

В. В. Гламаздин, М. П. Натаров, В. Н. Скресанов, А. И. Шубный
Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: skresanov@ire.kharkov.ua

РАДИАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ ЭЛЕМЕНТОВ СВЯЗИ ЗЕРКАЛЬНОГО ДИСКОВОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА. Часть 2. СВЯЗЬ С РАССОГЛАСОВАННЫМИ ВОЛНОВОДАМИ

Исследованы радиационные потери элементов связи (ЭС) зеркального дискового диэлектрического резонатора (ЗДДР) с модами шепчущей галереи для случая связи с рассогласованными волноводами. Результаты исследования представляют особый интерес для разработчиков автогенераторов с использованием ЗДДР, когда полупроводниковые приборы с цепями согласования импедансов расположены в волноводах, образуя комплексную нагрузку. Измерены зависимости резонансной частоты и добротности ЗДДР от амплитуды и фазы волны, отраженной от комплексной нагрузки. Исследовались ЗДДР с ЭС двух типов: отверстие в диафрагме и зауженный открытый конец волновода (щель) на зеркале. Для случая ЭС в виде щели показано, что добротность и резонансная частота ЗДДР с комплексной нагрузкой в волноводе могут быть рассчитаны с использованием предложенной схемы замещения ЭС в ЗДДР. Номиналы схемы замещения могут быть измерены в соответствии с методикой, изложенной в первой части данной работы. Рассчитаны две составляющие дополнительных потерь, вносимых в ЗДДР комплексной нагрузкой в волноводе: радиационные потери ЭС и джоулевы потери в нагрузке. Ил. 8. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: зеркальный дисковый диэлектрический резонатор, моды шепчущей галереи, элемент связи, радиационные потери, добротность, эквивалентная схема, твердотельные микроволновые генераторы.

В данной работе продолжено исследование радиационных потерь элементов связи (ЭС) в зеркальном дисковом диэлектрическом резонаторе (ЗДДР), результаты которого изложены в [1] для случая волноводов, согласованных с нагрузкой и с источником мощности. Рассматриваются ЭС в виде открытого конца плавно зауженного по узкой стенке прямоугольного волновода или отверстия в тонкой диафрагме в торце прямоугольного волновода. Открытый конец волновода (щель) или отверстие в диафрагме размещены под полудиском в области локализации поля резонансной моды, а плоскости апертур щели или отверстия совпадают с поверхностью зеркала.

Известно, что рассогласование в линиях связи (волноводах) с объемными резонаторами приводит к изменению резонансной частоты (так называемый эффект затягивания частоты) [2]. Неоднородности в волноводах, связанных с открытыми резонаторами (ОР) посредством ЭС, влияют не только на резонансную частоту, но и на добротность системы «ОР – волновод с неоднородностью». Дополнительные потери в системе обусловлены как потерями мощности в самом волноводе, так и зависимостью радиационных потерь ЭС ОР от амплитуды и фазы отраженной от неоднородности волны.

Эффекты рассогласования в волноводных линиях передачи для ОР, применяемых в измерительных резонаторах, дискриминаторах частоты, фильтрах, являются «паразитными», однако от них можно избавиться путем изоляции ОР от трактов, например, с помощью ферритовых вентилей или циркуляторов. В случае использования ОР в качестве резонаторных систем твердотельных генераторов, в которых полупроводниковые

приборы (диоды Ганна, лавинно-пролетные диоды, транзисторы) расположены в волноводах, за счет отражения в волноводе обеспечивается обратная связь в автоколебательной системе. Поэтому в твердотельных квазиоптических генераторах дополнительные радиационные потери на ЭС могут быть уменьшены только путем оптимального размещения полупроводниковых приборов в волноводах.

Эффективная передача энергии колебаний полупроводниковых приборов в резонаторную систему микроволновых генераторов возможна только при согласовании низкого импеданса полупроводниковых приборов (десятые доли ома) с высоким импедансом колебательной системы (сотни ом). В качестве устройств согласования обычно используются четвертьволновые отрезки низкоомных линий передачи, например, радиальных. Цепи согласования при размещении непосредственно в объеме ОР являются сильными рассеивающими неоднородностями, в значительной степени снижающими добротность системы. По этой причине полупроводниковые приборы вместе с цепями согласования помещают в различные конструктивные элементы резонаторных систем, специально созданные для этих целей, например, в короткозамкнутые волноводные отверстия в зеркалах ОР.

Упомянутый способ согласования использовался в твердотельном квазиоптическом генераторе [3] на основе классического ОР с фазокорректирующими зеркалами. Согласующий радиальный трансформатор расположен в пучности электрического поля волновода. Отличительная черта технического решения [3] – вывод энергии с регулируемым коэффициентом связи со сторо-

ны короткозамкнутого конца прямоугольного волновода. В дальнейшем был предложен более эффективный способ согласования диода Ганна с помощью «толстого» штыря в волноводе, расположенного в минимуме электрического поля [4]. Это решение отличается низким уровнем дополнительных радиационных потерь в резонаторной системе.

Подобные принципы согласования твердотельных приборов с ОР использовались, по-видимому, в квазиоптических генераторах с открытыми резонаторными системами на основе ЗДДР [5, 6]. Вместе с тем, проблема снижения уровня дополнительных радиационных потерь на ЭС ЗДДР в упомянутых работах не изучена. Важность решения этой задачи обусловлена тем, что дополнительные радиационные потери ЭС снижают добротность и КПД резонаторной системы, т. е. увеличивают фазовые флуктуации и понижают выходную мощность твердотельных генераторов.

В данной работе измерены радиационные потери ЭС в ЗДДР в зависимости от амплитуды и фазы волны, отраженной от неоднородности в волноводе. Показано, что эти потери могут быть рассчитаны, если измерены номиналы схемы замещения ЭС в соответствии с методикой, изложенной в первой части [1] данного исследования. Сформулированы условия, при соблюдении которых радиационные потери ЭС ЗДДР будут минимальны.

1. Методика эксперимента. Исследовалось влияние амплитуды и фазы коэффициента отражения в прямоугольном волноводе, связанном с ЗДДР посредством ЭС, на резонансную частоту и добротность. Резонатор образован тefлоновым полудиском 1 (диаметр 99,5 мм, толщина 8,6 мм) и двумя металлическими зеркалами (рис. 1).

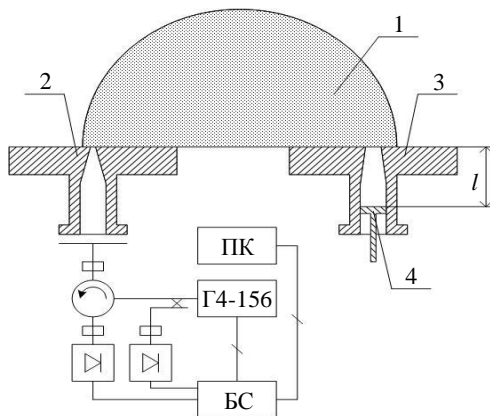


Рис. 1. Схема измерения характеристик ЗДДР

Измерения характеристик ЗДДР проводились со стороны латунного зеркала 2 с разме-

рами 100×100 мм, в центре которого выполнена щель связи 0,09×7,2 мм, плавно переходящая в волновод стандартного сечения 3,4×7,2 мм. Щель располагалась в области локализации поля резонансной моды под полудиском 1 на расстоянии 2 мм от его края.

Исследуемые ЭС с рассогласованными волноводами размещались на идентичных медных зеркалах 3 диаметром 60 мм. Исследовались ЭС: в виде щели 0,6×7,2 мм, плавно переходящей в волновод стандартного сечения 3,4×7,2 мм, и в виде отверстия диаметром 2,6 мм в диафрагме толщиной 0,1 мм в торце волновода стандартного сечения 3,4×7,2 мм. Каждое из двух медных зеркал 3 с впаянным исследуемым ЭС устанавливалось так, что центр апертуры ЭС располагался под полудиском 1 на расстоянии 2 мм от его края.

С целью изменения амплитуды отраженной волны в ходе эксперимента к волноводу на выходе ЭС в зеркале 3 (рис. 1) подключались нагрузки с различными модулями $|\Gamma_L|$ коэффициента отражения. Использовались: согласованная нагрузка ($|\Gamma_L|=0,05$), подвижный короткозамкнутый поршень ($|\Gamma_L|=0,97$) и специально изготовленная нагрузка в виде подвижного поршня с $|\Gamma_L|=0,76$.

Фаза отраженной волны изменялась вследствие перемещения поршней вдоль оси волновода. Положения l поршней 4 (рис. 1) отсчитывались относительно плоскости зеркала 3.

Зависимости собственной добротности $Q_z(|\Gamma_L|, l)$ и резонансной частоты $f_z(|\Gamma_L|, l)$ ЗДДР измерялись в соответствии с методикой [1] с использованием аппаратно-вычислительного комплекса [7].

2. Расчет добротности и резонансной частоты ЗДДР с нагрузкой в линии передачи.

Зависимости $Q_z(|\Gamma_L|, l)$ и $f_z(|\Gamma_L|, l)$ могут быть рассчитаны по схеме замещения ЗДДР с двумя ЭС, приведенной на рис. 2. Со стороны первого ЭС 1 (сечение $a-a$) ЗДДР нагружен на источник микроволновой мощности, который моделируется генератором тока I с характеристическим сопротивлением Z_{c1} входной линии передачи. Со стороны ЭС 2 (сечение $b-b$) к ЗДДР через отрезок волновода длиной l подключено нормированное на характеристическое сопротивление Z_{c2} активное сопротивление $R_L = (1 + |\Gamma_L|) / (1 - |\Gamma_L|)$. Отрезком длиной линии l и активным сопротивлением R_L моделируются используемые в эксперименте подвижные нагрузки. Таким образом, импеданс присоединенной к ЗДДР нагрузки в сечении $b-b$ равен

$$Z_L(l) = Z_{c2} \frac{1 + R_L \exp(j4\pi l / \lambda_g)}{1 - R_L \exp(j4\pi l / \lambda_g)} \equiv Z_{c2} \bar{Z}_L(l). \quad (1)$$

В полном соответствии со схемой замещения ЗДДР, используемой в [1], каждый ЭС моделируется импедансом $Z_{sk} = R_{sk} + jX_{sk}$, трансформатором сопротивлений $1:n_k$ и адмиттансом $Y_{ek} = n_k^2 (G_{sk} + jB_{sk})/Z_{c1}$, где $k = 1, 2$ – номер ЭС. Адмиттансом $Y_{e0} = n_1^2 (G_0 + jB_0)/Z_{c1}$ моделируется колебательный процесс в ЗДДР без ЭС. Поскольку измерение характеристик ЗДДР с нагрузкой в волноводе ЭС 2 выполняется со стороны ЭС 1, то нормировка Y_{e0} , а также обоих Y_{ek} проводится на сопротивление входной линии Z_{c1} . После трансформации всех элементов схемы рис. 2 в цепь входного волновода и нормировки на Z_{c1} схема замещения приобретает вид рис. 3. Активной и реактивной проводимостями $G_z = (G_{x1} + G_0 + G_{x2})$ и $B_z = (B_{x1} + B_0 + B_{x2})$ моделируются собственные колебания ЗДДР с двумя ЭС, а импеданс $Z_v = R_v + jX_v$ есть трансформированный во входной волновод импеданс на выходе ЗДДР.

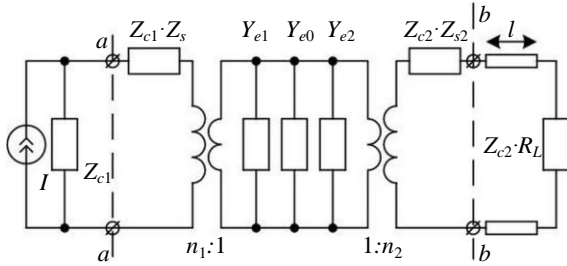


Рис. 2. Схема замещения ЗДДР с нагрузкой в волноводе

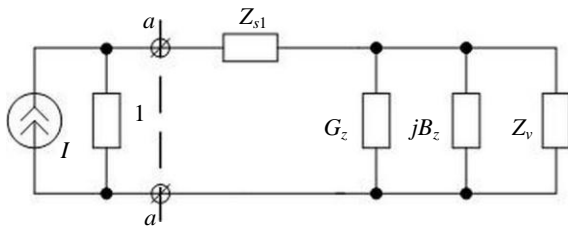


Рис. 3. Схема замещения ЗДДР (рис. 2) после трансформации во входную линию передачи

Полный импеданс ЗДДР во вторичной цепи трансформатора сопротивлений $n_2:1$ есть сумма присоединенной нагрузки $Z_L(l)$ (1) и импеданса $(Z_{c2}Z_{s2})$ ЭС 2. Этот импеданс, трансформированный во входную цепь ЗДДР, будет равен

$$Z_v(l) = \frac{n_1^2}{Z_{c1}} \frac{Z_{c2}}{n_2^2} (Z_{s2} + \bar{Z}_L(l)). \quad (2)$$

В (2) отношения n_k^2/Z_{ck} , $k = 1, 2$, выражаются через коэффициенты связи β_k ЗДДР (см. формулу (10) в [1]), где в данном случае $R_z = (G_{x1} + G_0 + G_{x2})^{-1}$. Учитывая, что $\beta_1/\beta_2 = Q_{ex2}/Q_{ex1}$, окончательно получим выражение для импеданса нагрузки, внесенного в цепь входного волновода:

$$Z_v(l) = \frac{Q_{ex2}}{Q_{ex1}} \frac{|1 + Z_{s1}|^2}{1 + R_{s1}} \frac{1 + R_{s2}}{|1 + Z_{s2}|^2} Z_{s2} (1 + \bar{Z}_L(l)). \quad (3)$$

Пусть резонансная частота и добротность колебательного контура на рис. 3 с отсоединенной нагрузкой Z_v (модель невозмущенного ЗДДР) равны f_z и Q_z . Подсоединение комплексной нагрузки Z_v вызовет изменение добротности и сдвиг резонансной частоты невозмущенного ЗДДР. Вычислим величину этих изменений.

Вычитая Z_{s1} из импеданса схемы $Z(f)$ в референсной плоскости $a-a$, запишем импеданс ЗДДР в виде, аналогичном записи импеданса невозмущенного ЗДДР [1]:

$$Z_{or}(f) = \frac{\bar{Z}_v / G_z}{1 + j\bar{Z}_v Q_z \tau_z(f)}, \quad (4)$$

где $\bar{Z}_v = Z_v / (R_z + Z_v)$.

Избавимся от комплексного коэффициента \bar{Z}_v в знаменателе (4), введя добротность Q_v и резонансную частоту f_v возмущенного ЗДДР так, чтобы

$$Z_{or}(f) = \frac{\bar{Z}_v / G_z}{1 + jQ_v (\tau_z + \Delta_v)}, \quad (5)$$

где $\Delta_v = (f_v - f_z) / f_z$ – относительный сдвиг резонансной частоты f_v возмущенного ЗДДР относительно резонансной частоты f_z невозмущенного ЗДДР.

Приравняв (5) к (4) и произведя вычисления, получим

$$Q_v = \frac{Q_z}{|R_z + Z_v|^2} \frac{(R_z R_v + |Z_v|^2)^2 + (R_z X_v)^2}{R_z R_v + |Z_v|^2}, \quad (6)$$

$$\Delta_v = \frac{|R_z + Z_v|^2}{Q_z} \frac{R_z X_v}{(R_z R_v + |Z_v|^2)^2 + (R_z X_v)^2},$$

где $R_v = \text{Re}(Z_v)$ и $X_v = \text{Im}(Z_v)$ – действительная и мнимая части импеданса (3).

При вычислении по формулам (6) с учетом (3), помимо параметров комплексной нагруз-

ки $\bar{Z}_L(l)$ в формуле (1), требуются значения номиналов последовательных импедансов ЭС Z_{s1} и Z_{s2} , внешних добротностей Q_{ex1} и Q_{ex2} , собственной добротности Q_z ЗДДР с двумя ЭС, а также значение эквивалентного характеристического сопротивления контура $R_z = (G_{x1} + G_0 + G_{x2})^{-1}$. Все эти величины могут быть измерены.

В первом эксперименте измерения выполняются со стороны ЭС 1 на зеркале 2 (рис. 1), когда ЭС 2 на зеркале 3 выведен из поля резонатора. В соответствии с методикой [1] находим $Z_{s1} = R_{s1} + jX_{s1}$ и Q_{ex1} . Аналогично во втором эксперименте со стороны ЭС 2, когда ЭС 1 выведен из поля резонатора, измеряем $Z_{s2} = R_{s2} + jX_{s2}$ и Q_{ex2} . В третьем эксперименте со стороны ЭС 2, когда ЭС 1 установлен в избранное положение и нагружен на согласованную нагрузку, измеряем нагруженную добротность Q_L и произведение $Q_{z3}G_{z3}$. Искомая добротность Q_z невозмущенного ЗДДР с двумя ЭС будет равна $Q_z^{-1} = (Q_L^{-1} - Q_{ex1}^{-1} - Q_{ex2}^{-1})$, а активное сопротивление контура $R_z = Q_z / Q_{z3}G_{z3}$.

3. Характеристики ЗДДР со щелевым ЭС при рассогласованном волноводе. Результаты расчета зависимостей добротности $Q_v(|\Gamma_L|, l)$ и относительного сдвига частоты $\Delta_v = (f_v(|\Gamma_L|, l) - f_z) / f_z$ ЗДДР со щелью связи $0,6 \times 7,2$ мм с комплексной нагрузкой в волноводе представлены линиями на рис. 4 и 5. На графиках длина l отрезка длинной линии нормирована на половину длины волны в волноводе λ_g . Необходимые для расчетов номиналы схемы замещения и характеристики ЗДДР были измерены, и их величины составили: $Z_{s1} = 0,0841 + j3,68$, $Z_{s2} = 0,232 + j0,827$, $Q_{ex1} = 6\,920$, $Q_{ex2} = 1\,070$, $Q_z = 4\,430$, $R_z = 5,28$. Кривые 1–4 соответствуют $|\Gamma_L| = 1,0; 0,97; 0,76$ и $0,05$.

На тех же графиках точками представлены результаты прямых измерений. Прямая 5 на рис. 4 – уровень измеренной добротности ЗДДР в случае согласованной нагрузки в волноводе, а прямая 6 – добротность Q_z невозмущенного ЗДДР. Наблюдаем удовлетворительное соответствие результатов прямых измерений (особенно в случае добротности Q_v) и расчетов с использованием схемы замещения ЗДДР. Заметные расхождения результатов измерений для сдвига резонансной частоты ОЗДР Δ_v обусловлены большой долговременной нестабильностью частоты генератора сигналов Г4-156 в измерительной установке [7].

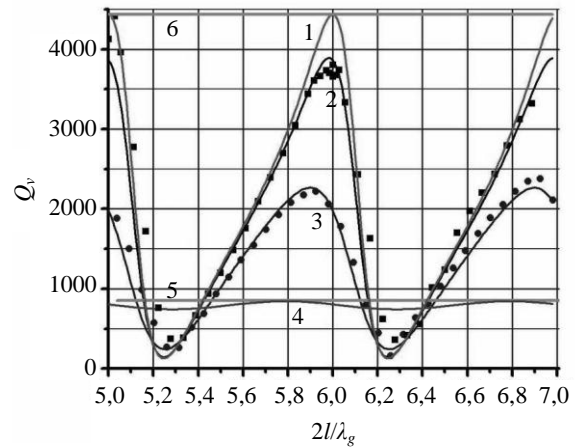


Рис. 4. Добротность ЗДДР с поршнем в волноводе, связанном через щель

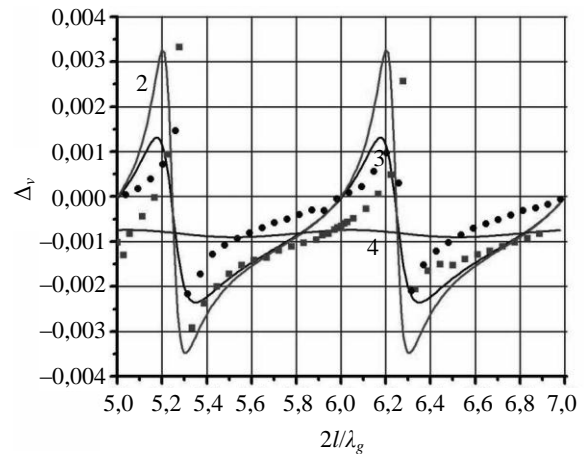


Рис. 5. Относительный сдвиг частоты в ЗДДР с поршнем в волноводе, связанном через щель

Количественное соответствие результатов прямых измерений добротности ЗДДР при подключении к волноводу комплексной нагрузки расчетам, основанным на схеме замещения ЗДДР эквивалентной цепью, позволяет сделать анализ вклада каждого из двух механизмов потерь в общие потери резонаторной системы. На рис. 6 представлены результаты расчета радиационных потерь мощности P_{rad} , обусловленных рассеянием энергии колебаний ЗДДР на ЭС, а на рис. 7 – потери мощности P_L в подключенной к волноводу нагрузке. Кривые 1–3 на рис. 6 и 7 соответствуют комплексной нагрузке с $|\Gamma_L| = 0,97; 0,76$ и $0,05$ соответственно.

Потери P_{rad} и P_L построены на графиках в отношении к потерям мощности P_0 в ЗДДР согласно формулам:

$$\frac{P_{rad}}{P_0} = \frac{R_{s2}R_z}{|Z_v|^2|1 + jQ_z\Delta_v|^2}, \quad (7)$$

$$\frac{P_L}{P_0} = \frac{R_LR_z}{|Z_v|^2|1 + jQ_z\Delta_v|^2},$$

где $R_L = \text{Re}(\bar{Z}_L)$ – действительная часть импеданса (1) присоединенной нагрузки.

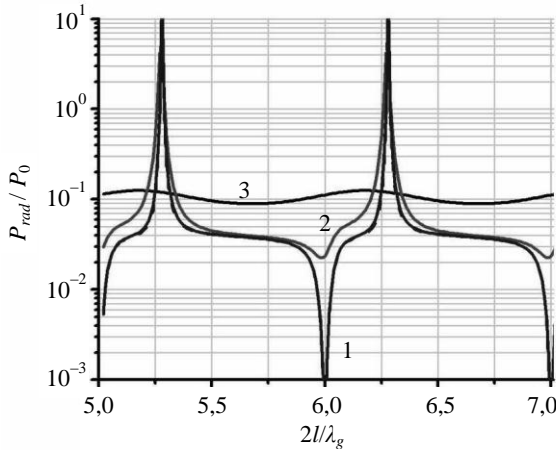


Рис. 6. Радиационные потери мощности ЗДДР на шелевом ЭС с поршнем в волноводе

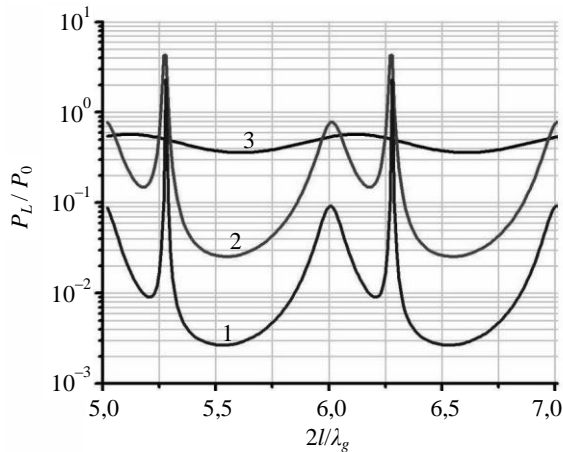


Рис. 7. Потери мощности в активном сопротивлении поршня в волноводе, связанном с ЗДР шелевым ЭС

Согласно (7), дополнительные радиационные потери на ЭС и джоулевы потери в волноводе с нагрузкой распределены в отношении $R_L(l)/R_{s2}$. Формулы (7) для простоты записаны в предположении, что радиационные потери ЭС обусловлены лишь рассеянием в активном сопротивлении R_{s2} . Потери в проводимости G_{e2} (рис. 2), незначительные по сравнению с рассеянием в проводимости G_{e0} , отнесены к суммарным потерям в проводимости контура G_z . При необходимости потери в G_{e2} могут быть вычислены в явном виде.

Как следует из рис. 6 и 7, дополнительные потери в согласованном волноводе преимущественно определяются рассеянием в нагрузке P_L , т. е. внешними потерями ЗДДР в линии передачи с ЭС 2. При подключении к волноводу идеального короткозамкнутого поршня ($|\Gamma_L|=0$) потери в нагрузке отсутствуют ($P_L=0$), а дополнительные радиационные потери $P_{rad}(l)$ периодически изменяются в пределах от нуля до значений, более чем на порядок превышающих потери невозмущенного ОЗДР. Заметим, что линия 1 на рис. 6 для поршня с $|\Gamma_L|=0,97$ с графической точностью совпадает с зависимостью $P_{rad}(l)$ для поршня с $|\Gamma_L|=0$. Период зависимости $P_{rad}(l)$, равно как зависимостей $Q_v(l)$ и $\Delta_v(l)$, равен половине длины волны $\lambda_g/2$ в волноводе. В максимумах $Q_v(l)$ при $l=n\lambda_g/2$ (n – натуральное число) $P_{rad}(n\lambda_g/2)$ стремится к нулю. В этом случае, как следует из (1), $\bar{Z}_L(n\lambda_g/2)=\infty$ и вносимое в резонатор сопротивление $Z_v(n\lambda_g/2)=\infty$ вне зависимости от величины импеданса Z_{s2} , т. е. схема замещения рис. 3 приобретает вид схемы замещения невозмущенного ЗДДР с одним элементом связи.

Интересно, что зависимости $P_L(l)$ в точках $l=n\lambda_g/2$ имеют максимум, величина которого увеличивается по мере уменьшения коэффициента отражения $|\Gamma_L|$ от нагрузки. Поскольку потери $P_{rad}(l)$ в этих точках малы, дополнительные потери практически полностью определяются потерями в нагрузке. Это обстоятельство можно использовать для разработки эффективного устройства вывода энергии от стабилизированного с помощью ЗДДР твердотельного генератора, когда полупроводниковый прибор включен в отрезок волновода между ЭС ЗДДР и устройством связи с нагрузкой в противоположном конце отрезка волновода. Такой вывод энергии используется в твердотельных генераторах с квазиоптической резонаторной системой [3]. Действительно, при коэффициенте отражения $|\Gamma_L|=0,67$ (рис. 7) потери в нагрузке приблизительно равны потерям в ЗДДР, в то время как радиационные потери (рис. 6) на порядок меньше. Следовательно, эффективность вывода энергии $P_L/(P_L+P_{rad})$ близка к единице.

В минимумах $Q_v(L)$, например, при $l_{min} \approx 6,25\lambda_g$, зависимости $P_{rad}(l)$ и $P_L(l)$ имеют резонансный вид и потери в этих точках макси-

малы. Уровень обоих видов потерь значительно превышает внешние потери ЗДДР в согласованном волноводе. Это объясняется «четвертьволновым» резонансом в отрезке волновода, присоединенного к ЗДДР. Волновод открыт со стороны щели и короткозамкнут с противоположной стороны. Расчет показывает, что положение l_{\min} существенным образом зависит от реактивности импеданса Z_{s2} ЭС.

В окрестности точек резонансов наблюдаем максимальные изменения резонансной частоты, тем большие, чем меньше омические потери в поршне. Это явление известно в технике объемных СВЧ-резонаторов как эффект затягивания резонансной частоты реактивной нагрузкой [2]. В отличие от объемных резонаторов, как показано выше, реактивная нагрузка в линии связи ОР приводит к значительному возрастанию дифракционных потерь в резонаторной системе. Максимальные потери наблюдаются в точках резонансов линии передачи.

4. Характеристики ЗДДР с ЭС в виде отверстия в диафрагме при рассогласованном волноводе качественно похожи для случая щелевого ЭС. На рис. 8 представлены результаты измерений $Q_v(l)$ и $f_v(l)$ ЗДДР с короткозамкнутым поршнем ($|\Gamma_L| = 0,97$) в волноводе для отверстия диаметром 2,6 мм в диафрагме толщиной 0,1 мм.

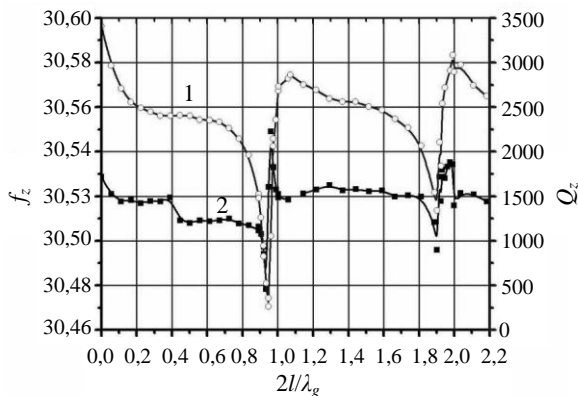


Рис. 8. Добротность (кривая 1) и относительный сдвиг частоты (кривая 2) ЗДДР, связанного через отверстие в диафрагме с короткозамкнутым волноводом

Укажем на наиболее существенные отличия зависимостей на рис. 8 для диафрагмы связи от зависимостей на рис. 6 и 7 для щели связи.

1. Резонансное возрастание дополнительных потерь наблюдается вблизи полуволновой длины волновода $l \approx 0,48\lambda_g$ с периодом $\lambda_g/2$. Природа «полуволновых» резонансов – суперпозиция отражений в отрезке прямоугольного волновода от короткозамкнутого конца и от диа-

фрагмы, имеющей в первом приближении узел электрического поля на ее поверхности. В частности, на резонансной длине $l \approx 0,93\lambda_g$ наблюдалась резонансная кривая с двумя максимумами, что обусловлено возбуждением связанных колебаний в системе двух связанных через диафрагму резонаторов (тефлонового полудиска на металлической плоскости и отрезка прямоугольного волновода).

2. Уровень добротности, близкий к уровню добротности невозмущенного ЗДДР, наблюдается только в положении поршня, вплотную прижатого к диафрагме. В этом случае неоднородность в виде круглого отверстия заданного диаметра (2,6 мм) и малой, по сравнению с $\lambda_g = 13,46$ мм, глубины (0,1 мм) слабо возмущает поле ЗДДР в плоскости зеркала.

3. Медленно изменяющийся уровень радиационных потерь вне «полуволновых» резонансов обусловлен особенностями рассеяния поля ЗДДР на отверстии в диафрагме с нерезонансной полостью с противоположной стороны. Расстроенный по частоте волноводный резонатор не в состоянии накапливать или канализировать энергию. Поэтому в широких пределах изменения длины отрезка волновода рассеяние энергии колебаний ЗДДР происходит на неоднородности со слабо изменяющейся конфигурацией.

Выводы. Исследовано влияние на резонансную частоту и добротность ЗДДР амплитуды и фазы волны, отраженной от неоднородностей в волноводной линии передачи, подключенной к ЗДДР через ЭС двух типов: отверстие в диафрагме и зауженный открытый конец волновода (щель). В частности показано, что реактивная нагрузка в волноводе, помимо известного для объемных резонаторов эффекта затягивания частоты, существенным образом изменяет добротность ЗДДР, что обусловлено зависимостью радиационных потерь ЭС от фазы отраженной волны.

Для щелевого ЭС в случае полного отражения из волновода радиационные потери ЭС могут быть либо пренебрежимо малыми (фаза отраженной волны на поверхности зеркала кратна 2π), либо существенно (в случае широких щелей – на несколько порядков) превышать потери ЗДДР с согласованным волноводом (случай «четвертьволнового» резонанса в волноводе). В общем случае зависимость радиационных потерь щелевого ЭС периодична (период равен половине длины волны в волноводе) и по мере уменьшения амплитуды отраженной волны величина потерь приближается к потерям ЭС с согласованным волноводом.

В случае ЭС в виде отверстия в диафрагме периодичность сохраняется, но минимальный уровень радиационных потерь составляет величину одного порядка с величиной внешних по-

ть в согласованном волноводе. Максимальный уровень радиационных потерь наблюдается в случае «полуволнового» резонанса в волноводе между ЭС и отражающей нагрузкой.

Показано, что потери в ЗДДР с рассогласованным волноводом могут быть рассчитаны с использованием схемы замещения ЗДДР, вид которой обоснован в первой части данной работы [1]. Там же изложена процедура измерения номиналов элементов схемы. Показано, что результаты расчетов добротности и резонансной частоты соответствуют результатам прямых измерений в пределах погрешности измерений.

Схема замещения ЗДДР использована для расчета двух составляющих дополнительных потерь, вносимых в ЗДДР рассогласованным волноводом: радиационных потерь ЭС и джоулевых потерь в нагрузке волновода. С учетом того, что представленная схема замещения ЗДДР применима к любым ОР, показано, что вывод энергии квазиоптического твердотельного генератора, предложенный в [3], имеет эффективность, близкую к 100 %.

Результаты данной работы представляют интерес для разработчиков автогенераторов с использованием ЗДДР, когда полупроводниковые приборы с цепями согласования импедансов расположены в волноводах. В частности, цепь согласования импедансов в виде «толстого» штыря, расположенного в минимуме электрического поля в волноводе [4], вносит пренебрежимо малые радиационные потери и перспективна для автогенераторов на основе ЗДДР.

Библиографический список

1. Радиационные потери элементов связи зеркального дискового диэлектрического резонатора. Часть 1. Связь с согласованными волноводами / В. В. Гламаздин, М. П. Натаров, В. Н. Скресанов, А. И. Шубный // Радиофизика и электрон. – 2015. – 6(20), № 4. – С. 70–79.
2. Альтман Дж. Л. Устройства сверхвысоких частот / Дж. Л. Альтман; пер. с англ. под ред. И. В. Лебедева. – М.: Мир, 1967. – 487 с.
3. Квазиоптический полупроводниковый генератор с радиально-волноводным возбуждением / Б. М. Булгаков, В. Н. Скресанов, А. И. Фисун, А. И. Шубный // Приборы и техника эксперимента. – 1987. – № 1. – С. 114–116.
4. Скресанов В. Н. Два режима высокочастотной генерации диода Ганна в открытом резонаторе / В. Н. Скресанов, А. И. Шубный // Научное приборостроение в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. АН УССР. – Х., 1988. – С. 146–153.
5. Кириченко А. Я. Твердотельный генератор с квазиоптическим зеркальным диэлектрическим резонатором / А. Я. Кириченко, С. Н. Харьковский // Твердотельные генераторы и преобразователи миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. АН УССР. – Х., 1989. – С. 62–66.
6. Квазиоптические твердотельные резонаторы / А. Я. Кириченко, Ю. В. Прокопенко, Ю. Ф. Филиппов, Н. Т. Черпак. – К.: Наук. думка, 2008. – 296 с.
7. Аппаратно-вычислительный комплекс для измерения характеристик низко- и высокодобротных резонаторов в

диапазоне 26...37,5 ГГц / В. Н. Скресанов, В. В. Гламаздин, А. И. Шубный, З. Е. Еременко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2009. – 14, № 3. – С. 389–400.

Рукопись поступила 20.10.2015.

V. V. Glamazdin, M. P. Natarov,
V. N. Skresanov, A. I. Shubnyj

COUPLING RADIATION LOSS IN THE MIRROR DIELECTRIC DISK RESONATOR.

PART 2. MISMATCHED WAVEGUIDE COUPLING

The coupling radiation loss of the whispering gallery mode mirror dielectric disk resonator (MDDR) with mismatched waveguides was researched. The findings are of particular interest to the developers of MDDR solid-state oscillators where semiconductor devices and impedance matching circuits are located in the waveguide, forming a complex load in the waveguide. The dependences of MDDR resonance frequency and Q-factor on the amplitude and phase of the wave reflected from inhomogeneities in the waveguide back to the resonator are measured. Two types of couplers (a hole in the diaphragm on the mirror and an open end of the narrower waveguide on the mirror) are studied. For the open end type coupler it has been shown that MDDR resonant frequency and Q-factor can be calculated using the proposed lumped elements scheme of MDDR coupler and measuring procedure described in the first part of this paper. Coupling radiation loss and Joule loss in the load which are brought in MDDR by the complex load in the waveguide are calculated.

Key words: mirror dielectric disk resonator, whispering gallery modes, coupler, radiation loss, quality factor, equivalent circuit, solid state microwave oscillators.

В. В. Гламаздин, М. П. Натаров,
В. М. Скресанов, О. І. Шубний

РАДІАЦІЙНІ ВТРАТИ ЕЛЕМЕНТІВ ЗВ'ЯЗКУ ДЗЕРКАЛЬНОГО ДИСКОВОГО РЕЗОНАТОРА.

Частина 2. ЗВ'ЯЗОК ІЗ НЕУЗГОДЖЕНИМ ХВИЛЕВОДОМ

Досліджено радіаційні втрати елементів зв'язку (ЕЗ) дзеркального дискового діелектричного резонатора (ДДДР) з модами шепочучої галереї з неузгодженими хвилеводами. Результати дослідження мають особливий інтерес для розробників автогенераторів з використанням ДДДР, коли напівпровідникові прилади з колами узгодження імпедансу розташовані у хвилеводах, утворюючи комплексне навантаження. Вимірюючи залежності резонансної частоти і добротності ДДДР від амплітуди і фази хвилі, відбитої від комплексного навантаження. Досліджувалися ДДДР з ЕЗ двох типів: отвір в діафрагмі і звужений відкритий кінець хвилеводу (щільна) на дзеркалі. Для випадку ЕЗ у вигляді щільної показано, що добротність й резонансна частота ДДДР з комплексним навантаженням у хвилеводі може бути розрахована з використанням запропонованої схеми заміщення ЕЗ в ДДДР, при цьому номінали схеми заміщення можуть бути виміряні відповідно до методики, викладеної в першій частині цієї роботи. Розраховано дві складові додаткових втрат, що вносяться в ДДДР комплексним навантаженням в хвилеводі: радіаційні втрати ЕЗ й теплові втрати в навантаженні.

Ключові слова: дзеркальний дисковий діелектричний резонатор, моди шепочучої галереї, елемент зв'язку, радіаційні втрати, добротність, еквівалентна схема, твердотільні мікрохвильові генератори.