

Трехзазорный многочастотный резонатор для миниатюрных многолучевых клистронов

А. Мирошниченко, д. т. н.¹, М. Чернышев², Н. Акафьева, к. т. н.³

УДК 621.38 | ВАК 2.2.2

Исследовался трехзазорный, многолучевой, призматический клистронный резонатор с планарными полосковыми элементами на диэлектрической подложке. Получены результаты электродинамического моделирования, проведенного с использованием численного метода конечных элементов в частотной области. Резонатор может применяться в низковольтных пролетных многолучевых усилительных или генераторных клистронов.

Многолучевые клистроны (МЛК) получили широкое распространение в микроволновой технике, они обеспечивают высокую выходную мощность, широкий диапазон усиливаемых частот при сниженном, по сравнению с однолучевыми аналогами, ускоряющем напряжении и массогабаритных параметрах [1–5]. Наряду с этим получают дальнейшее развитие миниатюрные многолучевые клистроны (ММЛК), которые могут использоваться в качестве выходного каскада в передающих модулях для средств телекоммуникации с выходной мощностью от 400 до 1000 Вт в X-, Ku-, Ka-диапазонах [6, 7].

На выходные параметры и характеристики пролетного клистронов, такие как полоса усиливаемых частот, выходная мощность, коэффициент усиления, массогабаритные характеристики, существенное влияние оказывают конструкция и свойства резонансных систем.

Для эффективного взаимодействия с электронным потоком эквивалентное сопротивление резонатора $R_e = \rho Q_{\text{н}}$, где ρ – характеристическое сопротивление резонатора, $Q_{\text{н}}$ – его нагруженная добротность, должно быть сравнимо с сопротивлением электронного пучка на постоянном токе R_0 . Так как добротность Q ограничена шириной полосы пропускания, в верхней части сантиметрового и миллиметрового диапазоне необходимо применять резонаторы с большим значением ρ [8].

Теоретически характеристическое сопротивление резонатора пропорционально числу зазоров, однако на практике эта пропорциональность нарушается из-за энергии, накапливаемой в элементах связи высокочастотных зазоров. Кроме того, при увеличении числа зазоров

ухудшается разделение видов колебаний. Наиболее приемлемое решение в этом случае – использование двух- или трехзазорных резонаторов.

Кроме того, для получения новых свойств резонансных систем, в частности расширения частотного диапазона, увеличения характеристического сопротивления, уменьшения массогабаритных параметров, возможно применение в резонаторе планарных полосковых проводников, размещенных в корпусе резонатора на диэлектрической подложке. Планарные полосковые структуры на диэлектрических подложках в настоящее время активно применяются в вакуумной микроволновой электронике. Примером может служить работа [9], где представлен низковольтный генератор, работающий в миллиметровом диапазоне на базе лампы обратной волны с использованием ленточного электронного пучка и планарной встречно-штыревой замедляющей системы, выполненной на подложке из кварца. Для применения в таких резонансных системах могут быть полезны новые диэлектрические материалы из высокодобротной керамики с низкими потерями и относительной диэлектрической проницаемостью от 10 до 120, из которых изготавливают диэлектрические резонаторы (ДР) [10, 11].

Однако в таких материалах может проявляться температурная зависимость относительной диэлектрической проницаемости материала ($TK\epsilon_r$), что может привести к температурной зависимости резонансной частоты ДР. Этот недостаток может быть нивелирован за счет изменения диэлектрической проницаемости и геометрических размеров при взаимной компенсации температурных уходов частоты.

Еще одна проблема заключается в «сгущении» частотного спектра ДР. Однако и в этом случае, особенно на высших типах колебаний, есть положительный момент, связанный с большей локализацией поля внутри диэлектрического тела и уменьшением радиационных потерь.

¹ СГТУ им. Ю. А. Гагарина, доцент кафедры ЭПУ.

² СГТУ им. Ю. А. Гагарина, ст. преподаватель кафедры ЭПУ.

³ СГТУ им. Ю. А. Гагарина, доцент кафедры ЭПУ.

Несмотря на достаточно широкое использование СВЧ диэлектрических материалов в различных микроволновых устройствах, в резонансных системах приборов клистронного типа они практически не исследованы.

Цель исследований, представленных в настоящей работе, электродинамическое моделирование призматического трехазорного резонатора с полосковыми проводниками на диэлектрической подложке, а также оценка его возможного применения в многолучевых низковольтных клистронах.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕЗОНАТОРА

Исследуемый резонатор представлен на рис. 1. Объемный призматический корпус 1 закрыт с торцов боковыми крышками 2. Внутри призматического объемного корпуса расположены два центральных электрода 3 и два боковых электрода 4, между которыми расположены три высокочастотных зазора 5. Центральные электроды опираются

на три диэлектрических опорных элемента (подложки) 6, с двух сторон которых симметрично расположены планарные полосковые проводники 7. Диэлектрические подложки, на которых размещены планарные полосковые проводники, расположены под углом 120 градусов друг относительно друга в корпусе резонатора. Планарные полосковые проводники электрически соединены, с одной стороны, с центральными электродами, с другой стороны – они заземлены на корпус призматического резонатора. В результате образуется резонансная система, состоящая из индуктивной части планарных полосковых проводников, нагруженных на емкость высокочастотных зазоров, которая возбуждается как на противофазных, так и на синфазных типах колебаний. Кроме этого, в подобных резонаторах также присутствуют и объемные моды, частота которых определяется геометрическими размерами корпуса резонатора. Основные размеры резонатора представлены в табл. 1.

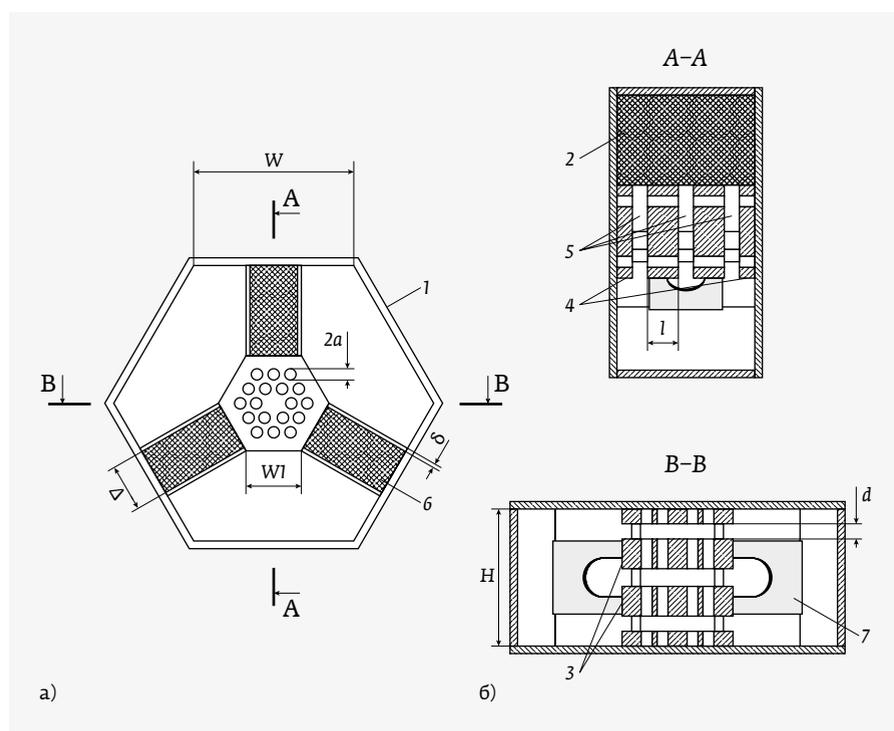


Рис. 1. Конструкция резонатора: а – вид сбоку на резонатор со снятой боковой крышкой; б – поперечное сечение резонатора

Таблица 1. Основные размеры резонатора

| H, мм | W, мм | w ₁ , мм | a, мм | d, мм | l, мм | Δ, мм | δ, мм |
|-------|-------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 9,6 | 10,4 | 3,6 | 0,35 | 1 | 2,2 | 1/3,2 | 0,2 |

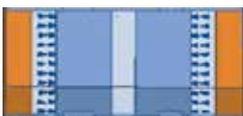
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Теоретическое исследование резонатора проводилось с использованием метода конечных элементов в частотной области. При исследовании резонатора рассматривались только те резонансные частоты, которые имели высокое характеристическое сопротивление, и высокочастотное поле которых было локализовано в зазорах резонатора.

Результаты моделирования представлены в табл. 2. Расчет электродинамических параметров производился в диапазоне до 20 ГГц для двух толщин диэлектрической подложки 1 и 3,2 мм, соответствующих условно «тонкой» и «толстой» подложке. Для всех мод были рассчитаны основные электродинамические параметры резонатора: резонансная частота, собственная добротность, характеристическое сопротивление. Также проведен анализ высокочастотных полей в зазорах.

По полученным результатам можно сделать следующие выводы. При увеличении толщины диэлектрика происходит уменьшение всех рассмотренных резонансных частот. При этом происходит «сгущение» трех основных рабочих мод – π , $3\pi/2$ и 2π .

Таблица 2. Результаты расчета электродинамических параметров

| № моды | Тип моды | Картина поля в зазорах резонатора | Частота, ГГц | Собственная добротность, Q | Характеристическое сопротивление, ρ |
|------------------------------------|----------|---|--------------|------------------------------|--|
| Толщина диэлектрика 1 мм (алмаз) | | | | | |
| 1 | π |  | 5,334 | 705 | 173 |
| 2 | $3\pi/2$ |  | 6,097 | 1426 | 118 |
| 3 | 2π |  | 8,028 | 2193 | 96 |
| 4 | $3\pi/2$ |  | 19,31 | 1661 | 12 |
| Толщина диэлектрика 3,2 мм (алмаз) | | | | | |
| 1 | π |  | 5,014 | 692 | 210 |
| 2 | $3\pi/2$ |  | 5,716 | 2044 | 92 |
| 3 | 2π |  | 6,847 | 3319 | 173 |
| 4 | $3\pi/2$ |  | 15,864 | 2967 | 15 |

При толщине диэлектрика 1 мм разнос частот между π - и $3\pi/2$ -модами составляет 0,763 ГГц, а при толщине 3,2 мм – 0,702 ГГц. Разнос частот между $3\pi/2$ - и 2π -модами составляет при толщине 1 мм 1,93 ГГц, а при толщине 3,2 мм – 1,13 ГГц.

Также можно отметить, что собственная добротность при увеличении толщины диэлектрика для

π -моды изменяется слабо, а для $3\pi/2$ - и 2π -мод возрастает на 43 и 51% соответственно. Для высшей $3\pi/2$ -моды увеличение добротности составляет 79%. Такую разницу можно объяснить локализацией высокочастотных полей, например, при основной π -мод ВЧ-поле сконцентрировано в основном в зазорах резонатора и слабо подвержено влиянию диэлектрика, а, например, 2π -мода является «объемной», поля которой расположены по всему объему резонатора.

Характеристическое сопротивление при увеличении толщины диэлектрика для π -моды возрастает на 21%, для 2π -моды – на 80%. Для $3\pi/2$ -моды характеристическое сопротивление уменьшается на 34%. Для высшей $3\pi/2$ -моды характеристическое сопротивление уменьшается на 25%. При этом для этой моды характеристическое сопротивление по абсолютному значению существенно меньше, чем на основных модах.

На рис. 2 представлены S-параметры для исследованных резонансных частот. Результаты получены для диэлектрических подложек толщиной 3,2 мм.

Проведено исследование распределения высокочастотного электрического поля вдоль пространства взаимодействия резонатора, результаты представлены на рис. 3, где E_z/E_m – относительная напряженность продольной компоненты высокочастотного электрического поля, E_m – максимальное значение поля для синфазного типа колебаний, H – высота резонатора. Показано, что наибольшая амплитуда высокочастотного электрического поля наблюдается на 2π -моды, с неравномерностью в зазорах не более 13%.

Для противофазной π -моды наблюдается наибольшая напряженность в центральном зазоре резонатора, неравномерность поля в зазорах достигает 45%. $3\pi/2$ -мода и высшая $3\pi/2$ -мода имеют амплитуду поля существенно ниже по сравнению с π - и 2π -модами при этом поле отсутствует в центральном зазоре резонатора и практически однородно в крайних зазорах.

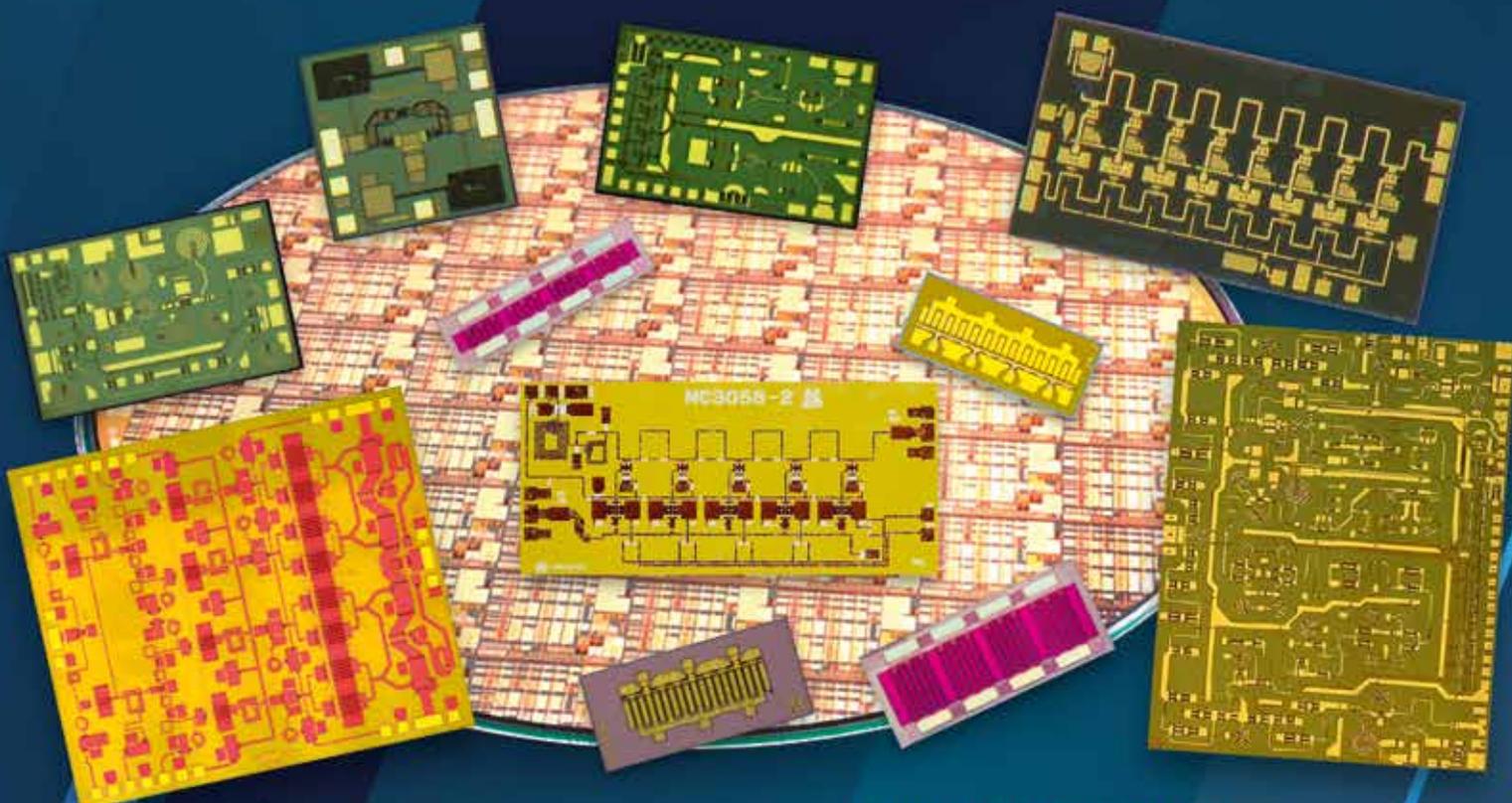


МИКРОВОЛНОВЫЕ
СИСТЕМЫ

ИНТЕЛЛЕКТ • КАЧЕСТВО НАДЕЖНОСТЬ

- ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО СВЧ GaAs И GaN ТРАНЗИСТОРОВ, МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ И МИКРОМОДУЛЕЙ
- СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА
- ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СВЧ МОДУЛЕЙ, МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ И БЛОКОВ РЭА
- НАИЛУЧШЕЕ СООТНОШЕНИЕ ЦЕНА / КАЧЕСТВО / СРОКИ

СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА СЕРТИФИЦИРОВАНА НА СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ ИСО9001



Область применения

- Широкополосная связь и телекоммуникации
- Контрольно-измерительные приборы
- Радиорелейная и спутниковая связь
- Специальная и космическая аппаратура
- Радиолинии «точка-точка», «точка-многоточка»

АО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»
Москва, Щёлковское шоссе, д. 5, стр. 1
Тел.: +7(499) 644-21-03
e-mail: mwsystems@mwsystems.ru
www.mwsystems.ru

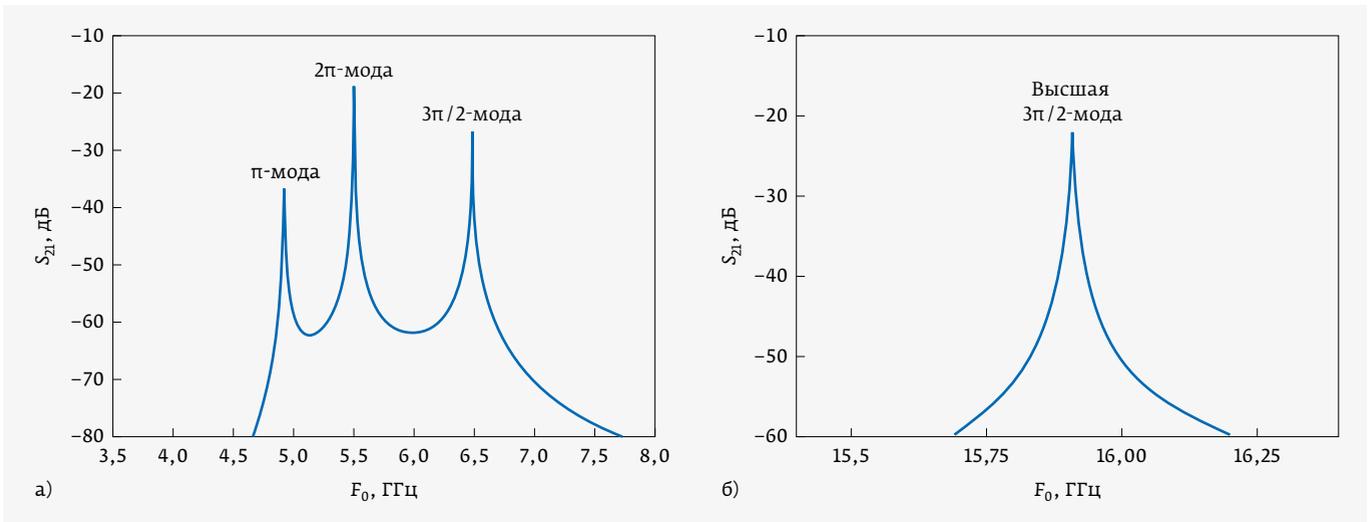


Рис. 2. Зависимость параметра S_{21} для исследованных резонансных частот

В работе исследован многочастотный режим работы резонатора и возможность настройки на кратные резонансные частоты. На рис. 4 представлены зависимости резонансных частот от длины элемента перестройки: F_0 для мод π , $3\pi/2$, 2π и $F_4/3$ для высшей моды $3\pi/2$ (F_0 и $F_4/3$ резонансные частоты на низших и высших гармониках). Для исследования режима перестройки частот резонатора производилось «закорачивание» полосковой линии 7 с помощью дополнительного полоскового элемента длиной $l_0 - l_1$ (см. рис. 4). В результате проведенных исследований по перестройке частот можно отметить, что наибольшей чувствительностью к изменению

длины элемента перестройки обладают π - и 2π -моды (814 и 588 МГц) соответственно. У $3\pi/2$ -моды и высшей $3\pi/2$ -моды такое изменение значительно меньше – 35 и 117 МГц соответственно.

Для возможного применения резонатора в приборах с умножением частоты был исследован режим работы на кратных резонансных частотах. При этом подбором длины элемента перестройки удалось получить кратность резонансных частот, равную трем для моды № 1 (π) и высшей моды № 4 ($3\pi/2$). Такой режим может быть реализован при длине перестраиваемого элемента ($l_0 - l_1 = 0,83$ мм) (см. рис. 4).

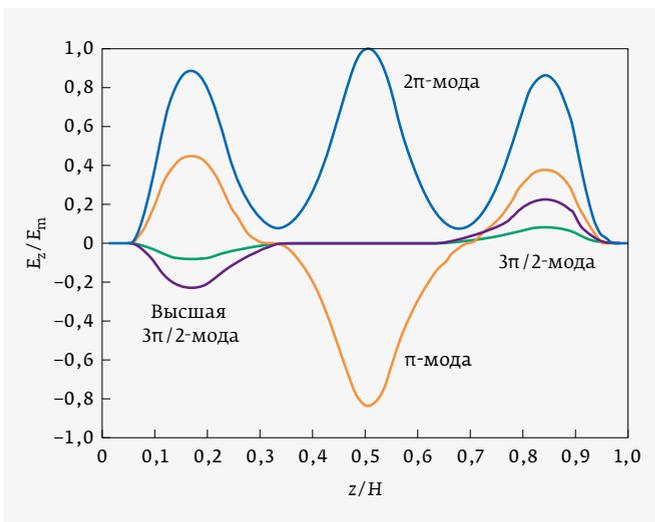


Рис. 3. Распределение высокочастотного магнитного поля в резонаторе вдоль пролетного канала

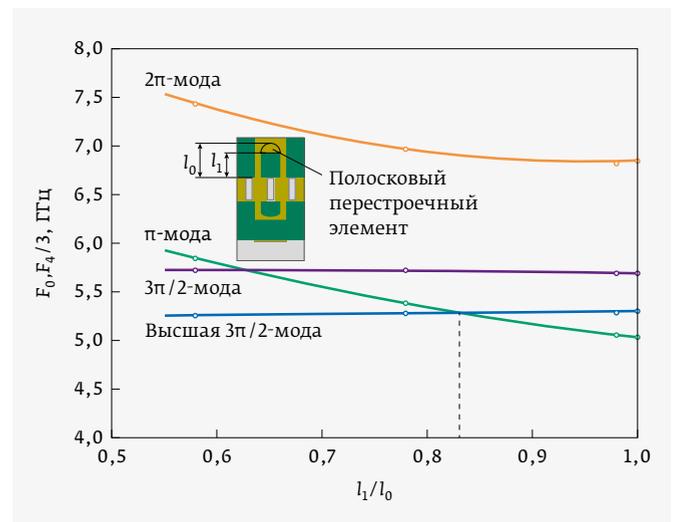


Рис. 4. Изменение резонансных частот резонатора в зависимости от длины элемента перестройки $l_0 - l_1$

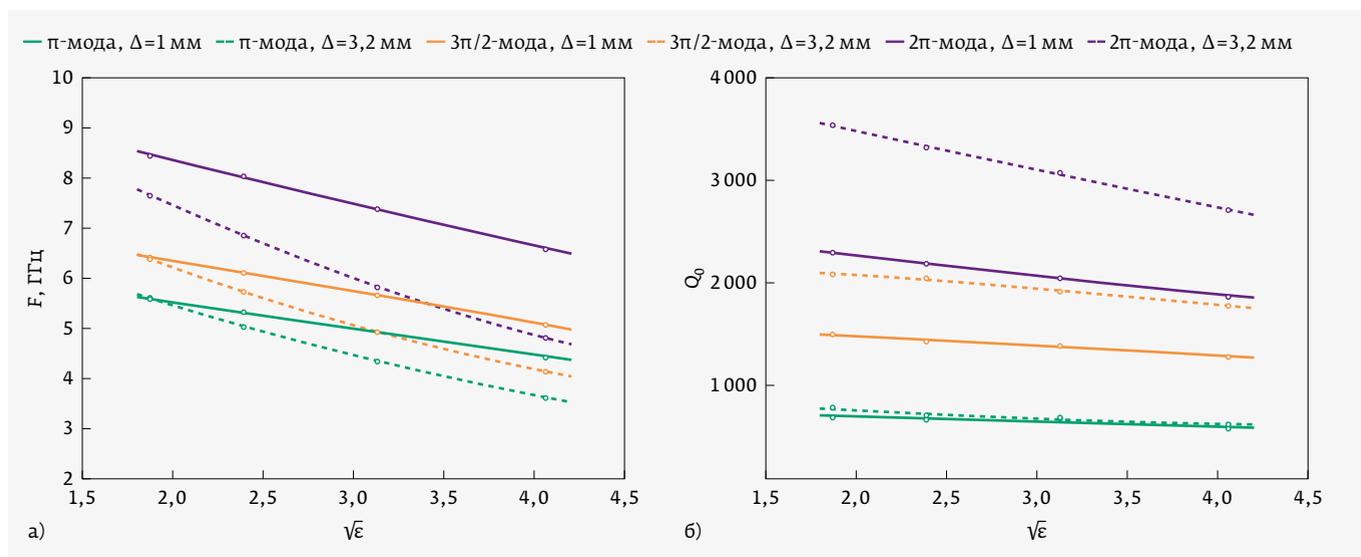


Рис. 5. Результаты исследований влияния диэлектрической проницаемости подложки на резонансную частоту (а) и собственную добротность (б)

ВЛИЯНИЯ НА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЗОНАТОРА ДИЭЛЕКТРИКОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Проведено исследование основных электродинамических параметров резонатора при различных значениях диэлектрической проницаемости диэлектрика подложки, на которых размещены полосковые линии. В частности, исследовалось поведение резонансных частот и собственной добротности. При этом значения диэлектрической проницаемости выбирались с учетом применения этих материалов в вакуумной микроволновой технике (алюмооксидная керамика, алмаз). Исследования проводились для диэлектрической подложки толщиной 1 и 3,2 мм. Результаты представлены на рис. 5.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы.

Общая тенденция для всех мод такова, что резонансные частоты уменьшаются при увеличении диэлектрической проницаемости подложки и увеличении толщины подложки. Для π - и $3\pi/2$ -мод при малых ϵ значения резонансных частот практически равны при разной толщине диэлектрика, далее при увеличении диэлектрической проницаемости для «толстого» диэлектрика уменьшение резонансной частоты происходит быстрее, чем для «тонкого» (разница частот на π -моду 798 МГц, на $3\pi/2$ -моду – 924 МГц). Для 2π -моды при малых значениях ϵ частоты при «толстом» и «тонком» диэлектрике не равны между собой (разница 788 МГц, которая увеличивается до 1770 МГц при $\sqrt{\epsilon}=4,06$).

Для собственной добротности наблюдается в целом уменьшение параметра при возрастании диэлектрической

проницаемости и увеличение при возрастании толщины диэлектрика, причем влияние на разные моды существенно отличается. Собственная добротность резонатора на π -моду меняется слабо при разных толщинах диэлектрика (максимальная разница на начальном участке, где $\Delta Q_0=91$). При этом на $3\pi/2$ - и 2π -модах наблюдается значительное расхождение характеристик при разных толщинах диэлектрика. Наибольшая разница между значениями добротности наблюдается при малых значениях ϵ , и составляет 580 на $3\pi/2$ -моду и 1253 на 2π -моду. При этом для 2π -моды значение добротности уменьшается больше при росте диэлектрической проницаемости по сравнению с π - и $3\pi/2$ -модами.

Исходя из полученных результатов исследований, можно заключить, что рассмотренный резонатор обладает многочастотным спектром колебаний, в котором в исследуемом диапазоне присутствуют моды: противофазная, синфазная и $3\pi/2$. Использование дополнительных резонансных элементов на диэлектрических подложках внутри объемного резонатора позволяет также получить ряд новых свойств, таких как увеличенное характеристическое сопротивление и добротность. Исследована возможность настройки резонатора на кратные резонансные частоты с кратностью, равной трем.

Рассмотренный в работе трехазорный, многоканальный, многочастотный резонатор может найти применение в низковольтных многолучевых приборах клистронного типа С-, Х-, Ku-диапазонов. Такие клистроны могут

быть перспективной электронной компонентной базой для создания миниатюрной телекоммуникационной радиоэлектронной аппаратуры, работающей в средневолновой и коротковолновой частях СВЧ-диапазона в системах космического применения и на подвижных объектах. Возможно также применение подобных резонаторов в умножителях частоты, работающих в двухчастотном режиме генерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Nusinovich G. S., Levush B., Abe D. K.** A review of the development of Multiple-beam Klystron and TWTs; Research report, Naval Research Laboratory, USA, March, 2003.
2. **Cai J. C., Syrathev I., Burt G.** Design Study of a High-Power Ka-Band High-Order-Mode Multibeam Klystron // IEEE transactions on electron devices. 2020. Vol. 67. No. 12.
3. **Teryaev V. E., Shchelkunov S. V., Hirshfield J. L.** Innovative Two-Stage Multibeam Klystron: Concept and Modeling // IEEE transactions on electron devices. 2020. Vol. 67. No. 7.
4. **Quangui Chao, Rui Zhang, Yong Wang, Xu Zhang.** Modeling and Design of a High-Efficiency Multibeam Klystron // IEEE transactions on electron devices. 2022. Т. 69. № 5. С. 2625–2630.
5. **Bin Shen, Yaogen Ding, Zhaochuan Zhang, Honghong Gu, Haibing Ding, Jing Cao, Caiying Wang, and Dongping Gao.** Research and Development of S-Band High Power Multibeam Klystron // IEEE transactions on electron devices. 2014. Vol. 61. No. 6.
6. **Korolev A. N., Zaitsev S. A., Pobedonostsev A. S., Rumjantsev S. A., Torbik V. M., Zakurdayev A. D., Sazonov B. V.** The Results of the Complex Investigation and Optimization of the Transmitting Modules, Using the Miniature Multibeam Klystrons and TWTs.
7. **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.
8. **Григорьев А. Д.** Терагерцевая электроника. М.: ФИЗМАЛИТ, 2020. 308 с.
9. **Ryskin N. M., Torgashov R. A., Benedik A. I.** Study of miniaturized low-voltage backward-wave oscillator with a planar slow-wave structure // Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2017. Vol. 25. Is. 5. PP. 35–46.
10. **Геворкян В., Кочемасов В.** Объемные диэлектрические резонаторы – основные типы, характеристики, производители // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2016. № 4 (00154). С. 62–76.
11. ВЧ и СВЧ керамические материалы и микроволновые элементы. Каталог продукции ООО «Керамика». СПб, 2004. 35 с.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена за два тома
2420 руб.

СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА В СИСТЕМАХ РАДИОЛОКАЦИИ И СВЯЗИ. ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ

Издание 3-е, исправленное. В 2-х книгах
Белов А. И., Мерданов М. К., Шведов С. В.

Впервые в отечественной научно-технической литературе в объеме одной книги детально рассмотрены теоретические основы, физические механизмы и принципы работы всех известных СВЧ-приборов и типовых устройств на их основе, методы расчета и конструирования, базовые технологические, схмотехнические и конструктивные особенности каждого класса СВЧ-приборов, а также наиболее распространенных технических решений радиоэлектронных систем на их основе – от РЛС и телекоммуникационных устройств различного назначения до СВЧ-оружия наземного и космического применения. Энциклопедия оформлена в двух книгах и содержит 18 глав.

Книга 1. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. — 782 с.,
ISBN 978-5-94836-605-0
Цена 1210 руб.

Книга 2. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. — 702 с.,
ISBN 978-5-94836-606-7
Цена 1210 руб.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru