

# Исследование электродинамических параметров двухззорного фотонно-кристаллический резонатора с дополнительными планарными резонансными элементами

А. В. Гнусарев, А. Ю. Мирошниченко, В.А. Царев, Н. А. Акафьева, М.А. Чернышев

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

**Аннотация:** в данной работе исследовался миниатюрный многоканальный резонатор с фотонно-кристаллической решеткой и с интегрированными дополнительными пленарными полосковыми резонаторами на диэлектрической подложке. Исследованы основные электродинамические параметры резонатора на двух низших частотах- противофазной ( $\pi$ ) и синфазной ( $2\pi$ ) моде. Исследовано влияние геометрических размеров ПРПР на электродинамические параметры резонатора.

**Ключевые слова:** МЛК, ФКР, ПРПР, частота, собственная добротность, характеристическое сопротивление

## 1. Введение.

Среди широкого спектра микроволновых вакуумных электронных приборов находят широкое 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 [1-2]. Миниатюрные многолучевые клистроны (ММЛК) также могут эффективно использоваться в бортовой аппаратуре различного назначения в качестве низковольтных усилителей и генераторов [3]. При этом на выходные параметры клистронов существенное влияние оказывают конструктивные особенности и параметры применяемых резонаторов.

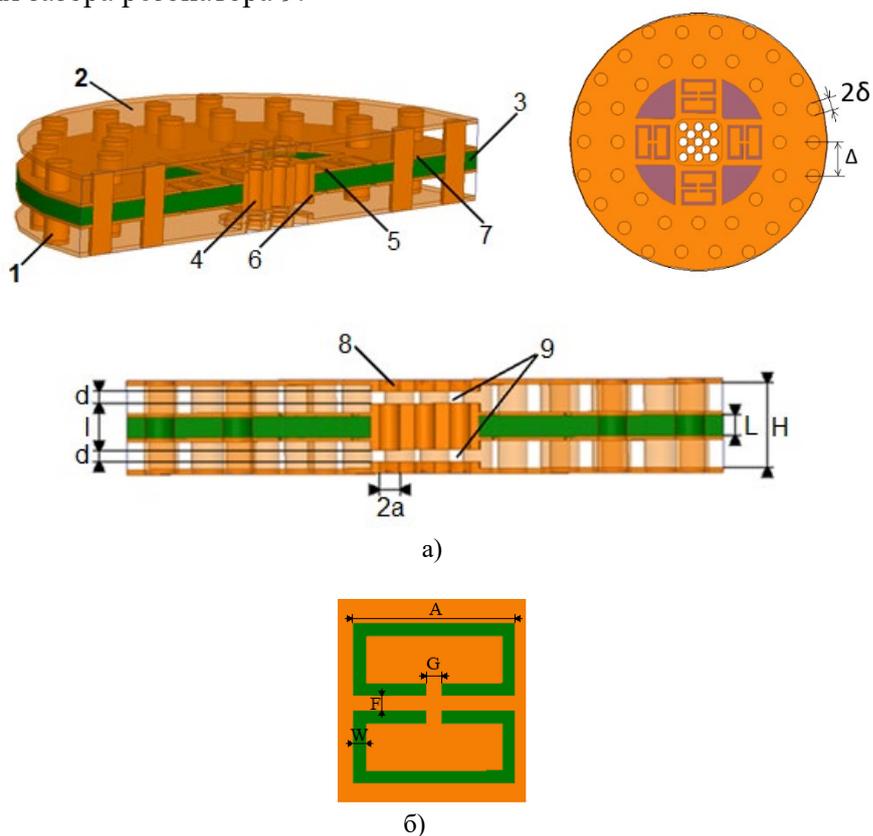
При разработке ММЛК возникают существенные трудности, связанные проблемой подавления высших паразитных мод колебаний. Одним из путей решения этих проблем является использование в качестве резонансных систем так называемых фотонно-кристаллических резонаторов (ФКР), в иностранной литературе описанных как Photonic Band Gaps structures (PBG) [4,5], которые могут в большей степени минимизировать эти недостатки. Наряду с этим, применение в качестве резонаторов клистрона двухззорной конструкции, а также введение дополнительных полосковых резонансных элементов в ФКР, например таких как «rectangular open loop resonator» или прямоугольный разомкнутый петлевой резонатор (ПРПР) может позволить получить в двухззорном ФКР (ДФКР) новые свойства. Различные конструкции ПРПР были исследованы в ряде работ, например, для получения микроволновых фильтров [6,7]. 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 ПРПР.

## 2. Конструкция резонатора

Конструкция резонатора представлена на рис.1а. Фотонно-кристаллическая решетка с дефектом в центре образуется металлическими стержнями 1 круглой формы с радиусом  $\delta$  и с шагом решетки  $\Delta$ . Внутри дефекта фотонно-кристаллической решетки на диэлектрической подложке 3 размещены с двух сторон диэлектрика четыре отрезка

полосковых линий с дополнительным резонансным элементом 5 в виде ПРПР, внешний вид которого представлен на Рис.1б, где  $W$  – толщина линии,  $G$ -ширина зазора,  $A$ - длина боковой стороны, а  $F$ -ширина, которая отделяет два кольца. ПРПР 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.



**Рисунок 1.** Конструкция ДФКР. а) конструкция резонатора; б) конструкция ПРПР.

Основные размеры резонатора приведены в таблице 1.

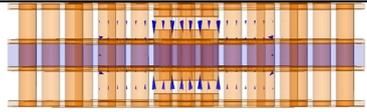
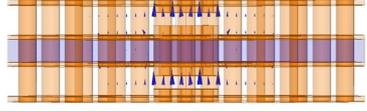
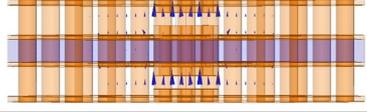
**Таблица 1.** Основные размеры резонатора

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

### 3. Результаты моделирования

Для расчета резонатора использовался метод трехмерного моделирования методом конечных элементов в частотной области. В работе исследованы типы колебаний, которые имеют наилучшее взаимодействие с многолучевым электронным потоком в клистроне и обладают высокими значениями характеристического сопротивления, низший противофазный ( $\pi$ ) и синфазный ( $2\pi$ ).

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

### 4. Исследование влияния ПРПР на параметрыДФКР

Для изучения новых свойств резонатора, полученных при введении в конструкцию резонатора дополнительного ПРПР, исследовано влияние изменения геометрических размеров ПРПР на электродинамические параметрыДФКР. На рисунке 2 представлены зависимости частоты, собственной добротности и характеристического сопротивления от

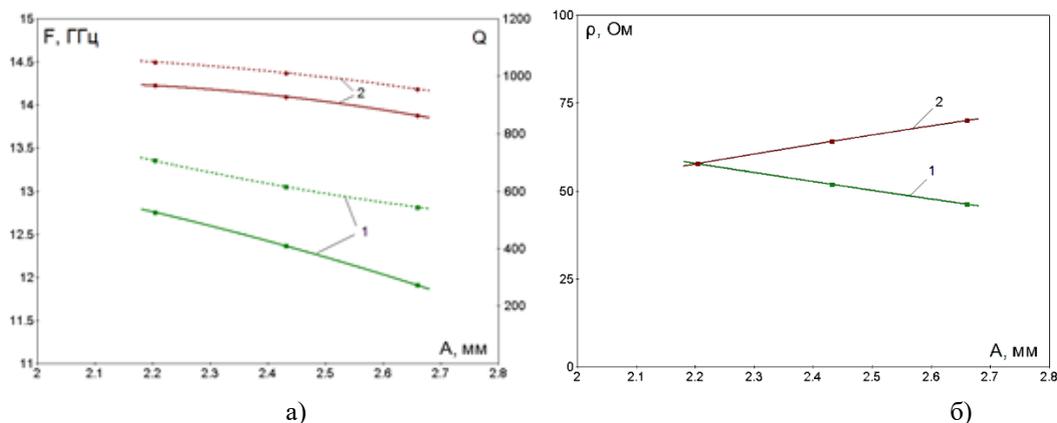
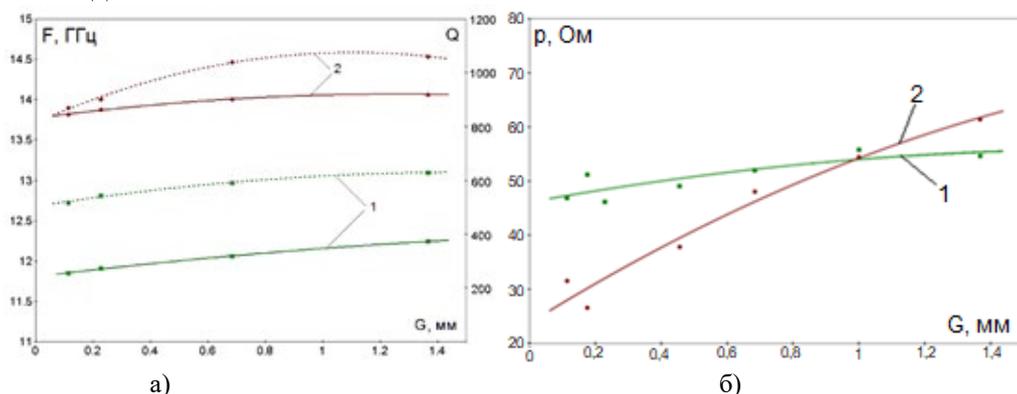


Рисунок 2. Зависимость частоты, собственной добротности (а) и характеристического сопротивления (б) от параметра А. 1-  $\pi$  мода, 2-  $2\pi$  мода. Сплошная линия- частота, пунктирная собственная добротность.

длины боковой стороны ПРПР (параметр А). Видно, что изменение параметра А 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%.

Рисунок 3 иллюстрирует влияние на электродинамические параметры резонатора ширины зазора (G) ПРПР. При этом меняется электрическая связь между двумя половинами

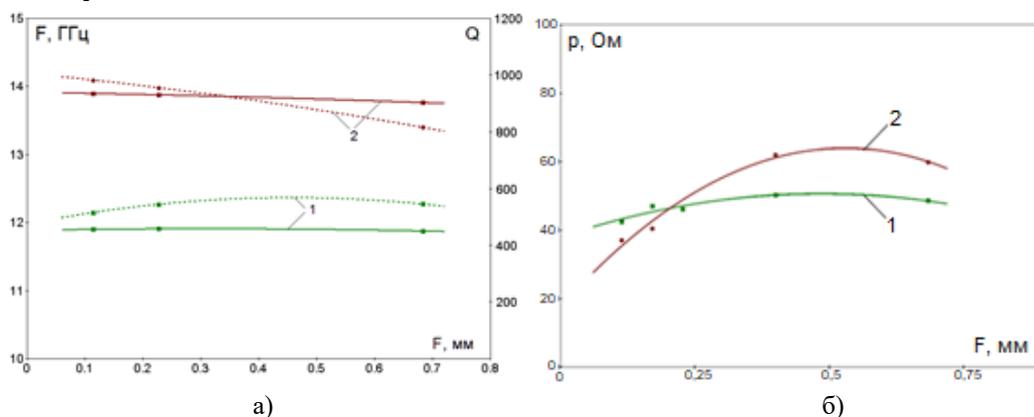
ПРПР. Видно, что при увеличении  $G$ , происходит небольшое увеличение частоты  $\pi$ -моды на 3-4%, а  $2\pi$ -моды на 2-3%.



**Рисунок 3.** Зависимость частоты, собственной добротности (а) и характеристического сопротивления (б) резонатора от параметра  $G$ . 1-  $\pi$  мода, 2-  $2\pi$  мода. Сплошная линия- частота, пунктирная собственная добротность.

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.

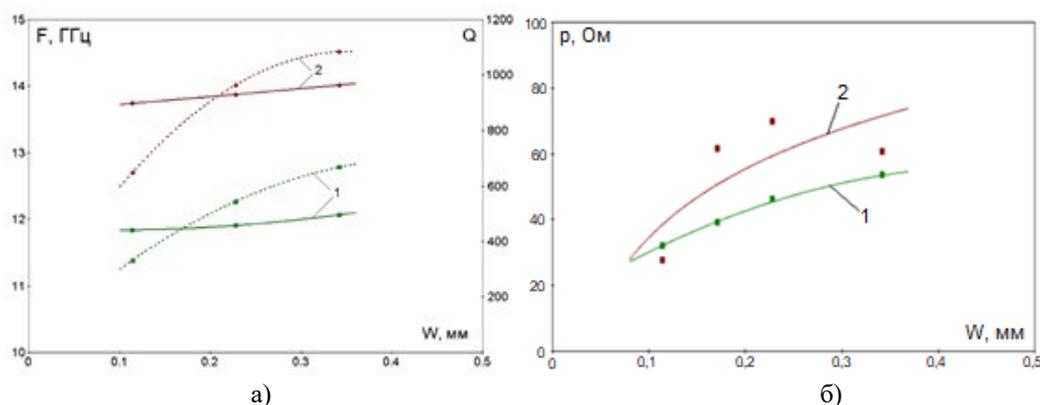
На рисунке 4 приведены результаты исследования влияния изменения параметра  $F$  ПРПР на электродинамические параметры резонатора. В этом случае также меняется величина электрической связи между двумя половинами ПРПР. При этом можно отметить, что частоты  $\pi$ -моды и  $2\pi$ -моды почти не изменялись. Так как с увеличением  $F$  частоты незначительно уменьшились меньше чем на 1% для  $\pi$ -моды и  $2\pi$ -моды.



**Рисунок 4.** Зависимость частоты, собственной добротности (а), характеристического сопротивления (б) от параметра  $F$  ПРПР. 1-  $\pi$  мода, 2-  $2\pi$  мода. Сплошная линия- частота, пунктирная собственная добротность.

При слабом изменении частоты можно отметить достаточно сильную зависимость характеристического сопротивления от параметра  $F$  ПРПР 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 рисунке 5 показано изменение электродинамических параметров при изменении размера  $W$  ПРПР, при этом можно наблюдать то что здесь так же как при изменении  $F$  частота мод  $\pi$ -моды 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%.



**Рисунок 5.** Зависимость частоты и собственной добротности (а), характеристического сопротивления (б) от параметра  $W$  ПРПР. 1-  $\pi$  мода, 2-  $2\pi$  мода. Сплошная линия- частота, пунктирная собственная добротность.

Параметр  $W$  ПРПР 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  $W$ .

## 5. Заключение

В данной статье приведены результаты исследования миниатюрного многоканального резонатора с фотонно-кристаллической решеткой и с интегрированными дополнительными планарными полосковыми резонаторами на диэлектрической подложке. Исследованы основные электродинамические параметры резонатора на двух низших частотах-противофазной ( $\pi$ ) и синфазной ( $2\pi$ ) моде. Исследовано влияние геометрических размеров ПРПР на электродинамические параметры резонатора. Особенно сильное влияние геометрии ПРПР отмечено на характеристическое сопротивление ДФКР. Рассмотренный в статье ДФКР может быть использован в низковольтных многолучевых усилительно-генераторных приборах клистронного типа.

### Список литературы

1. Bearzatto C., Bres M., Faillon G. Advantages of Multiple Beam Klystrons // *Vakuum elektronik und Displays: Vortrage der ITG Fachtagung*. Garmisch-Partenkirchen, 4–5 May 1992. Garmisch-Partenkirchen: ITG, 1992. P. 4–32.
2. Multiple-beam klystron amplifiers: Performance parameters and development trends / A. N. Korolyov, E. A. Gelvich, Y. V. Zhary, A. D. Zakurdayev, V. I. Poognin // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2004. Vol. 32, № 3. P. 1109–1118. doi: 10.1109/TPS.2004.828807
3. 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, № 5. P. 1049–1053. doi: 10.1109/TED.2007.893196
4. 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. P. 1153–1155. doi: 10.1109/PAC.2003.1289636
5. Xu Y., Seviour R. Design of Photonic Crystal Klystrons // *Proc. of the 1st Intern. Particle Accelerator Conf. (IPAC 2010)*, Kyoto, 23–28 May 2010. P. 4002–4004.
6. 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].
7. D. W. Astuti and M. Alaydrus, “A Bandpass Filter Based on Rectangular Open Loop Resonators at 2.45 GHz,” in *IEEE International Conference on Instrument, Communications, Information Technology and Biomedical Engineering*, 2013, no. 1, pp. 147–151.