

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 537.874;621.396

УПРАВЛЯЕМЫЕ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЕ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

© 2014 г. Ю. Н. Казанцев, Г. А. Крафтмахер, В. П. Мальцев

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,

Российская Федерация, 141190, г. Фрязино Московской обл., пл. Введенского 1

E-mail: yukazantsev@mail.ru

Поступила в редакцию 06.12.2013 г.

Рассмотрены полосно-пропускающие частотно-селективные поверхности (ЧСП), управляемые варакторами и представляющие собой бипериодические решетки из щелевых квадратов в тонком металлическом экране. Проведена экспериментальная оценка основных факторов, влияющих на диапазон перестройки ЧСП при различных схемах подключения управляющих варакторов. Представлены результаты измерения волноводным методом коэффициента прохождения на СВЧ через образцы как единичных элементов ЧСП, нагруженных варакторами различных типов, так и решеток из этих элементов. На основании результатов измерений даны оценки достижимых значений относительной перестройки резонансной частоты ЧСП $f_{\max}/f_{\min} = 1.4$ для схем управления каждым элементом ЧСП двумя варакторами малой емкости МА46Н120 и $f_{\max}/f_{\min} = 1.5$ для схем управления одним варактором средней емкости ВВ857.

DOI: 10.7868/S0033849414060096

ВВЕДЕНИЕ

Частотно-селективные поверхности (ЧСП) в настоящее время применяются в широком классе радиоэлектронных устройств. Функциональные возможности этих устройств существенно повышаются при использовании ЧСП с перестройкой резонансной частоты. За последние 10–15 лет опубликовано много работ, посвященных разработке полосно-отражающих ЧСП, управляемых варакторами. В таких ЧСП варакторы включаются либо в разрывы проводника внутри металлических элементов ЧСП [1–7], либо между элементами [8–11]. Вместе с тем управляемые полосно-пропускающие ЧСП также представляют интерес для практического применения: в частотных фильтрах, обеспечивающих оптимальные условия распространения радиоволн внутри зданий [12–14], в системах управления направлением радиолуча [15, 16], в обтекателях антенн с ограниченной полосой прозрачности [17].

Полосно-пропускающие ЧСП обычно реализуются в виде периодической решетки из резонансных отверстий в тонком металлическом экране. Резонансная частота и добротность решетки зависят от формы и размеров отверстий, а также от периода решетки. Отверстия в управляемых ЧСП обычно имеют форму либо прямолинейных щелей [13, 15], либо щелевых квадратов и окружностей [14, 18–20]. Электронное управле-

ние осуществляется при помощи пин-диодов или варакторов, включаемых между краями щелей.

Качество управления можно оценить при помощи двух параметров: диапазона перестройки резонансной частоты ЧСП и потерь при прохождении волны через ЧСП на резонансной частоте. Эти параметры зависят от многих факторов: интервала рабочих емкостей варакторов, форм и размеров щелевых элементов, схем подключения варакторов к щелевым элементам ЧСП, тепловых потерь в варакторах. Так, в работах [13, 15] рассмотрены ЧСП в форме периодических решеток из прямолинейных щелей, управляемых варакторами, которые расположены в серединах щелей. Такие решетки предполагается использовать для управления распространением радиоволн в закрытых помещениях, насыщенных устройствами беспроводной связи. Максимальная относительная перестройка частоты, реализованная в работе [13], составила 1.7. При этом на минимальной частоте диапазона перестройки потери при прохождении волны через ЧСП превышают 6 дБ. В работах [15, 16] представленные ЧСП предлагается использовать в системе управления направлением радиолуча. Относительная величина перестройки резонансной частоты ЧСП при приемлемых потерях не превышает 1.3 и может быть реализована путем изменения емкости варакторов в пределах 0.14...0.3 пФ [15]. Как отмечено в [16], дальнейшее увеличение емкости приводит к ката-

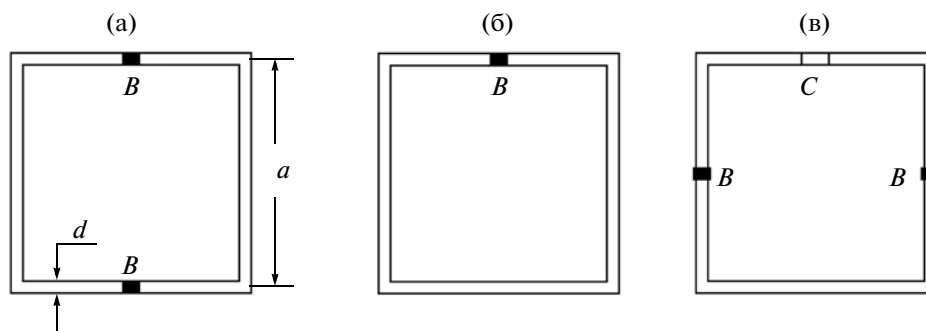


Рис. 1. Схемы подключения емкостных нагрузок к щелевому элементу; B – варактор, C – постоянная емкость.

строфическому уменьшению сигнала, проходящего через ЧСП, и увеличению потерь.

В ряде работ рассмотрены полосно-пропускающие ЧСП в виде периодических решеток из щелевых квадратов с управляющими пин-диодами [14] и варакторами [18], включенными в середины противоположных сторон щели. Управляемая решетка [14] является пространственным переключателем между режимами отражения и прохождения для некоторого заданного диапазона частот. В работе [18] показано, что относительная перестройка резонансной частоты 1.3 достигается при изменении емкости варакторов в интервале 0.3...0.7 пФ при незначительных потерях (менее 1 дБ). В работах [19, 20] приведены результаты численного расчета коэффициента отражения от периодических решеток из кольцевых щелей в тонком металлическом экране с переменными емкостями без потерь, подключенными к щелям. Так, в [19] рассмотрен случай подключения в диаметрально противоположные участки щели двух емкостей, изменяющихся в интервале 0.05...0.3 пФ с относительной перестройкой резонансной частоты около 1.7. В работе [20] рассмотрен случай подключения одной емкости, изменяющейся в интервале 0.2...1.0 пФ с относительной перестройкой резонансной частоты 1.4.

Во многих описанных выше управляемых полосно-пропускающих ЧСП уменьшению резонансной частоты сопутствуют увеличение потерь на резонансной частоте и сужение полосы пропускания. Еще одним отрицательным фактом является то, что эффективное управление резонансной частотой ЧСП при малых потерях на резонансной частоте имеет место лишь в интервале малых значений управляющей емкости (менее 1 пФ).

Цель данной работы – оценка диапазона перестройки резонансной частоты полосно-пропускающей ЧСП в зависимости от типа варакторов и схемы их подключения в элементы решетки в форме щелевых квадратов. Как известно [17], преимуществом решетки с элементами такой

формы является высокая угловая устойчивость их частотных характеристик.

1. СХЕМЫ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ВАРАКТОРОВ В ЭЛЕМЕНТЫ ЧСП

На рис. 1а–1в приведены основные рассмотренные нами схемы подключения варакторов к щелевому элементу ЧСП, где “ B ” – варактор, “ C ” – конденсатор постоянной емкости. Наиболее универсальной представляется схема на рис. 1а с двумя варакторами, поскольку ее несложно модифицировать для применения в схеме произвольной поляризации падающей волны. Схемы на рис. 1б и 1в предназначены для работы только на одной поляризации падающей волны. Распределение электрического поля основной моды в щелевом элементе без подключения варакторов и конденсатора проиллюстрировано на рис. 2. Это поле можно представить как сумму двух щелевых волн, бегущих навстречу друг другу. При обороте на 360° амплитуда поля в щели проходит через два максимума и два нуля. В схемах на рис. 1а и 1б варакторы подключаются в точки максимумов электрического поля, что естественно. В схеме на рис. 1в при отсутствии конденсатора “ C ” варакторы находились бы в точках, где электрическое поле равно нулю, однако включение конденсатора создает в этих точках поле конечной величины.

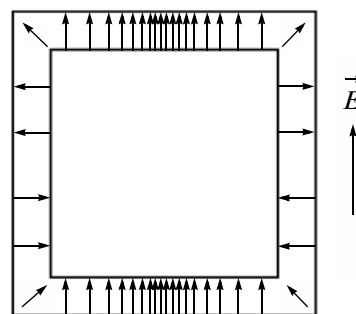


Рис. 2. Распределение электрического поля на ненагруженном квадратном щелевом элементе.

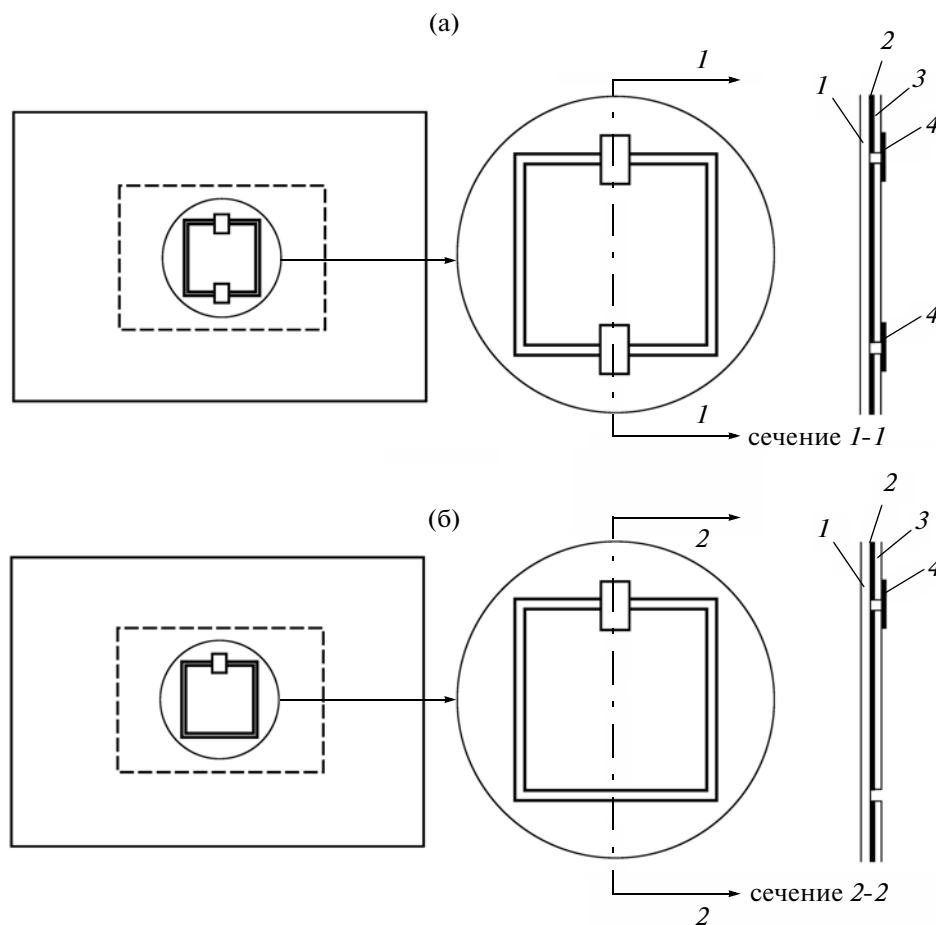


Рис. 3. Щелевой элемент с двумя (а) и одной (б) емкостной нагрузкой постоянной емкости.

Включение в щелевой элемент емкостной нагрузки в виде варактора или конденсатора постоянной емкости изменяет не только резонансную частоту элемента, но и распределение в нем электромагнитного поля. Так, например, в схеме на рис. 1а при значительном увеличении емкостных нагрузок, что в пределе эквивалентно коротким замыканиям, эффективное возбуждение основной щелевой моды становится невозможно и, следовательно, как результат, коэффициент прохождения на резонансной частоте падает. Другим важным фактором, влияющим на коэффициент прохождения через ЧСП, является рассеяние щелевой волны, включая рассеяние в тепло на емкостном элементе. Этот фактор, как и фактор большой емкости, реально ограничивает диапазон перестройки резонансной частоты полосно-пропускающей ЧСП. Сравнительная оценка диапазонов перестройки была проведена при измерении волноводным методом [4] для схем на рис. 1а и 1б и различных типов емкостной нагрузки: конденсаторов постоянной емкости и варакторов. Измерения с конденсаторами постоянной емкости с заведомо малыми тепловыми потерями бы-

ли проведены для оценки влияния фактора емкости нагрузки на коэффициент прохождения.

2. ИЗМЕРЕНИЕ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ ЩЕЛЕВОГО ЭЛЕМЕНТА, НАГРУЖЕННОГО КОНДЕНСАТОРОМ ПОСТОЯННОЙ ЕМКОСТИ

Резонансную частоту щелевого элемента ЧСП и коэффициента прохождения на этой частоте определяли волноводным методом по частотной зависимости коэффициента прохождения $T(f)$ при расположении элемента в центре поперечного сечения волновода.

Измерения проводили для образца щелевого элемента, нагруженного двумя (рис. 3а) и одним (рис. 3б) конденсатором постоянной емкости. Квадратные щелевые элементы были выполнены на основе трехслойной пленки: 1 – лавсан толщиной 50 мкм, 2 – алюминиевая фольга 20 мкм, 3 – полиэтилен 50 мкм. Ширина щели d составляла 0.5 мм, а средний размер a стороны квадрата – 10 мм. Емкостная нагрузка представляла собой прямоугольный фрагмент алюминиевой фольги 4,

Таблица 1. Результаты измерений резонансной частоты и коэффициента прохождения в соответствии со схемой рис. 3а

Сторона квадратной щели, мм	Сечение волновода, мм ²	Емкость нагрузки, пФ	Резонансная частота, ГГц	Коэффициент прохождения, дБ
10	35 × 15	0	7.5	-1.0
10	48 × 24	0.25	5.7	-3.0
10	48 × 24	0.5	5.2	-4.0
10	48 × 24	1.0	3.5	-5.0
10	72 × 34	2.0	2.85	-5.5
10	72 × 34	3.0	2.44	-7.5
10	72 × 34	4.0	2.18	-15.0

Таблица 2. Результаты измерений резонансной частоты и коэффициента прохождения в соответствии со схемой рис. 3б

Сторона квадратной щели, мм	Сечение волновода, мм ²	Емкость нагрузки, пФ	Резонансная частота, ГГц	Коэффициент прохождения, дБ
10	35 × 15	0	7.5	-1.0
10	35 × 15	0.25	7.0	-1.0
10	35 × 15	0.5	6.6	-1.0
10	35 × 15	1.0	5.4	-1.0
10	35 × 15	2.0	5.2	-2.0
10	48 × 24	4.0	4.3	-3.0
10	72 × 34	7.0	4.2	-4.0

размещенный на щели и образующий два плоских последовательно соединенных конденсатора.

Емкостная нагрузка C рассчитывалась в соответствии с известной формулой для плоских конденсаторов:

$$C = \frac{S\varepsilon}{8\pi l} [\text{см}], \quad (1)$$

где S — площадь конденсатора, $\varepsilon = 2.25$ и $l = 0.005$ см — диэлектрическая проницаемость и толщина полиэтиленового слоя соответственно. Здесь учтено, что емкость нагрузки равна половинной емкости двух одинаковых конденсаторов.

При измерении образец размещали между двумя фланцами волноводов. Штриховой линией на рисунке показано поперечное сечение волновода.

В табл. 1 и 2 приведены результаты измерения резонансной частоты и коэффициента прохождения в соответствии со схемами рис. 3а и 3б для

различных значений емкостных нагрузок. В случае двух емкостных нагрузок (рис. 3а, табл. 1) коэффициент прохождения резко падает, когда величина емкостной нагрузки превышает 3 пФ. Такое поведение коэффициента прохождения объясняется уменьшением импеданса емкостной нагрузки до значений менее 20 Ом. Относительная перестройка резонансной частоты $f_{\text{макс}}/f_{\text{мин}}$ составляет около 3 при изменении емкостной нагрузки от 0 до 3 пФ. В случае двух емкостных нагрузок (рис. 3б, табл. 2) при изменении емкостной нагрузки от 0 до 7 пФ коэффициент прохождения меняется сравнительно мало, находясь в интервале $-1...-4$ дБ. При этом относительная перестройка резонансной частоты $f_{\text{макс}}/f_{\text{мин}}$ составляет около 1.8. Заметим, что в случае короткого замыкания щели резонансная частота изменяется сравнительно мало по сравнению со случаем нагрузки 7 пФ (от 4.2 ГГц до 3.75 ГГц).

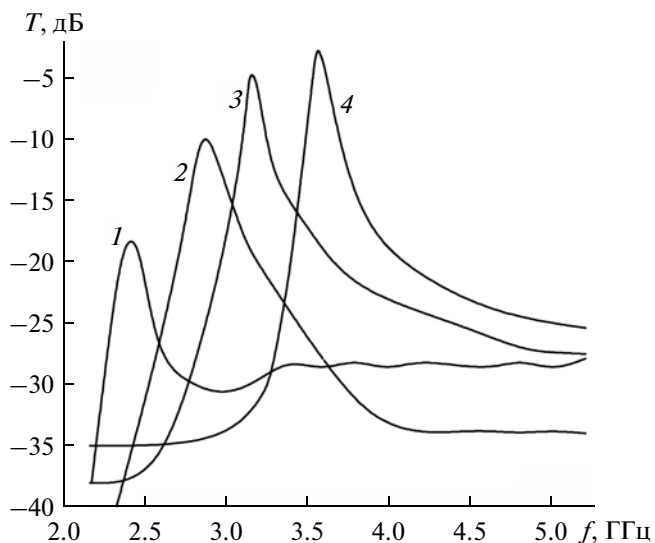


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента прохождения через квадратный щелевой элемент с размером стороны $a = 10$ мм, нагруженный двумя варакторами ВВ857. Кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют управляющему напряжению на варакторах 10, 15, 20 и 29 В.

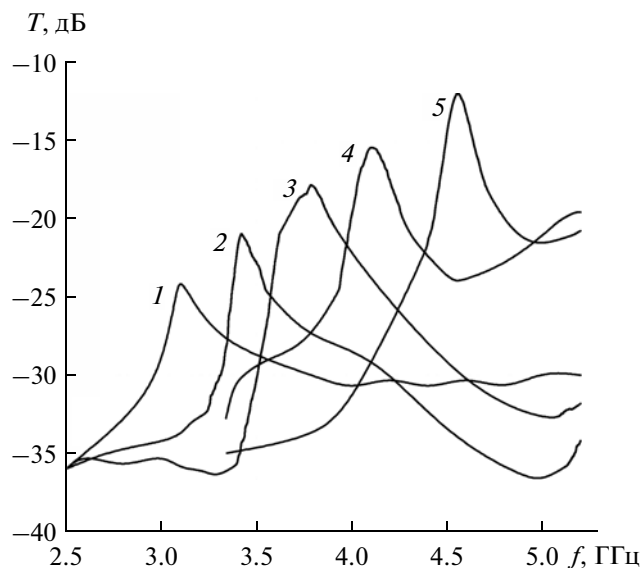


Рис. 5. Частотная зависимость коэффициента прохождения через квадратный щелевой элемент с размером стороны $a = 7$ мм, нагруженный двумя варакторами ВВ857. Кривые 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют управляющему напряжению на варакторах 10, 13, 15, 20 и 29 В.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОХОЖДЕНИЯ ДЛЯ ЩЕЛЕВОГО ЭЛЕМЕНТА ЧСП, НАГРУЖЕННОГО ВАРАКТОРАМИ

В качестве нагрузок переменной емкости были использованы два типа варакторов: варактор средней емкости ВВ857 фирмы INFINEON и варактор малой емкости МА46Н120 фирмы МАСОМ. Щелевые элементы были двух типоразмеров: $a = 10$ мм, $d = 0.5$ мм и $a = 7$ мм, $d = 0.5$ мм. Резонансную частоту элемента и коэффициент прохождения на резонансной частоте определяли по частотной зависимости коэффициента прохождения, измеренной волноводным методом. Частотные зависимости коэффициентов прохождения T для схем на рис. 1а, двух типоразмеров щелевых элементов и двух типов варакторов приведены на рис. 4–7. Так, на рис. 4 и 5 приведены частотные зависимости коэффициентов прохождения для варактора ВВ857 и щелевых элементов с $a = 10$ мм и $a = 7$ мм соответственно. По данным производителя емкость варактора на частоте 1 МГц меняется в интервале от 7 до 0.5 пФ при изменении управляющего напряжения от 0 до 29 В. Как следует из рис. 4 и 5, сильное падение коэффициента прохождения имеет место уже при снижении управляющего напряжения на варакторе до 10 В, что соответствует емкости 1 пФ. Заметим, что в случае емкостных нагрузок в виде конденсаторов с малыми тепловыми потерями значительное падение коэффициента прохождения имеет место

при емкости 3...4 пФ. Такое различие в коэффициентах прохождения можно объяснить тепловым рассеянием энергии на варакторе, которое растет с увеличением емкости варактора и, соответственно, с увеличением тока высокой частоты через последовательную цепь “емкостное + активное сопротивление” варактора.

На рис. 6 и 7 представлены частотные зависимости коэффициентов прохождения для варакторов типа МА46Н120. По данным производителя емкость варактора этого типа на частоте 1 МГц меняется в интервале от 1.1 до 0.15 пФ при изменении управляющего напряжения от 0 до 20 В. Как следует из рис. 6 и 7, коэффициенты прохождения при использовании этих варакторов оказываются выше во всем интервале управляющих напряжений при относительной перестройке резонансной частоты $f_{\text{макс}}/f_{\text{мин}} = 1.5$. Это можно объяснить как меньшими значениями емкостей, так и меньшими тепловыми потерями в варакторе. Этот результат не противоречит результатам измерения решетки из восьми квадратных щелевых элементов, каждый из которых управляется двумя варакторами с характеристиками, близкими к характеристикам МА46Н120 [18].

На рис. 8 представлена частотная зависимость коэффициента прохождения для схемы, представленной на рис. 1б с варактором ВВ857. Как и следовало ожидать, диапазон перестройки лежит внутри интервала частот, который ограничен сверху условием отсутствия емкостной нагрузки и снизу условием короткого замыкания нагрузки.

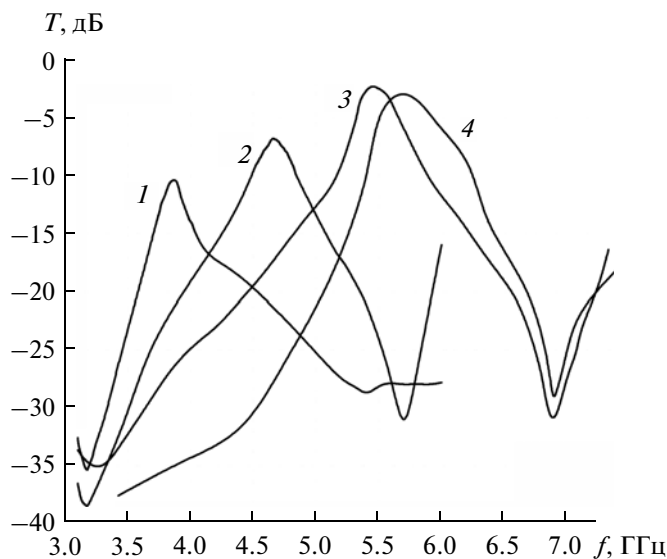


Рис. 6. Частотная зависимость коэффициента прохождения через квадратный щелевой элемент с размером стороны $a = 10$ мм, нагруженный двумя варакторами МА46Н120. Кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют управляющему напряжению на варакторах 0, 2, 15 и 20 В.

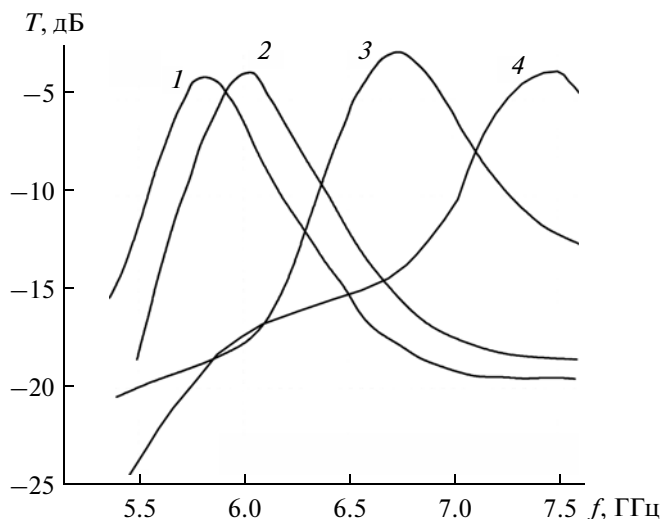


Рис. 7. Частотная зависимость коэффициента прохождения через квадратный щелевой элемент с размером стороны $a = 7$ мм, нагруженный двумя варакторами МА46Н120. Кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют управляющему напряжению на варакторах 6, 7, 10, и 20 В.

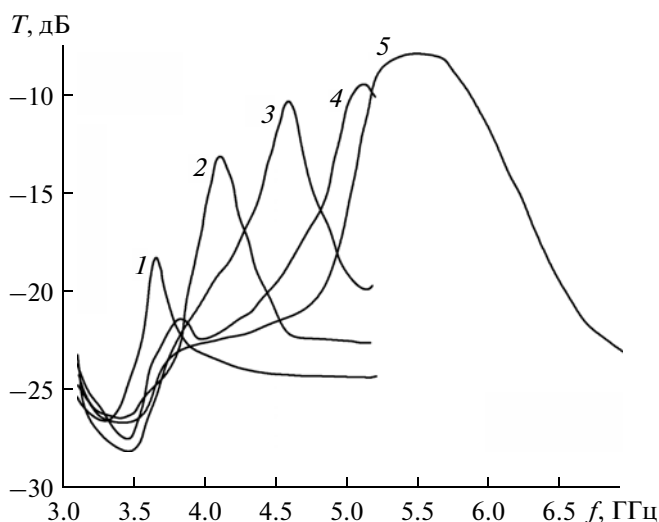


Рис. 8. Частотная зависимость коэффициента прохождения через квадратный щелевой элемент с размером стороны $a = 10$ мм, нагруженный одним варактором ВВ857. Кривые 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют управляющему напряжению на варакторах 0, 5, 10, 20 и 29 В.

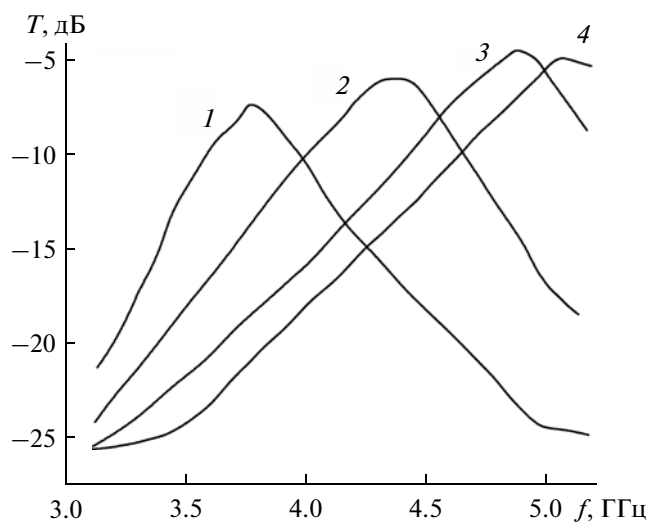


Рис. 9. Частотная зависимость коэффициента прохождения через квадратный щелевой элемент с размером стороны $a = 17$ мм, нагруженный двумя варакторами ВВ857 и конденсатором 0306 (30 пФ). Кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют управляющему напряжению на варакторах 0, 10, 20 и 29 В.

Границы этого интервала соответственно равны 7.5 ГГц и 3.7 ГГц. Как и в случае схемы с двумя варакторами ВВ857, коэффициент прохождения быстро уменьшается при управляющем напряжении менее 10 В.

На рис. 9 показана частотная зависимость коэффициента прохождения для схемы, представленной

на рис. 1в с варактором ВВ857 и следующими параметрами щелевого элемента: $a = 17$ мм и $d = 1$ мм, емкость конденсатора марки 0603 $C = 30$ пФ. Из рисунка видно, что при изменении управляющего напряжения на варакторах от 29 В до 0 резонансная частота меняется от 5 ГГц до 3.8 ГГц, а коэффициент прохождения на резонансной частоте — от -6 дБ до -10 дБ.

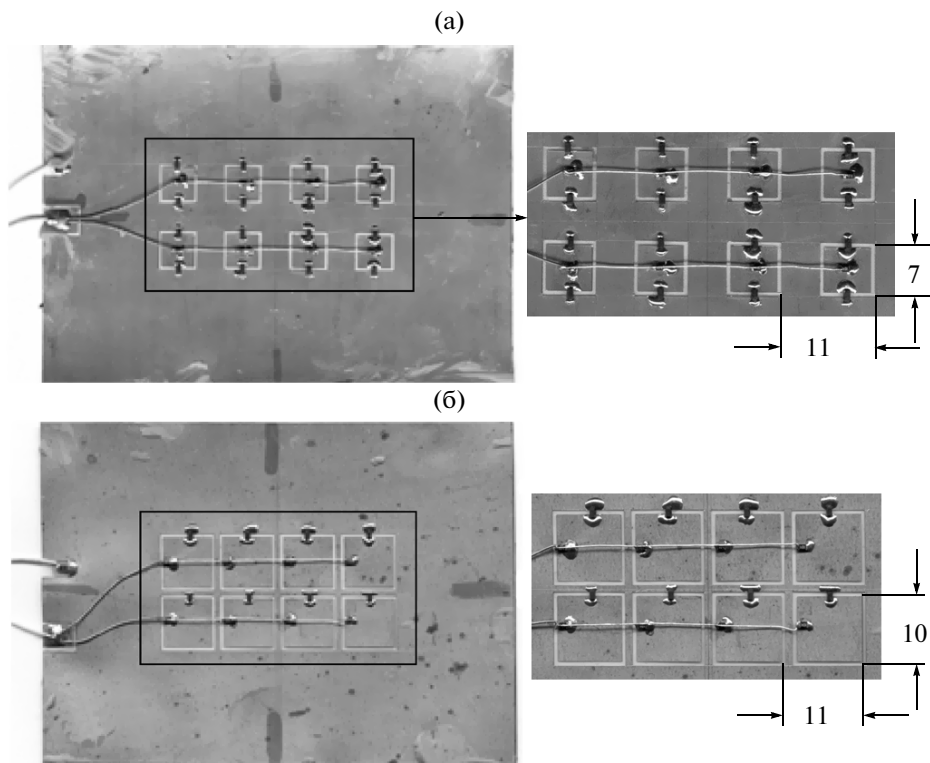


Рис. 10. Внешний вид решеток из квадратных щелевых элементов, нагруженных двумя (а) и одним (б) варакторами ВВ857.

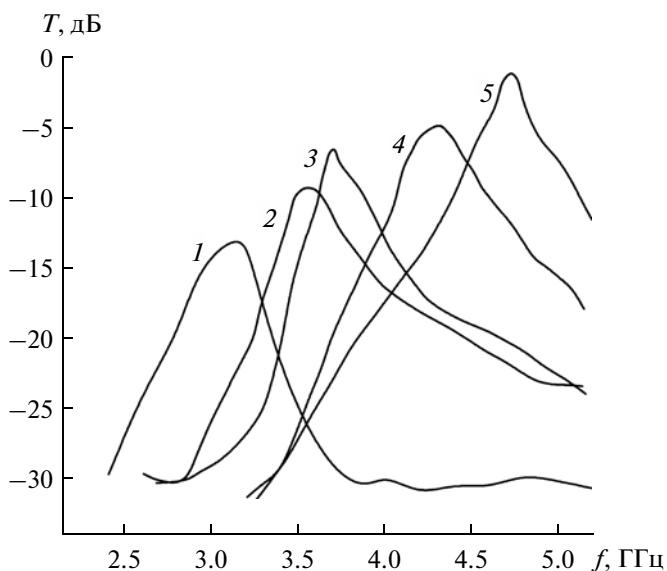


Рис. 11. Частотная зависимость коэффициента прохождения через решетку из восьми квадратных щелевых элементов с размером стороны $a = 7$ мм, нагруженных двумя варакторами ВВ857. Кривые 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют управляющему напряжению на варакторах 10, 13, 15, 20 и 29 В.

4. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОХОЖДЕНИЯ ЧЕРЕЗ РЕШЕТКУ ИЗ ЩЕЛЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЧСП, НАГРУЖЕННЫХ ВАРАКТОРАМИ

Результаты измерения волноводным методом коэффициента прохождения через образцы единичных щелевых элементов отличаются от результатов измерения коэффициента прохождения через бипериодические решетки из большого числа элементов в условиях свободного пространства. Чтобы максимально уменьшить это различие, были проведены волноводным же методом измерения коэффициента прохождения через решетки из восьми элементов, нагруженных либо двумя, либо одним варактором ВВ857. Внешний вид и размеры решеток даны на рис 10а и 10б. Частотные зависимости коэффициентов прохождения через образцы решеток с элементами, нагруженными двумя и одним варактором ВВ857, представлены соответственно на рис. 11 и 12. Как следует из сравнения частотных зависимостей коэффициентов прохождения для решеток (рис. 11 и 12) и одиночных элементов (рис. 5 и 8), соответствующие резонансные частоты практически не различаются, но коэффициенты прохождения на этих частотах для решеток существенно выше. Последнее особенно относится к случаю элементов,

нагруженных одним варактором. Так, при перестройке резонансных частот от 5.5 ГГц до 3.6 ГГц коэффициент прохождения на этих частотах меняется в интервале от -1 до -4 дБ в случае решетки и в интервале от -8 до -18 дБ в случае одиночного элемента.

Эффективность управления резонансной частотой решетки можно оценить как относительную перестройку частоты $f_{\text{макс}}/f_{\text{мин}}$, при которой коэффициент прохождения меняется в пределах 3 дБ. Для решетки, нагруженной двумя варакторами, отношение $f_{\text{макс}}/f_{\text{мин}}$ составило значение 1.15, а для решетки, нагруженной одним варактором, -1.5 . Заметим, что относительная перестройка частоты даже не решетки, а отдельного щелевого элемента, нагруженного двумя варакторами малой емкости МА46Н120, составляет 1.28.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены три возможные схемы подключения управляющих варакторов к щелевым элементам полосно-пропускающей ЧСП: схема с двумя варакторами, с одним варактором, с двумя варакторами плюс постоянная емкость. С целью оценки потенциальных возможностей перестройки резонансной частоты элемента ЧСП при различных схемах подключения варакторов была проведена серия измерений коэффициента прохождения через образцы элементов, нагруженных пленочными конденсаторами различной емкости с заведомо малыми тепловыми потерями. Измерения показали, что в схеме с двумя конденсаторами коэффициент прохождения на резонансной частоте начинает резко падать при емкости, большей 3 пФ, что можно объяснить кардинальной перестройкой электромагнитного поля в щелевом элементе. Относительная перестройка частоты при изменении емкости в интервале 0.25...3 пФ составляет 2.3. В схеме с одним конденсатором при изменении емкости от 0.25 до 7 пФ коэффициент прохождения на резонансной частоте снижается всего на 3 дБ. Относительная перестройка частоты при этом составляет величину ~ 1.7 .

Результаты измерения коэффициентов прохождения через образцы элементов, нагруженных варакторами, продемонстрировали существенно меньшие диапазоны перестройки частоты, что особенно относится к схеме подключения с двумя варакторами ВВ857 средней величины емкости. Резкое снижение коэффициента прохождения имеет место при управляющем напряжении ≤ 10 В, что приблизительно соответствует емкости варактора ≥ 1 пФ. Относительная перестройка частоты, при которой коэффициент прохождения изменялся не более чем на 3 дБ, составляла 1.1. В случае применения в этой схеме варакторов ма-

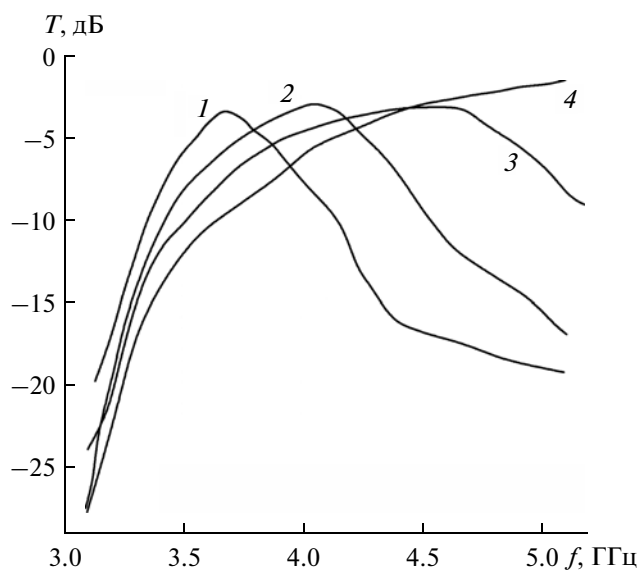


Рис. 12. Частотная зависимость коэффициента прохождения через решетку из восьми квадратных щелевых элементов с размером стороны $a = 10$ мм, нагруженных одним варактором ВВ857. Кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют управляющему напряжению на варакторах 0, 5, 10 и 20 В.

лой емкости МА46Н120 относительная перестройка частоты увеличивалась до 1.3.

При измерении коэффициента прохождения через решетки из восьми щелевых элементов, нагруженных варакторами ВВ857, получены значения перестройки частоты 1.15 и 1.5 для схем с двумя и одним варактором соответственно.

Результаты измерения характеристик отдельных щелевых элементов и решеток из этих элементов позволяют оценить достижимые значения перестройки резонансной частоты полосно-пропускающих ЧСП следующим образом: 1.4 и 1.5 — для ЧСП с элементами, управляемыми двумя варакторами малой емкости МА46Н120 и одним варактором средней емкости ВВ857 соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mias C. // Electronics Lett. 2003. V. 39. № 11. P. 850.
2. Mias C. // Electronics Lett. 2003. V. 39. № 14. P. 1060.
3. Mias C. // Microwave and Optical Technology Lett. 2004. V. 43. № 6. P. 508.
4. Mias C. // Microwave and Optical Technology Lett. 2005. V. 44. № 5. P. 412.
5. Mias C. // IEEE Microwave and Wireless Components Lett. 2005. V. 15. № 9. P. 570.
6. Казанцев Ю.Н., Крафтмахер Г.А., Мальцев В.П. // РЭ. 2013. Т. 58. № 9. С. 958.
7. Крафтмахер Г.А., Бутылкин В.С., Казанцев Ю.Н. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. № 11. С. 21.

8. *Chang T.K., Langley, R.J., Parker E.A.* // IEEE Microwave and Guided Wave Lett. 1993. V. 3. № 10. P. 387.
9. *Shiroma W.A., Bundy S.C., Hollung S. et al.* // IEEE Trans. 1995. V. MTT-43. № 12. P. 2904.
10. *Bayatpur F., Sarabandi K.* // IEEE Trans. 2009. V. 57. № 2. P. 590.
11. *Bayatpur F., Sarabandi K.* // IEEE Trans. 2009. V. 57. № 6. P. 1433.
12. *Sanz-Izquierdo B., Ekpo L.T., Robertson J. B. et al.* // Electronics Lett. 2008. V. 44. № 21. P. 1268.
13. *Sanz-Izquierdo B., Parker E.A., Robertson J. B. et al.* // Electronics Lett. 2009. V. 45. № 22. P. 1107.
14. *Sanz-Izquierdo B., Parker E.A., Batchelor J.C.* // IEEE Trans. 2011. V. AP-59. № 7. P. 2728.
15. *Bocia I.L., Russo I., Amendola G. et al.* // Electronics Lett. 2009. V. 45. № 24. P. 1213.
16. *Russo I., Boccia L., Amendola G. et al.* // Proc. Fourth European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP 2010). 12–16 Apr. 2010. Barcelona. N.Y.: IEEE, 2010. P. 235.
17. *Munk B.A.* Frequency Selective Surfaces. Theory and Design. N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
18. *Mias C., Tsakonas C.* // Microwave and Optical Technology Lett. 2005. V. 45. № 1. P. 62.
19. *Martynyuk A.E., Lopez J.I.M., Martynyuk N.A.* // Electronics Lett. 2005. V. 41. № 1. P. 2.
20. *Durbin J.L., Saed M.A.* // Progress in Electromagnetics Research Lett. 2012. V. 29. P. 43.