

**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

УДК 621.396.67

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОДОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ КРИСТАЛЛЕ
С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

© 2021 г. **Е. В. Фролова^а, С. Е. Банков^{а, *}, В. И. Калинин^а**

^а*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация*

^{*}*E-mail: sbankov@yandex.ru*

Поступила в редакцию 18.06.2020 г.

После доработки 18.06.2020 г.

Принята к публикации 23.07.2020 г.

Исследованы собственные волны волноводных EBG-каналов в электромагнитном кристалле в виде двумерно-периодической решетки из металлических цилиндров с зазорами, в которые включены сосредоточенные элементы (СЭ). Решетка из цилиндров с СЭ расположена между экранами плоского волновода, анализируется возможность управления характеристиками распространения основной моды путем изменения емкости СЭ в цилиндрах внутри волноводного канала. Задача о собственных волнах периодического волновода решена путем численного моделирования с использованием граничных условий периодичности. Для двухрядного и трехрядного EBG-волноводов проведен параметрический анализ центральной частоты и полосы одномодового режима. Показано, что основным фактором, ограничивающим полосу рабочих частот волновода, является высшая по ширине нечетная мода.

DOI: 10.31857/S0033849421060097

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работах [1, 2] была сформулирована концепция построения реконфигурируемых устройств (РУ) СВЧ-диапазона на основе двумерных электромагнитных кристаллов (ЭМК). Основная ее идея состоит в использовании ЭМК, элементы которого имеют параметры, зависящие от внешних воздействий. Отметим, что в СВЧ-диапазоне наибольшее распространение получили двумерные ЭМК на основе плоского волновода (ПВ).

В настоящее время создание СВЧ РУ с управляемой структурой является актуальной темой научных исследований и практических разработок. Это связано с тем, что применение РУ значительно расширяет функциональные возможности радиоэлектронной аппаратуры, поскольку РУ в зависимости от вида и интенсивности управляющих воздействий могут иметь разную структуру и, следовательно, выполнять разные функции. В этом состоит их важное отличие от хорошо известных в технике СВЧ-устройств с управляемыми параметрами, которые могут иметь разные количественные значения некоторых характеристик, но не могут изменять выполняемую функцию. Существует большое число работ, описывающих разные способы электронного управления характеристиками СВЧ-устройств, в основном антенн и фильтров, а

также свойствами поверхностей с высоким импедансом. Некоторые из них представлены в [3–8].

Данная статья является продолжением исследования в направлении создания РУ на основе ЭМК с сосредоточенными элементами (СЭ), проведенного в работе [9]. Ее целью является исследование характеристик волноводных каналов, образованных в ЭМК с СЭ. В этом случае “дефектом” периодической структуры, образующим волноводный канал в кристалле, служит не удаление одного или нескольких рядов кристалла как в [10], а отличие импеданса СЭ внутри канала от импеданса СЭ в окружающих элементах, образующих его стенки.

В работе рассмотрен случай, когда СЭ представляет собой параллельный резонансный контур, состоящий из индуктивности и емкости. Предполагается, что емкость зависит от управляющего фактора, т.е. от подаваемого на нее напряжения. Параметры исходного ЭМК (внешний ЭМК), в котором формируется волновод, выбираются таким образом, чтобы в интересующем нас диапазоне частот он находился бы в полосе запирающей и в нем отсутствовали распространяющиеся типы волн. Волновод формируется путем изменения емкости СЭ в бесконечном ряде элементов внешнего ЭМК. Емкость в волноводном канале выбирается таким образом, чтобы однородный ЭМК с такой емкостью находился в полосе прозрачности. Назовем его внутренним ЭМК. Выбор пара-

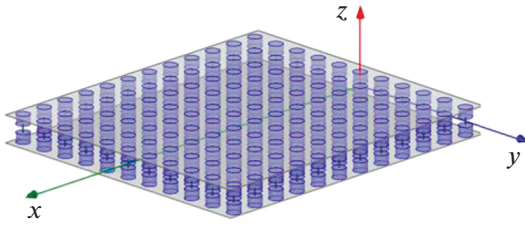


Рис. 1. ЭМК с СЭ в зазорах внутри цилиндров.

метров СЭ во внутренней и внешней областях волновода, по крайней мере на начальном этапе исследования, производится исходя из результатов исследования однородного ЭМК [9].

Волноводы в ЭМК различаются по числу рядов кристалла, образующих волноводный канал: одно-, двух- и трехрядные волноводы. В работе основное внимание уделено трехрядным и двухрядным волноводам с СЭ. Как и в [10], исследование включает изучение дисперсионных характеристик собственных волн волноводов в полосе прозрачности, а также полосы рабочих частот и центральной частоты рабочего диапазона.

2. СТРУКТУРА ЭМК С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Общий вид ЭМК приведен на рис. 1. Исследуемая структура представляет собой двумерную решетку из металлических цилиндров с зазорами, в которые включены СЭ. Решетка размещается внутри ПВ высотой b . Приняты следующие обозначения: величина зазора h , период решетки P , диаметр цилиндра D . Вид элемента решетки представлен на рис. 2.

Модель СЭ при использовании системы HFSS (<https://ansys.com>) имеет вид бесконечно тонкого прямоугольника (см. рис. 2, б), на поверхности которого заданы граничные условия RLC -типа, определяющие импеданс этой поверхности. Величина импеданса определяется параметрами конту-

ра, описывающего электрические характеристики СЭ. В данной работе потери в контуре и других элементах структуры не учитываем. При такой идеализации на частоте резонанса величина импеданса контура становится бесконечно большой. Вне резонанса импеданс СЭ стремится к нулю, и элемент ЭМК переходит в режим, близкий к режиму короткого замыкания (КЗ). В этом режиме цилиндры полностью включены в ПВ, образуя КЗ между его экранами. Параметры ЭМК выбираются таким образом, чтобы в режиме КЗ кристалл находился в полосе запирающей, в которой в нем отсутствуют распространяющиеся волны. В режиме высокого импеданса СЭ, близкого к режиму холостого хода (ХХ), цилиндры слабо влияют на волновые характеристики ПВ, что эквивалентно их отсутствию в решетке.

3. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЭМК И СЭ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВОЛНОВОДНЫХ КАНАЛОВ

Рассмотрим дисперсионные характеристики однородного ЭМК в разных режимах в диапазоне частот 7...13 ГГц с целью выбора параметров внешнего и внутреннего ЭМК, образующих регулярный волновод. Как уже отмечалось выше, внешний ЭМК должен находиться в полосе запирающей, а внутренний в полосе прозрачности.

Проектирование волновода в ЭМК с СЭ является многопараметрической задачей. Приведем параметры, описывающие исследуемую структуру: b, ϵ – параметры ПВ; P, D – параметры решетки цилиндров; C_p, C_s, L_s, h, w , – параметры СЭ.

Предполагаем, что СЭ во внешнем и внутреннем ЭМК имеют одинаковые индуктивности L_s и разные емкости C_p, C_s . В данном исследовании они являются ключевыми параметрами, выбором которых реализуются, соответственно, режимы ХХ и КЗ в ЭМК с СЭ.

Выбор параметров ПВ. Исследование однородного ЭМК с СЭ и его дисперсионных характери-

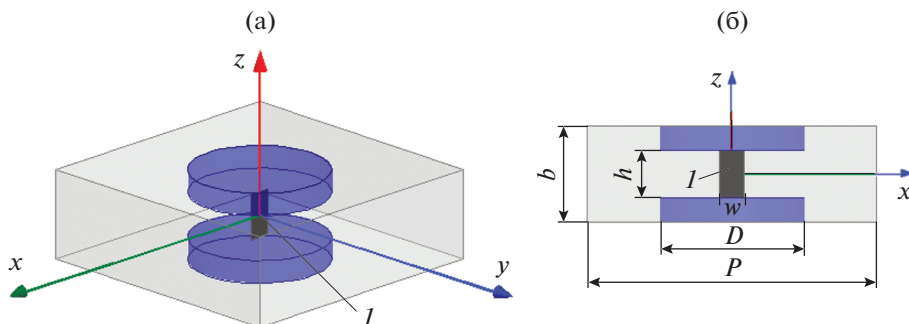


Рис. 2. Элемент решетки: а – общий вид, б – поперечное сечение, I – модель СЭ в виде тонкого прямоугольника с граничными условиями RLC .

стик, представленное в работе [9], показало, что относительная полоса прозрачности ЭМК из металлических цилиндров с СЭ в ПВ возрастает с уменьшением высоты ПВ и при заполнении его диэлектриком.

Основываясь на этих результатах, в данной работе будем исследовать ЭМК в ПВ с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2.2$ и высотой $b = 1.6$, ориентируясь на параметры стандартных диэлектрических подложек для печатных плат. Здесь и далее все размеры приводятся в миллиметрах.

Выбор параметров решетки ЭМК. В работе [10] при исследовании частотной дисперсии волноводов, сформированных в ЭМК с воздушным заполнением путем удаления одного, двух и трех рядов сплошных цилиндров, были выбраны значения периода решетки $P = 12, 8, 6$. В данной работе, ориентируясь на тот же диапазон частот, с учетом заполнения ПВ диэлектриком с $\epsilon = 2.2$ выберем периоды решетки для формирования одно-, двух- и трехрядных волноводов соответственно $P = 8, 6, 4$. Ограничимся значениями относительного диаметра цилиндров $D/P = 0.5$ и 0.8 .

Выбор параметров СЭ. В модели СЭ (см. рис. 2) примем его высоту $h=1$ и ширину $w = 0.5$. Высота СЭ равна размеру зазора в цилиндре. Примем минимальные значения емкости C и индуктивности L в модели СЭ $C = 0.1$ пФ и $L = 0.1$ нГ.

Частотная зависимость импеданса СЭ определяется выражением для импеданса параллельного LC-контура: $Z(\omega) = j\omega L / (1 - \omega^2 LC)$, где $\omega = 2\pi f$. Примеры этой зависимости для значения $L = 0.2$ нГ и при значениях $C = 0.2, 0.8, 1.2, 1.6$ пФ показаны на рис. 3.

В отсутствие потерь в контуре импеданс СЭ чисто мнимый ($Z' = jZ$), на рис. 3 показана его величина Z с учетом знака: индуктивный, ниже резонансной частоты, и емкостной – выше нее. Следует отметить, что значения импеданса на рис. 3 относятся к уединенному СЭ. В [9] было показано, что паразитная емкость в рассматриваемой структуре СЭ, включенного в зазор цилиндра внутри ПВ, также дает вклад в общий импеданс цилиндра, нагруженного СЭ.

Рассмотрим характеристики полос прозрачности кристалла с приведенными выше параметрами при изменении емкости СЭ в интервале $0.1 \dots 7$ пФ. В результате расчетов дисперсионных характеристик однородного ЭМК в режиме собственных волн были получены представленные на рис. 4–6 зависимости нижней и верхней критических частот полосы прозрачности ЭМК от емкости СЭ для периодов решетки $P = 4, 6$ и 8 соответственно, $D/P = 0.5$ во всех этих случаях. Для оценки влияния на частотные характеристики индуктивности СЭ были выполнены расчеты для двух значе-

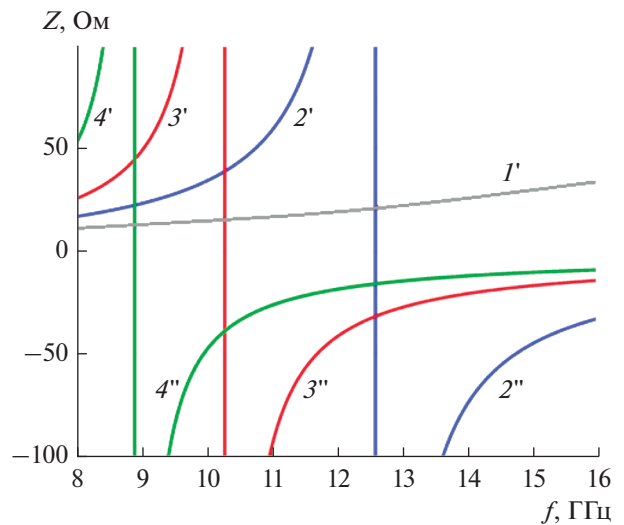


Рис. 3. Зависимости импеданса СЭ от частоты при $C = 0.2$ (1'), 0.8 (2'), 1.2 (3') и 1.6 пФ (4'), отмечены ветви ниже (1''–4'') и выше резонансных частот (2''–4'').

ний $L = 0.2$ нГ (см. рис. 1а–3а) и $L = 0.1$ нГ (см. рис. 1б–3б).

Предполагая, что в полосах прозрачности ЭМК должны размещаться полосы рабочих частот волноводов ($P = 8$ – однорядных, $P = 6$ – двухрядных, $P = 4$ – трехрядных), для определения их характеристик проведем анализ представленных на рис. 4–6 зависимостей. В результате этого анализа мы должны определить значение емкости C_p , исходя из следующих условий. Обозначим нижнюю частоту зоны прозрачности внешнего ЭМК как $f_{s \min}$, максимальную – $f_{s \max}$. Индекс s указывает на емкость C_s в эквивалентной схеме СЭ в цилиндрах внешнего ЭМК. Аналогично, обозначим нижнюю частоту зоны прозрачности внутреннего ЭМК через $f_{p \min}$, максимальную – $f_{p \max}$. Индекс p указывает на емкость C_p в эквивалентной схеме СЭ в цилиндрах внутреннего ЭМК. Потребуем, чтобы полоса прозрачности внутреннего ЭМК лежала в полосе запираания внешнего ЭМК. В этом случае при отсутствии других ограничивающих факторов полоса рабочих частот волновода лежит в пределах $f_{p \min} < f < f_{p \max}$. Нас интересует выбор параметров, обеспечивающий максимальную относительную полосу рабочих частот волновода, т.е. отношения $f_{p \max} / f_{p \min}$. Очевидно, это достигается при условии, что верхняя частота волновода ограничивается сверху минимальной частотой полосы прозрачности внешнего ЭМК, т.е. $f_{p \max} = f_{s \min}$. При этом условии зона прозрачности волновода примыкает к зоне прозрачности его стенок. На рис. 4–6 этому режиму соответствуют горизонтальные линии, идущие от $f_{s \min}$, которые для разных периодов определены для принятого минимального значения $C_s = 0.1$ пФ.

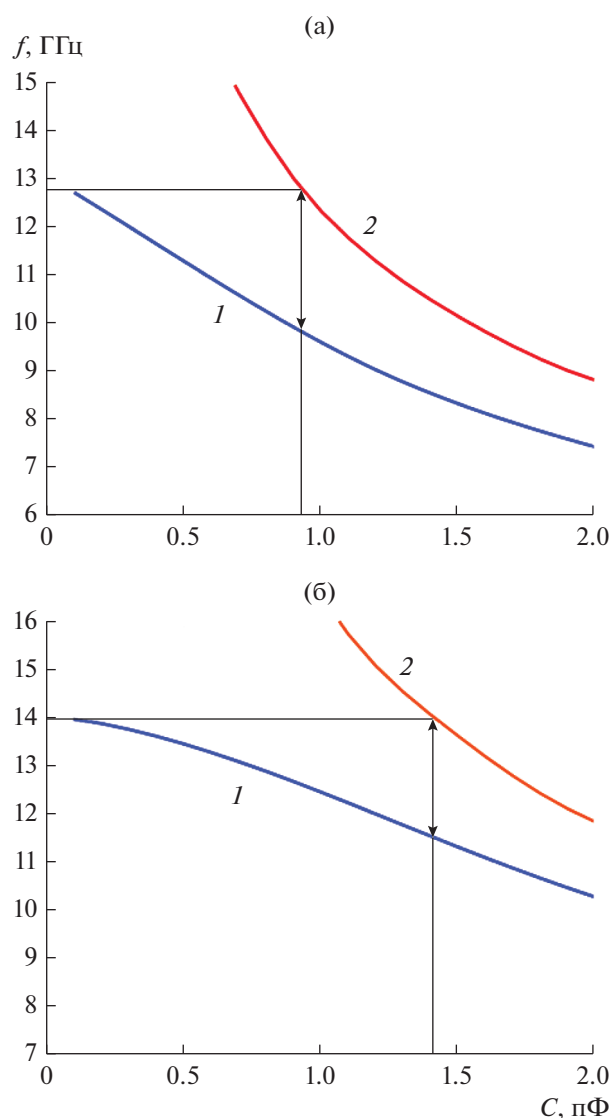


Рис. 4. Зависимости нижних (1) и верхних (2) граничных частот полосы прозрачности ЭМК с периодом $P = 4$ от емкости СЭ при $L = 0.2$ (а) и 0.1 нГ (б).

Точки пересечения этих линий с кривыми 2, которые определяют верхнюю частоту зоны прозрачности ЭМК, как раз и определяют верхнюю частоту полосы прозрачности волноводного канала $f_{p \max}$. Соответствующие точкам пересечения значения емкости определяют величины C_p в каждом случае. Соответствующее этой величине C_p значение нижней критической частоты (кривые 1 на рис. 4–6) определяют величину $f_{p \min}$. Показанные двойными стрелками на рис. 4–6 частотные интервалы определяют максимальную полосу зоны прозрачности волновода в каждом случае. Отметим еще раз, что эти результаты получены при $b = 1.6$, $\epsilon = 2.2$, $D/P = 0.5$, $C_s = 0.1$ пФ, $L_s = 0.2$ нГ. Как видно на рис. 4–6, при этих параметрах максимальным значениям рабочих частот

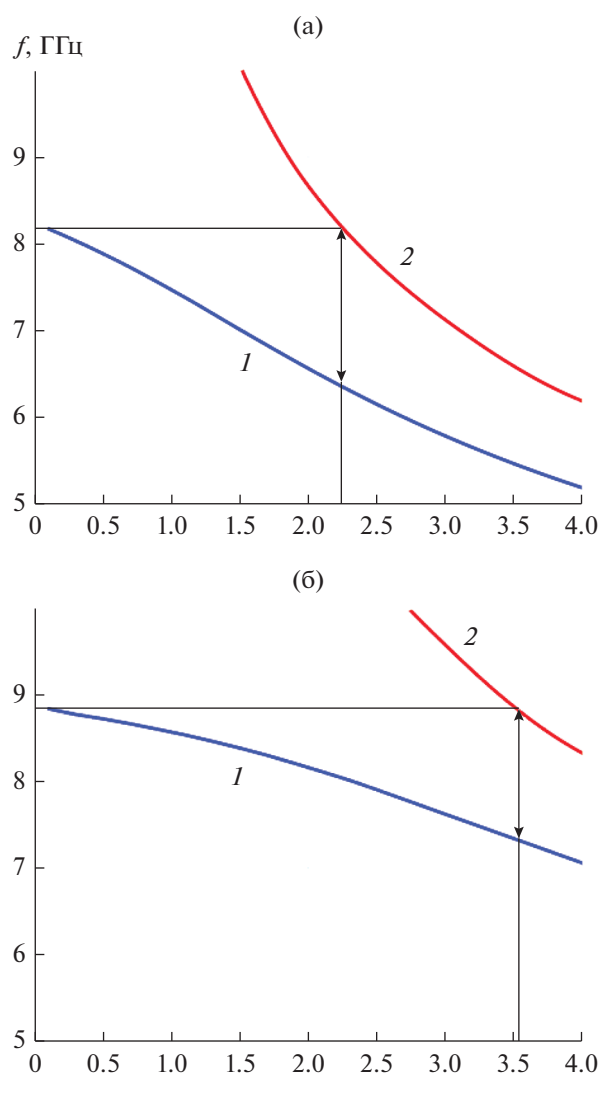


Рис. 5. Зависимости нижних (1) и верхних (2) граничных частот полосы прозрачности ЭМК с периодом $P = 6$ от емкости СЭ при $L = 0.2$ (а) и 0.1 нГ (б).

волновода с периодами $P = 4, 6, 8$ соответствуют частоты $f_{p \max} = 12.75, 8.18, 5.95$ ГГц, $f_{p \min} = 9.81, 6.35, 4.68$ ГГц и емкости $C_p = 0.94, 2.25, 4.23$ пФ. Соответствующие относительные полосы рабочих частот волноводов $f_{p \max}/f_{p \min} = 1.3$ (трехрядные волновод), 1.28 (двухрядный), 1.27 (однорядный).

С уменьшением индуктивности СЭ ($L_s = 0.1$ нГ) границы полос прозрачности ЭМК смещаются в сторону более высоких частот, значения относительной полосы уменьшаются до величины 1.2.

Из полученных результатов следует, в частности, что полоса прозрачности однорядного волновода в ЭМК с периодом $P = 8$ (4.68...5.95 ГГц) лежит за пределами выбранного для исследования диапазона частот 7...13 ГГц, в то же время полосы прозрачности ЭМК с периодами $P = 4, 6$ со-

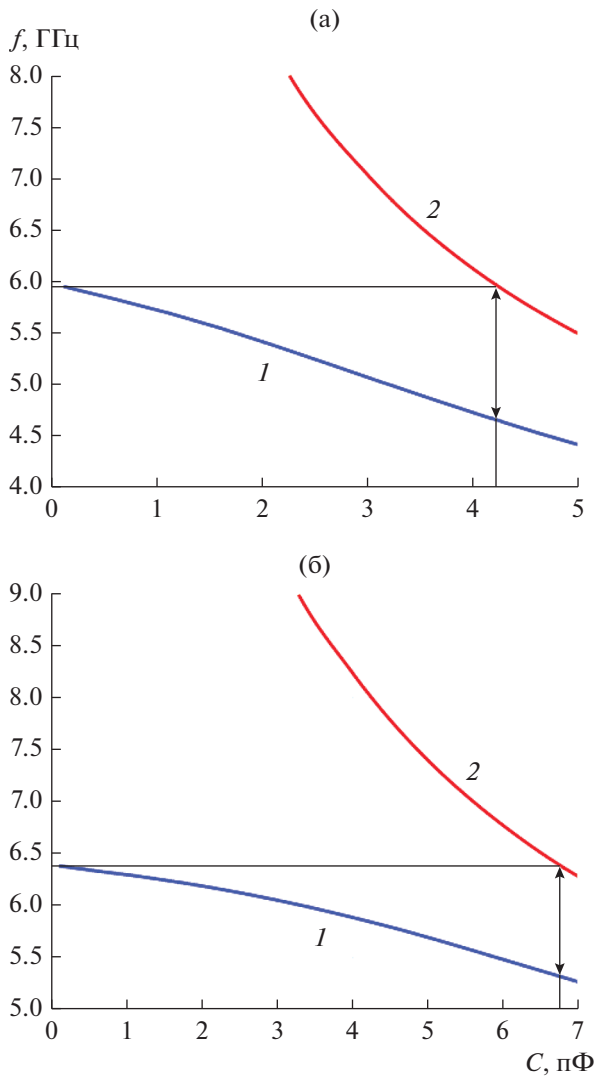


Рис. 6. Зависимости нижних (1) и верхних (2) граничных частот полосы прозрачности ЭМК с периодом $P = 8$ от емкости СЭ при $L = 0.2$ (а) и 0.1 нГ (б).

ответствуют данному диапазону. Следовательно, для дальнейшего исследования выберем трехрядный волноводный канал в решетке с периодом $P = 4$ и двухрядный канал в решетке с периодом $P = 6$.

4. ДИСПЕРСИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХРЯДНОГО ВОЛНОВОДНОГО КАНАЛА

На рис. 7 представлен трехрядный волноводный канал в ЭМК с СЭ (а – вид решетки ЭМК в плоскости xOy , б – поперечное сечение волновода плоскостью zOy). Колебательные контуры в волноводном канале (1) характеризуются емкостью C_p , в стенках (2) – емкостью C_s . Индуктивности всех элементов ЭМК одинаковы и равны L_s .

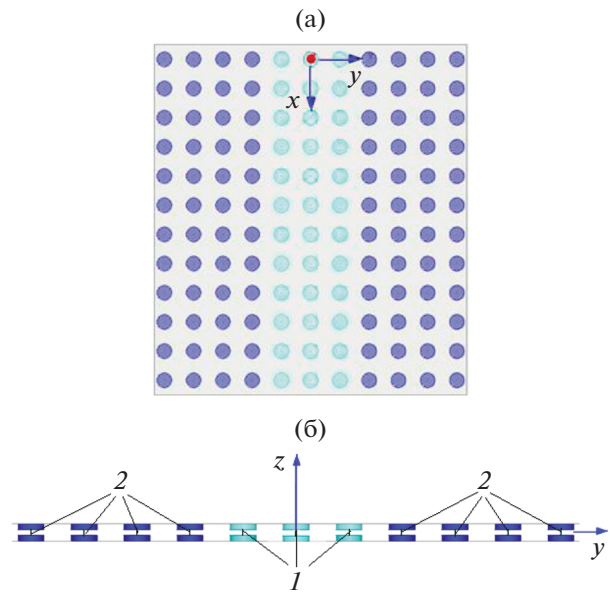


Рис. 7. Трехрядный волновод в двумерно-периодической решетке цилиндров с сосредоточенными элементами в зазорах, кривая 1 – СЭ с емкостью колебательного контура C_p , кривая 2 – СЭ с емкостью C_s .

Дисперсионные характеристики волновода, изображенного на рис. 7, как и однородного ЭМК, рассчитывали в режиме собственных волн “eigenmode”. В качестве модели для расчетов была выбрана ячейка, состоящая из одного ряда элементов, расположенного вдоль оси Oy и содержащего 11 цилиндров с зазорами. Три элемента в центре ряда содержат емкости СЭ C_p . Стенки волноводного канала состоят из четырех элементов с емкостями СЭ C_s . Модель ячейки ограничена по ширине металлическими стенками. Направление распространения волны в волноводном канале – вдоль оси Ox . При расчетах были использованы параметры ЭМК, выбор которых обоснован выше: $P = 4$, $D/P = 0.5$, $b = 1.6$, $\epsilon = 2.2$, $h = 1$, $w = 0.5$, а также $C_s = 0.2$ пФ и $L_s = 0.2$ нГ. Обратим внимание, что здесь значение параметра C_s отличается от принятого в предыдущем разделе ($C_s = 0.1$ пФ). Однако, как показывают расчеты, это отличие в минимальном значении емкости СЭ для внешнего ЭМК не приводит к заметному отличию в характеристиках волновода.

Исследовались два типа волноводных мод – основная мода и высшая (нечетная) по ширине. На рис. 8, 9 приведены примеры распределения (здесь и далее в линейном масштабе) амплитуды напряженности электрического поля в сечении ячейки (основной моды 1 и высшей моды 2) для значений емкости соответственно $C_p = 0.8$ и 1.2 пФ. Первой и второй модам при $C_p = 0.8$ пФ (см. рис. 8) соответствуют частоты 11.338 ГГц и 12.385 ГГц, найденные при сдвиге фазы на длине периода

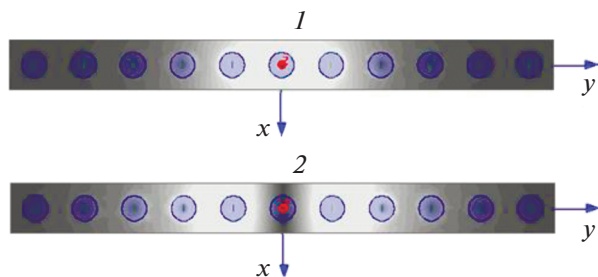


Рис. 8. Распределение амплитуды напряженности электрического поля основной моды на частоте 11.338 ГГц (1) и высшей моды на частоте 12.385 ГГц (2) при $C_p = 0.8$ пФ.

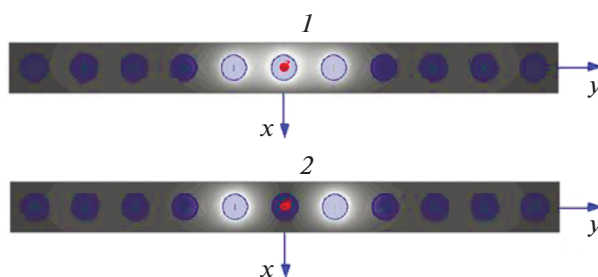


Рис. 9. Распределение амплитуды напряженности электрического поля основной моды на частоте 11.084 ГГц (1) и высшей моды на частоте 11.273 ГГц (2) при $C_p = 1.2$ пФ.

$\Delta\varphi = 40^\circ$. При $C_p = 1.2$ пФ (см. рис. 9) частота первой моды составляет 11.084 ГГц, высшей моды – 11.273 ГГц при сдвиге фазы $\Delta\varphi = 120^\circ$.

Здесь следует отметить, что один и тот же сдвиг фазы на длине периода для обеих основной и высшей мод имеет место на близких частотах. Это свидетельствует о близости их постоянных распространения. Далее были проведены расчеты частот для всех значений сдвига фазы в интервале $\Delta\varphi = 0 \dots 180^\circ$. Полученные в результате этих расчетов дисперсионные характеристики волновода при $C_p = 1.2$ пФ представлены на рис. 10, на рис. 10а – в виде частотных зависимостей нормированной постоянной распространения волны $\beta P/\pi$, на рис. 10б – коэффициент замедления волны $U = \beta/k$, где k – волновое число свободного пространства. Кривые 1, 2 соответствуют основной и высшей по ширине типам волн, 3 – дисперсионная характеристика в зоне прозрачности образующего стенки волновода ЭМК с емкостями СЭ $C_s = 0.2$ пФ. Обе нижняя и верхняя критические частоты основной моды волновода расположены ниже нижней критической частоты внешнего ЭМК. Таким образом, полоса прозрачности волновода полностью лежит в зоне запираения внешнего ЭМК. В этом случае полоса рабочих частот волновода

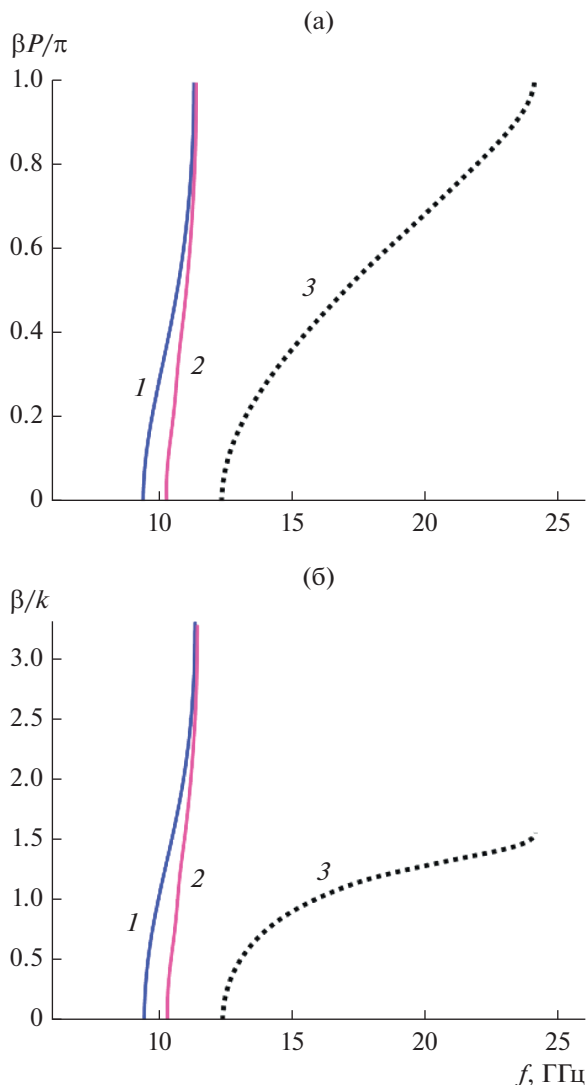


Рис. 10. Дисперсионные характеристики основной (1) и высшей по ширине (2) волн трехрядного волновода ($P = 4$, $D/P = 0.5$) с $C_p = 1.2$ пФ; а также дисперсионная характеристика однородной ЭМК в стенках с $C_s = 0.2$ пФ (3): а – нормированная постоянная распространения, б – коэффициент замедления.

ограничивается сверху критической частотой высшей моды. Так как критические частоты основной и высшей мод близки, то полоса сравнительно узкая.

Зависимости критических частот основной (1, 2) и высшей (3) волноводных мод от емкости C_p в интервале 0.6...1.6 пФ, полученные при $D/P = 0.5$, представлены на рис. 11. Для сопоставления на этом же рисунке показана нижняя граница полосы прозрачности внешнего ЭМК (4). Как видно из рисунка, при малых значениях емкости ($C_p < 0.68$ пФ) верхняя граница полосы рабочих частот волновода определяется критической частотой внешнего ЭМК. С увеличением емкости полоса частот

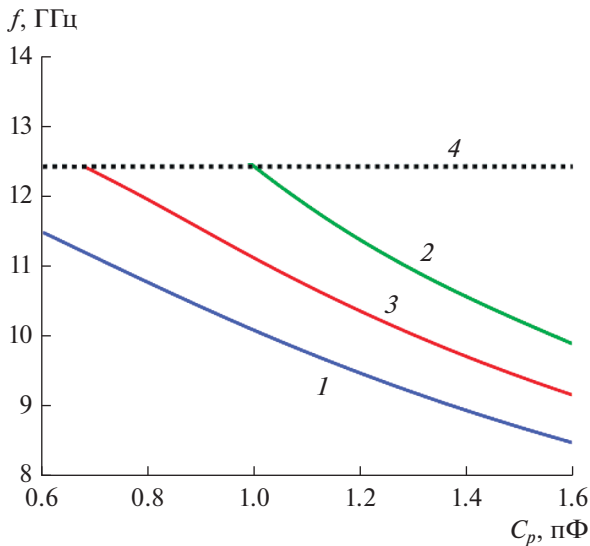


Рис. 11. Зависимости критических частот волноводных мод трехрядного волновода ($P = 4$) от емкости СЭ в волноводном канале, кривые 1, 2 – нижняя и верхняя критические частоты основной моды соответственно, 3 – нижняя критическая частота высшей моды, 4 – критическая частота однородного кристалла с емкостями СЭ $C_s = 0.2$ пФ; $D/P = 0.5$.

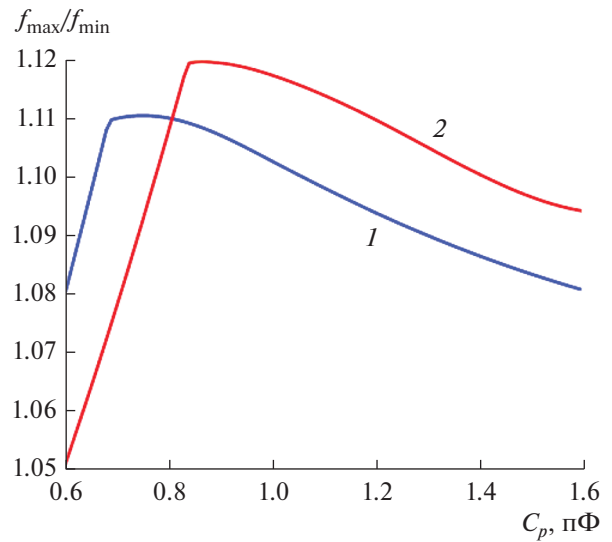


Рис. 12. Зависимости относительной полосы рабочих частот трехрядного волноводного канала ($P = 4$) от емкости СЭ: $D/P = 0.5$ (1), 0.8 (2).

ограничивается критической частотой высшей по ширине волноводной моды.

Определим максимальную f_{\max} и минимальную f_{\min} частоты диапазона рабочих частот: f_{\min} ограничивает диапазон снизу и соответствует критической частоте основного типа волны, а f_{\max} ограничивает диапазон сверху, а ее значение равно минимальной из трех частот – верхней критической частоты основной моды, нижней критической частоты высшей моды и нижней границы полосы прозрачности ЭМК, образующего стенки волновода.

Зависимости относительной рабочей полосы частот (f_{\max}/f_{\min}) и центральной частоты волновода $f_0 = (f_{\max} + f_{\min})/2$ от емкости C_p изображены соответственно на рис. 12, 13 для $D/P = 0.5$ и 0.8. Как видно из рис. 12, на рассматриваемом интервале изменения емкости СЭ существуют максимумы значения относительной полосы частот. С увеличением относительного диаметра цилиндров максимум относительной полосы возрастает и при значении емкости $C_p = 0.87$ пФ для $D/P = 0.8$ достигает величины 1.12, центральная частота диапазона при этом равна 10.85 ГГц.

5. ДИСПЕРСИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХРЯДНОГО ВОЛНОВОДА

При моделировании двухрядного волновода выбрана ячейка, состоящая из одного ряда элементов, расположенного вдоль оси 0у и содержа-

щего 10 цилиндров с зазорами. Два элемента в центре ряда содержат емкости СЭ C_p . Стенки волноводного канала состоят из четырех элементов с емкостями СЭ C_s . Модель ячейки также ограничена по ширине металлическими стенками. При расчетах были использованы следующие параметры структуры: $P = 6$, $D/P = 0.5$, $b = 1.6$, $\epsilon = 2.2$, $h = 1$, $w = 0.5$, $C_s = 0.2$ пФ и $L_s = 0.2$ нГ. На рис. 14, 15 приведены примеры распределения амплитуды напряженности электрического поля (основной 1 и высшей моды 2) в сечении ячейки для зна-

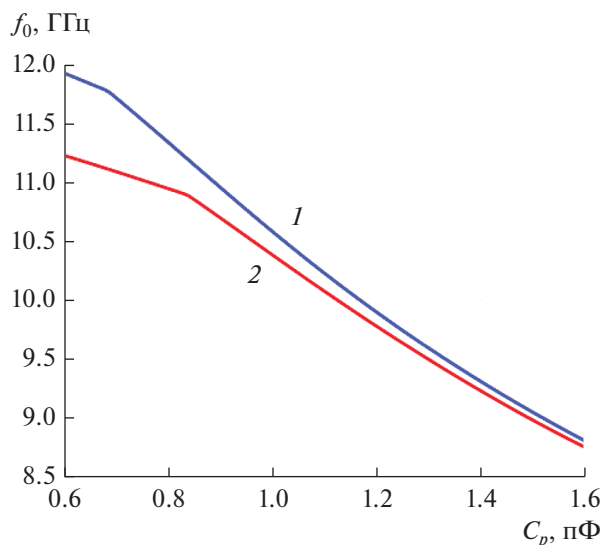


Рис. 13. Зависимости центральной частоты рабочего диапазона трехрядного волноводного канала ($P = 4$) от емкости СЭ: $D/P = 0.5$ (1), 0.8 (2).

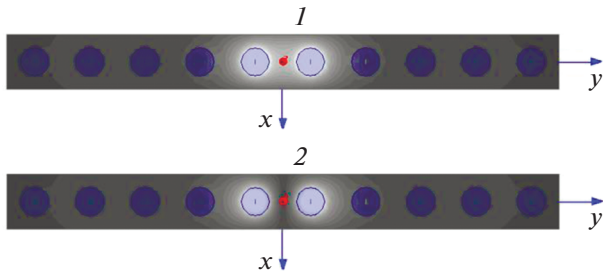


Рис. 14. Распределение амплитуды напряженности электрического поля основной моды (1) на частоте 8.51 ГГц и высшей моды (2) на частоте 8.71 ГГц при $C_p = 2$ пФ.

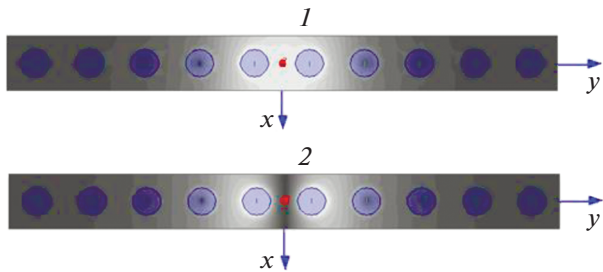


Рис. 15. Распределение амплитуды напряженности электрического поля основной моды (1) на частоте 6.87 ГГц и высшей моды (2) на частоте 7.54 ГГц при $C_p = 2.5$ пФ.

чений емкости соответственно $C_p = 2$ и 2.5 пФ. Первой и второй модам при $C_p = 2$ пФ (см. рис. 13) соответствуют частоты 8.51 и 8.71 ГГц, найденные при сдвиге фазы на длине периода $\Delta\phi = 120^\circ$. При $C_p = 2.5$ пФ (см. рис. 14) частота первой моды составляет 6.87 ГГц, высшей моды – 7.10 ГГц при сдвиге фазы $\Delta\phi = 40^\circ$.

Дисперсионные характеристики волновода при значении $C_p = 2.5$ пФ представлены на рис. 16а, 16б: соответственно частотные зависимости нормированной постоянной распространения волны $\beta P/\pi$ и коэффициент замедления волны $U = \beta/k$. Из рисунка видно, что для выбранного значения емкости $C_p = 2.5$ пФ полосы прозрачности обеих волноводных мод лежат вне полосы прозрачности ЭМК, образующего стенки волновода ($C_s = 0.2$ пФ). Следует отметить, что полоса рабочих частот данного двухрядного волновода, как и рассмотренного выше трехрядного, ограничивается сверху критической частотой высшей моды.

На рис. 17 представлены зависимости критических частот основной (1, 2) и высшей (3) волноводных мод от емкости C_p в интервале 1.0...2.5 пФ, полученные при $D/P = 0.5$, а также показана граница полосы прозрачности ЭМК, образующего стенки волновода (4). Как видно из рис. 17, при

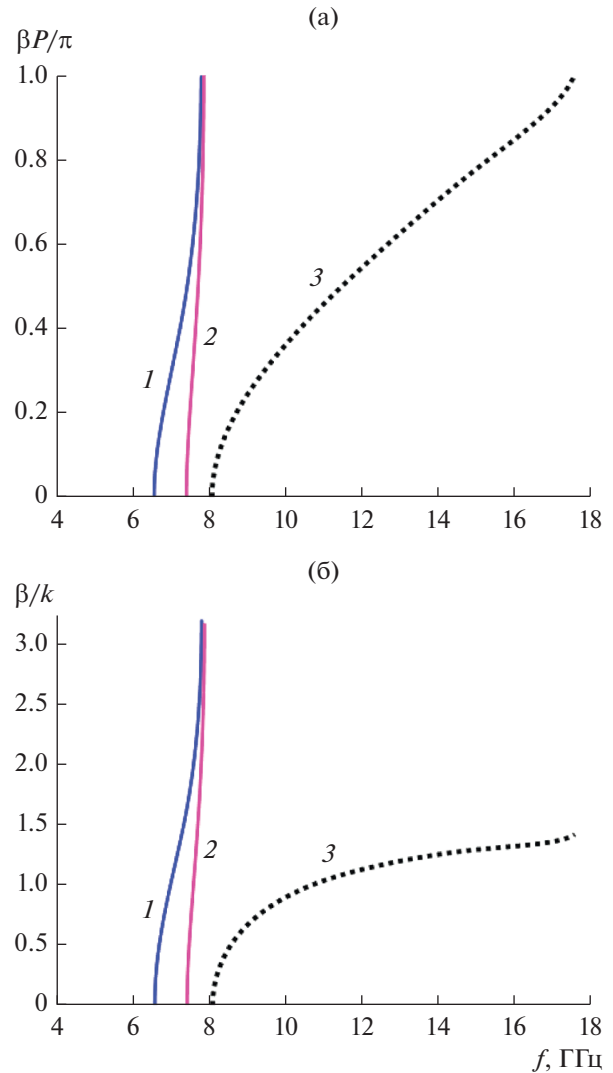


Рис. 16. Дисперсионные характеристики основной (1) и высшей по ширине (2) волн двухрядного волновода ($P = 6$, $D/P = 0.5$) с $C_p = 2.5$ пФ; а также дисперсионная характеристика однородной ЭМК в стенках с $C_s = 0.2$ пФ (3): а – нормированная постоянная распространения, б – коэффициент замедления.

значениях емкости $C_p < 2$ пФ верхняя граница полосы рабочих частот волновода определяется критической частотой внешнего ЭМК, образующего стенки волновода, при $C_p > 2$ пФ полоса частот ограничивается критической частотой высшей по ширине волноводной моды.

Зависимости относительной рабочей полосы частот и центральной частоты волновода от емкости C_p получены на основе анализа кривых рис. 17 и представлены соответственно на рис. 18, 19 для $D/P = 0.5$ и 0.8 . Как видно из рис. 18, для $D/P = 0.8$ максимум относительной полосы может достигать величины 1.158 при значении емкости $C_p = 2.3$ пФ,

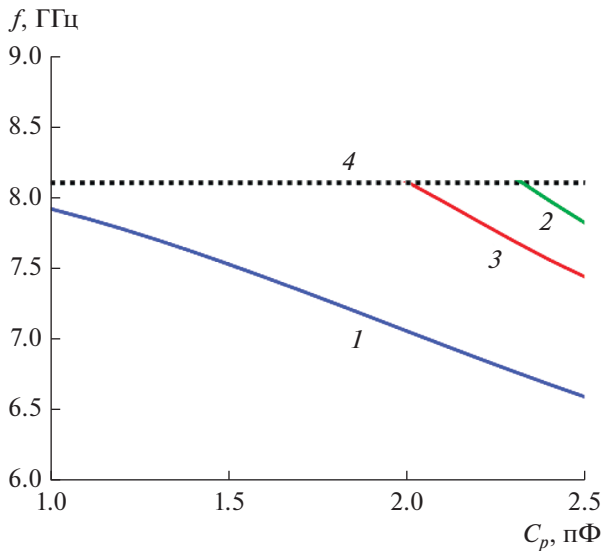


Рис. 17. Зависимость критических частот волноводных мод двухрядного волновода ($P=6$) от емкости СЭ в волноводном канале, кривые 1, 2 – нижняя и верхняя критические частоты основной моды соответственно, 3 – нижняя критическая частота высшей моды, 4 – критическая частота однородного кристалла с емкостями СЭ $C_s = 0.2$ пФ; $D/P = 0.5$.

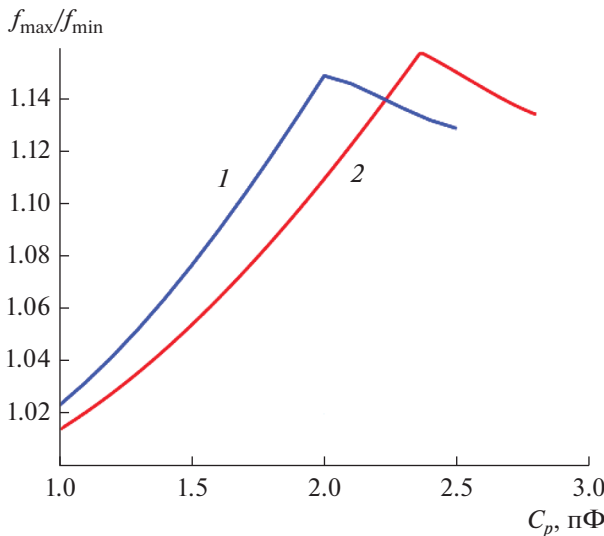


Рис. 18. Зависимости относительной полосы рабочих частот двухрядного волноводного канала ($P = 6$) от емкости СЭ: $D/P = 0.5$ (1), 0.8 (2).

центральная частота диапазона (см. рис. 19) при этом равна 7.08 ГГц.

В заключение интересно отметить, как соотносится резонансная частота СЭ в волноводном канале $f_{LC} = 1/2\pi\sqrt{LC}$, определяемая емкостью C_p и индуктивностью $L_s = 0.2$ нГ, с центральной

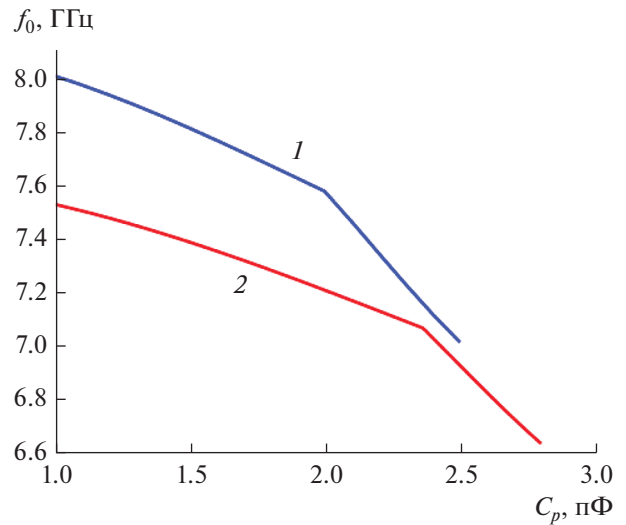


Рис. 19. Зависимости центральной частоты рабочего диапазона двухрядного волноводного канала ($P = 6$) от емкости СЭ: $D/P = 0.5$ (1), 0.8 (2).

частотой рабочего диапазона волновода f_0 . Выше, в разд. 3 при обсуждении рис. 4–6 мы определили значения емкости C_p , при которых достигается максимальная полоса прозрачности волновода. В случае трехрядного волновода $C_p = 0.94$ пФ и соответствующая резонансная частота $f_{LC} = 11.607$ ГГц. Для двухрядного волновода $C_p = 2.25$ пФ и $f_{LC} = 7.502$ ГГц. Из рис. 13, 19 следует, что для значения $C_p = 0.94$ пФ центральная частота для трехрядного волновода составляет $f_0 \approx 10.7$ ГГц (кривая 1 на рис. 13), для двухрядного волновода для $C_p = 2.25$ пФ центральная частота $f_0 \approx 7.3$ ГГц (кривая 1 на рис. 19). Видим, что в обоих случаях значения центральной частоты волновода меньше соответствующей резонансной частоты f_{LC} СЭ в волноводном канале. Это объясняется тем, что полоса прозрачности волновода в обоих случаях оказывается меньше максимальной предсказанной, показанной на рис. 4–6 двойными стрелками, из-за возникновения высшей по ширине нечетной моды волновода, которая не учитывалась при анализе зависимостей на рис. 4–6. В силу этого фактора, который приводит к смещению верхней рабочей частоты волновода вниз, центральная частота рабочего диапазона также смещается вниз относительно резонансной частоты СЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования дисперсионных характеристик установлено, что значения относительной полосы рабочих частот трехрядного и двухрядного волноводов при заданных параметрах ЭМК и СЭ могут достигать соответственно величин 1.12, 1.16. Эти значения

ниже ожидаемых значений 1.28, 1.30, полученных на основе анализа относительных полос прозрачности однородного кристалла. Расчеты показали, что основной причиной уменьшения полосы рабочих частот волновода является возникновение высшей по ширине моды волноводного канала, которая не учитывалась при анализе дисперсионных характеристик однородного кристалла.

В дальнейших исследованиях было бы интересно попытаться построить численно-аналитическую модель волновода, в котором волна направляется за счет разности значений импеданса внутренней и внешней областей, в частности за счет разности значений емкости в LC -контурах СЭ в этих областях. Такая модель, вероятно, смогла бы предсказывать критическую частоту ближайшей высшей волны, определяющей полосу одномодового режима волновода в ЭМК с СЭ, и ее зависимость от параметров структуры.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания по теме 0030-2019-0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Банков С.Е. // РЭ. 2011. Т. 56. № 2. С. 133.
2. Банков С.Е. // РЭ. 2009. Т. 54. № 6. С. 671.
3. Koderer T., Caloz C. // IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. Digest (MTT). Seattle, WA, USA. 2–7 June 2013. P. 1.
4. Sievenpiper D.F., Schaffner J.H., Jae S.H. et al. // IEEE Trans. 2003. V. AP-51. № 10. P. 2713.
5. Karim M.F., Guo Y.-X., Chen Z.N., Ong L.C. // IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. Digest. 15–20 June 2008. Atlanta, GA, USA. P. 1031.
6. Medeiros C., Costa J.R., Fernandes C.A. // IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp. 5–11 July 2008. San Diego, CA, USA. P. 1.
7. Loh T.-H., Tian Z., Patel P. // IEEE MTT-S Intern. Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP). 1–3 July 2015. Suzhou, China. P. 1.
8. Mias C., Yap J.H. // IEEE Trans. 2007. V. AP-55. № 7. P. 1955.
9. Банков С.Е., Калиничев В.И., Фролова Е.В. // РЭ. 2021. Т. 66. № 2. С. 122.
10. Банков С.Е., Калиничев В.И., Фролова Е.В. // РЭ. 2020. Т. 65. № 9. С. 852.