
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

TECHNICAL SCIENCE

УДК 621.3.049
ББК 32.844
К 77

Кравцов В.А.

Аспирант кафедры теоретической физики и компьютерных технологий Кубанского государственного университета, тел. 89618543486, e-mail: vakravtsov@mail.ru

Чижиков В.И.

Доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой теоретической физики и компьютерных технологий Кубанского государственного университета, тел. 89183351736, e-mail: cvi@phys.kubsu.ru

Использование печатных плат в СВЧ приборах (Рецензирована)

Аннотация

На примере фильтра нижних частот, реализованного на полосковых линиях передачи, проанализирована возможность использования печатных плат в СВЧ приборах в качестве альтернативы дорогим платам на керамической подложке. Рассчитан фильтр нижних частот лестничного типа для оценки возможностей замены полосковых плат на основе подложек из поликора новыми печатными платами. Предлагаемые печатные платы в ряде задач могут успешно заменить дорогостоящие платы на керамической подложке.

Ключевые слова: печатные платы, полосковый фильтр нижних частот, СВЧ устройства.

Kravtsov V.A.

Post-graduate student of Theoretical Physics and Computer Technologies Department, Kuban State University, ph. 89618543486, e-mail: vakravtsov@mail.ru

Chizhikov V.I.

Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of Theoretical Physics and Computer Technologies Department, Kuban State University, ph. 89183351736, e-mail: cvi@phys.kubsu.ru

Use of printed-circuit boards in the microwave devices

Abstract

Using the microstrip lowpass filter as an example, an analysis is made of a possibility of application of printed-circuit boards in the microwave devices as an alternative to high-cost boards on a ceramic substrate. The microstrip lowpass filter of the ladder type is calculated to assess possibilities of replacement of strip boards basing on polybark substrates by new printed-circuit boards. The offered printed-circuit boards can successfully replace high-cost boards on a ceramic substrate in a number of tasks.

Keywords: printed-circuit boards, microstrip lowpass filter, microwave devices.

Введение

В современных условиях при разработке радиоэлектронных приборов приходится решать научно-технические задачи с учетом производственных и финансовых возможностей. Такого рода задачи должны иметь компромиссные решения, обеспечивающие меньшие затраты как на стадии разработки устройства, так и при его серийном выпуске. Для достижения этой цели необходимо учитывать все аспекты современных технологий, применяемых при производстве электронных приборов.

Широкое распространение в приборах СВЧ диапазона получили линии передачи на основе полосков. С их использованием разработаны методики конструирования раз-

личных устройств: фильтров, ответвителей, делителей, сумматоров мощности и др. В настоящее время для изготовления плат с полосковыми линиями применяются различные материалы и технологии.

При этом подложка остается важным составным элементом линии передачи. Свойства подложки определяют параметры линии передачи, технологический процесс изготовления платы и устройства на ее основе, а также конструкцию модуля в целом. Основные требования, предъявляемые к подложкам, следующие: малые потери; достаточно высокое значение диэлектрической проницаемости; высокая чистота поверхности и чистота материала; строгие допуски на линейные размеры; большая теплопроводность; согласование температурного коэффициента линейного расширения подложки и нанесенных на нее пленок; устойчивость к механическим воздействиям; инертность к химическим растворителям; низкая стоимость; независимость диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления от изменения частоты и температуры [1]. Всем перечисленным требованиям не удовлетворяет ни одна известная подложка. Поэтому в каждом конкретном случае выбор подложки носит компромиссный характер.

Производители печатных плат предлагают большой перечень материалов (Arlon, Rogers, Taconic и др.) для изготовления плат, используемых в СВЧ приборах. Обладая стабильными электрическими характеристиками в широком диапазоне частот, такие материалы могут служить основой для разработки СВЧ печатных плат, которые в ряде задач могут успешно заменить дорогостоящие керамические платы. Примером такой задачи может служить разработка полоскового фильтра нижних частот (ФНЧ) для обеспечения требуемой чистоты спектра СВЧ сигнала.

При выборе материала подложки с соответствующими электрическими характеристиками и толщиной можно разработать полосковые печатные платы, которые не будут уступать по своим техническим параметрам и габаритным размерам платам на основе алюмооксидной керамики. Однако из-за разных технологий производства допуски на геометрические размеры проводников печатной платы существенно ниже, чем для платы на основе, например, поликора (Al_2O_3). А это, в свою очередь, означает, что печатные платы будут иметь больший разброс электрических параметров, особенно при размерах элементов, близких к предельным размерам для выбранной технологии производства.

В данной работе на примере фильтра нижних частот, реализованного на полосковых линиях передачи, проанализирована возможность использования печатных плат в СВЧ приборах в качестве альтернативы дорогим платам на керамической подложке.

Метод расчета

Для оценки возможности реальной замены полосковых плат на основе подложек из поликора печатными платами сначала необходимо было рассчитать ФНЧ на основе одного из материалов, применяемых при производстве СВЧ печатных плат. Затем изготовить платы на фирме, специализирующейся на производстве печатных плат, измерить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) полученных образцов и сравнить с АЧХ аналогичного ФНЧ на поликоровой плате с целью анализа разброса значений параметров.

При синтезе СВЧ фильтров широкое распространение получил метод прототипных схем, в основе которого лежит реализация элементов СВЧ фильтров по табулированным параметрам элементов прототипной схемы [2]. В данном случае в качестве прототипа был использован фильтр с чебышевской характеристикой.

Приведенная здесь методика расчета фильтров подробно изложена в [3]. Здесь приводятся только формулы, необходимые для расчета геометрических размеров эле-

ментов ФНЧ.

Исходными параметрами для расчета ФНЧ служат:

f_c – граничная частота полосы пропускания фильтра;

f_s – граничная частота полосы заграждения фильтра;

L_{Ar} – неравномерность АЧХ в полосе пропускания (дБ);

L_{As} – минимальное ослабление в полосе заграждения (дБ);

ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки;

h – толщина подложки.

На первом шаге метода расчета, исходя из заданных L_{Ar} , L_{As} при $\Omega = \Omega_s$ определили требуемый порядок прототипа

$$n \geq \frac{\operatorname{arch} \sqrt{\frac{10^{0,1L_{As}} - 1}{10^{0,1L_{Ar}} - 1}}}{\operatorname{arch} \Omega_s}.$$

Здесь $\Omega_s = \left(\frac{\Omega_c}{\omega_c}\right)\omega$ – приведенная частота [рад/с], $\omega = 2\pi f$ – круговая частота (рад/с) и f – частота сигнала (Гц). Через ω_c и Ω_c обозначены круговая и приведенная частоты среза ФНЧ соответственно, Ω_s – приведенная частота заграждения ФНЧ. Отметим, что $\Omega_c = 1$ рад/с.

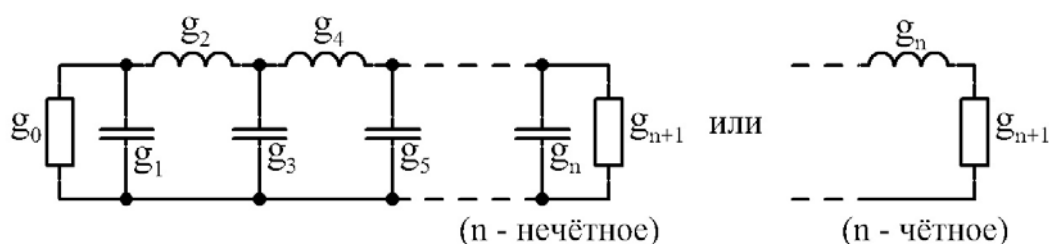


Рис. 1. Схема прототипа ФНЧ лестничного типа

Потом нашли обобщенные элементы прототипа фильтра. Для прототипа ФНЧ лестничного типа с чебышевской характеристикой обобщенные элементы, представленные на рисунке 1, описываются следующими выражениями:

$$g_0 = 1,0;$$

$$g_1 = \frac{2}{\gamma} \sin\left(\frac{\pi}{2n}\right);$$

$$g_i = \frac{1}{g_{i-1}} \cdot \frac{4 \sin\left[\frac{(2i-1)\pi}{2n}\right] \cdot \sin\left[\frac{(2i-3)\pi}{2n}\right]}{\gamma^2 + \sin^2\left[\frac{(i-1)\pi}{n}\right]} \quad \text{для } i = 2, 3, \dots, n;$$

$$g_{n+1} = \begin{cases} 1,0 & \text{для нечётных } n, \\ \operatorname{cth}^2\left(\frac{\beta}{4}\right) & \text{для чётных } n, \end{cases}$$

где

$$\beta = \ln \left[\operatorname{cth} \left(\frac{L_{Ar}}{17,37} \right) \right], \quad \gamma = \operatorname{sh} \left(\frac{\beta}{2n} \right).$$

На следующем шаге обобщенные элементы прототипа преобразовываются в действительные значения реактивных элементов ФНЧ в соответствии с формулами

$$L = \frac{\Omega_c}{\omega_c} \frac{Z_0}{g_0} g, \quad C = \frac{\Omega_c}{\omega_c} \frac{g_0}{Z_0} g,$$

где Z_0 – сопротивление источника сигнала (обычно 50 Ом).

Рассчитанные по этим формулам индуктивность и емкость элементов имеют размерность Гн и Ф соответственно. Кроме того, нужно задать ширину полосков элементов. Как известно, от ширины полосковой линии зависит характеристическое сопротивление этой линии. В данном случае, задавая ширину полосков, необходимо выполнить условие

$$Z_{0C} < Z_0 < Z_{0L},$$

где через Z_{0C} и Z_{0L} обозначено характеристическое сопротивление линий с низким и высоким сопротивлениями соответственно. Требование выполнения этого условия связано с тем, что низкоимпедансные линии лучше аппроксимируют емкостные элементы, высокоимпедансные – индуктивные.

Характеристическое сопротивление определяется по формуле

$$Z_c = \frac{\eta}{2\pi\sqrt{\varepsilon_{re}}} \ln \left[\frac{F}{u} + \sqrt{1 + \left(\frac{2}{u} \right)^2} \right].$$

В этой формуле $\eta = 120\pi$ Ом и

$$F = 6 + (2\pi - 6) \exp \left[- \left(\frac{30,666}{u} \right)^{0,7528} \right].$$

Точность расчета $Z_c\sqrt{\varepsilon_{re}}$ превосходит 0,01% для $u \leq 1$ и 0,03% для $u \leq 1000$.

Эффективная относительная диэлектрическая проницаемость ε_{re} находится из выражения

$$\varepsilon_{re} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10}{u} \right)^{-ab},$$

где $u = W/h$, W – ширина полосковой линии, ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки, и

$$a = 1 + \frac{1}{49} \ln \left(\frac{u^4 + \left(\frac{u}{52} \right)^2}{u^4 + 0,432} \right) + \frac{1}{18,7} \ln \left[1 + \left(\frac{u}{18,1} \right)^3 \right], \quad b = 0,564 \left(\frac{\varepsilon_r - 0,9}{\varepsilon_r + 3} \right)^{0,053}.$$

При $\varepsilon_r \leq 128$ и $0,01 \leq u \leq 100$ точность этой модели превосходит 0,2%.

Задавая ширину полосковых линий, важно также убедиться, что рабочие частоты ФНЧ не превосходят частот

$$f_1 = \frac{c \cdot \operatorname{arctg} \varepsilon_r}{\sqrt{2\pi h} \sqrt{\varepsilon_r - 1}}, \quad f_2 = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r} (2W + 0,8h)}.$$

где через c обозначена скорость света в вакууме ($c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с).

В данной работе рассматривается пример ФНЧ лестничного типа, использующего разомкнутые шлейфы. Для такого ФНЧ физическая длина низко- и высокоимпедансных линий вычисляется по следующим формулам:

$$l_L = \frac{\lambda_{gL}}{2\pi} \arcsin\left(\frac{\omega_c L}{Z_{0L}}\right), \quad l_C = \frac{\lambda_{gC}}{2\pi} \operatorname{arctg}(\omega_c C Z_{0C}).$$

Соответственно λ_{gL} и λ_{gC} – длины квази-ТЕМ волн в низко- и высокоимпедансном полосковом волноводе определяются по формуле

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{re}}} = \frac{c}{f \sqrt{\varepsilon_{re}}},$$

где λ_0 – длина волны колебания с частотой f в вакууме.

Далее, чтобы компенсировать неучтенную реактивность двух соседних высокоимпедансных линий с длинами $l_{Lлев}$ и $l_{Lправ}$, расчетная длина l_C должна быть скорректирована в соответствии с выражением

$$\omega_c C = \frac{1}{Z_{0C}} \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l_C}{\lambda_{gC}}\right) + \frac{1}{Z_{0C}} \operatorname{tg}\left(\frac{\pi l_{Lлев}}{\lambda_{gL}}\right) + \frac{1}{Z_{0C}} \operatorname{tg}\left(\frac{\pi l_{Lправ}}{\lambda_{gL}}\right).$$

Для случая, когда С-секция является первой или конечной секцией фильтра, последняя формула принимает вид:

$$\omega_c C = \frac{1}{Z_{0C}} \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l_C}{\lambda_{gC}}\right) + \frac{1}{Z_{0C}} \operatorname{tg}\left(\frac{\pi l_L}{\lambda_{gL}}\right).$$

Наконец, рассчитывается укорочение С-секций фильтра

$$\Delta l = \frac{c Z_{0C}}{\sqrt{\varepsilon_{re}}} \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r W}{h}.$$

На этом расчет ФНЧ заканчивается.

Сравнение расчетных и измеренных характеристик

По описанной методике был рассчитан ФНЧ. Исходные данные для расчета: $f_c = 3,2$ ГГц, $f_s = 4,0$ ГГц, $L_{Ar} = 0,1$ дБ, $L_{As} = 35$ дБ.

В качестве материала подложки был выбран Ro4003С толщиной 0,305 мм. Для финишного покрытия проводников печатной платы применялось иммерсионное золочение. Рассчитанная топология фильтра представлены на рисунке 2 (а).

Габаритные размеры топологии фильтра (в данном примере: 35,9x7,2 мм) не всегда могут оказаться приемлемыми. Поэтому можно воспользоваться приемами миниатюризации, которые для некоторых типов фильтров описаны, например, в [3]. В результате получаем ФНЧ изображенный на рисунке 2 (б) с габаритными размерами топологии 17,5x7,2 мм, т.е. площадь топологии фильтров уменьшилась вдвое.

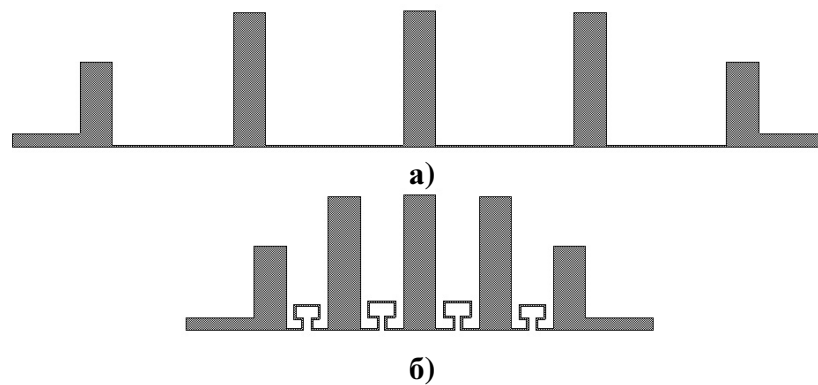


Рис. 2. Топология ФНЧ-1 до миниатюризации (а) и после (б)

Следует отметить, что данная методика имеет границы применимости, и только не выходя за эти границы можно получить хорошее согласование расчетных характеристик ФНЧ с результатами моделирования полученных фильтров в специализированных программах и результатами тестирования изготовленных образцов. Поэтому расчеты, как правило, проводятся в несколько итераций.

При разработке любого устройства необходимо учитывать технологические возможности производства, следить за тем, чтобы изготовление было практически реализуемым, желательно отработанными методами без излишних и неоправданных затрат.

В частности, при разработке топологии полосковых ФНЧ наиболее критичным параметром является ширина W L-секций фильтра. Большинство изготовителей СВЧ печатных плат на Ro4003C обеспечивают минимальную ширину проводника/зазора 0,1/0,1 мм, хотя отдельные производители заявляют о возможности обеспечить 0,075/0,075 мм в критичных местах. Таким образом, ширина W L-секций фильтра не может быть меньше 0,1 мм, причем, если имеется такая возможность, то лучше выбрать W равной 0,2 мм.

При разработке ФНЧ в нашем примере ширина L-секций была выбрана 0,1 мм для того, чтобы оценить параметры печатных плат при изготовлении на пределе технологических возможностей.

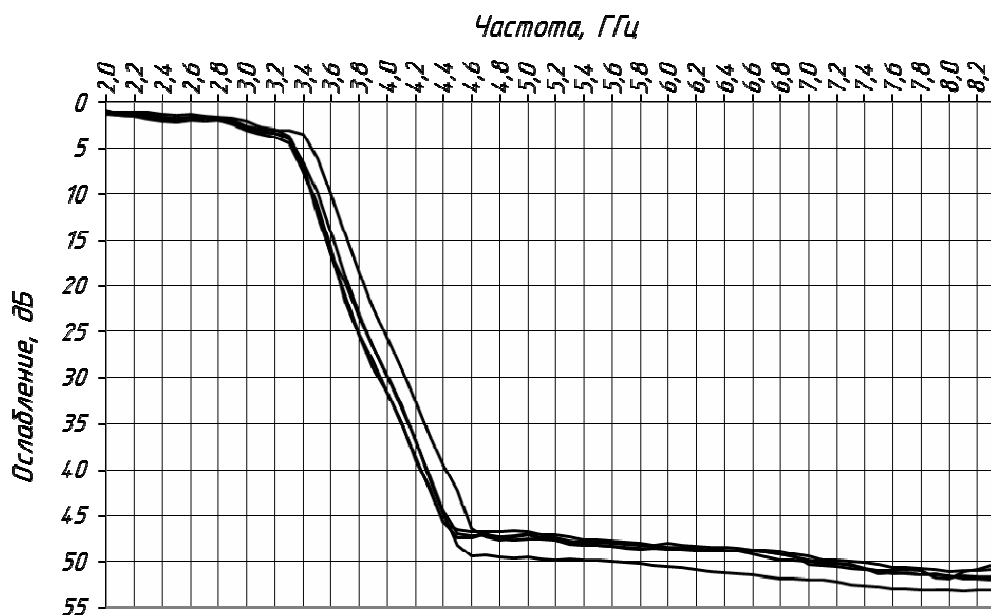


Рис. 3. Данные тестирования образцов ФНЧ на подложке из Ro4003C

Результаты тестирования образцов ФНЧ представлены на рисунке 3. Сравнение расчетной АЧХ фильтров с усредненными результатами измерений представлено на рисунке 4. Измерения проводились с помощью измерителя КСВН панорамного Р2-103.

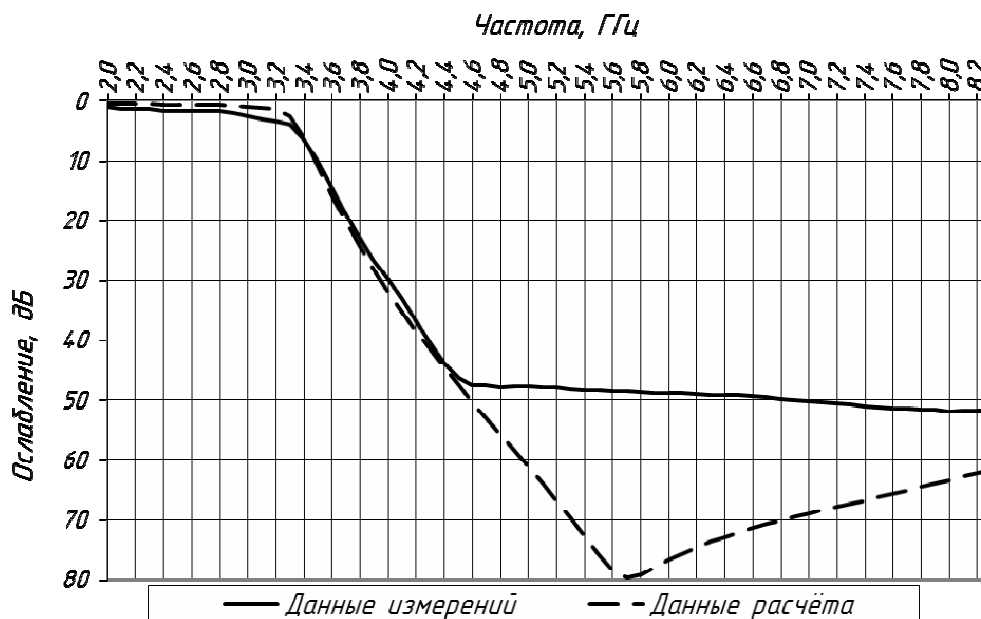


Рис. 4. Сравнение расчетных данных с усредненными данными измерений

Для сравнения разброса АЧХ ФНЧ на подложках из Ro4003С и поликора приведен рисунок 5. Пик АЧХ на частоте 6,8 ГГц обусловлен топологией фильтра и согласуется с расчетными данными.

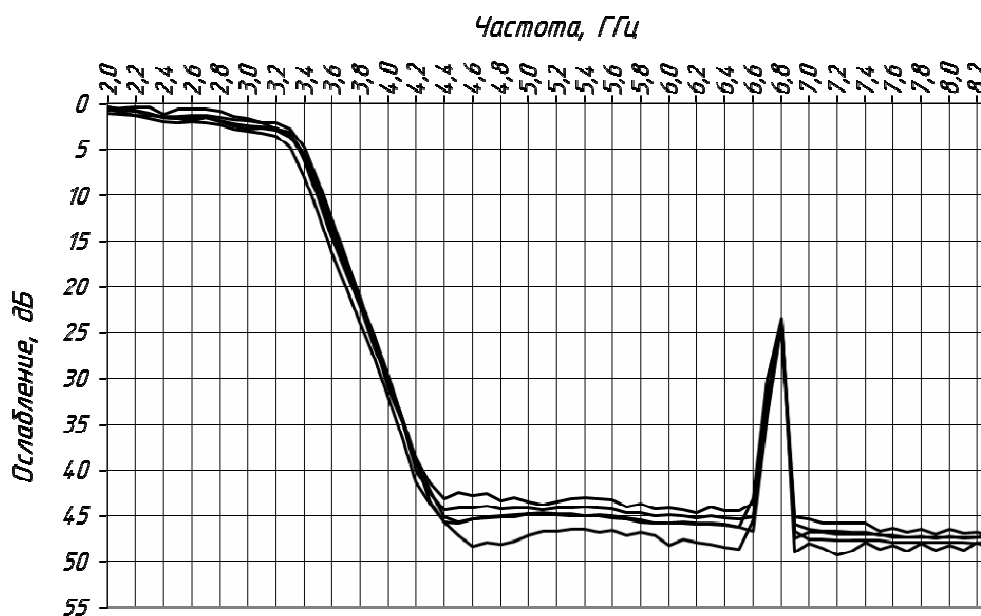


Рис. 5. Данные тестирования образцов ФНЧ на подложке из поликора

Как видно из рисунков 3 и 5, разброс АЧХ фильтров на подложке из Ro4003С несколько превосходит разброс АЧХ фильтров на поликоровой подложке, тем не менее является приемлемым для многих задач.

Заключение

Поскольку выбор подложки для полосковых СВЧ устройств носит компромиссный характер, то приведенная методика расчета полоскового ФНЧ лестничного типа на основе прототипных схем позволяет дать рекомендации для практических разработок СВЧ приборов на полосковых линиях передачи. Сравнение разброса по АЧХ фильтра, рассчитанного по указанной методике, с аналогичным ФНЧ на керамической подложке показывает, что, несмотря на несколько больший разброс параметра, печатные платы в ряде задач могут успешно заменить дорогостоящие платы на керамической подложке.

Примечания:

1. Малорацкий Л.Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ. М.: Сов. радио. 1976. 216 с.
2. Малорацкий Л.Г., Явич Л.Р. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях. М.: Сов. радио, 1972. 232 с.
3. Hong Jia-Sheng, Lancaster M.J. Microstrip Filters for RF // Microwave Applications. John Wiley & Son Inc., 2001. 488 pp.

References:

1. Maloratskiy L.G. Microminiaturization of elements and microwave devices. M.: Sov. radio. 1976. 216 pp.
2. Maloratskiy L.G., Yavich L.R. Design and calculation of the stripline microwave elements. M.: Sov. radio, 1972. 232 pp.
3. Hong Jia-Sheng, Lancaster M.J. Microstrip Filters for RF // Microwave Applications. John Wiley & Son Inc., 2001. 488 pp.