

ISSN 1561-8358 (Print)  
 ISSN 2524-244X (Online)  
 УДК 621.372.8;621.317  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-478-485>

Поступила в редакцию 08.02.2018  
 Received 08.02.2018

А. Е. Когут<sup>1</sup>, И. К. Кузьмичев<sup>1</sup>, Р. С. Доля<sup>1</sup>, С. О. Носатюк<sup>1</sup>, Е. А. Шульга<sup>1</sup>, Хе Джаочан<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт радиофизики и электроники имени А. Я. Усикова Национальной академии наук Украины, Харьков, Украина

<sup>2</sup>Восточно-Китайский НИИ «Фотоэлектроника», Уху, Китай

## ЭКРАНИРОВАННЫЙ ПЛАНАРНЫЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР С МОДАМИ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ

**Аннотация.** Исследованы спектральные и энергетические характеристики открытого и экранированного со стороны криволинейной поверхности планарных диэлектрических резонаторов (ДР), возбуждаемых на модах высших порядков типа шепчущей галереи (ШГ) в 8-миллиметровом диапазоне длин волн. Данные резонаторы образуют тонкой по сравнению с рабочей длиной волны дисковой диэлектрической структурой, расположенной своими плоскими основаниями между двумя проводящими зеркалами. Таким образом, электрическая компонента резонансного поля ограничивалась по высоте планарного диска двумя проводящими поверхностями. Резонансные свойства такой структуры определялись условием полного внутреннего отражения волн от внутренней криволинейной поверхности диэлектрического диска.

Проведенными исследованиями установлено, что при переходе от открытых планарных ДР к экранированным с тонким воздушным зазором в области между металлическим экраном кольцевой формы и диэлектрическим диском при определенном соотношении радиусов удается повысить их собственную добротность. Добротность экранированной резонансной структуры на высокочастотном краю возрастает до 40 %. Причиной данного эффекта является частичное смещение резонансного поля мод ШГ из области диэлектрика в воздушный зазор, что приводит к уменьшению потерь в материале диэлектрика. Для подтверждения этого эффекта было проведено компьютерное моделирование полей мод ШГ в планарном ДР с помощью программного обеспечения CST Microwave Studio 2013. Кроме того, результаты компьютерного моделирования показывают, что эти моды ШГ характеризуются однородным распределением резонансного поля вдоль аксиальной координаты. Отмечена перспективность использования планарных ДР в твердотельных генераторах миллиметрового диапазона длин волн.

**Ключевые слова:** дисковый планарный диэлектрический резонатор, моды шепчущей галереи, повышение добротности, 8-миллиметровый диапазон длин волн

**Для цитирования.** Экранированный планарный диэлектрический резонатор с модами шепчущей галереи / А. Е. Когут [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 478–485. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-478-485>

А. Ye. Kogut<sup>1</sup>, I. K. Kuzmichev<sup>1</sup>, R. S. Dolia<sup>1</sup>, S. O. Nosatiuk<sup>1</sup>, Ye. A. Shulha<sup>1</sup>, He Jaochan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov, Ukraine

<sup>2</sup>Eastern-Chinese Institute "Photoelectronics", Wuhu, China

## A SHIELDED PLANAR DIELECTRIC RESONATOR WITH WHISPERING GALLERY MODES

**Abstract.** The spectral and energy characteristics of two planar dielectric resonators (DRs), open and shielded from the curvilinear surface, excited in higher-order modes as whispering gallery modes (WGMs) in Ka-waveband are investigated. These resonators are formed by a thin (compared to the operating wavelength) disk dielectric structure, located between two conducting planes. Thus, the E-field of the resonator was limited along the height of the planar disk by two conducting surfaces. The resonance properties of such a structure are determined by the condition of total internal reflection of waves from the internal curvilinear surface of a dielectric disk.

The carried out investigations shown that the unloaded Q-factor is increased at the arrangement of planar dielectric disk inside the ring metal shield at the certain ratio of the radiuses of the shield and dielectric disk. The Q-factor of the shielded resonant structure at the high-frequency edge increases to 40 %. The partial displacement of the resonant field of the WGMs modes from the dielectric to the air gap is the cause of this effect. It leads to decrease in losses in the dielectric material. A computer simulation of the WGMs fields in the planar DR was carried out using the CST Microwave Studio 2013 software to confirm this effect. In addition, computer simulation results shown that these WGMs in the planar DR are characterized by a homogeneous distribution of the resonant field along the axial coordinate. The perspectives of using planar DR in solid-state Ka-band oscillators are shown.

**Keywords:** disk planar dielectric resonator, whispering gallery modes, increasing of Q-factor, 8-mm waveband

**For citation.** Kogut A. Ye., Kuzmichev I. K., Dolia R. S., Nosatiuk S. O., Shulha Ye. A., He Jaochan. A shielded planar dielectric resonator with whispering gallery modes. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 4, pp. 478–485 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-478-485>

**Введение.** Открытые дисковые диэлектрические резонаторы (ДР) с модами шепчущей галереи (ШГ) обладают признанными достоинствами в миллиметровом диапазоне длин волн: высокой добротностью и относительно разреженным спектром колебаний [1, 2]. Это делает перспективным использование таких резонаторов в ряде активных и пассивных устройств. В настоящее время ДР с модами ШГ уже нашли применение в качестве базовых элементов генераторов, усилителей и сумматоров мощности, фильтров и устройств для исследования электрофизических свойств широкого класса материалов.

Однако одним из главных недостатков этих резонаторов являются их большие размеры. ДР с модами ШГ создаются на принципах квазиоптики. Радиусы резонаторов данного типа намного превышают длину волны в материале диэлектрика, а их высота близка к длине волны. Было установлено, что при уменьшении одного из этих параметров собственная добротность ДР ухудшается. При уменьшении радиусов резонаторов наблюдается рост радиационных потерь со стороны их криволинейной поверхности. При уменьшении высоты существенно возрастают радиационные потери со стороны плоских оснований диэлектрического диска. В [3, 4] показано, что пороговым (минимальным) значением высоты ДР, позволяющим возбуждать в них моды ШГ, является величина  $H \approx \lambda d/2$ , где  $\lambda d$  – длина волны в материале диэлектрика.

Решением данной задачи является переход к планарным диэлектрическим структурам, расположенным плоскими основаниями между двумя проводящим зеркалами [5, 6]. Высота планарных резонансных структур много меньше длины волны. Размеры зеркал выбираются больше диаметра диэлектрического диска с целью минимизации дополнительных дифракционных потерь на краях диэлектрической структуры. В такой системе электромагнитное поле «запирается» в диэлектрике двумя проводящими поверхностями, а ее резонансные свойства определяются полным внутренним отражением волн от внутренней криволинейной поверхности планарных диэлектрических дисков. Необходимо отметить, что большая часть проведенных исследований осуществлялась ранее расчетным путем, а экспериментальные исследования относились или к коротковолновой области электромагнитного спектра (оптический и субмиллиметровый диапазон), или к СВЧ-диапазону (сантиметровый диапазон) [5, 7, 8]. Из литературных источников известно, что добротность планарных ДР сравнительно невысока и может достигать от сотен до нескольких тысяч в зависимости от материалов резонатора и выбранного диапазона длин волн [5, 7]. Данные об экспериментальных исследованиях планарных ДР с модами ШГ в миллиметровом диапазоне в научной литературе отсутствуют. По-видимому, это связано с трудностями возбуждения мод ШГ в планарных ДР. Способы возбуждения классических открытых ДР, высота которых близка к длине волны, очевидно, не применимы для возбуждения планарных ДР, поскольку предполагают размещение элемента возбуждения (диэлектрического волновода или открытого конца металлического волновода) вблизи криволинейной поверхности диэлектрического диска. Реализовать такие способы в тонкой диэлектрической структуре, расположенной между двумя металлическими зеркалами, размеры которых превышают диаметр диска, затруднительно.

В связи с вышесказанными задачами наших исследований являются: разработка способа эффективного возбуждения мод ШГ в планарном ДР на основе диэлектрического диска; исследование электродинамических характеристик такого резонатора в 8-миллиметровом диапазоне длин волн; поиск путей повышения добротности планарных ДР.

**Объект и методика исследований.** Нами изучались спектральные и энергетические характеристики двух планарных дисковых ДР. Один из них был открыт со стороны цилиндрической поверхности, а второй – экранирован металлическим кольцом. Оба резонатора плоскими основаниями находились между двумя металлическими зеркалами. Несмотря на то, что первый резонатор был частично экранирован со стороны плоских оснований, для удобства будем его назы-

вать открытым планарным ДР в силу того, что присутствуют радиационные потери со стороны его цилиндрической (рабочей) поверхности. Второй резонатор обозначим как экранированный планарный ДР.

Объекты исследований схематически показаны на рис. 1. Оба резонатора содержали диэлектрические диски  $1$ , изготовленные из фторопласта-4 ( $\epsilon = 2,08$ ) высотой  $H_1 = 1$  мм и радиусом  $R_1 = 39$  мм. Своими плоскими основаниями диски располагались между двумя круглыми тонкими латунными зеркалами  $2$  и  $3$  диаметром 100 мм. Удаленность одного из зеркал относительно диска на рис. 1 показана только для наглядности расположения диэлектрического диска в такой системе. В эксперименте оба зеркала плотно прилегали к плоским основаниям диска. В экранированном планарном ДР диэлектрический диск находился внутри алюминиевого кольца  $4$  высотой  $H_2 = H_1 = 1$  мм и радиусом  $R_2 = 42$  мм. Таким образом, внутри экранированного планарного ДР существовал тонкий воздушный зазор толщиной 3 мм между диэлектрическим диском и металлическим экраном.

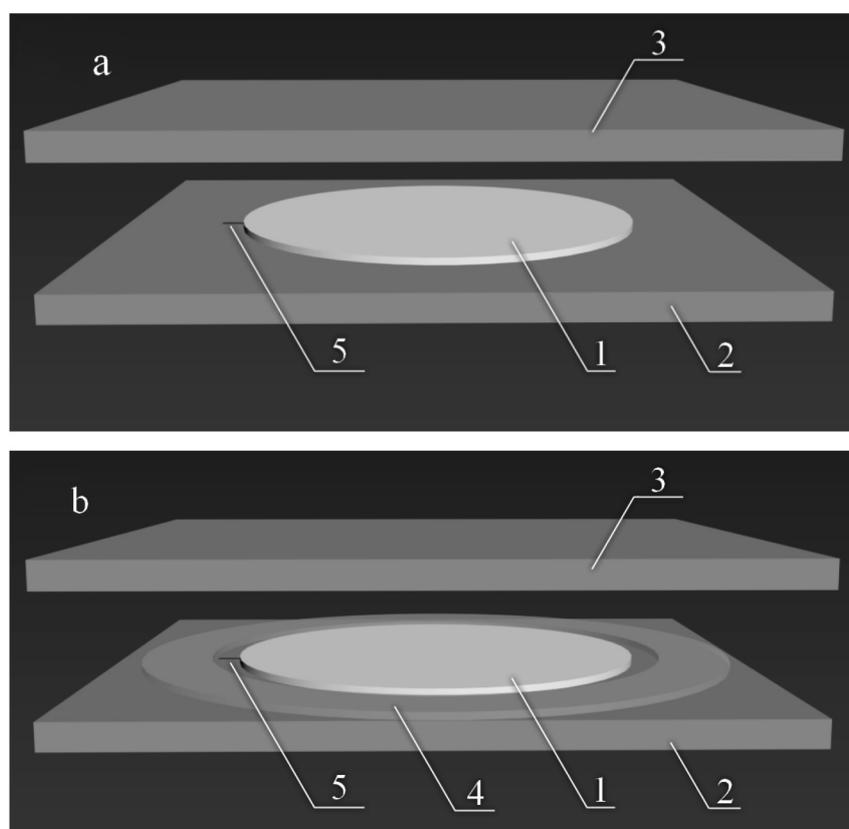


Рис. 1. Объект экспериментальных исследований:  $a$  – открытый планарный ДР,  $b$  – экранированный планарный ДР  
Fig. 1. The object of experimental investigations:  $a$  – open planar DR,  $b$  – shielded planar DR

Как было показано в [9] при изучении электродинамических характеристик классических ДР, размеры которых превышали длину волны, именно при таких размерах диэлектрической резонансной структуры и металлического экрана достигается собственная добротность, превышающая добротность подобного открытого ДР. Причиной этого является снижение потерь за счет частичного смещения резонансного поля мод ШГ из диэлектрика в воздушный зазор.

Для возбуждения мод ШГ в планарных ДР использовался способ, применяемый для классических открытых дисковых ДР [10]. При возбуждении мод ШГ в таких резонаторах открытым концом металлического волновода со стороны плоского основания диска при определенных условиях достигается высокая эффективность связи. Нами данный способ был модернизирован [6]. Для возбуждения мод ШГ в планарном ДР в данной работе использовалась щель связи в металлическом зеркале.

Качественно оценить в эксперименте распределение интенсивностей резонансных полей мод ШГ в исследуемых резонаторах вдоль радиальной координаты позволяла зависимость нормированного на максимальное значение параметра связи  $p/p_{\max}$  от относительной радиальной координаты  $r_i/R_1$  щели связи. Очевидно, что наибольшая связь соответствует расположению щели связи на участках резонансных полей с наибольшей интенсивностью. Изменение радиальной координаты щели связи в эксперименте достигалось путем смещения диэлектрического диска на металлическом зеркале в соответствующем направлении.

По аналогии с [6] моделирование полей мод ШГ в планарном ДР было выполнено с помощью стандартного программного обеспечения CST Microwave Studio 2013.

**Экспериментальные результаты и их объяснение.** Общим для спектров открытого и экранированного планарных ДР является присутствие мод ШГ с одной и двумя вариациями поля вдоль радиальной координаты. Результаты компьютерного моделирования указывают на то, что эти моды ШГ характеризуются однородным распределением резонансного поля вдоль аксиальной координаты. На рис. 2 представлены распределения полей для экранированного (а) и открытого (б) планарного ДР вдоль азимутальной координаты.

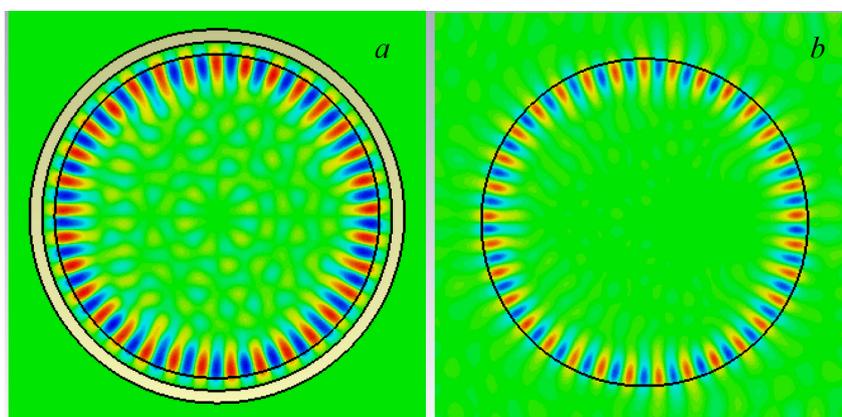


Рис. 2. Распределение поля  $HE_{33,10}$ -моды в экранированном (а) и в открытом (б) дисковом планарном ДР  
Fig. 2. The distribution of the  $HE_{33,10}$ -mode fields in the shielded (a) and open (b) disk planar DR

Таким образом, оба резонатора в исследуемом диапазоне частот работают в режиме возбуждения  $HE_{n,10}$  и  $HE_{n,20}$  мод ШГ. Индекс  $n$  определяет число вариаций поля мод ШГ вдоль азимутальной координаты. Для выбранного диапазона частот его значения находятся в пределах  $31 \leq n \leq 37$ . Возбуждаемым модам ШГ в обоих резонаторах соответствуют чередующиеся резонансные отклики с близким к постоянному интервалом по шкале частот – периодом сетки резонансных частот. Соседние резонансные отклики соответствуют модам, отличающимся на единицу значением азимутального индекса. Причем значения усредненного периода сетки резонансных частот  $\langle \Delta f_n \rangle$  открытого и экранированного планарных ДР различны. Спектр открытого планарного ДР характеризуется значением величины  $\langle \Delta f_n^o \rangle = 0,93$  ГГц, а экранированного резонатора –  $\langle \Delta f_n^s \rangle = 0,97$  ГГц. Это свидетельствует о различном характере распределения резонансных полей мод ШГ в них. Причиной этого очевидно есть различие электрических длин путей волн ШГ в открытом и экранированном планарных ДР. Иными словами, различительным признаком исследуемых резонаторов является их эффективная диэлектрическая проницаемость по отношению к полям мод ШГ. Для экранированного планарного ДР присутствие воздушной среды в виде воздушного зазора выражено в большей мере.

Отличие абсолютных значений резонансных частот мод ШГ открытого и экранированного планарных ДР в среднем составляет 150 МГц, причем с уменьшением их азимутального индекса (резонансной частоты) такое различие увеличивается. Так, для  $HE_{37,10}$  мод оно составляет 90 МГц, а для  $HE_{31,10}$  – 230 МГц.

В пользу правильности приведенных предположений свидетельствует зависимость параметра связи  $p$  от азимутального индекса  $n$  мод ШГ при различных положениях щели связи вдоль радиальной координаты. На рис. 3 представлены такие зависимости для двух наиболее характерных положений щели связи: внутри диэлектрика ( $r_i/R_1 = 0,94$ ) и когда середина щели связи находится на краю диэлектрического диска ( $r_i/R_1 = 1$ ). Пунктиром соединены значения параметра связи с экранированным планарным ДР, сплошной линией – с открытым резонатором.

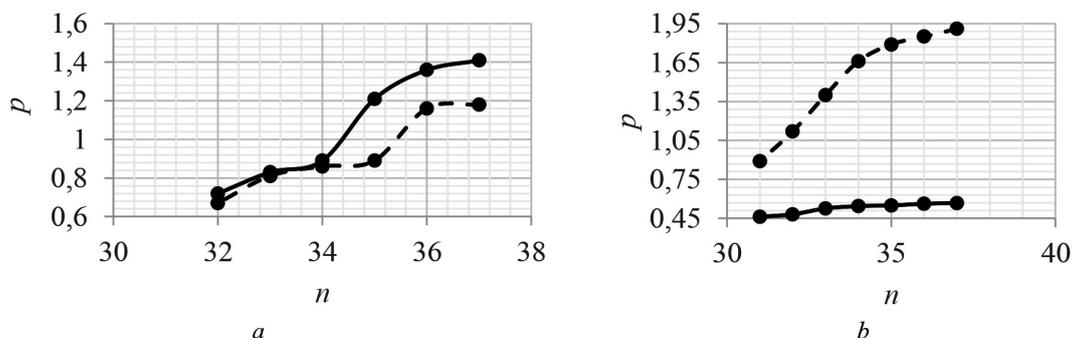


Рис. 3. Зависимость параметра связи от азимутального индекса мод ШГ:  $a - r_i/R_1 = 0,94$ ,  $b - r_i/R_1 = 1$   
 Fig. 3. The dependences of the coupling parameter on the azimuthal indexes of the whispering gallery modes:  $a - r_i/R_1 = 0,94$ ,  $b - r_i/R_1 = 1$

Видно, при расположении щели связи в диэлектрическом диске бóльшая связь достигается с открытым резонатором. При этом на высокочастотном краю исследуемого диапазона частот наблюдается закритическая связь ( $p > 1$ ) с двумя резонаторами. При смещении щели связи к краю диэлектрического диска связь с экранированным планарным ДР характеризуется существенно более высокими значениями параметра связи по сравнению с открытым резонатором. Почти во всем исследуемом диапазоне частот наблюдается закритическая связь, в то время как связь с открытым резонатором слабая ( $p > 1$ ). Это говорит о том, что на краю диэлектрического диска интенсивность резонансного поля мод ШГ существенно возрастает при его экранировании. При этом область воздушного зазора также характеризуется высокой «концентрацией» резонансного поля мод ШГ. Из этого можно предположить, что потери в материале диэлектрика открытого планарного ДР вносят больший вклад в общие собственные потери по сравнению с экранированным резонатором.

Проведенный анализ поведения параметра с открытым и экранированным планарными ДР при разных положениях щели связи во многом объясняет результаты проведенного исследования их собственной добротности для мод ШГ, отличающихся азимутальным индексом. Данная зависимость графически представлена на рис. 4. Сплошная кривая отображает поведение добротности открытого планарного ДР, пунктирная – экранированного резонатора.

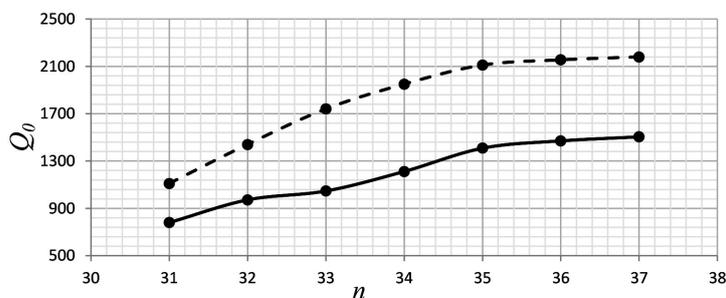


Рис. 4. Зависимость собственной добротности экранированного и открытого планарных ДР от азимутального индекса мод ШГ

Fig. 4. The dependence of the unloaded  $Q$ -factor of the shielded and open planar DRs on the azimuthal index of the whispering gallery modes

Видно, что добротность открытого планарного ДР сравнительно невелика. С увеличением азимутального индекса рабочих мод ШГ добротность такого резонатора растет, и на высокочастотном краю исследуемого диапазона частот она достигает значения 1580. Такое поведение добротности планарного ДР хорошо согласуется с поведением энергетических характеристик классических ДР, для которых низшей аксиальной модой является мода с аксиальным индексом, равным 1. С уменьшением азимутального индекса (частоты) наибольший вклад в собственные потери энергии таких резонаторов вносит рост радиационных потерь [2]. Минимизировать их влияние на величину добротности позволяет переход к экранированным диэлектрическим резонансным структурам с воздушным зазором в области между ними и металлическим экраном [9]. Данные, представленные на рис. 4, подтверждают это. Видно, что во всем исследуемом диапазоне частот добротность экранированного планарного ДР существенно превышает добротность подобного резонатора, открытого со стороны криволинейной поверхности. Причем с ростом азимутального индекса мод ШГ (частоты) такое различие более очевидно. На высокочастотном краю исследуемого диапазона частот оно достигает 40 %, на низкочастотном краю составляет 30 %. Можно предположить, что с понижением рабочей частоты омические потери на стенках металлического экрана растут, что и определяет снижение добротности экранированного планарного ДР и превосходства его энергетических характеристик над характеристиками открытого резонатора.

Объяснить рост добротности планарного ДР при его экранировании позволяет анализ зависимости параметра связи от радиальной координаты щели связи. Данная зависимость отображает распределение интенсивности резонансного поля мод ШГ в исследуемых резонаторах вдоль радиальной координаты. Очевидно, что наибольшие значения параметра связи соответствуют положениям щели связи на участках резонансных полей с наибольшей интенсивностью. При снижении интенсивности резонансного поля связь с резонатором будет снижаться. Зависимость нормированного на максимальное значение параметра связи  $p/p_{\max}$  от относительной радиальной координаты середины щели связи  $r_i/R_1$  для экранированного (сплошная кривая) и открытого (пунктир) планарных ДР, возбуждаемых на  $HE_{3710}$  моде ШГ, представлена на рис. 5. Границе воздух–металл в экранированном планарном ДР соответствует относительная радиальная координата щели связи  $r_i/R_1 = 1,08$ .

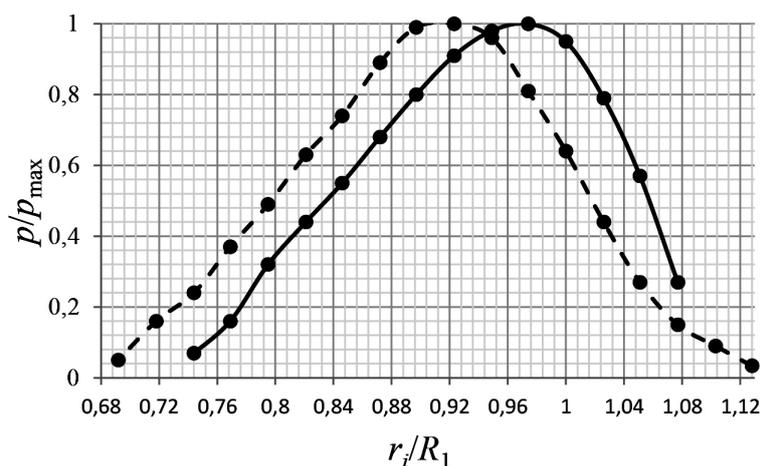


Рис. 5. Зависимость относительного параметра связи от относительной радиальной координаты щели связи

Fig. 5. The dependence of the relative coupling parameter on the relative radial coordinate of the coupling slot

Видно, что причиной роста добротности планарного ДР при его экранировании является снижение потерь в материале диэлектрика и незначительные потери в цилиндрических стенках металлического экрана. В отличие от открытого резонатора резонансное поле мод ШГ экранированного планарного ДР в основном сосредоточено в воздушном зазоре, несмотря на то, что максимум его интенсивности располагается в диэлектрике. При этом область воздушного зазора

характеризуется высокими значениями параметра связи (закритическая связь) с экранированным планарным ДР. При приближении к стенкам металлического экрана интенсивность поля понижается, достигая на границе с металлом наименьших значений, о чем свидетельствуют малые значения параметра связи ( $p = 0,39$ ).

**Закключение.** Экспериментально установлено, что путем перехода от открытых планарных диэлектрических структур к экранированным, содержащим тонкий воздушный зазор между диэлектрическим элементом резонатора и его экраном цилиндрической формы, удается существенно повысить собственную добротность. Причиной этого выступает снижение потерь в материале диэлектрика за счет частичного смещения резонансного поля мод ШГ из области диэлектрика в воздушный зазор. Показано, что при определенных соотношениях радиусов диэлектрического диска и экрана цилиндрической формы удается снизить омические потери в стенках экрана. Путем возбуждения мод ШГ в планарных ДР щелью связи в металлическом зеркале резонатора, ориентированной параллельно радиусу основания диэлектрического диска, достигаются режимы закритической связи. Это делает перспективным использование планарных ДР в качестве колебательных систем твердотельных источников миллиметровых волн.

### Список использованных источников

1. Диэлектрические резонаторы / М. Е. Ильченко [и др.] ; под ред. М. Е. Ильченко. – М.: Радио и связь, 1989. – 328 с.
2. Квазиоптические твердотельные резонаторы / А. Я. Кириченко [и др.]. – Киев: Наук. думка, 2008. – 296 с.
3. Влияние величины зазора между дисками на добротность диэлектрического пластинчатого резонатора / Г. В. Голубничая [и др.] // Письма в Журн. техн. физики. – 2015. – Т. 41, вып. 6. – С. 50–57.
4. Experimental conditions for the excitation of thin disk whispering-gallery-mode resonators / V. Yurchenko [et al.] // Progress in Electromagnetics Research C. – 2013. – Vol. 43. – P. 29–40. <https://doi.org/10.2528/pierc13062803>
5. Annino, G. Study on planar whispering gallery dielectric resonators. I. General properties / G. Annino, M. Cassettari, M. Martinelli // Int. J. of Infrared and Millimeter Waves. – 2002. – Vol. 23, № 4. – P. 597–615. <https://doi.org/10.1023/a:1015709927809>
6. Возбуждение колебаний шепчущей галереи в дисковом планарном диэлектрическом резонаторе щелью связи / А. Е. Когут [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 3. – С. 121–128.
7. Santhosh Kumar, G. D. V. Whispering Gallery Modes of Planar Dielectric Resonators in LTCC Technology / G. D. V. Santhosh Kumar, K. C. James Raju // Research Areas and 2013 International Conference on Microelectronics, Communications and Renewable Energy (AICERA/ICMiCR), 2013 Annual International Conference on. – P. 474–479. <https://doi.org/10.1109/aicera-icmicr.2013.6576026>
8. K-band planar type dielectric resonator filter with high- $\epsilon_{\text{spl}}$  ceramic substrates / T. Hiratsuka [et al.] // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. – 1998. – Vol. 3. – P. 1311–1314. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.1998.700615>
9. Whispering-Gallery Modes in Shielded Hemispherical Dielectric Resonators / Z. E. Eremenko [et al.] // IEEE Trans. on MTT. – 2002. – Vol. 50, № 11. – P. 2647–2649. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2002.804627>
10. Иванов, Е. Н. Повышение эффективности возбуждения дисковых диэлектрических резонаторов / Е. Н. Иванов, А. А. Карачев, Д. П. Царапкин // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1987. – Т. 30, № 10. – С. 68–69.
11. Гинзтон, Э. Л. Измерения на сантиметровых волнах / Э. Л. Гинзтон – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 519 с.

### References

1. Il'chenko M. E., Vzyatyshv V. F., Gassanov L. G. et.al. *Dielectric Resonators*. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1989. 328 p. (in Russian).
2. Kirichenko A. Ia., Prokopenko Iu. V., Filippov Iu. F., Cherpak N. T. *Quasi-Optical Solid-State Resonators*. Kiev, Naukova dumka Publ., 2008. 296 p. (in Russian).
3. Golubnichaya G. V., Kirichenko A. Ya., Krivenko E. V., Lutsenko V. I. The effect of gap width between disks on the Q value of a laminar dielectric disk resonator. *Technical Physics Letters*, 2015, vol. 41, no. 3, pp. 281–283. <https://doi.org/10.1134/s1063785015030207>
4. Yurchenko V., Altintas A., Ciydem M., Koc S. Experimental conditions for the excitation of thin disk whispering-gallery-mode resonators. *Progress in Electromagnetics Research C*, 2013, vol. 43, pp. 29–40. <https://doi.org/10.2528/pierc13062803>
5. Annino G., Cassettari M., Martinelli M. Study on planar whispering gallery dielectric resonators. I. General properties. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2002, vol. 23, no. 4, pp. 597–615. <https://doi.org/10.1023/a:1015709927809>
6. Kogut A. E., Dolya R. S., Nosatiuk S. O., Shulha Ye. A., He Zhaochan. Excitation of whispering gallery vibrations in a disk planar dielectric resonator by the coupling gap. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-*

*technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 3, pp. 121–128 (in Russian).

7. Santhosh Kumar G. D. V., James Raju K. C. Whispering Gallery Modes of Planar Dielectric Resonators in LTCC Technology. *Emerging Research Areas and 2013 International Conference on Microelectronics, Communications and Renewable Energy (AICERA/ICMiCR), 2013 Annual International Conference on*, pp. 474–479. <https://doi.org/10.1109/aicera-icmicr.2013.6576026>

8. Hiratsuka T., Sonoda T., Sakamoto K., Ishikawa Y. K-band planar type dielectric resonator filter with high- $\epsilon_{\text{r}}$  ceramic substrates. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 1998, vol. 3, pp. 1311–1314. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.1998.700615>

9. Eremenko Z. E., Filipov Y. F., Kharkovsky S. N., Kutuzov V. V., Kogut A. E. Whispering-Gallery Modes in Shielded Hemispherical Dielectric Resonators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, vol. 50, no. 11, pp. 2647–2649. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2002.804627>

10. Ivanov E. N., Karachev A. A., Tsarapkin D. P. Increasing the excitation efficiency of disk dielectric resonators. *Izvestia vuzov. Radioelektronika = Radioelectronics and Communications Systems*, 1987, vol. 30, no. 10, pp. 68–69 (in Russian).

11. Ginzton E. L. *Microwave Measurements*. New York, McGraw-Hill, 1957. 519 p.

### Информация об авторах

*Когут Александр Евгеньевич* – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт радиопроизводства и электроники имени А. Я. Усикова Национальной академии наук Украины (ул. Академика Проскуры, 12, 61085, Харьков, Украина). E-mail: [kogut@ire.kharkov.ua](mailto:kogut@ire.kharkov.ua)

*Кузьмичев Игорь Константинович* – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт радиопроизводства и электроники имени А. Я. Усикова Национальной академии наук Украины (ул. Академика Проскуры, 12, 61085, Харьков, Украина). E-mail: [kuzmichev.igr@i.ua](mailto:kuzmichev.igr@i.ua)

*Носатюк Сергей Олегович* – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт радиопроизводства и электроники имени А. Я. Усикова Национальной академии наук Украины (ул. Академика Проскуры, 12, 61085, Харьков, Украина). E-mail: [nosatyk\\_sergey@mail.ru](mailto:nosatyk_sergey@mail.ru)

*Доля Роман Сергеевич* – аспирант, младший научный сотрудник, Институт радиопроизводства и электроники имени А. Я. Усикова Национальной академии наук Украины (ул. Академика Проскуры, 12, 61085, Харьков, Украина). E-mail: [roma\\_vb@mail.ru](mailto:roma_vb@mail.ru)

*Шульга Евгений Александрович* – аспирант, младший научный сотрудник, Институт радиопроизводства и электроники имени А. Я. Усикова Национальной академии наук Украины (ул. Академика Проскуры, 12, 61085, Харьков, Украина). E-mail: [Shulgaevgeniy.ne@mail.ru](mailto:Shulgaevgeniy.ne@mail.ru)

*Хе Джаочан* – заместитель директора, Восточно-Китайский НИИ «Фотозлектроника» (Уху, Провинция Аньхой, Китай, 241002).

### Information about the authors

*Oleksandr Ye. Kogut* – D. Sc. (Physical and Mathematical), Leading Researcher, O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine (12, Academician Proskura Str., 61085, Kharkov, Ukraine). E-mail: [kogut@ire.kharkov.ua](mailto:kogut@ire.kharkov.ua)

*Igor K. Kuzmichev* – D. Sc. (Physical and Mathematical), Leading Researcher, O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine (12, Academician Proskura Str., 61085, Kharkov, Ukraine). E-mail: [kuzmichev.igr@i.ua](mailto:kuzmichev.igr@i.ua)

*Serhii O. Nosatiuk* – Ph. D. (Physical and Mathematical), Researcher, O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine (12, Academician Proskura Str., 61085, Kharkov, Ukraine). E-mail: [nosatyk\\_sergey@mail.ru](mailto:nosatyk_sergey@mail.ru)

*Roman S. Dolia* – Graduate student, Junior Researcher, O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine (12, Academician Proskura Str., 61085, Kharkov, Ukraine). E-mail: [roma\\_vb@mail.ru](mailto:roma_vb@mail.ru)

*Yevgeniy A. Shulha* – Graduate Student, Junior Researcher, O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine (12, Academician Proskura Str., 61085, Kharkov, Ukraine). E-mail: [Shulgaevgeniy.ne@mail.ru](mailto:Shulgaevgeniy.ne@mail.ru)

*He Jaochan* – Deputy Director, East China Research Institute “Photoelectronics” (Huajinnan Road, Huaxia Technology Park, Wuhu Hi-Tech Development Zone, Wuhu, Anhui Province, P. R. China, 241002).