рис. 7. Зависимость отношения коэффициентов передачи от $\text{tg} \delta$ для: 1 – $r_0 = 3$ мм; 2 – $r_0 = 5$ мм

4. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ФАКТОРОВ НА ПАРАМЕТРЫ РЕЗОНАТОРОВ

Влияние различных факторов окружающей среды (влажность, температура), погрешности при изготовлении и связанные с ними конструктивные отклонения реальных параметров резонаторов от

расчетных приводят к изменению резонансных частот и добротности резонансных систем. В этой связи была проведена оценка количественного и качественного вклада, вносимого вышперечисленными факторами, а также их влияния на точность и достоверность измерений.

С этой целью был проведен численный анализ рассмотренной системы двух связанных БКР с отверстием связи радиусом $r_0 = 5$ мм. При этом резонансные частоты составляли 9,5679 и 9,5732 ГГц, частотный интервал между ними – 5,3 МГц, добротности колебаний составляли ~11900.

Расчеты показали, что проводимость стенок резонаторов сказывается лишь на значениях добротности колебаний, при этом резонансные частоты остаются практически неизменными. Так замена меди ($\sigma = 58 \cdot 10^6$ См/м) на алюминий ($\sigma = 38 \cdot 10^6$ См/м) приводит лишь к незначительному снижению добротностей связанных резонаторов до 10600.

Незначительные изменения степени связи приводят лишь к небольшому уходу резонансных частот связанных резонаторов при сохранении частотного интервала между ними. Так увеличение радиуса отверстия связи между резонаторами на 0,05 мм (1%) приводит к возрастанию частот связанных БКР на 2,6 МГц (~0,027%) при этом разность частот сохраняется практически неизменной 5,4 МГц.

Еще меньший вклад вносят малые изменения величины связи с внешним трактом. Изменение отверстий связи с питающим волноводом на 0,1 мм (~2,6%) приводит к увеличению резонансных частот связанных резонаторов лишь на 1,8 МГц (~0,019%) при сохранении разности частот между ними в 5,3 МГц.

Практически не сказывается на параметрах связанных резонаторов небольшие изменения радиуса торцевых отверстий, при увеличении радиуса которых на 0,05 мм (1%) наблюдается лишь незначительный сдвиг частот на 1,4 МГц (~0,014%) при полном сохранении вида частотной характеристики.

К более заметным изменениям приводят отклонения значений угла при вершине конуса и радиуса биконических резонаторов в максимальном сечении. Отличие угла при вершине конуса от заданного на $0,3^\circ$ (1%) приводит к изменению частот связанных резонаторов на 26,3 МГц (~0,27%) при практически неизменной разности 5,2 МГц. Уменьшение же максимального радиуса резонатора всего на 0,05 мм (0,2%) приводит к увеличению частот на 20,5 МГц (0,21%). При возрастании же максимального радиуса на 0,25 мм (1%) частоты связанных резонаторов частоты рассмотренных резонаторов изменяются неравномерно, на 188 МГц (~2%) и 17 МГц (~0,18%) соответственно, частотный интервал при этом также уменьшается до 4,6 МГц (~13%).

Что касается влияния геометрических размеров и местоположения образца на точность определения параметров диэлектриков, то отклонение радиуса образца из фторопласта ($\varepsilon = 2,08$) на 1% (0,02 мм) приводит к изменению резонансных частот на всего 0,2 МГц (0,002%). Примерно к такому же результату приводит смещение данного образца на 0,2 мм относительно оси резонатора. Другими словами, влияние этих факторов несущественно.

ВЫВОДЫ

Система связанных биконических резонаторов обладает определенными практическими преимуществами, обуславливающими перспективы их применения в измерительной технике, в частности, для контроля и определения параметров диэлектрических материалов. В первую очередь это связано с особенностями самих биконических резонаторов, обладающих высокой добротностью, разреженным спектром и наличием запредельных участков, облегчающих размещение исследуемых образцов в объеме резонатора.

Применение системы двух связанных резонаторов позволяет несколько повысить точность и однозначность измерений. Это связано с тем, что измерение проницаемости диэлектрического образца можно проводить не только по абсолютному значению частоты, как в случае одиночного резонатора, но и по разности частот колебаний связанных резонаторов. В этом случае один из резонаторов выступает в роли опорного (эталонного), что позволяет как минимизировать влияние различных внешних факторов, таких как температура и влажность окружающей среды, нестабильность работы измерительной аппаратуры, так и проводить оценку параметров исследуемых диэлектриков в режиме реального времени.

В случае использования связанных резонаторов приближенную оценку значения $\text{tg}\delta$ можно получить по соотношению амплитуд пиков связанных колебаний нагруженного и ненагруженного резонаторов, при этом в значительной мере отпадает необходимость в достаточно трудоемкой и неоднозначной процедуре определения добротности.

К недостаткам рассмотренной системы следует отнести достаточно узкий диапазон перестройки частоты резонаторов и резкое падение амплитуд пиков частотной характеристики при сильной расстройке резонаторов. Увеличение степени связи резонаторов позволяет несколько расширить диапазон измерений, однако это сопровождается падением нагруженной добротности резонаторов, что не может не сказаться на точности измерений.

Исходя из вышесказанного, система связанных биконических резонаторов не достаточно эффективна для определения параметров ди-

электриков с большими потерями, однако, благодаря соответствующему выбору степени связи и геометрических размеров образца, может быть успешно использована для контроля параметров малопотерных диэлектриков с небольшими и средними значениями проницаемости ($\varepsilon < 10$).

Литература.

- [1] Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. — М.: Физматлит, 1963. — 404 с.
- [2] Завьялов А. С., Дунаевский Г. Е. Измерение параметров материалов на сверхвысоких частотах. — Томск: Изд-во Томского ун-та, 1985. — 214 с.
- [3] Викторов В. А., Лункин Е. В., Совлуков А. С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 208 с.
- [4] Егоров В. Н. Резонансные методы исследования диэлектриков на с.в.ч. (обзор) // Приборы и техника эксперимента. 2007, №2. — С. 5-38.
- [5] Дмитриев В. М., Седых В. М., Денисов Д. С. Некоторые типы волноводных резонаторов с переменным поперечным сечением // Вопросы радиофизики и спектроскопии. — М.: Сов. радио, 1966. Вып. 2. — С. 19-30.
- [9] Дмитриев В. М., Ляпунов Н. В., Седых В. М. Добротность резонатора с переменным прямоугольным поперечным сечением // Теоретическая электротехника. — 1967. — Вып. 4. — С. 144-150.
- [10] Дмитриев В. М., Ляпунов Н. В., Терещенко А. И. К расчету собственных частот нерегулярных предельных резонаторов // Уч. зап. ХГУ. Т. 132. Труды радиофизического факультета. — 1962. — Т. 7. — С. 71-75.
- [11] Терещенко А. И., Буртовой Д. П. Анализ частотных свойств цилиндрических нерегулярных предельных резонаторов // Радиотехника. Харьковский межв. сб. Харьков: Вища школа, 1975. — Вып. 35. — С. 50-56.
- [12] Бобрышев В. Д., Дмитриев В. М., Пренцлау Н. Н. Объемный резонатор. Авт. свид. СССР № 696562. Бюл. изобрет. 1979. № 41.
- [13] Терещенко А. И., Буртовой Д. П. Применение открытых предельных резонаторов для измерения параметров диэлектриков // Радиотехника. Харьковский межв. сб. Харьков: Вища школа, 1969. — Вып. 10. — С. 180-185.
- [14] Буртовой Д. П., Мироненко В. Л., Терещенко А. И. Применение открытого цилиндрического предельного резонатора для исследования диэлектрических свойств вещества // Изв. вузов: Радиоэлектроника. 1970. — Т. 13, № 9. — С. 1085-1091.
- [15] Барташевский Е. Л., Привалов Е. Н. Датчик для измерения параметров диэлектриков. Авт. свид. СССР №3834626. Бюл. изобрет. — 1986. №24.
- [16] Горев Н. Б., Дробахин О. О., Заболотный П. И., Коджеспинова И. Ф., Привалов Е. Н. СВЧ-резонаторы в контроле параметров органических жидкостей // Техническая механика. — 2009. №3. — С. 3-12.
- [17] Дробахин О. О., Заболотный П. И., Горев Н. Б., Салтыков Д. Ю. Датчики на основе биконических СВЧ-резонаторов для контроля параметров диэлектриков // 19-th Crimean Conf. "Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo'2009)", 14-18 Sept., Sevastopol, Crimea, Ukraine. P. 775-776.

Поступила в редколлегию 28.02.2014



Дробахин Олег Олегович, доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной и компьютерной радиофизики Днепропетровского национального университета им. Олеся Гончара. Научные интересы: радиофизика, неразрушающий контроль, измерения на СВЧ.



Салтыков Дмитрий Юрьевич, старший преподаватель кафедры прикладной и компьютерной радиофизики Днепропетровского национального университета им. Олеся Гончара. Научные интересы: измерительная техника СВЧ диапазона.

частот коливань зв'язаних резонаторів, що дозволяє як мінімізувати вплив різноманітних зовнішніх факторів, так і проводити вимірювання в режимі реального часу. Наближена оцінка значень $\text{tg } \delta$ може бути отримана за співвідношенням амплітуд піків коливань зв'язаних резонаторів з досліджуваним зразком і без нього.

Ключові слова: біконічний резонатор, резонансна частота, добротність, діелектрична проникність
Л. 07. Бібліогр.: 17 найм.

UDC 621.317

Investigation of the possibility of applying coupled biconical resonators for determining the parameters of dielectric materials / O. O. Drobakhin, D. Yu. Saltykov // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2014. — Vol. 13. — № 1. — P. 64–70.

The article considers a system of coupled biconical resonators as a sensor for monitoring the parameters of dielectrics. By using numerical simulation it is shown that the coupled resonators have some advantages over a single one. Determination of dielectric permittivity can be performed by the estimation of the difference of the oscillation frequencies of coupled resonators. This approach allows to minimize the influence of various external factors and perform measurements in real time. Approximate estimation of $\text{tg } \delta$ can be obtained by the estimation of the ratio of peak amplitudes of coupled resonators with the test sample and without it.

Keywords: biconical cavity resonator, resonant frequency, Q-factor, dielectric permittivity

Fig. 07. Ref.: 17 items.

УДК 621.317

Дослідження можливості застосування зв'язаних біконічних резонаторів для визначення параметрів діелектричних матеріалів / О. О. Дробахин, Д. Ю. Салтыков // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2014. — Том 13. — № 4. — С. 64–70.

У статті розглянуто систему зв'язаних біконічних резонаторів як датчик для контролю параметрів діелектриків. За допомогою чисельного моделювання показано, що зв'язані резонатори мають деякі переваги порівняно з поодинокими. Визначення діелектричної проникності може здійснюватися не за абсолютним значенням частоти, а за різницею