

# Двухзазорный клистронный фотонно-кристаллический резонатор с дополнительными планарными резонансными элементами

А. Гнусарев<sup>1</sup>, А. Мирошниченко д. т. н.<sup>2</sup>, В. Царев д. т. н.<sup>3</sup>,  
Н. Акафьева к. т. н.<sup>4</sup>

УДК 621.37 | ВАК 2.2.1

Исследовались основные электродинамические параметры двухзазорного фотонно-кристаллического резонатора (ДФКР) с включением в резонансную систему ПРПП с целью возможного использования подобных резонаторов в ММЛК, работающих в Ku- и K-диапазонах. Результаты могут найти применение при разработке резонаторных систем для приборов клистронного типа, работающих в качестве усилителей и генераторов в радиолокации, телекоммуникации, средствах связи.

**В** последние годы как в России, так и за рубежом возрастает роль микроволновой электроники, которая значительно влияет на технические характеристики радиоэлектронных устройств различного функционального назначения [1]. Среди большой номенклатуры микроволновых вакуумных электронных приборов находят применение многолучевые клистроны (МЛК), которые существенно превышают однолучевые клистроны по основным параметрам, таким как полоса частот, КПД, а также имеют более низкое ускоряющее напряжение и меньшие габариты и массу [2–5]. Миниатюрные многолучевые клистроны (ММЛК) также могут эффективно использоваться в бортовой аппаратуре различного назначения в качестве низковольтных усилителей, обеспечивающих в Ku- и K-диапазонах выходную мощность порядка нескольких сотен ватт [6]. На выходные параметры клистронов, такие как полоса частот, коэффициент усиления, выходная мощность, а также на массогабаритные показатели существенное влияние

оказывают конструктивные особенности и параметры применяемых резонаторов.

При разработке ММЛК, особенно в верхней части сантиметрового и миллиметрового диапазоне возникают существенные трудности, связанные с подавлением высших паразитных мод колебаний. Также при увеличении рабочей частоты уменьшается собственная добротность резонаторов,  $Q_0$ , и его характеристическое сопротивление. Одним из путей решения этих проблем является использование в качестве резонансных систем так называемых фотонно-кристаллических резонаторов (ФКР), в иностранной литературе описанных как Photonic Band Gaps structures (PBG) [7–12], которые могут в большей степени минимизировать эти недостатки. Несмотря на то, что ФКР используются в настоящее время в основном в качестве резонансных систем для мощных и сверхмощных приборов, они также могут с успехом применяться в ММЛК. Кроме того, на электродинамические параметры резонатора существенное влияние может оказывать изменение шага решетки ФКР, в частности, увеличение диаметра стержней в первом слое вокруг дефекта приводит к существенным изменениям электродинамических параметров [13]. Но подобные исследования проводились только для лампы с бегущей волной и не проводились для клистронов.

Наряду с этим применение в качестве резонаторов клистронов двухзазорной конструкции, а также введение дополнительных полосковых резонансных элементов в ФКР, например, таких как rectangular open loop resonator или прямоугольный разомкнутый петлевой резонатор (ПРПП), может позволить получить в двухзазорном ФКР (ДФКР) новые свойства. Различные конструкции ПРПП были исследованы в ряде работ, например, для получения

<sup>1</sup> Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина, аспирант кафедры «Электронные приборы и устройства», 19953@bk.ru.

<sup>2</sup> Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина, доцент, заведующий кафедрой «Электронные приборы и устройства», alexm2005@list.ru.

<sup>3</sup> Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина, профессор кафедры «Электронные приборы и устройства», tsarev\_va@mail.ru.

<sup>4</sup> Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина, доцент кафедры «Электронные приборы и устройства», akafieva\_na@mail.ru.

микроволновых фильтров [14–16]. Однако в клистронных резонаторах такие элементы до сих пор не применялись и их свойства не изучались.

Целью исследований является изучение основных электродинамических параметров двухззорного фотонно-кристаллического резонатора (ДФКР) с включением в резонансную систему ПРППР для возможного использования подобных резонаторов в ММЛК, работающих в Ku- и K-диапазонах.

## КОНСТРУКЦИЯ РЕЗОНАТОРА

Конструкция резонатора представлена на рис. 1а. Фотонно-кристаллическая решетка образуется металлическими стержнями 1 круглой формы с радиусом  $\delta$  и с шагом решетки  $\Delta$ . Внутри фотонно-кристаллической решетки за счет отсутствия стержней расположен дефект. Стержни фотонно-кристаллической решетки закреплены на двух боковых крышках резонатора 2. Внутри дефекта фотонно-кристаллической решетки на диэлектрической подложке 3 с толщиной  $L$  размещены взаимно перпендикулярно с двух сторон диэлектрика четыре отрезка полосковых линий с дополнительным резонансным элементом 5 в виде ПРППР, внешний вид которого представлен на рис. 1б, где  $W$  – толщина линии;  $G$  – ширина зазора;  $A$  – длина боковой стороны;  $F$  – ширина, которая отделяет два кольца. ПРППР представляет собой систему двух связанных петлевых резонаторов с электрической связью между контурами. Центральный электрод 6 с 13 отверстиями 4 для прохождения электронного потока электрически соединен с полосковыми линиями. Полосковые линии в свою очередь с другой стороны электрически соединены с плоской заземляющей поверхностью 7. Боковые электроды 8 размещены на боковых крышках и также имеют 13 отверстий для прохождения электронного потока. Центральный и два боковых электрода образуют два высокочастотных зазора резонатора 9. Основные размеры резонатора приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные размеры резонатора

Параметр	Значение
Высота резонатора, мм	$H$ 2,8
Длина зазора, мм	$d$ 0,4
Длина втулки, мм	$l$ 1,6
Радиус пролетного канала, мм	$a$ 0,35
Толщина диэлектрика, мм	$L$ 0,7
Радиус стержня фотонно-кристаллической решетки, мм	$\delta$ 0,5
Шаг фотонно-кристаллической решетки, мм	$\Delta$ 2,6

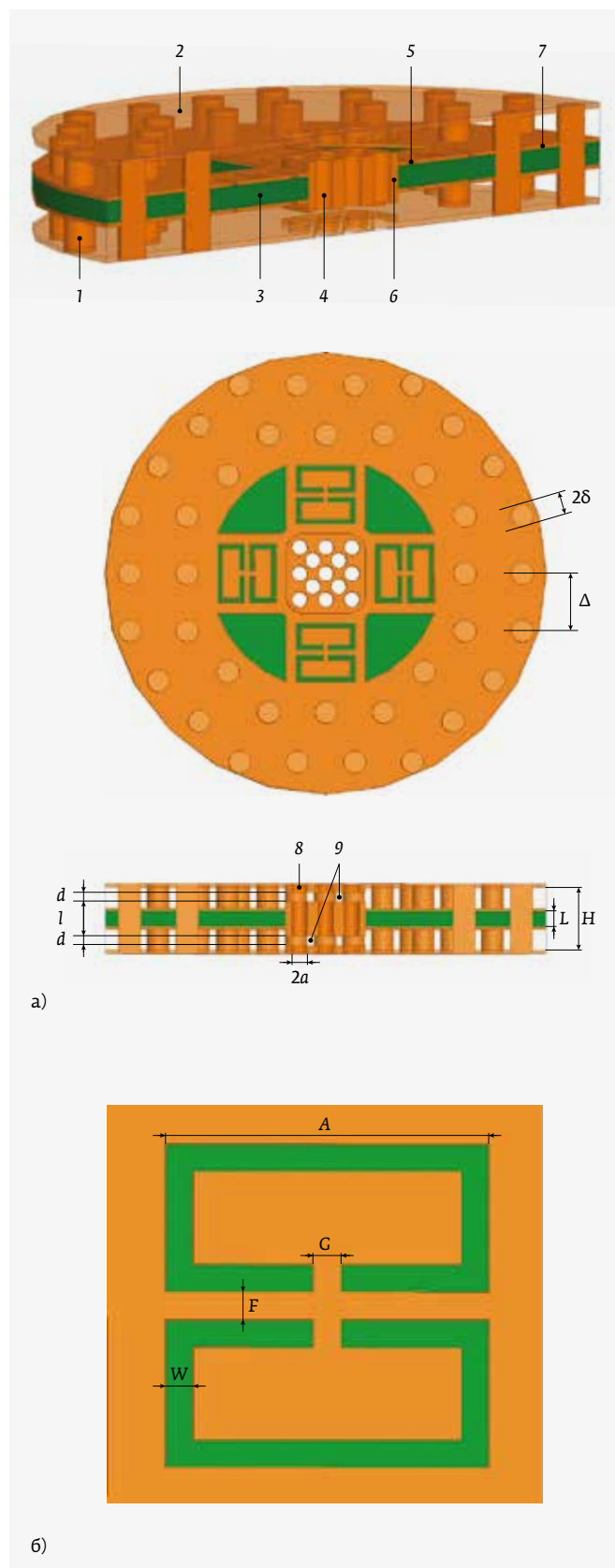


Рис. 1. Конструкция ДФКР: а – конструкция резонатора; б – конструкция ПРППР

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для расчета резонатора использовался метод трехмерного моделирования методом конечных элементов в частотной области.

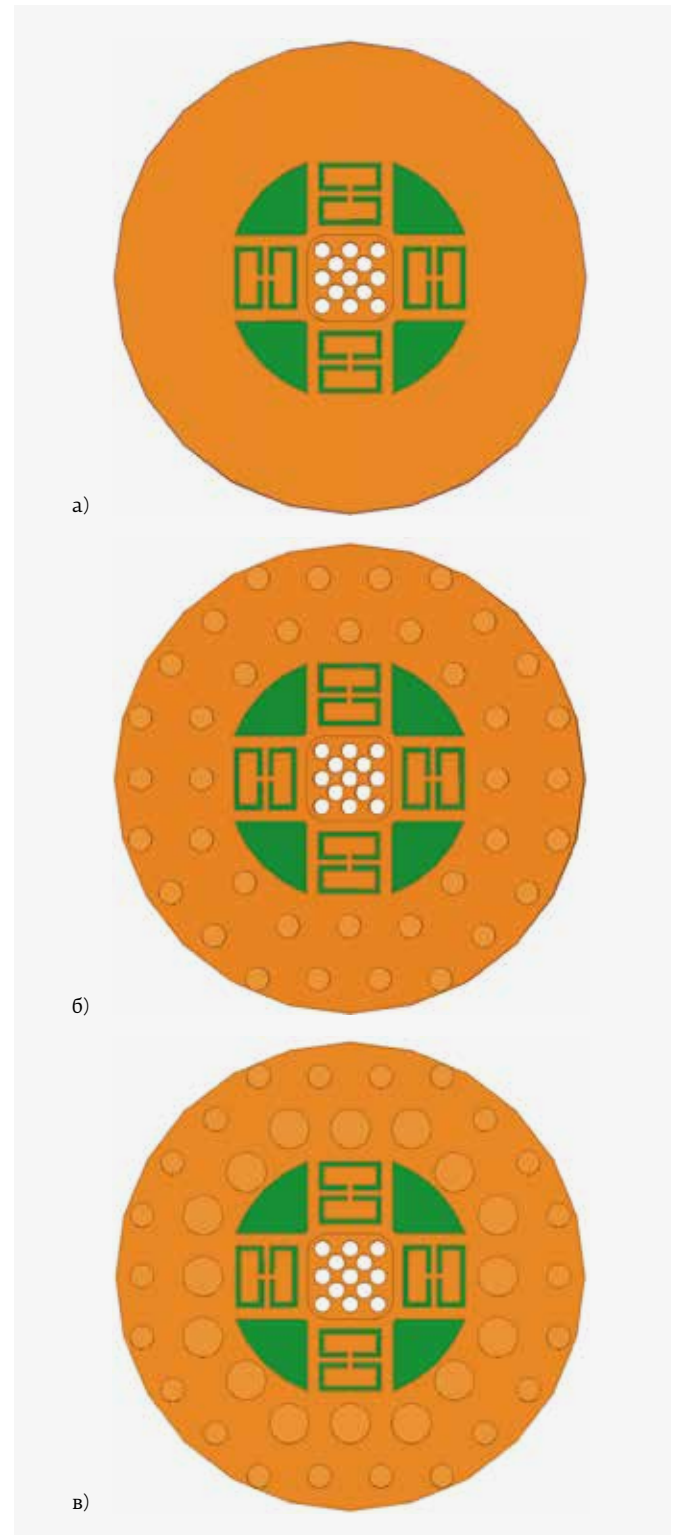
В резонаторах данного типа может возбуждаться множество резонансных частот. Но мы будем проводить анализ только тех мод, которые имеют наилучшее взаимодействие с многолучевым электронным потоком в клистроне и обладают высокими значениями характеристического сопротивления. Именно таким условиям соответствуют два низших типа – противофазный ( $\pi$ ) и синфазный ( $2\pi$ ).

Для проведения сравнительного анализа исследованы три модели резонатора: первая – без фотонно-кристаллической решетки, представляющая собой цилиндрический двухзазорный резонатор; вторая конструкция – ДФКР со стандартной фотонно-кристаллической решеткой; третья конструкция ДФКР с увеличенным диаметром стержней первого слоя фотонно-кристаллической решетки. Во всех трех случаях в полосковых линиях резонатора был использован ПРПР (рис. 2).

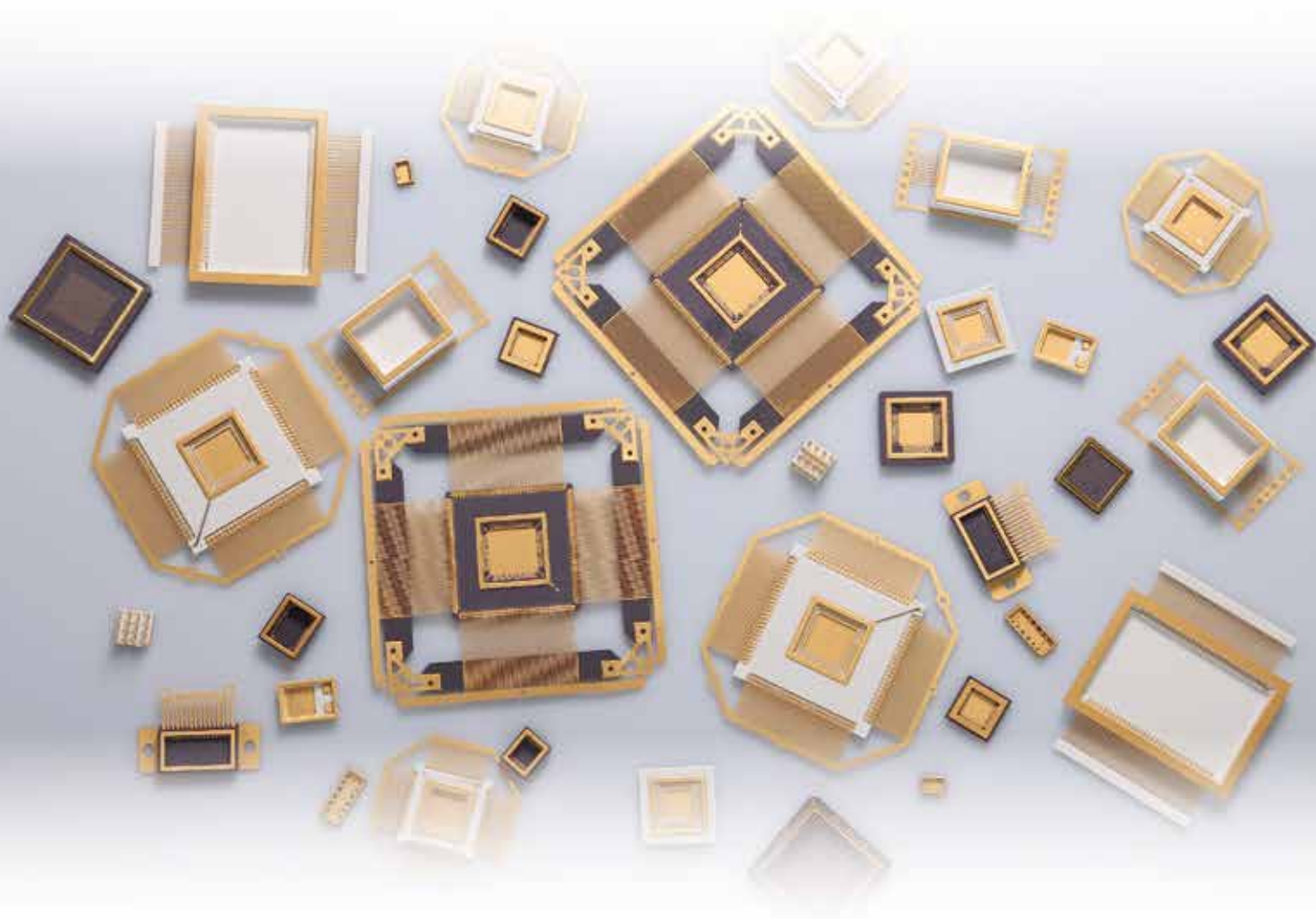
На рис. 3 показаны результаты исследования спектра частот резонатора в диапазоне частот от 10 до 40 ГГц в виде зависимости параметра  $S_{21}$  от частоты для трех вариантов конструкции, представленных на рис. 2.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы. При введении в резонатор ФКР со стандартным шагом ( $\delta/\Delta=0,38$ ) для первых  $\pi$ - и  $2\pi$ -мод наблюдается сдвиг частот вверх по диапазону для  $\pi$ -моды на 2,1 ГГц, для  $2\pi$ -моды 3 ГГц. Для некоторых высших мод наблюдается сдвиг по частоте и резкое уменьшение амплитуды. Например, частоты в области 22–25 ГГц смещаются в диапазон 27–29 ГГц с существенным подавлением амплитуды на 30 дБ. Однако в этом случае существуют моды, амплитуда которых сдвигается вверх по частоте и даже возрастает. Например, мода 18,6 ГГц смещается вверх на 0,7 ГГц с увеличением амплитуды на 14 дБ, мода 31,5 ГГц смещается вверх на 1,5 ГГц с увеличением амплитуды на 3,5 дБ.

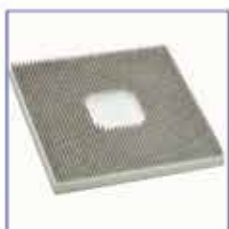
При применении в ФКР первого слоя с увеличенным диаметром стержней ( $\delta/\Delta=0,7$ ) для низших  $\pi$ - и  $2\pi$ -мод также наблюдается смещение частот вверх по диапазону, но в меньшей степени. Для  $\pi$ -моды относительно стандартной ФКР смещение частоты 0,36 ГГц, для  $2\pi$ -моды 0,8 ГГц. Явление подавления резонансных частот, в отличие от предыдущего случая, существенно усиливается. Например, моды на частоте 19, 27–29 ГГц оказываются полностью подавлены. Но при этом существует ряд высших мод, которые, как и в предыдущем случае не подавляются, а смещаются вверх, например, мода 33 ГГц сместилась на 33,6 ГГц относительно предыдущего случая. Таким образом, можно сделать вывод о селективных свойствах ФКР, которые более существенно



**Рис. 2.** Исследуемые модели резонатора: а – двухзазорный резонатор без фотонно-кристаллической решетки; б – ДФКР со стандартной фотонно-кристаллической решеткой; в – ДФКР с увеличенным диаметром стержней первого слоя фотонно-кристаллической решетки



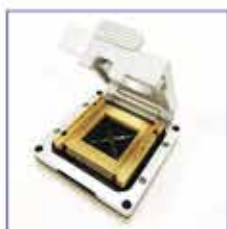
Выводные рамки



Металлокерамические  
корпуса



Нагревательные  
элементы



Контактные  
устройства



Графитовая  
оснастка



Оптоэлектронные  
корпуса



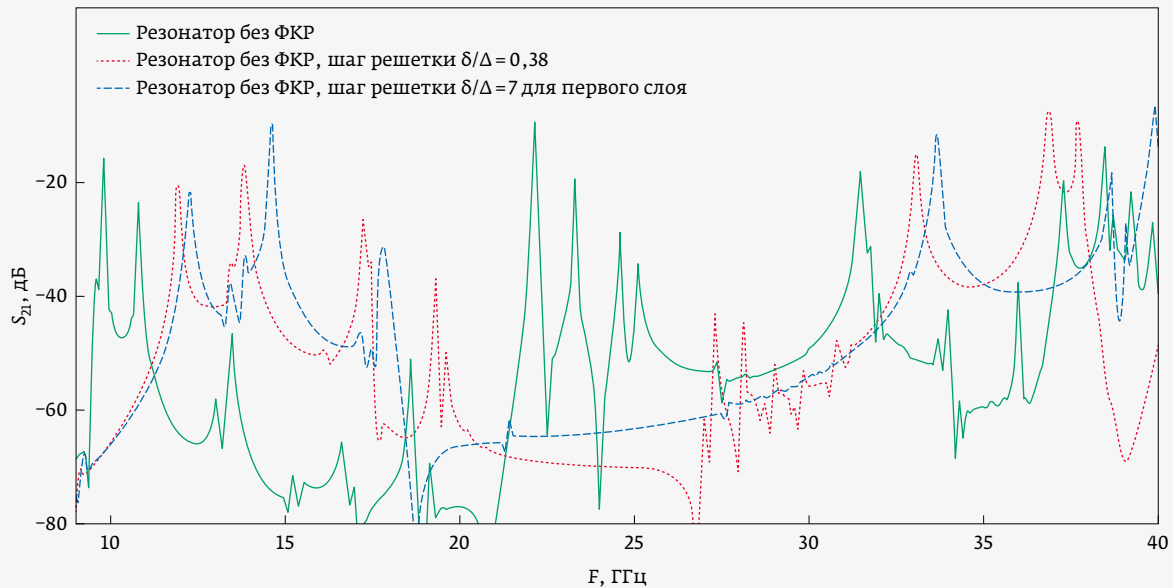


Рис. 3. Распределение частот резонатора в диапазоне от 10 до 40 ГГц для трех вариантов конструкции

проявляются при увеличении диаметра стержней в первом слое ФКР.

На основании исследованного спектра частот с учетом требований к электродинамическим параметрам были выбраны для дальнейших исследований две низшие моды. В табл. 2 приведены основные электродинамические параметры для двух первых мод – противофазной ( $\pi$ ) и синфазной ( $2\pi$ ) для случая стандартного шага фотонно-кристаллической решетки  $\delta/\Delta = 0,38$ .

Исследование влияния толщины стержней первого слоя фотонно-кристаллической решетки на электродинамические параметры ДФКР

Проведено исследование электродинамических параметров ДФКР при изменении толщины стержней первого слоя ФКР. На рис. 4 показаны зависимости изменения частоты, добротности и характеристического сопротивления

от диаметра стержней фотонно-кристаллической решетки первого слоя ( $\delta/\Delta$ ) для  $\pi$ - и  $2\pi$ -мод резонатора. Видно, что частоты  $\pi$ - и  $2\pi$ -мод возрастают, причем угол наклона кривой для синфазной моды выше. Параметр  $Q_0$  уменьшается в пределах 6–8%.

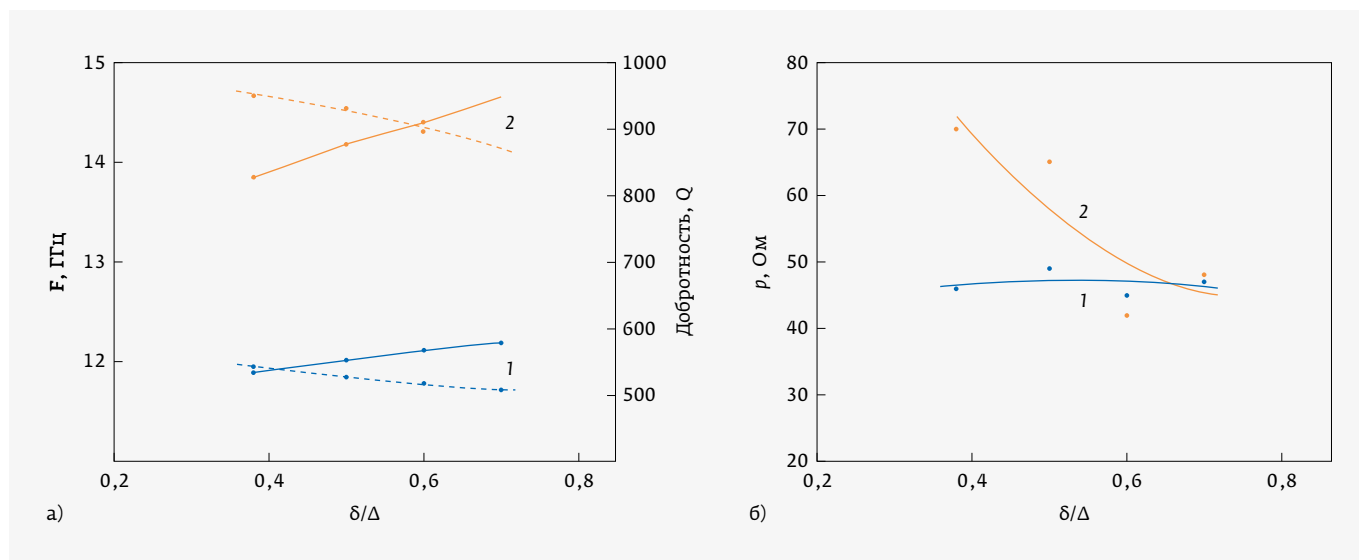
Характеристическое сопротивление резонатора для  $\pi$ -моды остается практически постоянным при изменении толщины стержней первого слоя ФКР, для  $2\pi$ -моды наблюдается достаточно сильное уменьшение параметра на 31% (рис. 4б).

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРПП НА ПАРАМЕТРЫ ДФКР

Для изучения новых свойств резонатора, полученных при введении в конструкцию резонатора дополнительного ПРПП, исследовано влияние изменения

Таблица 2. Результаты расчета электродинамических параметров для  $\pi$ - и  $2\pi$ -мод

Тип моды	Частота, ГГц	Собственная добротность	Характеристическое сопротивление
$\pi$	11,905	544	46
$2\pi$	13,874	955	70

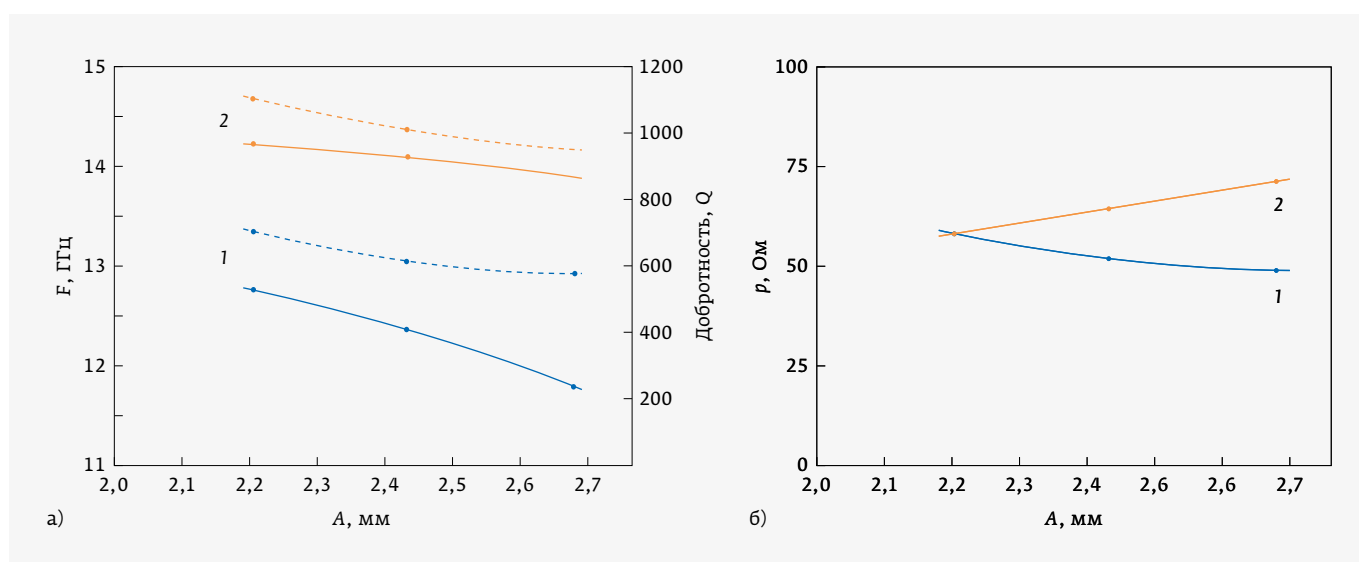


**Рис. 4.** Зависимости частоты, добротности (а) и характеристического сопротивления (б) резонатора от изменения диаметра стержней первого слоя фотонно-кристаллической решетки: 1 –  $\pi$ -мода; 2 –  $2\pi$ -мода. Сплошная линия – частота; пунктирная линия – добротность

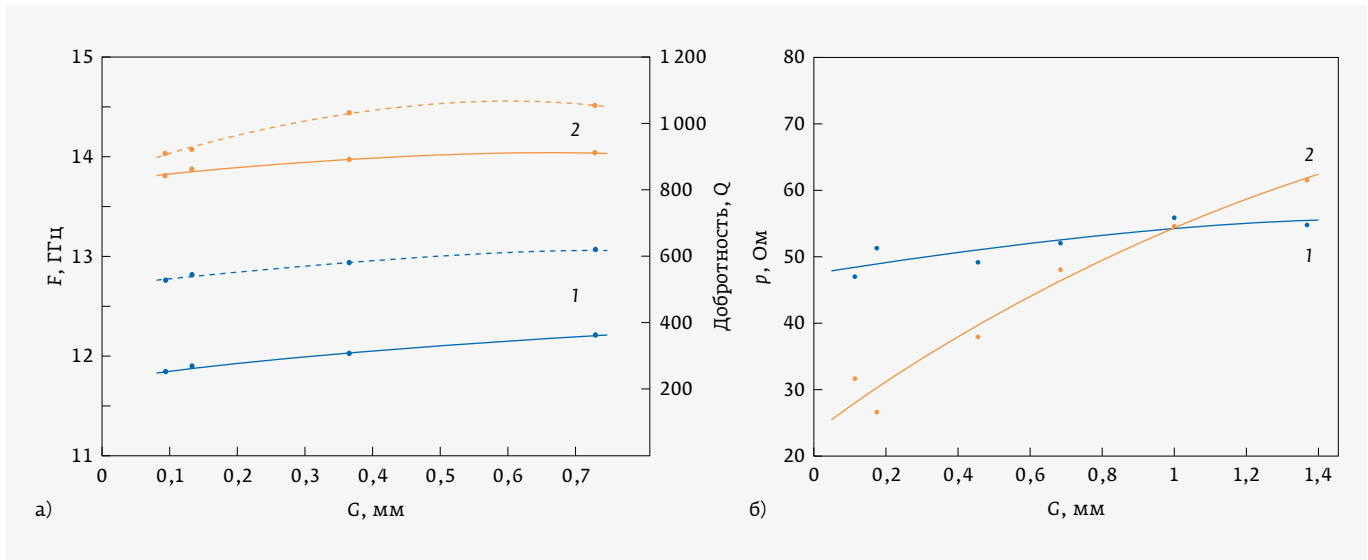
геометрических размеров ПРПР на электродинамические параметрыДФКР. На рис. 5 представлены зависимости частоты, собственной добротности и характеристического сопротивления от длины боковой стороны ПРПР (параметр  $A$ ). Видно, что изменение параметра  $A$  дополнительного ПРПР в диапазоне указанных на рисунках значений приводит к незначительному уменьшению частоты  $2\pi$ -моды колебаний в пределах 2–3%, в то

же время на частоту  $\pi$ -моды влияние более заметное и она уменьшается в пределах 6–7%. Собственная добротность также уменьшается, для  $\pi$ -моды – на 23%, а для  $2\pi$ -моды – на 9%.

Изменение характеристического сопротивления для  $\pi$ -моды и  $2\pi$ -моды носит противоположный характер. В то время как характеристическое сопротивление  $\pi$ -моды уменьшается на 20%, то  $2\pi$ -моды увеличивается на 21%.



**Рис. 5.** Зависимость частоты, собственной добротности (а) и характеристического сопротивления (б) от параметра  $A$ : 1 –  $\pi$ -мода; 2 –  $2\pi$ -мода. Сплошная линия – частота; пунктирная линия – собственная добротность



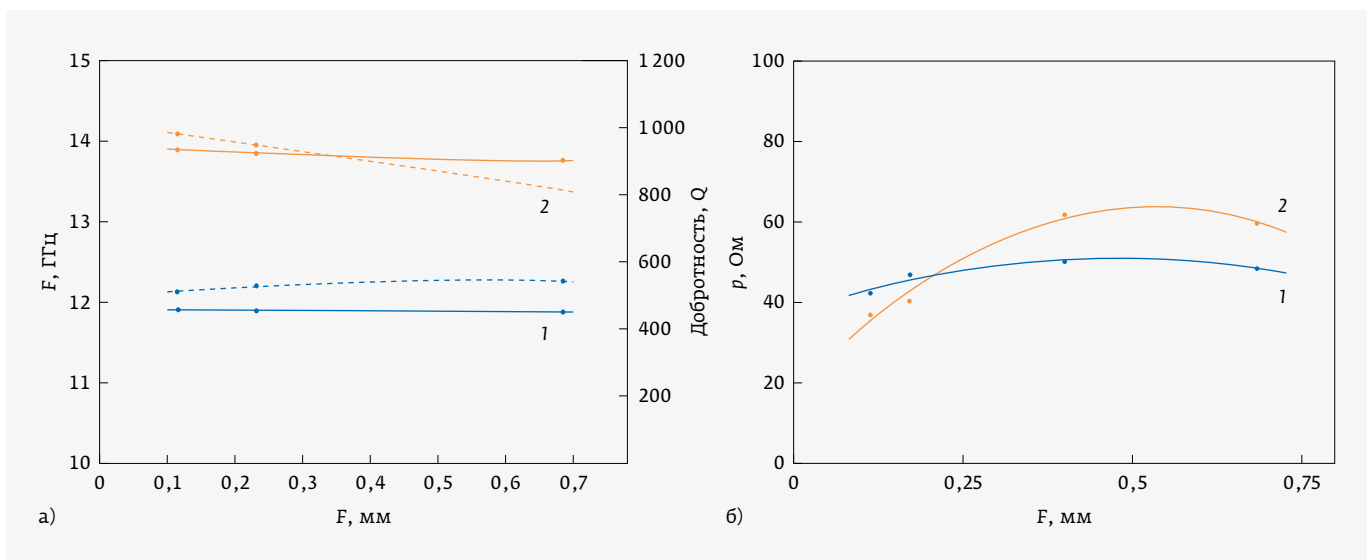
**Рис. 6.** Зависимость частоты, собственной добротности (а) и характеристического сопротивления (б) резонатора от параметра  $G$ : 1 –  $\pi$ -мода; 2 –  $2\pi$ -мода. Сплошная линия – частота; пунктирная линия – собственная добротность

Влияние на электродинамические параметры резонатора ширины зазора ( $G$ ) ПРПР иллюстрирует рис. 6. При этом меняется электрическая связь между двумя половинами ПРПР. Видно, что при увеличении  $G$  происходит небольшое увеличение частоты  $\pi$ -моды на 3–4%, а  $2\pi$ -моды на 2–3%.

Влияние параметра  $G$  на характеристическое сопротивление проявляется более значительно. В диапазоне изменяемых значений  $G$  для  $\pi$ -моды рост составляет 16–17%,

а для  $2\pi$ -моды характеристическое сопротивление  $\rho$  возрастает в два раза.

На рис. 7 приведены результаты исследования влияния изменения параметра  $F$  ПРПР на электродинамические параметры резонатора. В этом случае также меняется величина электрической связи между двумя половинами ПРПР. При этом можно отметить, что частоты  $\pi$ -моды и  $2\pi$ -моды почти не изменялись. Так как с увеличением  $F$



**Рис. 7.** Зависимость частоты, собственной добротности (а), характеристического сопротивления (б) от параметра  $F$  ПРПР: 1 –  $\pi$ -мода; 2 –  $2\pi$ -мода. Сплошная линия – частота, пунктирная линия – собственная добротность



ГРУППА КОМПАНИЙ

ЭЛЕКТРОННОЕ СПЕЦИАЛЬНОЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

АО НПП ЭСТО (Группа компаний ЭСТО) - объединение ведущих российских предприятий, специализирующихся на разработках, производстве, модернизации, продаже и сервисном обслуживании специального технологического оборудования.

### Направления деятельности группы «ЭСТО»

Разработка и производство технологического оборудования (лазерное, вакуумное, сборочное, нестандартное) и внедрение технологий

Организация поставок как отдельных единиц зарубежного технологического оборудования, так и комплексных законченных технологий «под ключ»

Комплексная и частичная модернизация российского и зарубежного технологического оборудования любой сложности

Сервисное обслуживание российского и зарубежного технологического оборудования

Проектирование и строительство производств микроэлектроники

Обучение специалистов заказчика

Технологический аудит производства

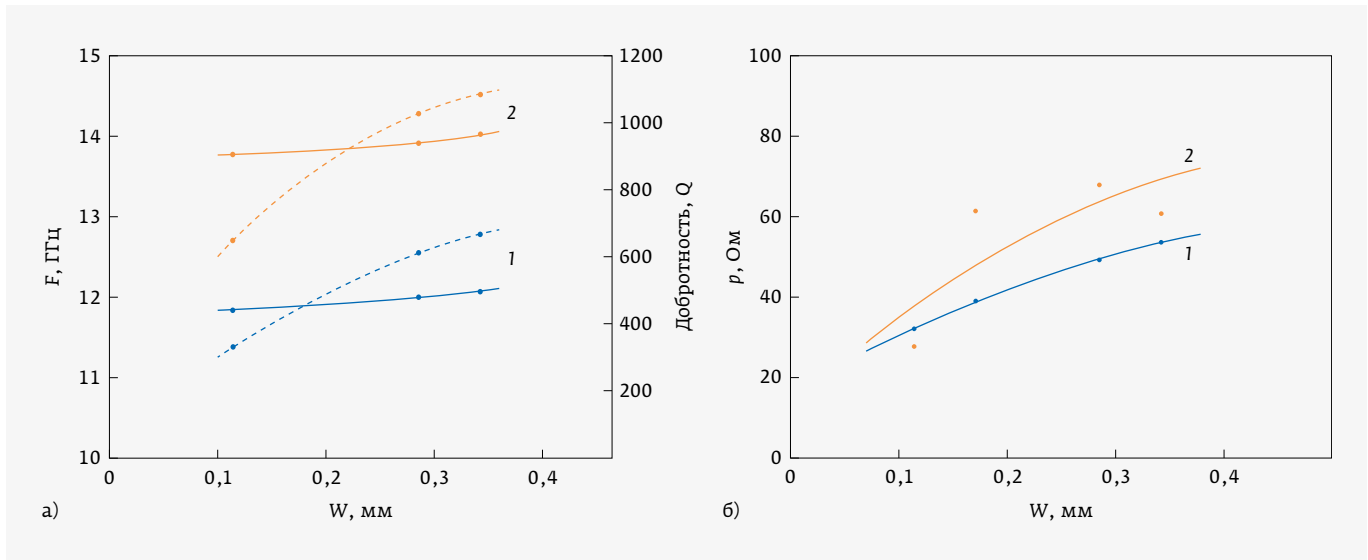
Группа компаний ЭСТО более 20 лет производит оборудование для микроэлектроники в собственном инженерно-производственном комплексе метражом в 5000 кв.м в г. Зеленограде

Акционерное общество  
«Научно-производственное  
предприятие «Электронное  
специальное технологическое  
оборудование»

124460, Москва, Зеленоград,  
просп. Георгиевский, д. 5, стр. 1  
тел.: (499) 729-77-51,  
(499) 479-12-39  
info@nppesto.ru  
www.nppesto.ru







**Рис. 8.** Зависимость частоты и собственной добротности (а), характеристического сопротивления (б) от параметра  $W$  ПРПП: 1 –  $\pi$ -мода; 2 –  $2\pi$ -мода. Сплошная линия – частота; пунктирная линия – собственная добротность

частоты незначительно уменьшились меньше чем на 1% для  $\pi$ -моды и  $2\pi$ -моды.

При слабом изменении частоты можно отметить достаточно сильную зависимость характеристического сопротивления от параметра  $F$  ПРПП для  $2\pi$ -моды. Максимумы значений как на  $\pi$ -моды (50 Ом), так и на  $2\pi$ -моды (60 Ом) наблюдаются при  $F=0,5-0,55$  мм.

На рис. 8 показано изменение электродинамических параметров при изменении размера  $W$  ПРПП, при этом можно наблюдать то, что также как и при изменении  $F$  частота  $\pi$ - и  $2\pi$ -моды изменяется незначительно – всего на 1–2%, но в то же время при увеличении  $W$  резко начинает увеличиваться собственная добротность  $\pi$ -моды (в 2 раза), а  $2\pi$ -моды на 67–68%.

Параметр  $W$  ПРПП также оказывает большое влияние на характеристическое сопротивление резонатора. Для  $\pi$ -моды увеличение составляет около 67%, а  $2\pi$ -моды вообще возрастает больше чем в два раза. При этом на  $2\pi$ -моды наблюдается большой разброс значений при изменении параметра  $W$ .

\* \* \*

В данной статье приведены результаты исследования миниатюрного многоканального резонатора с фотонно-кристаллической решеткой и с интегрированными дополнительными плечевыми резонаторами на диэлектрической подложке. Исследованы основные электродинамические параметры ДФКР на двух низших частотах – противофазной ( $\pi$ ) и синфазной ( $2\pi$ ) модах. Исследовано влияние геометрических размеров

ПРПП на электродинамические параметры ДФКР. При этом среди всех параметров ДФКР наибольшие изменения величины отмечаются у характеристического сопротивления. Также изучено воздействие на электродинамические параметры изменения диаметра стержней первого слоя фотонно-кристаллической решетки. При этом отмечаются фильтрующие свойства для подавления высших мод в резонаторе в случае стандартной фотонно-кристаллической решетки, и особенно сильно при утолщении стержней первого слоя решетки. Рассмотренный в статье ДФКР может быть использован в низковольтных многолучевых усилительно-генераторных приборах клистронного типа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Щербаков С. В.** Развитие СВЧ электроники в рамках реализации государственных программ // Материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. «Электроника и микроэлектроника СВЧ», СПб., 29 мая – 1 июня 2017. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. С. 15–23. URL: <https://mwelectronics.etu.ru/assets/files/2017/01.pdf> (дата обращения 26.05.2021).
2. **Beazatto C., Bres M., Faillon G.** Advantages of Multiple Beam Klystrons // Vakuuum elektronik und Displays: Vortrage der ITG Fachtagung. Garmisch-Partenkirchen, 4–5 May 1992. Garmisch-Partenkirchen: ITG, 1992. PP. 4–32.
3. **Korolyov A. N., Gelvich E. A., Zhary Y. V., Zakurdayev A. D., Poognin V. I.** Multiple-beam klystron amplifiers: Performance parameters and development trends // IEEE Transactions on Plasma Science. 2004. Vol. 32. no. 3. PP. 1109–1118. doi: 10.1109/TPS.2004.828807.

4. **Nusinovich G. S., Levush B., Abe D. K.** A review of the development of multiple-beam klystrons and TWTs. Washington: Naval Research Laboratory, 2003. 42 p.
5. **Ding Y., Shen B., Shi S., Cao J.** S-band multibeam klystron with bandwidth of 10% // IEEE Transactions Electron Devices. 2005. Vol. 52, no. 5. PP. 889–894. doi: 10.1109/TED.2005.845796.
6. **Kotov A. S., Gelvich E. A., Zakurdayev A. D.** Small-Size Complex Microwave Devices (CMD) for Onboard Applications // IEEE Transactions on Electron Devices. 2007. Vol. 54. No. 5. PP. 1049–1053. doi: 10.1109/TED.2007.893196.
7. **Smirnov A. V., Newsham D., Yu D.** PBG Cavities for Single-Beam and Multi-Beam Electron Devices // Proc. of Particle Accelerator Conf. Portland, Oregon, 12–16 May 2003. Portland, Oregon: IEEE, 2003. PP. 1153–1155. doi: 10.1109/PAC.2003.1289636.
8. **Xu Y., Seviour R.** Design of Photonic Crystal Klystrons // Proc. of the 1st Intern. Particle Accelerator Conf. (IPAC 2010), Kyoto, 23–28 May 2010. PP. 4002–4004.
9. **Singh A., Jain P. K.** FDTD Analysis of the Dispersion Characteristics of the Metal PBG Structures // Progress in Electromagnetics Research B. 2012. Vol. 39. PP. 71–88. doi: 10.2528/PIERB11120601.
10. **Xie Chenglong, Chen Chun-Ping.** Anada Tetsuo 2D microwave metallic photonic crystal point-defect-cavity resonator // Microwave and Optical Technology Lett. 2017. Vol. 59, no. 10. PP. 2547–2551. doi: 10.1002/mop.30767.
11. **Chen Chun-Ping, Xie Chenglong, Anada Tetsuo, Zhang Zejun.** Simulation and Measurement of Properties of Metallic Photonic Crystal Point-Defect-Cavities with a Centrally-Loaded Rod // IEICE Transactions on Electronics. 2018. Vol. E101-C. No. 1. PP. 91–95. doi: 10.1587/transele. E101.C.91.
12. **Masullo M. R., Andreone A., Gennaro Di E., Albanese S., Francomacaro F., Panniello M., Vaccaro V. G., Lamura G.** Study of Hybrid Photonic Band Gap Resonators for Particle Accelerators // Microwave and Optical Technology Lett. 2006. Vol. 48. № 12. PP. 2486–2491. doi: 10.1002/mop.22016.
13. **Ningfeng Bai, Xiaohan Sun.** Slow Wave Structures with Composite Defect Electromagnetic Band Gap Structure // IVEC 2008.
14. **Ahmed Rhbanou, Mohamed Sabbane, Seddik Bri.** Design of Dual-Mode Substrate Integrated Waveguide Band-Pass Filters // Circuits and Systems. 2015. No. 6. PP. 257–267.
15. **Dian Widi Astuti, Rizki Ramadhan Putra, Muslim, Mudrik Alaydrus.** Substrate integrated waveguide bandpass filter for short range device application using rectangular open loop resonator // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). Vol. 11. No. 5. October 2021. PP. 3747–3756.
16. **Astuti D. W., Alaydrus M.** A Bandpass Filter Based on Rectangular Open Loop Resonators at 2.45 GHz // IEEE International Conference on Instrument, Communications, Information Technology and Biomedical Engineering. 2013. No. 1. PP. 147–151.



Акционерное общество  
**ИРКУТСКИЙ  
РЕЛЕЙНЫЙ  
ЗАВОД**

разрабатываем и производим радиоэлектронные компоненты



Ориентируемся на клиентов

Учитываем требования клиентов и предоставляем своим заказчикам образцы изделий

100% гарантия качества

Строго следим за выпускаемой продукцией и проверяем ее на каждом этапе производства

Работаем над продукцией

Постоянно работаем над своей продукцией и улучшаем технические характеристики







**РАЗРАБАТЫВАЕМ И  
СЕРИЙНО ПРОИЗВОДИМ**

электромагнитные реле,  
коаксиальные радиочастотные  
соединители,  
переключатели электромеханические  
поворотные и коаксиальные,  
помехоподавляющие фильтры

Россия, 664075,  
г. Иркутск, ул. Байкальская, 239  
(3952) 35-23-18  
marketing@irzirk.ru



Посмотрите каталог промежуточных реле на сайте:  
[www.irzirk.ru](http://www.irzirk.ru)