

# Электродинамический расчет и проектирование полосно-пропускающих фильтров на круглых волноводах

© Д.В. Лонкина,<sup>1</sup> В.В. Земляков,<sup>2</sup> Д.С. Губский,<sup>2</sup> С.В. Крутиев,<sup>2</sup> Г.Ф. Заргано<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт Витрулюкс,  
195030 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Южный федеральный университет,  
344006 Ростов-на-Дону, Россия  
e-mail: ds@sfedu.ru

Поступило в Редакцию 7 мая 2023 г.

В окончательной редакции 16 августа 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Показана возможность использования круглого волновода с радиальными гребнями и кольцевыми сегментами конечной толщины в качестве резонансных диафрагм при синтезе полосно-пропускающих цилиндрических волноводных фильтров. Проведен анализ зависимостей электродинамических параметров диафрагмы от ее геометрических размеров. Осуществлен синтез фильтров и проведено сравнение с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** полосно-пропускающий фильтр, круглый волновод, резонансная диафрагма со сложным поперечным сечением.

DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56798.f223-23

## Введение

Цилиндрические волноведущие структуры с различными неоднородностями сложного поперечного сечения широко используются в сверхвысокочастотной (СВЧ) технике [1–4]. Они обладают селективными свойствами, что делает возможным построение различных волноводных СВЧ фильтров [5]. Для уменьшения массогабаритных показателей фильтра вместо классических объемных резонаторов используют плоско-поперечные резонаторы в виде тонких металлических диафрагм [6]. При этом основной вклад в размеры фильтра дают четвертьволновые участки регулярного волновода, которые выполняют роль инверторов сопротивления. Такие фильтры имеют меньшие размеры, лучшее затухание в полосе заграждения и в них могут использоваться отрезки круглых волноводов с произвольно расположенными гребнями.

При проектировании СВЧ устройств часто используются различные пакеты компьютерного моделирования. Однако, успех данного процесса и затрачиваемое время сильно зависят от выбора начального приближения. Это связано с необходимостью проведения многопараметрической оптимизации электродинамических характеристик моделируемого устройства. Таким образом, получается, что выбор конструкции прототипа фильтра и его первоначальных размеров актуален и сказывается на эффективности использования в дальнейшем пакетов компьютерного моделирования и проведении многопараметрической оптимизации, поэтому в настоящей работе рассмотрен подход к проектированию полосно-пропускающих фильтров на круглых волноводах с диафрагмами сложного поперечного сечения и получению оптимальной конструкции прототипа фильтра для даль-

нейшей его оптимизации. В настоящей работе показана возможность использования круглого волновода с радиальными гребнями и кольцевыми сегментами конечной толщины (рис. 1) в качестве резонансных диафрагм [7] при синтезе полосно-пропускающих волноводных фильтров на базе цилиндрических волноведущих структур [8].

При проектировании прототипа фильтра и его дальнейшей оптимизации был использован ранее апробированный подход моделирования селективных устройств [9]. Согласно которому задаем параметры полосно-пропускающего фильтра (например, фильтр пятого порядка, полоса пропускания  $\Delta f = 400$  МГц, диаметр круглого волновода 30 мм) и определяем добротности резонансных диафрагм [10]. Далее нам необходи-

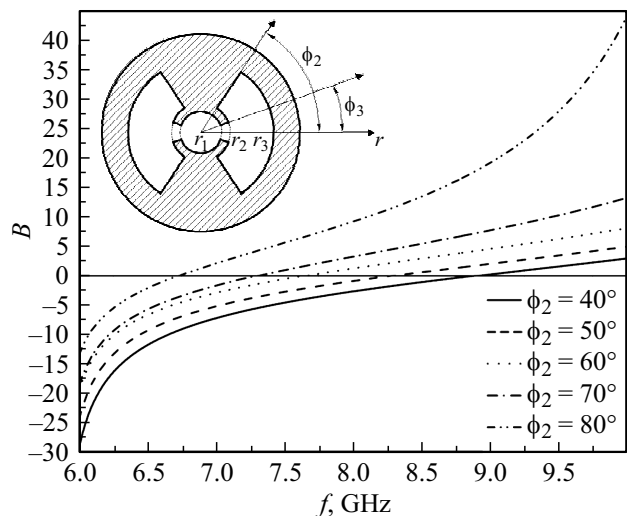


Рис. 1. Зависимость проводимости диафрагмы и ее поперечное сечение.

мо определить размеры резонансных диафрагм, удовлетворяющих заданным критериям. Для это была решена задача дифракции основной волны на бесконечно тонкой диафрагме (рис. 1) в круглом волноводе. Нас, в первую очередь, интересуют проводимость неоднородности и ее  $S$ -параметры. Для нахождения коэффициентов отражения и прохождения считаем электрические поля на апертуре неоднородности  $\mathbf{E}_N(r, \varphi)$ . Тогда коэффициенты отражения  $\Gamma_1$  и прохождения  $T_1$  для основной волны можно найти в виде:

$$1 + \Gamma_1 = \int_L \mathbf{E}_N(r, \varphi) \sigma_1 \mathbf{E}(r, \varphi) dL$$

и

$$T_1 = \int_L \mathbf{E}_N(r, \varphi) \sigma_1 \mathbf{E}(r, \varphi) dL,$$

где  $\mathbf{E}(r, \varphi)$  — собственная функция основной волны волновода,

$$\sigma_1 = \left( \int_L (\mathbf{E}(r, \varphi))^2 dL \right)^{-1}$$

— весовой множитель,  $L$  — апертура неоднородности, учитывающая ее форму. Далее можно определить электрическое поле на неоднородности в виде суммы собственных функций ее апертуры с неизвестными числовыми коэффициентами, которые определяются из решения системы линейных алгебраических уравнений по ранее описанной методике [9]. Это позволяет определить электрическое поле на неоднородности, комплексные коэффициенты отражения и прохождения и проводимость диафрагмы:  $G + jB = (1 - \Gamma_1)/(1 + \Gamma_1)$ . Разработанный метод позволил провести расчеты интересующих нас параметров. Так, на рис. 1 показана зависимость мнимой части шунтирующей проводимости  $B$ , нормированной на волновое сопротивление возбуждающей линии, для одиночной диафрагмы от размеров сектора неоднородности при  $\varphi_3 = 25^\circ$ ,  $r_1 = 2.5 \text{ mm}$ ,  $r_2 = 4.5 \text{ mm}$ ,  $r_3 = 6 \text{ mm}$ . Видно, что увеличение угла радиального гребня  $\varphi_2$  существенно сдвигает резонансную частоту диафрагмы. Проведенные расчеты показали, что изменение внешнего радиуса кольцевого сегмента  $r_2$  практически не изменяет резонансную частоту диафрагмы.

Для анализа резонансных свойств одиночной диафрагмы были рассчитаны элементы матрицы рассеяния. На рис. 2 приведены результаты расчета модуля коэффициента прохождения  $|S_{21}|$  в зависимости от частоты при изменении различных геометрических размеров неоднородности. Остальные параметры структуры имеют следующие размеры:  $r_2 = 4.5 \text{ mm}$ ,  $r_3 = 6 \text{ mm}$ , на рис. 2, *a*:  $\varphi_2 = 70^\circ$ ,  $\varphi_3 = 25^\circ$ , и  $r_1 = 2.5 \text{ mm}$ ,  $\varphi_2 = 70^\circ$  (рис. 2, *b*) и  $\varphi_3 = 25^\circ$  (рис. 2, *c*). Из рисунков видно, что изменение геометрических размеров радиального ребра приводит к существенному изменению модуля коэффициента прохождения.

Проведенные расчеты показали, что наибольшее влияние на резонансную частоту и нагруженную добротность диафрагмы, определяемую по ширине резонансной кривой, оказывают угол радиального гребня  $\varphi_2$ , угол кольцевого сегмента  $\varphi_3$  и радиус кольцевого сегмента  $r_1$ . Необходимо отметить, что внешний радиус  $r_3$  одиночной диафрагмы практически не влияет на ее добротность. Однако значительно смещает резонансную частоту. Проведенные расчеты и анализ результатов позволили выявить геометрические размеры неоднородности, существенно влияющие только на смещение резонансной частоты, а также параметры, влияющие как на резонансную частоту, так и на добротность самой диафрагмы. Такое разное поведение резонансных характеристик неоднородности от ее геометрических размеров позволяет производить более точный выбор параметров частотно-селективных устройств, удовлетворяющих заданным требованиям. Благодаря большому числу изменяемых параметров удастся рассчитать геометрические размеры резонансных диафрагм с нужной добротностью и с сохранением одинаковой резонансной частоты.

Таким образом, проектирование фильтра можно провести в два этапа.

1. Электродинамический расчет резонансной диафрагмы, который в себя включает: выбор вида неоднородности и геометрии ее апертуры; решение краевой задачи для эквивалентного волновода сложного поперечного сечения и определение его собственных значений и собственных функции и решение дифракционной задачи в одномодовом режиме работы (для этого можно приравнять поля основной волны волновода и поля на апертуре, которое в свою очередь задается разложением по ее собственным функциям). Результат: расчет коэффициентов отражения и прохождения для основной волны, а также комплексной проводимости диафрагмы.

2. Синтеза фильтра: задать требуемые характеристики фильтра (полосу пропускания, полосу заграждения, уровни затухания), определить требуемое число звеньев, рассчитать коэффициенты фильтра с четвертьволновыми связями, реализующими чебышевскую характеристику, определить добротности резонаторов фильтра. Далее рассчитать геометрию апертур резонансных диафрагм, реализующих требуемую добротность, рассчитать длины четвертьволновых отрезков волновода, построить трехмерную модель фильтра-прототипа с полученными геометрическими размерами и, зная влияние различных параметров на резонансные характеристики неоднородности, провести оптимизацию геометрических параметров фильтра, например, в пакете CST STUDIO SUITE.

Используемый подход и проведенные расчеты позволили смоделировать прототип фильтра, в котором в качестве резонаторов были использованы исследуемые диафрагмы в форме радиального гребня и кольцевого сегмента конечной толщины, а регулярные четвертьволновые отрезки круглого волновода являлись инверторами сопротивлений. Полученные геометрические

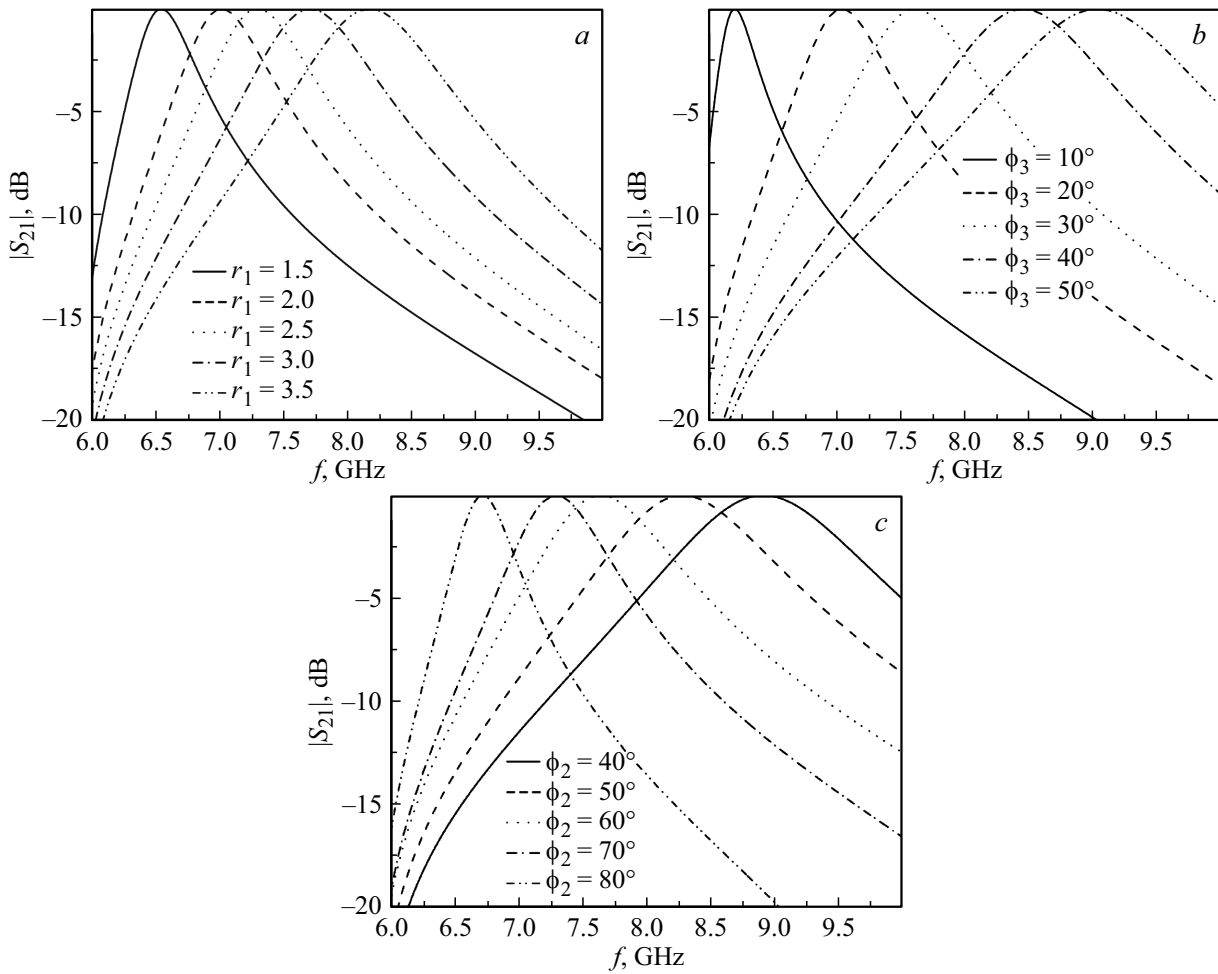


Рис. 2. Зависимость модуля коэффициента прохождения от частоты и размеров диафрагмы.

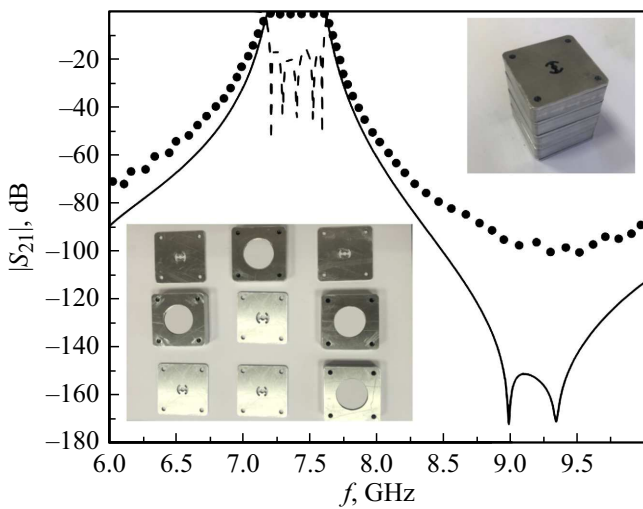


Рис. 3. АЧХ синтезированного фильтра, экспериментальные данные (маркеры) и фотографии созданного фильтра в сборе и по компонентно.

размеры резонансных диафрагм были использованы в качестве начального приближения для синтеза полосно-пропускающих фильтров в программном пакете CST STUDIO SUITE. При этом необходимо отметить, что подробно изученные зависимости проводимости и модуля коэффициента прохождения от геометрических параметров позволяют оптимально задать параметры оптимизации, что значительно сокращает затрачиваемое время на этот трудоемкий процесс. В результате был спроектирован фильтр третьего порядка с шириной полосы пропускания 400 МГц (7.22–7.62 GHz), неравномерность коэффициента передачи в полосе пропускания до  $-0.7$  dB и коэффициентом отражения не хуже 33 dB. При этом его продольный размер составил 26.34 mm, а продольный размер фильтра пятого порядка составил всего 43.66 mm. При этом ширина полосы пропускания у фильтра пятого порядка находилась в диапазоне 7.17–7.63 GHz, а коэффициент отражения не хуже 16.35 dB (рис. 3).

Для проведения экспериментальной проверки результатов численного моделирования были изготовлены соответствующие фильтры. Так, на рис. 3 приведены

фотографии фильтра пятого порядка и показаны результаты сравнения рассчитанных характеристик при компьютерном моделировании (сплошная линия  $|S_{21}|$ , пунктирная  $|S_{11}|$ ) с измеренными параметрами (маркеры  $|S_{21}|$ ) изготовленных фильтров-прототипов для фильтра пятого порядка. Видно хорошее совпадение сравниваемых величин, что говорит о высокой точности и достоверности предложенных методов проектирования СВЧ фильтров.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] S. Ekici, E. Yazgan. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, **64**, 1707 (2022). DOI: 10.1002/mop.33356
- [2] Д.В. Лонкина, Д.С. Губский, В.В. Земляков. *Радиотехника и электроника*, **65** (9), 835 (2020). DOI: 10.31857/S0033849420090053
- [3] S. Ekici, E. Yazgan. *Electromagnetics*, **41** (1), 1 (2021). DOI: 10.1080/02726343.2021.1864577
- [4] J. Li, L. Guo, S. Xie. *IEEE MTT-S Intern. Wireless Sympos. (IWS)* (Harbin, China, 2022), p. 1. DOI: 10.1109/IWS55252.2022.9977509
- [5] S.Y. Yu, J. Bornemann. *bProceedings of 2011 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing* (Victoria, BC, Canada, 2011), p. 504–508. DOI: 10.1109/PACRIM.2011.6032945
- [6] Д.С. Губский, В.В. Земляков, Д.В. Лонкина. *Радиотехника и электроника*, **64** (1), 22 (2019). DOI: 10.1134/S0033849419010078
- [7] Д.В. Лонкина, В.В. Земляков, Д.С. Губский, Г.Ф. Заргано, С.В. Крутиев. *Известия вузов. Радиофизика*, **64** (5), 395 (2021). DOI: 10.52452/00213462\_2021\_64\_05\_395
- [8] E. Musonda, I.C. Hunter. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **63** (3), 954 (2015). DOI: 10.1109/TMTT.2015.2389216
- [9] V. Zemlyakov, M. Tyaglov, V. Shevchenko. *J. Electromagnetic Waves and Applications*, **34** (2), 224 (2020). DOI: 10.1080/09205071.2019.1697379
- [10] А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич, В.П. Смирнов. *Справочник по элементам волноводной техники* (Сов. радио, М., 1967), 651 с.