

**Исследование двухмодового режима работы двухззорных
фотонно-кристаллических резонансных систем, выполненных на печатной плате
с фрактальными элементами "остров Минковского"**

В. А. Царев, А. Ю. Мирошниченко✉, А. В. Гнусарев, Н. А. Акафьева

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

✉ alexm2005@list.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время проявляется значительный интерес к разработке новых усилителей и генераторов Ку- и К-диапазонов (12...27 ГГц) для применения в бортовой аппаратуре. Одним из претендентов на элементную базу таких устройств могут стать низковольтные многолучевые клистроны (НМЛК). Для НМЛК, работающих в сантиметровом и миллиметровом диапазонах, возникают серьезные проблемы, связанные с необходимостью подавления паразитных видов колебаний. Один из путей решения этих проблем – применение в НМЛК двухззорных фотонно-кристаллических резонаторов (ДФКР). Еще одно перспективное направление улучшения характеристик таких резонаторов – применение резонансных отрезков полосковых линий с фрактальными элементами. При этом полосковые линии размещаются на диэлектрической подложке в пространстве взаимодействия. Такие резонаторы могут получить также новые, полезные для клистронов свойства (повышение характеристического сопротивления, подавление спектра нежелательных частот, уменьшение массы и габаритов).

Цель работы. Определение оптимального комплекса электродинамических и электронных параметров двухззорных фотонно-кристаллических резонансных систем с фрактальными элементами "остров Минковского" при работе в составе резонаторной системы НМЛК, возбуждаемой на π - и 2π -видах колебаний.

Материалы и методы. Для расчета электродинамических параметров резонаторов использовался метод конечных разностей во временной области. Для вычисления электронных параметров, таких, как электронная проводимость G_e / G_0 и коэффициент связи M , использовался известный метод Вессель-Берга.

Результаты. Исследованы основные электродинамические параметры резонатора – собственная добротность, резонансная частота и характеристическое сопротивление. Рассчитаны электронные параметры резонатора, коэффициент связи с электронным потоком и относительная электронная проводимость на π - и 2π -видах колебаний. Исследованы 3 варианта резонатора с нулевой, первой и второй итерациями фрактального элемента, амплитудно-частотные характеристики резонатора при изменении шага фотонно-кристаллической решетки. Дана оценка степени неоднородности высокочастотного поля в пространствах взаимодействия резонатора. Определены условия работы одновременно на двух видах колебаний без самовозбуждения.

Заключение. Результаты могут найти применение при разработке резонаторных систем для приборов клистронного типа сантиметрового и миллиметрового диапазонов.

Ключевые слова: низковольтный многолучевой клистрон, фотонно-кристаллический двухззорный резонатор, полосковая линия, резонансная частота, характеристическое сопротивление, фрактальный элемент "остров Минковского"

Для цитирования: Исследование двухмодового режима работы двухззорных фотонно-кристаллических резонансных систем, выполненных на печатной плате с фрактальными элементами "остров Минковского" / В. А. Царев, А. Ю. Мирошниченко, А. В. Гнусарев, Н. А. Акафьева // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 5. С. 80–88. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-5-80-88

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00611\21.

Статья поступила в редакцию 08.07.2021; принята к публикации после рецензирования 21.09.2021; опубликована онлайн 29.11.2021

© Царев В. А., Мирошниченко А. Ю., Гнусарев А. В., Акафьева Н. А., 2021



Investigation of the Two-Mode Regime of Two-Gap Photonic-Crystal Resonance Systems Produced on a Printed Circuit Board with Fractal Elements "Minkowski Island"

Vladislav A. Tsarev, Alexey Yu. Miroshnichenko✉, Andrey V. Gnusarev, Natalia A. Akafyeva

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

✉ alexm2005@list.ru

Abstract

Introduction. The development of new amplifiers and generators of the Ku- and K-bands (12...27 GHz) for use in onboard equipment is increasingly attracting research interest. Low-voltage multi-beam klystrons (LMBK) can be a promising element base for such devices. Serious problems are associated with the need to suppress parasitic modes of oscillations in NMLK operating in the centimeter and millimeter range. A possible solution is to use double-gap photonic-crystal resonators (DPCR) in LMBK. Another promising direction for improving the characteristics of such resonators is to use resonant segments of strip lines with fractal elements. In this case, the strip lines are placed on a dielectric substrate in the interaction space. Such resonators exhibit new properties that are useful for klystrons (an increase in characteristic impedance, suppression of the spectrum of unwanted frequencies, a reduction in mass and dimensions).

Aim. Determination of an optimal set of electrodynamic and electronic parameters of double-gap photonic-crystal resonance systems with fractal elements "Minkowski Island" when operated as part of the LMBK resonator system, excited on π - and 2π -modes of oscillation.

Materials and methods. To calculate the electrodynamic parameters of resonators, the method of finite differences in the time domain was used. The well-known Wessel-Berg method was used to calculate electronic parameters, such as the G_e / G_0 electronic conductivity and the coupling coefficient M .

Results. The main electrodynamic parameters of the resonator – Q -factor, resonant frequency and characteristic impedance – were investigated. The electronic parameters of the resonator, the coefficient of coupling with the electron beam, and the relative electronic conductivity for π - and 2π -modes of oscillations were calculated. In this case, three variants of the resonator with zero, first and second iterations of the fractal element were investigated. The amplitude-frequency characteristics of the resonator were investigated with a change in the pitch of the photonic crystal lattice. An estimation of the inhomogeneity of the high-frequency field in the interaction spaces of the resonator was carried out. Operational conditions were determined simultaneously for two types of oscillations without self-excitation.

Conclusion. The results can find application in the development of resonator systems for klystron-type devices in the centimeter and millimeter ranges.

Keywords: low-voltage multi-beam klystrons, photonic crystal double-gap resonator, strip line, resonant frequency, characteristic impedance, "Minkowski Island" fractal

For citation: Tsarev V. A., Miroshnichenko A. Yu., Gnusarev A. V., Akafyeva N. A. Investigation of the Two-Mode Regime of Two-Gap Photonic-Crystal Resonance Systems Produced on a Printed Circuit Board with Fractal Elements "Minkowski Island". Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 5, pp. 80–88. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-5-80-88

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Financing source. The research was supported by the Russian Fund for Basic Research, Project no. 19-07-00611\21.

Submitted 08.07.2021; accepted 21.09.2021; published online 29.11.2021

Введение. В настоящее время проявляется значительный интерес к разработке многолучевых низковольтных усилителей Ку- и К-диапазонов с выходной мощностью около нескольких сотен ватт.

Такие приборы могут применяться в бортовой аппаратуре радиоэлектронных систем воздушного, морского и наземного базирования [1, 2]. Одним из претендентов среди СВЧ-приборов для применения

Исследование двухмодового режима работы двухзонарных фотонно-кристаллических резонансных систем, выполненных на печатной плате с фрактальными элементами "остров Минковского"
Investigation of the Two-Mode Regime of Two-Gap Photonic-Crystal Resonance Systems Produced on a Printed Circuit Board with Fractal Elements "Minkowski Island"

в этой аппаратуре являются низковольтные многолучевые клистроны (НМЛК), позволяющие удовлетворить строгим требованиям по комплексу электрических и массогабаритных характеристик [3–6]. Важным требованием к клистронным усилителям является широкая полоса усиливаемых частот. Один из путей расширения полосы усиления НМЛК – применение двухззорных резонаторов.

Однако при создании НМЛК с двухззорными резонаторами, работающими в верхней части сантиметрового и миллиметрового диапазонов, возникают серьезные проблемы, связанные с малыми размерами таких резонаторных систем. Из-за возрастания емкости уменьшаются собственная добротность резонаторов Q_0 и характеристическое сопротивление ρ . Затрудняется изготовление таких резонансных систем. Усложняется спектр резонансных частот и возникает проблема подавления паразитных (высших типов) колебаний.

В связи с этим в последние годы внимание разработчиков клистронов привлекают так называемые фотонно-кристаллические резонаторы (ФКР), в зарубежной литературе описываемые как Photonic Band Gaps structures (PBG) [7–12], позволяющие в значительной мере устранить или свести к минимуму эти недостатки. Особенно целесообразно применение таких принципов построения резонаторных систем при разработке малогабаритных НМЛК с двухззорными фотонно-кристаллическими резонаторами (ДФКР), содержащими ре-

зонансные элементы с фрактальными включениями, выполненными на диэлектрических подложках. Одним из распространенных фрактальных элементов в таких системах является фрактал "остров Минковского" ("Minkowski Island" fractal) [13–16]. Следует отметить, что подобные фрактальные элементы широко применяются при разработке миниатюрных антенн и фильтров.

Использование НМЛК с двухззорными резонаторами и фрактальными резонансными элементами, расположенными на диэлектрической подложке, позволит упростить изготовление таких резонаторов и обеспечить возможность управления спектром нежелательных (паразитных) колебаний. При этом возможно создание резонаторов, возбуждаемых на кратных частотах, соответствующих π (противофазное возбуждение)- и 2π (синфазное возбуждение)-видам колебаний. Представленная работа продолжает цикл исследований ДФКР с различными фрактальными элементами [17].

Цель исследований, описываемых в настоящей статье, – изучение основных электродинамических и электронных параметров ДФКР с фрактальными элементами "остров Минковского" ("Minkowski Island" fractal) применительно к использованию таких резонансных систем в НМЛК, работающих в Ku- и K-диапазонах.

Конструкция резонатора. Схематическое изображение резонатора показано на рис. 1.

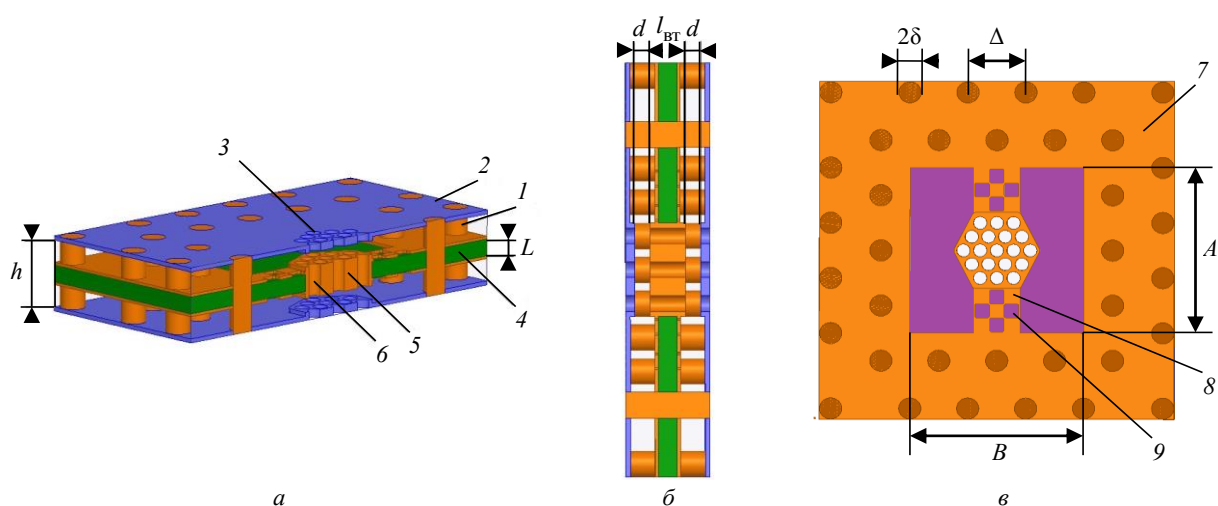


Рис. 1. ДФКР с фрактальным элементом "остров Минковского": а – общий вид; б – поперечное сечение резонатора; в – керамическая подложка. Геометрические размеры резонатора: $A = 7.8$ мм; $B = 7.8$ мм; $h = 2.8$ мм; $l_{BT} = 1.3$ мм; $L = 0.7$ мм; $d = 0.58$ мм; $a = 0.3$ мм; $\delta = 0.5$ мм; $\Delta = 2.5$ мм

Fig. 1. The design of the DPCR: а – general view of the resonator; б – cross section of the resonator; в – ceramic substrate. The resonant system has the following dimensions: $A = 7.8$ мм; $B = 7.8$ мм; $h = 2.8$ мм; $l_{BT} = 1.3$ мм; $L = 0.7$ мм; $d = 0.58$ мм; $a = 0.3$ мм; $\delta = 0.5$ мм; $\Delta = 2.5$ мм

Основу резонатора составляет фотонно-кристаллическая решетка из металлических стержней 1 круглой формы с радиусом стержней δ и шагом Δ , образующая дефект фотонно-кристаллической решетки, который имеет форму прямоугольника с размерами A и B . В центре этого дефекта расположен центральный электрод 5 с 19 отверстиями для пролета электронных лучей. В поперечном сечении фотонно-кристаллическая решетка ограничена боковыми пластинами 2. Для прохождения электронного потока в центральном электроде выполнены отверстия 6. Такие же отверстия 3 выполнены и в боковых пластинах резонатора. По аналогии с [18] центральный электрод размещен на алмазной диэлектрической подложке 4 ($\varepsilon = 5.7$). Следует отметить, что такая технология изготовления электродинамических систем в настоящее время широко применяется при создании лампы бегущей волны W -диапазона. Центральный электрод соединен двумя отрезками полосковой линии 8 с экранными заземляющими проводниками 7. Внутри каждого из этих проводников имеется фрактальное включение типа "остров Минковского" 9, вид которого определяется номером итерации.

Результаты расчета. Параметры резонатора определялись с помощью разработанной авторами трехмерной программы расчета многозазорных резонаторов "REZON" [19]. Достоверность расчетов основных электродинамических параметров (F, Q_0, ρ) была подтверждена сравнением с известными программами трехмерного моделирования.

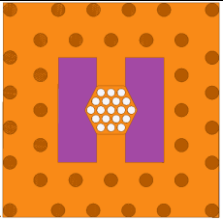
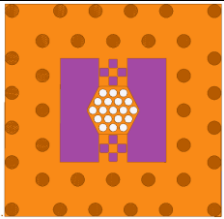
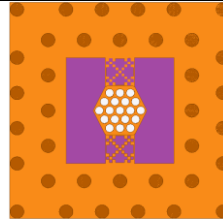
Исследовались 2 типа мод, соответствующих противофазному и синфазному ВЧ-напряжениям на зазорах резонатора. Выбор этих резонансных мод определялся тем, что эффективность взаимодействия высокочастотных полей с электронным потоком на высших модах минимальна.

Результаты моделирования представлены в таблице и на рис. 2–4. Из этих результатов видно, что резонансные частоты (как π -, так и 2π -видов колебаний) при увеличении номера итерации фрактального элемента уменьшаются. При этом характеристическое сопротивление на обеих модах имеет максимальное значение при первой итерации фрактального элемента. Можно также отметить, что собственная добротность имеет наибольшее значение при нулевой итерации фрактального элемента как на π -, так и на 2π -мод.

Амплитудно-частотные характеристики резонатора (АЧХ) для π - и 2π -видов колебаний представлены на рис. 2. При расчете АЧХ порты были установлены в центральной части боковых пластин. При этом эффективно возбуждаются моды, соответствующие продольной составляющей ВЧ-поля в зазорах резонатора. Повышение номера итерации фрактального элемента приводит к понижению резонансной частоты. При этом уход частоты для π -моды для резонатора с фракталом первой итерации составляет около 148 МГц, а для резонатора с фракталом второй итерации – 102 МГц. Для синфазной моды (2π) влияние номера итерации фрактального элемента на частоту менее заметно. Разница частот между нулевой и первой итерациями составляет 39 МГц, а между первой и второй – 61 МГц.

Результаты моделирования резонатора

Resonator simulation results

Итерация фрактала	0	1	2
Диэлектрическая подложка с полосковыми элементами			
Параметры резонатора	F , ГГц	Q_0	ρ , Ом
Противофазная мода (π)	11.6140	992	86.3
Синфазная мода (2π)	17.2461	1479	66.9

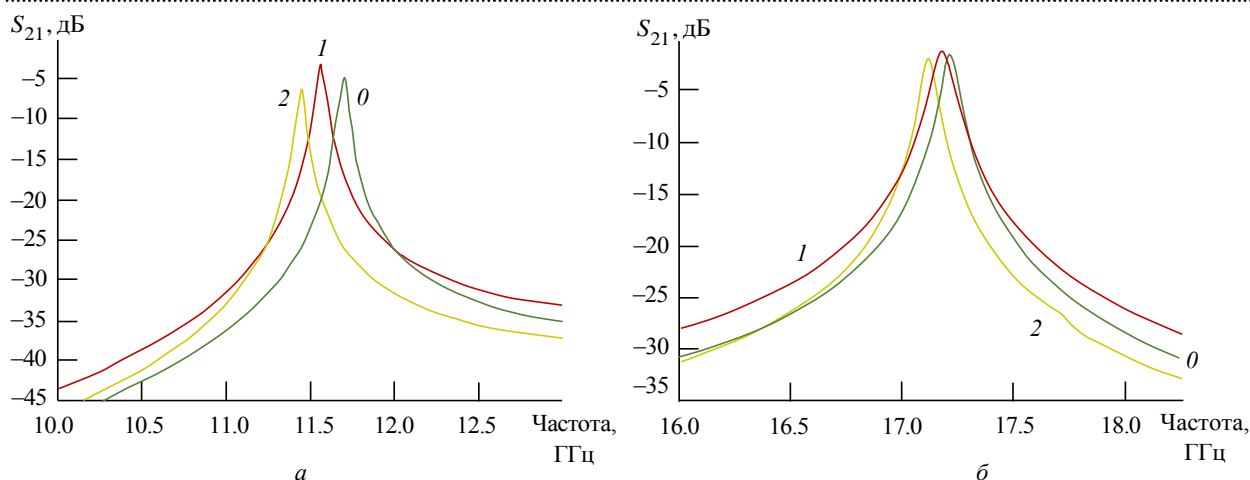


Рис. 2. Рассчитанные S -параметры резонатора: a – π -вид колебаний; b – 2π -вид колебаний; 0 – нулевая итерация; 1 – первая итерация; 2 – вторая итерация

Fig. 2. Calculated S -parameters of the resonator: a – π -type of oscillations; b – 2π -type of oscillations; 0 – zero iteration; 1 – first iteration; 2 – second iteration

Результаты исследования поведения спектра частот резонатора в зависимости от шага фотонно-кристаллической решетки приведены на рис. 3. Увеличение шага фотонно-кристаллической решетки приводит к росту частоты как для π -, так и для 2π -моды. При увеличении δ/Δ от 0.12 до 0.32 для π -вида колебаний изменение частоты составляет 690 МГц. Изменение частоты для синфазной (2π -моды) при тех же параметрах δ/Δ более значительное – 2.4 ГГц.

При этом можно наблюдать селекцию или подавление высших типов колебаний при увеличении соотношения δ/Δ . Например, при $\delta/\Delta = 0.32$ среди высших типов до 28 ГГц остается только частота 23.4 ГГц. Это можно объяснить тем, что при

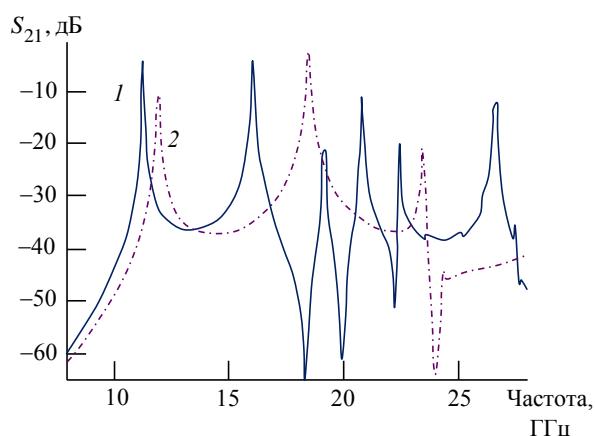


Рис. 3. АЧХ резонатора в зависимости от шага фотонно-кристаллической решетки: 1 – $\delta/\Delta = 0.12$; 2 – $\delta/\Delta = 0.32$

Fig. 3. Frequency response of the resonator depending on the step of the photonic crystal lattice: 1 – $\delta/\Delta = 0.12$; 2 – $\delta/\Delta = 0.32$

наличии в ФКР дефекта волны, попадающие в запрещенную зону, смогут распространяться в дефекте, а стенки фотонно-кристаллической решетки будут являться для них идеальными отражателями. Использование ФКР позволяет обеспечить селекцию колебаний, так как подбором шага δ/Δ фотонно-кристаллической решетки можно добиться, чтобы в область запрещенной зоны не попадали частоты паразитных мод.

Рассмотрим результаты исследования неравномерности распределения высокочастотного электрического поля для различных каналов многолучевого резонатора в поперечном сечении центрального электрода по двум направлениям. На рис. 4, a представлено распределение относительного электрического высокочастотного поля в каналах резонатора в поперечном направлении центрального электрода по длине w_1 . Максимальная амплитуда высокочастотного электрического поля для π -моды наблюдается в крайних каналах, минимальная – в центральном канале. При этом неравномерность поля 6 %. Для 2π -моды максимум поля наблюдается в центральном канале, минимум – в крайних, неравномерность поля около 6.5 %. На рис. 4, b приведены результаты расчета поля по длине w_2 , при этом для противофазной моды неравномерность поля 7 %, для синфазной моды – 9 %. В этом случае для обеих мод (π и 2π) максимальное значение амплитуды высокочастотного электрического поля наблюдается в центральном канале, а минимальное – в крайних каналах.

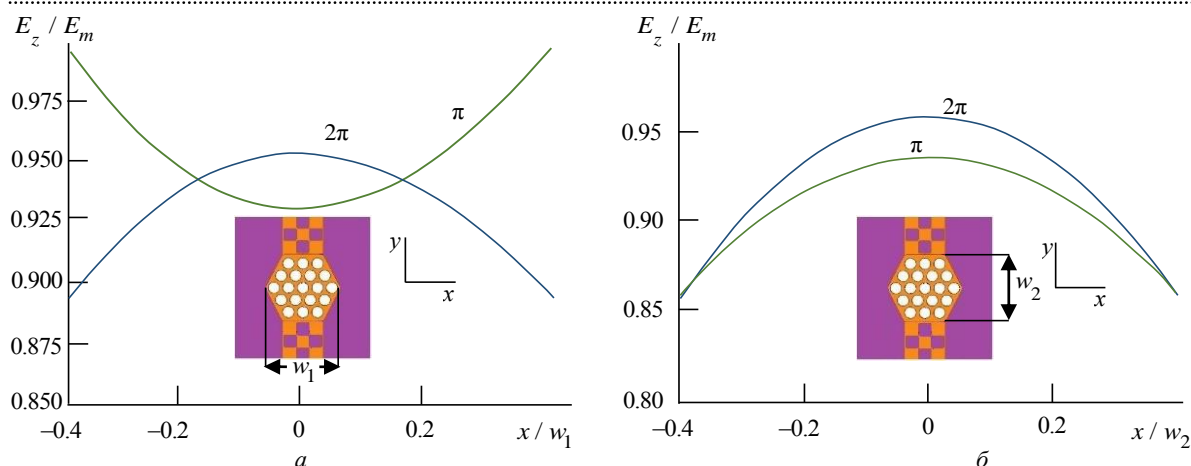


Рис. 4. Распределение продольной компоненты высокочастотного поля для π - и 2π -колебаний:

a – по направлению w_1 ; b – по направлению w_2

Fig. 4. Distribution of the longitudinal component of the high-frequency field for π - and 2π -oscillations:

a – in the w_1 direction; b – in the direction w_2

Рассчитаны также электронные параметры взаимодействия, в частности M – коэффициент связи и относительная электронная проводимость G_e / G_0 . На рис. 5 приведены результаты расчета основных электронных параметров многослойного клистрона с исследуемым резонатором.

Показано, что при работе одновременно на двух модах можно обеспечить режим без самовозбуждения при ускоряющем напряжении 2.8...3.1 кВ (на рис. 5 диапазон выделен синим цветом). С другой стороны, при выборе ускоряющего напряжения 4...5 кВ обеспечивается устойчивое самовозбуждение прибора при работе резонаторов на синфазном виде колебаний (на рис. 5

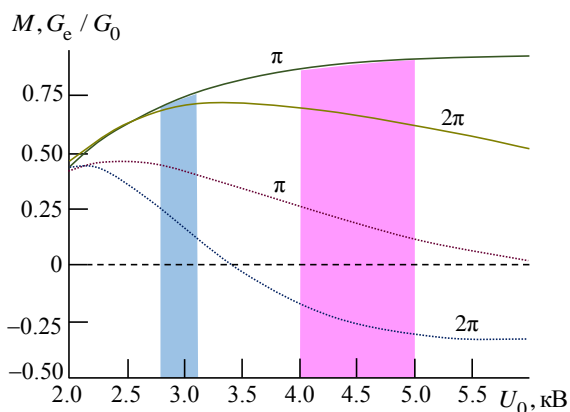


Рис. 5. Электронные параметры взаимодействия: сплошная линия – коэффициент связи M ; пунктирная линия – относительная электронная проводимость G_e / G_0

Fig. 5. Electronic interaction parameters: solid line – coupling coefficient M ; dotted line – relative electronic conductivity G_e / G_0

диапазон выделен розовым цветом). Этот режим может быть полезен при создании генераторов или умножителей частоты, работающих в Ку- и К-диапазонах.

Закключение. В статье представлен двухзазорный фотонно-кристаллический резонатор, выполненный на основе печатной платы с резонансной системой, содержащей фрактальный элемент "остров Минковского" трех итераций. Получены результаты трехмерного электромагнитного моделирования такого резонатора при одновременном возбуждении на π - и 2π -видах колебаний. Рассчитаны параметры электронного взаимодействия на этих модах в зависимости от значения ускоряющего напряжения. Проанализировано распределение высокочастотного электрического поля в зазорах резонатора. Исследовано поведение спектра частот резонатора в зависимости от шага фотонно-кристаллической решетки. Исходя из полученных результатов, учитывая увеличение характеристического сопротивления π -вида примерно на 10 %, для усилительного режима наиболее предпочтителен вариант резонатора, имеющий фрактальный элемент первой итерации на частоте π -вида колебаний. Для генераторов и умножителей частоты, работающих в Ку- и К-диапазонах, целесообразно использовать высоковольтный режим работы, обеспечивающий самовозбуждение прибора при работе резонаторов на 2π -видах колебаний.

Полученные результаты могут найти применение при разработке новых типов резонансных систем НМЛК сантиметрового и миллиметрового диапазонов.

Авторский вклад

Царев Владислав Алексеевич – руководство работой, постановка задачи и участие в обсуждении результатов.

Мирошниченко Алексей Юрьевич – проведение компьютерного моделирования, подготовка текста статьи и участие в обсуждении результатов.

Гнусарев Андрей Владимирович – проведение компьютерного моделирования.

Акафьева Наталья Александровна – подготовка текста статьи, участие в обсуждении результатов.

Author's contribution

Vladislav A. Tsarev, management of the work, statement of the problem and discussion of the results.

Alexey Yu. Miroshnichenko, computer simulation, preparation of the paper text and discussion of the results.

Andrey V. Gnusarev, computer simulation.

Natalia A. Akafyeva, preparation of the paper text and discussion of the results.

Список литературы

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. 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

3. 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.

4. 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

5. 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.

6. S-band multibeam klystron with bandwidth of 10 % / Y. Ding, B. Shen, S. Shi, J. Cao // IEEE Transactions Electron Devices. 2005. Vol. 52, № 5. P. 889–894. doi: 10.1109/TED.2005.845796

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. P. 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. P. 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. P. 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, № 10. P. 2547–2551. doi: 10.1002/mop.30767

11. Simulation and Measurement of Properties of Metallic Photonic Crystal Point-Defect-Cavities with a Centrally-Loaded Rod / Chen Chun-Ping, Xie Chenglong, Anada Tetsuo, Zhang Zejun // IEICE Transactions on Electronics. 2018. Vol. E101–C, № 1. P. 91–95. doi: 10.1587/transele.E101.C.91

12. Study of Hybrid Photonic Band Gap Resonators for Particle Accelerators / M. R. Masullo, A. Andreone, E. Di Gennaro, S. Albanese, F. Francomacaro, M. Pannillo, V. G. Vaccaro, G. Lamura // Microwave and Optical Technology Lett. 2006. Vol. 48, № 12. P. 2486–2491. doi: 10.1002/mop.22016

13. Miniaturized dual-mode resonators with Minkowski-Island-based fractal patch for Wlan Dual-Band systems / J. Ch. Liu, H. H. Liu, K. D. Yeh, Ch. Y. Liu, B. H. Zeng, Ch. Ch. Chen // Progress In Electromagnetics Research C. 2012. Vol. 26. P. 229–243. doi: 10.2528/PIERC11111502

14. Luo Q., Salgado H. M., Pereira J. R. Fractal Monopole Antenna Design Using Minkowski Island Geometry // IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp., North Charleston, 1–5 June 2009. North Charleston: IEEE, 2009. P. 1–4. doi: 10.1109/APS.2009.5172157

15. Thanh Nghia Cao, Wojciech Jan Krzysztofik. Frequency tuned Minkowski island fractals RHCP antenna optimised for three-band GPS receiver // IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2019. Vol. 13, № 14. P. 2501–2508. doi: 10.1049/iet-map.2019.0072

16. Hota S., Mishra G. P., Mangaraj B. B. Design and Performance Study of Modified Minkowski Island Fractal Patch Antenna for Various Wireless Communications // Intern. Conf. on Inventive Computing and Informatics (ICICI 2017),

Coimbatore, 23–24 Nov. 2017. Coimbatore: IEEE, 2017. P. 849–855. doi: 10.1109/ICICI.2017.8365256

17. Мирошниченко А. Ю., Царев В. А., Акафьева Н. А. Новые типы двухззорных фотонно-кристаллических резонаторов, обеспечивающие улучшенные выходные параметры миниатюрных многолучевых клистронов коротковолновой части микроволнового диапазона // Радиотехника. 2019. Т. 83, № 8 (12). С. 35–41. doi: 10.18127/j00338486-201908(12)-05

18. Проектирование и исследование технологии изготовления перспективной замедляющей системы для

ЛБВ W-диапазона / Е. А. Ракова, А. В. Галдецкий, Г. Ф. Корепин, В. А. Смирнов, Н. П. Зубков, Н. А. Лябин, В. С. Парамонов, А. В. Дерябкин, Е. Н. Куликов, М. П. Духновский // Материалы V Всерос. науч.-техн. конф. "Электроника и микроэлектроника СВЧ", СПб., 30 мая – 2 июня 2016. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2016. С. 148–152. URL: https://mwelectronics.etu.ru/assets/files/2016/oral/03_17.pdf (дата обращения 14.09.2021)

19. Свид. об офиц. регистрации программы для ЭВМ 2011611748 RU. REZON / В. Ю. Мучкаев, В. А. Царев. Оpubл. 24.02.2011.

Информация об авторах

Царев Владислав Алексеевич – доктор технических наук (1996), профессор, профессор кафедры "Электронные приборы и устройства". Автор более 200 научных работ, в том числе 44 изобретений. Сфера научных интересов – вакуумная СВЧ-электроника, электродинамические системы микроволновых приборов.

Адрес: Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., ул. Политехническая, д. 77, Саратов, 410054, Россия

E-mail: tsarev_va@mail.ru

Мирошниченко Алексей Юрьевич – доктор технических наук (2015), доцент, заведующий кафедрой "Электронные приборы и устройства". Автор 96 научных работ, восьми патентов. Сфера научных интересов – вакуумная СВЧ-электроника, электродинамические системы микроволновых приборов.

Адрес: Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., ул. Политехническая, д. 77, Саратов, 410054, Россия

E-mail: alexm2005@list.ru

Гнусарев Андрей Владимирович – аспирант кафедры "Электронные приборы и устройства". Автор пяти статей. Сфера научных интересов – вакуумная СВЧ-электроника, электродинамические системы микроволновых приборов.

Адрес: Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., ул. Политехническая, д. 77, Саратов, 410054, Россия

E-mail: 19953@bk.ru

Акафьева Наталья Александровна – кандидат технических наук (2012), доцент кафедры «Электронные приборы и устройства». Автор 47 научных работ, четырех патентов. Сфера научных интересов – многолучевые СВЧ-генераторы и усилители клистронного типа, многоззорные резонаторы.

Адрес: Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., ул. Политехническая, д. 77, Саратов, 410054, Россия

E-mail: akafieva_na@mail.ru

References

1. Shcherbakov S. V. Development of microwave electronics within the framework of government programs. Materials of the VI Scientific Conf. "Microwave electronics and microelectronics". SPb, Russia, 29 May – 1 June 2017. SPb, Izd-vo SPbGETU "LETI", 2017, pp. 15–23. Available at: <https://mwelectronics.etu.ru/assets/files/2017/01.pdf> (accessed 26.05.2021). (In Russ.)

2. 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

3. Bearzatto C., Bres M., Faillon G. Advantages of Multiple Beam Klystrons. Vakuum elektronik und Displays: Vortrage der ITG Fachtagung. Garmisch-Partenkirchen, Germany, 4–5 May 1992. Garmisch-Partenkirchen, ITG, 1992, pp. 4–32.

4. 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

5. 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.

6. 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

7. Smirnov A. V., Newsham D., Yu D. PBG Cavities for Single-Beam and Multi-Beam Electron Devices. Proceedings of Particle Accelerator Conf. Portland, Oregon, USA, 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. Proceedings of the 1st Intern. Particle Accelerator Conf. (IPAC 2010). Kyoto, Japan, 23–28 May 2010. Kyoto, JACoW, 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., Di Gennaro 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, no. 12, pp. 2486–2491. doi: 10.1002/mop.22016
13. Liu J. Ch., Liu H. H., Yeh K. D., Liu Ch. Y., Zeng B. H., Chen Ch. Ch. Miniaturized dual-mode resonators with Minkowski-Island-based fractal patch for WLAN Dual-Band systems. Progress in Electromagnetics Research C. 2012, vol. 26, pp. 229–243. doi: 10.2528/PIERC11111502
14. Luo Q., Salgado H. M., Pereira J. R. Fractal Monopole Antenna Design Using Minkowski Island Geometry. IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp. North Charleston, USA, 1–5 June 2009. North Charleston, IEEE, 2009, pp. 1–4. doi: 10.1109/APS.2009.5172157
15. Thanh Nghia Cao, Wojciech Jan Krzysztofik. Frequency tuned Minkowski island fractals RHCP antenna optimised for three-band GPS receiver. IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2019, vol. 13, no. 14, pp. 2501–2508. doi: 10.1049/iet-map.2019.0072
16. Hota S., Mishra G. P., Mangaraj B. B. Design and Performance Study of Modified Minkowski Island Fractal Patch Antenna for Various Wireless Communications. Intern. Conf. on Inventive Computing and Informatics (ICICI 2017). Coimbatore, India, 23–24 Nov. 2017. Coimbatore, IEEE, 2017, pp. 849–855. doi: 10.1109/ICICI.2017.8365256
17. Miroshnichenko A. Yu., Tsarev V. A., Akafyeva N. A. The new types of two-gap PBG resonators providing the improved output parameters of small-sized MBK for a short-wave part of a microwave range. J. Radioengineering. 2019, vol. 83, no. 8 (12), pp. 35–41. doi: 10.18127/j00338486-201908(12)-05 (In Russ.)
18. Rakova E. A., Galdetskii A. V., Korepin G. F., Smirnov V. A., Zubkov N. P., Lyabin N. A., Paramonov V. S., Deryabkin A. V., Kulikov E. N., Dukhnovskii M. P. Design and research of the technology of manufacturing a promising retarding system for TWT W-band. Materials of the V Scientific Conf. "Microwave electronics and microelectronics", 30 May – 2 June 2016. SPb, *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2016, pp. 148–152. Available at: https://mwelectronics.etu.ru/assets/files/2016/oral/03_17.pdf (accessed 14.09.2021) (In Russ.)
19. Muchkayev V. Yu., Tsarev V. A. REZON. Certificate on official registration of the computer program no. 2011611748 of the RF from 24.02.2011 (In Russ.)

Information about the authors

Vladislav A. Tsarev, Dr Sci. (Eng.) (1996), Professor, Department Electronic Devices. More than 200 published scientific works, including 44 inventions. Area of scientific interests: vacuum microwave electronics, electrodynamic systems of microwave devices.

Address: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politechnicheskaya St., Saratov 410054, Russia
E-mail: tsarev_va@mail.ru

Alexey Yu. Miroshnichenko, Dr Sci. (Eng.) (2015), Associate Professor, Department "Electronic Devices". 96 published scientific works, including 8 inventions. Area of scientific interests: vacuum microwave electronics, electrodynamic systems of microwave devices.

Address: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politechnicheskaya St., Saratov 410054, Russia
E-mail: alexm2005@list.ru

Andrey V. Gnusarev, Postgraduate Student, Department Electronic Devices. 5 published scientific works. Area of scientific interests: vacuum microwave electronics, electrodynamic systems of microwave devices.

Address: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politechnicheskaya St., Saratov 410054, Russia
E-mail: 19953@bk.ru

Natalia A. Akafyeva, Cand. Sci. (Eng.) (2012), Department Electronic Devices. 47 published scientific works, 4 inventions. Area of scientific interests: multi-beam microwave klystron type generators and amplifiers, multi-gap resonators.

Address: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politechnicheskaya St., Saratov 410054, Russia
E-mail: akafieva_na@mail.ru