

11

Исследование полосковых резонаторов и колебательных контуров, взаимодействующих через тонкий металлический слой

© Б.А. Беляев^{1,2}, Н.М. Боев^{2,3}, А.М. Сержантов^{1,2}, С.Д. Креков³, А.А. Лексиков³,
Я.Ф. Бальва³, С.А. Ходенков¹

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³ Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

E-mail: belyaev@iph.krasn.ru

Поступило в Редакцию 14 февраля 2025 г.

В окончательной редакции 5 марта 2025 г.

Принято к публикации 5 марта 2025 г.

Показана возможность создания полосно-пропускающих фильтров, обладающих сверхширокой полосой заграждения, которые построены на резонансах нечетных мод колебаний каждого двухпроводникового резонатора, полосковые проводники которых разделены металлическим слоем тоньше скин-слоя на частотах полосы пропускания. Тонкий металлический слой на частоте нечетной моды колебаний слабо поглощает и отражает СВЧ-мощность, так как в этом случае токи в полосковых проводниках резонатора имеют противоположные направления и почти не наводят ток в металлическом слое, в отличие от четной моды. Разработанная эквивалентная схема на сосредоточенных элементах описывает поведение обнаруженного эффекта в зависимости от толщины металлического слоя. Измеренные амплитудно-частотные характеристики экспериментального образца из двух связанных через металлический слой контуров на сосредоточенных элементах, изготовленных в соответствии с эквивалентной схемой, хорошо согласуются с рассчитанными характеристиками как с металлическим слоем, так и без него.

Ключевые слова: подложка, микрополосковый резонатор, коэффициент связи, мода колебаний.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.11.60485.20283

Металлические пленки из магнитных материалов на протяжении многих лет привлекают исследователей благодаря своим уникальным свойствам [1–3]. На их основе создаются датчики слабых магнитных полей [4,5], а также различные СВЧ-устройства [6,7]. В последние годы большой интерес проявляется к тонким слоям из немагнитных металлов, которые успешно используются в создании полосно-пропускающих фильтров на диэлектрических слоях-резонаторах, разделенных металлическими пленками-зеркалами [8,9]. Изучаются отражающие и поглощающие свойства тонких пленок, изготовленных из различных металлов [10], в широкой полосе частот с целью создания на их основе покрытий, аккумулирующих солнечную энергию [11], и покрытий, предназначенных для защиты объектов от электромагнитных полей [12]. Однако в литературе представлено мало работ по исследованию взаимодействия резонаторов, разделенных проводящей пленкой с толщиной меньше толщины скин-слоя, чему и посвящена настоящая работа. Результаты таких исследований представляют не только теоретический, но и практический интерес, например, при создании устройств передачи электромагнитной энергии через проводящие слои, а также при создании новых частотно-селективных устройств с улучшенными характеристиками.

Рассмотрим полосно-пропускающий фильтр, состоящий из трех двухпроводниковых резонаторов, одинаковые полосковые структуры которых изготовлены на од-

ной стороне каждой из двух поликорковых подложек с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 9.8$ и толщиной $h = 0.25$ mm, подвешенных в экранирующем корпусе строго напротив друг друга с воздушным зазором 1.8 mm (рис. 1, а). В центре зазора располагается тонкий металлический слой, соединенный с экраном по всему периметру [13]. Концы всех полосковых проводников резонаторов с одной стороны подложки замкнуты на экран, а концы проводников с другой стороны подложки соединены с экраном через емкости, которые понижают собственные частоты резонаторов. Порты входа и выхода исследуемой конструкции имеют волновое сопротивление 50 Ω , при этом они подключены к крайним полосковым проводникам на противоположных сторонах верхней и нижней подложек. Очевидно, что в рассматриваемой конструкции взаимодействие связанных линий в каждом резонаторе, как и между резонаторами, преимущественно индуктивное. В двухпроводниковых резонаторах, как известно [14], наблюдаются две моды колебаний: четная (even), когда токи в полосковых проводниках совпадают по направлению, и нечетная (odd), когда токи противоположны. При этом взаимная индуктивность полосковых проводников понижает резонансную частоту четной моды колебаний f_e и повышает частоту нечетной моды f_o в соответствии с величиной связи полосковых линий, образующих резонатор. Как показали исследования двухпроводникового резонатора, добротность резонанса нечетной моды колебаний остается достаточно

высокой при толщине металлического слоя меньше толщины скин-слоя, так как токи, наводимые в этом слое двумя проводниками резонатора, компенсируют друг друга. При этом резонанс четной моды практически не наблюдается из-за эффективного отражения и поглощения СВЧ-мощности в металлическом слое. Поэтому при настройке рассматриваемой конструкции в качестве полосно-пропускающего фильтра используются резонансы только нечетных мод колебаний.

На рис. 1, *b* представлены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) прямых потерь S_{21} (сплошная линия) и потерь на отражение S_{11} (пунктир) фильтра рассматриваемой конструкции, настроенного в пакете программ электродинамического анализа 3D-моделей „CST Studio Suite“ на центральную частоту $f_0 = 130$ MHz и ее относительную ширину $\Delta f/f_0 = 2\%$ по уровню -3 dB. При этом получены следующие конструктивные параметры после настройки устройства: ширина полоскового проводника центрального резонатора 8 mm, крайних резонаторов 7 mm, длина полосковых проводников 27 mm, зазор между проводниками 3 mm, емкости $C_1 = 500$ pF, $C_2 = 550$ pF. Металлический слой толщиной $t = 36$ μ m выполнен из нихрома, имеющего удельную проводимость $\sigma = 8.93 \cdot 10^5$ S/m, что в 65 раз меньше, чем у меди. Это увеличивает толщину скин-слоя на частоте $f_0 = 130$ MHz до величины $\delta = 47$ μ m. Главной особенностью разработанного фильтра является рекордная ширина полосы заграждения, которая простирается вплоть до плазменных резонансов в ультрафиолетовом диапазоне [9]. Это связано с тем, что металлический слой, имеющий на частотах полосы пропускания толщину меньше толщины скин-слоя, с увеличением частоты становится много толще скин-слоя. В результате этот слой служит хорошим экраном между входом и выходом устройства, обеспечивая затухание ~ 40 dB на втором паразитном резонансе фильтра в области 5 GHz, а на частотах выше 15 GHz — более 80 dB.

Штриховыми линиями на рис. 1, *b* представлены амплитудно-частотные характеристики рассматриваемого фильтра, в котором отсутствует металлический слой. Видно, что фильтр сохранил свои характеристики, при этом центральная частота полосы пропускания почти не изменилась, относительная ее ширина незначительно увеличилась с 2.0 до 2.2 %, однако минимальные потери СВЧ-мощности в полосе пропускания уменьшились существенно (с 7.3 до 3.9 dB). Заметим, что потери в полосе пропускания фильтра, как и в конструкциях традиционных фильтров, уменьшаются с увеличением ширины полосы пропускания.

Важно отметить, что в конструкции без металлического слоя собственные частоты четных колебаний двухпроводниковых резонаторов также образуют полюсу пропускания с относительной шириной $\sim 28\%$, отсутствующую в фильтре с металлическим слоем. Ширина полосы пропускания оценивалась по уровню -12 dB от уровня минимальных потерь, так как в этой полосе наблюдается очень высокая неравномерность

АЧХ, превышающая 10 dB. Центральная частота полосы пропускания 61 MHz, и в ней хорошо видны три резонансных частоты: $f_1 = 55.3$ MHz, $f_2 = 63.7$ MHz и $f_3 = 71.0$ MHz. Очевидно, что столь широкая полоса пропускания обусловлена сильной связью резонаторов друг с другом благодаря сонаправленным токам в полосковых проводниках каждого из двухпроводниковых резонаторов.

Для выяснения природы обнаруженных закономерностей поведения резонансов четных и нечетных мод колебаний в зависимости от толщины металлической прослойки двухпроводниковых резонаторов рассмотрим их эквивалентную схему из двух связанных колебательных контуров на сосредоточенных элементах, представленную на вставке к рис. 2, *a*. Металлический слой в этой схеме, расположенный между индуктивно связанными контурами, для симметрии описываем двумя сосредоточенными индуктивностями L_S , параллельно которым включено сопротивление R_S , являющееся поверхностным сопротивлением проводящего слоя толщиной h , выполненного из материала с удельной проводимостью σ :

$$R_S = \frac{1}{\sigma h}. \quad (1)$$

Рассчитать собственные частоты такой эквивалентной схемы несложно исходя из теории цепей, предполагая для простоты $R_S = \infty$ и отключив порты входа и выхода. Решая уравнения Кирхгофа, для такого случая получаем

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L - L_{12}^2/L_S)C}}. \quad (2)$$

Видно, что при взаимодействии контуров посредством трансформаторной связи, образованной индуктивностями L_S , частота самой нижней четной моды колебаний равна частоте уединенного контура.

В качестве номиналов элементов эквивалентной схемы были выбраны измеренные величины емкостей $C = 505$ nF и индуктивностей катушек $L = 6.8$ μ H колебательных контуров, приготовленных для проведения эксперимента. Отметим, что катушки имели по 12 витков, а их наружный диаметр составлял 59 mm. Суммарное сопротивление потерь в катушках и в емкостях колебательных контуров $R = 0.04$ Ω . При этом величина взаимной индуктивности L_{12} подбиралась так, чтобы экспериментально наблюдаемые резонансные частоты четных и нечетных колебаний совпали с расчетными, а индуктивности L_S — так, чтобы экспериментально наблюдаемые амплитуды резонансов четных и нечетных колебаний совпали с расчетными. В результате $L_{12} = 0.197$ μ H, а $L_S = 12$ nH, и эти значения остаются неизменными независимо от толщины металлического слоя.

На рис. 2, *a* показаны АЧХ исследуемой резонансной системы из связанных контуров в зависимости от толщины h разделяющей их медной прослойки

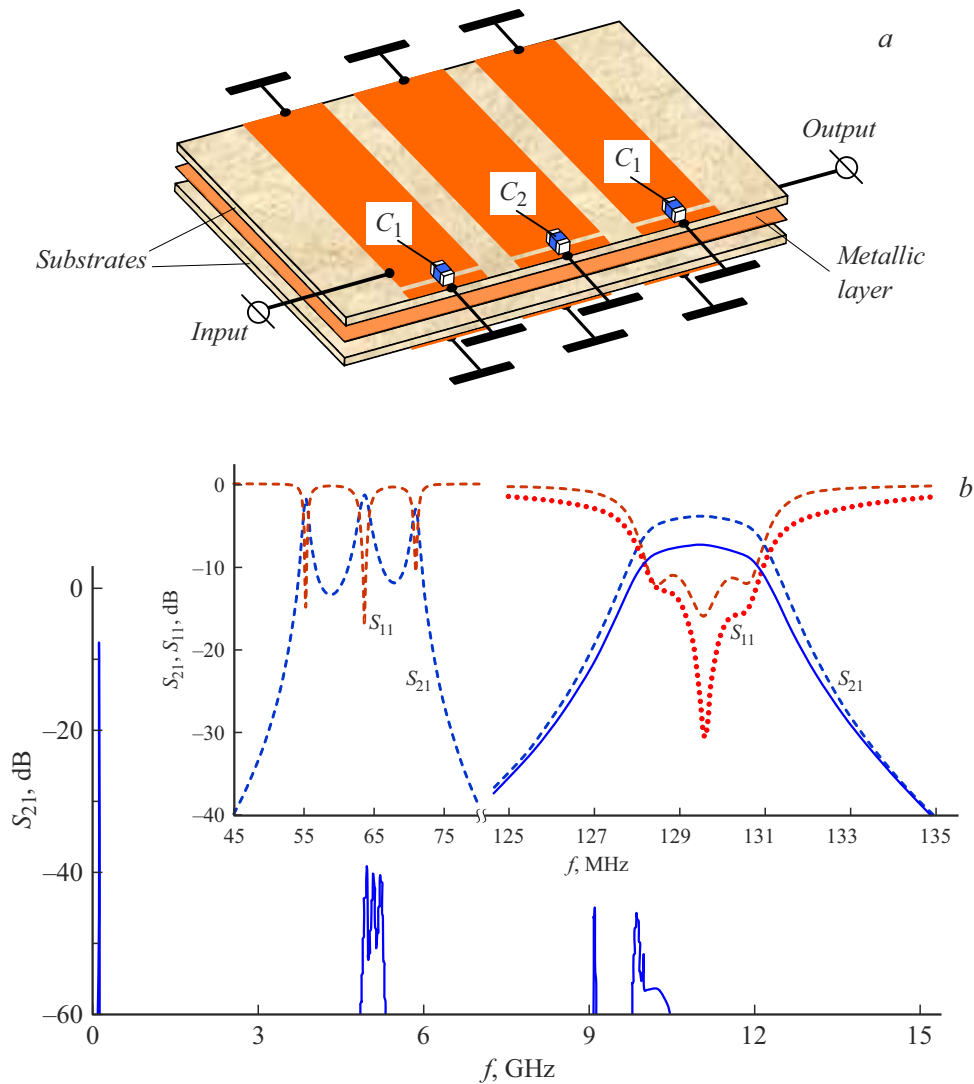


Рис. 1. *a* — конструкция фильтра третьего порядка, построенная на резонансах нечетных мод колебаний двухпроводниковых резонаторов. *b* — АЧХ исследуемого фильтра в широком и узком диапазонах частот. Штриховые линии — образец без металлического слоя.

($\sigma = 5.8 \cdot 10^7$ S/m), рассчитанные с применением эквивалентной схемы. На зависимостях при $h = 0$ отчетливо видны два резонансных пика, соответствующие частотам четной $f_e = 86$ kHz и нечетной $f_o = 119$ kHz моды связанных колебаний контуров. Видно также, что с увеличением толщины металлического слоя наблюдается слабая зависимость вносимого затухания на частоте нечетной моды колебаний, но очень быстрый рост затухания на частоте четной моды, резонанс которой полностью исчезает уже при $h = 8$ μ m.

На рис. 2, *b* построены зависимости коэффициентов передачи T , отражения R и поглощения A от толщины h проводящего слоя на частотах четной (сплошные линии) и нечетной (штриховые линии) моды связанных колебаний. Коэффициент поглощения A вычислялся по формуле

$$A = 1 - T - R. \quad (3)$$

Видно, что на частоте четной моды колебаний с увеличением толщины металлического слоя коэффициент поглощения A ведет себя немонотонно, имея максимум $A \approx 0.5$ при толщине медного слоя $h \sim 1$ μ m, при этом коэффициент передачи T быстро убывает, а коэффициент отражения R быстро растет. На частоте нечетной моды колебаний зависимости T , R и A с ростом h изменяются гораздо меньше. Природа обнаруженного аномального поведения величины затухания на резонансе нечетной моды колебаний, как и в случае рассмотренного выше фильтра третьего порядка на двухпроводниковых полосковых резонаторах, объясняется компенсацией токов, наводимых катушками в металлическом слое.

Для экспериментальной проверки наблюдаемых эффектов был изготовлен образец из контуров, связанных через металлическую прослойку с толщиной меньше толщины скин-слоя, размещенных в металлическом кор-

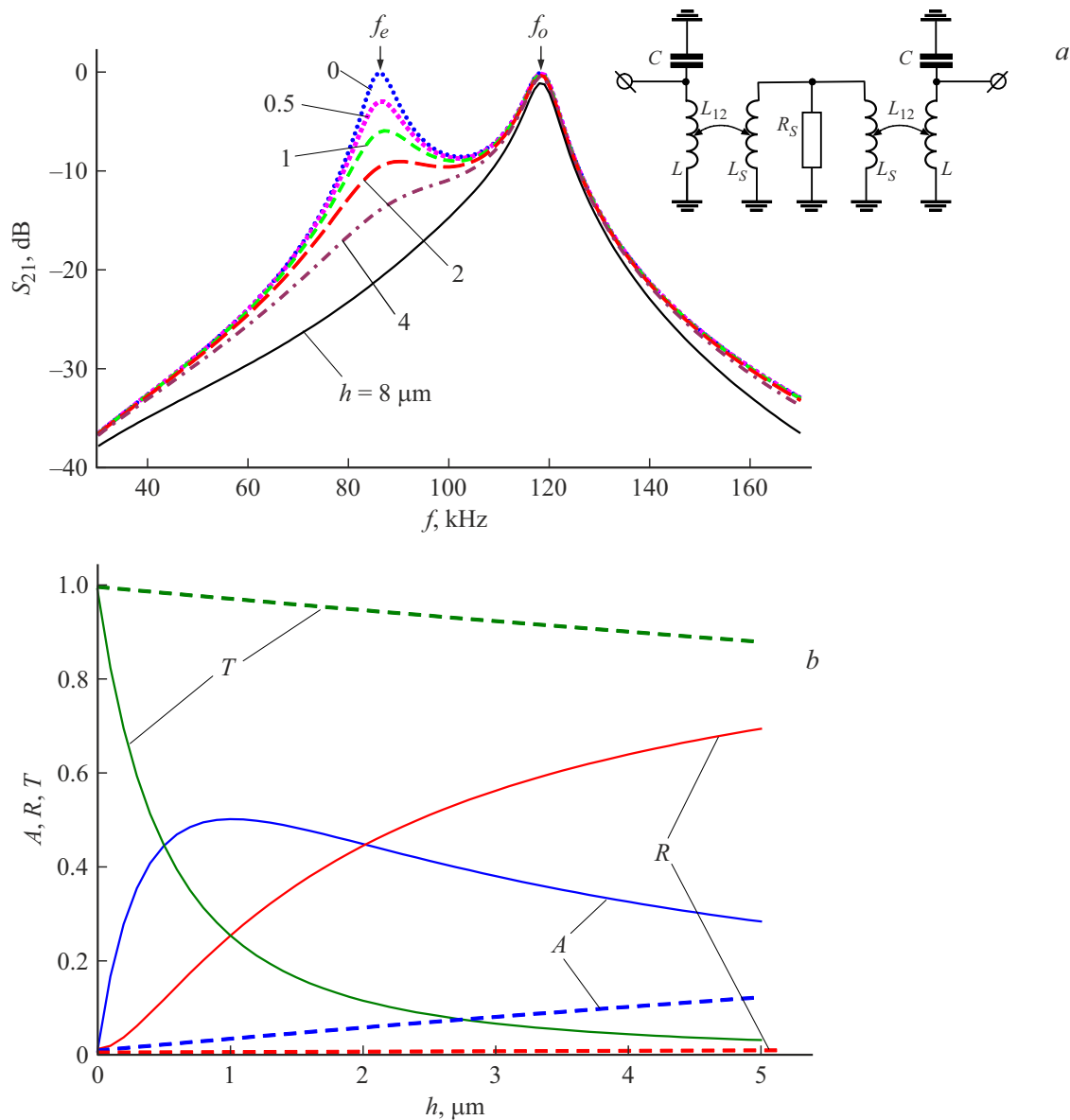


Рис. 2. *a* — АЧХ эквивалентной схемы двух контуров с индуктивной связью, взаимодействующих через металлический слой между ними, при различных толщинах металлического слоя (на вставке — эквивалентная схема). *b* — зависимости от толщины металлического слоя h коэффициентов передачи T , отражения R и поглощения A электромагнитных волн на резонансных частотах четной (сплошные линии) и нечетной (штриховые линии) моды колебаний.

пусе, конструкция которого представлена на рис. 3, *a*. В качестве прослойки в ней использовался медный слой толщиной $h = 17 \mu\text{m}$ на диэлектрической пластине Rogers 4003C ($\epsilon = 3.55$) толщиной 0.5 mm, которая закреплялась между катушками колебательных контуров (рис. 3, *a*). На корпусе устройства устанавливались коаксиальные разъемы с волновым сопротивлением 50Ω , к которым на входе подключался перестраиваемый генератор, а на выходе — приемник. Заметим, что толщина скин-слоя $\delta = 189 \mu\text{m}$, рассчитанная на частоте нечетной моды колебаний исследуемого образца $f_o = 119 \text{ kHz}$, на порядок больше, чем толщина металлической прослойки, используемой в эксперименте. Отметим также, что

при толщине металлического слоя $h = 17 \mu\text{m}$ сопротивление $R_S = 1.1 \cdot 10^{-3} \Omega$.

На рис. 3, *b* точками представлены результаты измерений частотных зависимостей прохождения высокочастотного сигнала через изготовленный образец с металлической прослойкой и без нее, а линиями — результаты расчета по эквивалентной схеме. Видно хорошее совпадение измеренных и рассчитанных АЧХ, что доказывает корректность используемой эквивалентной схемы. Как показали измерения, при толщине медного экрана $17 \mu\text{m}$ затухание прошедшей электромагнитной волны на частоте нечетной моды колебаний $\sim 4.5 \text{ dB}$, а на частоте четной моды $\sim 26 \text{ dB}$, при этом изме-

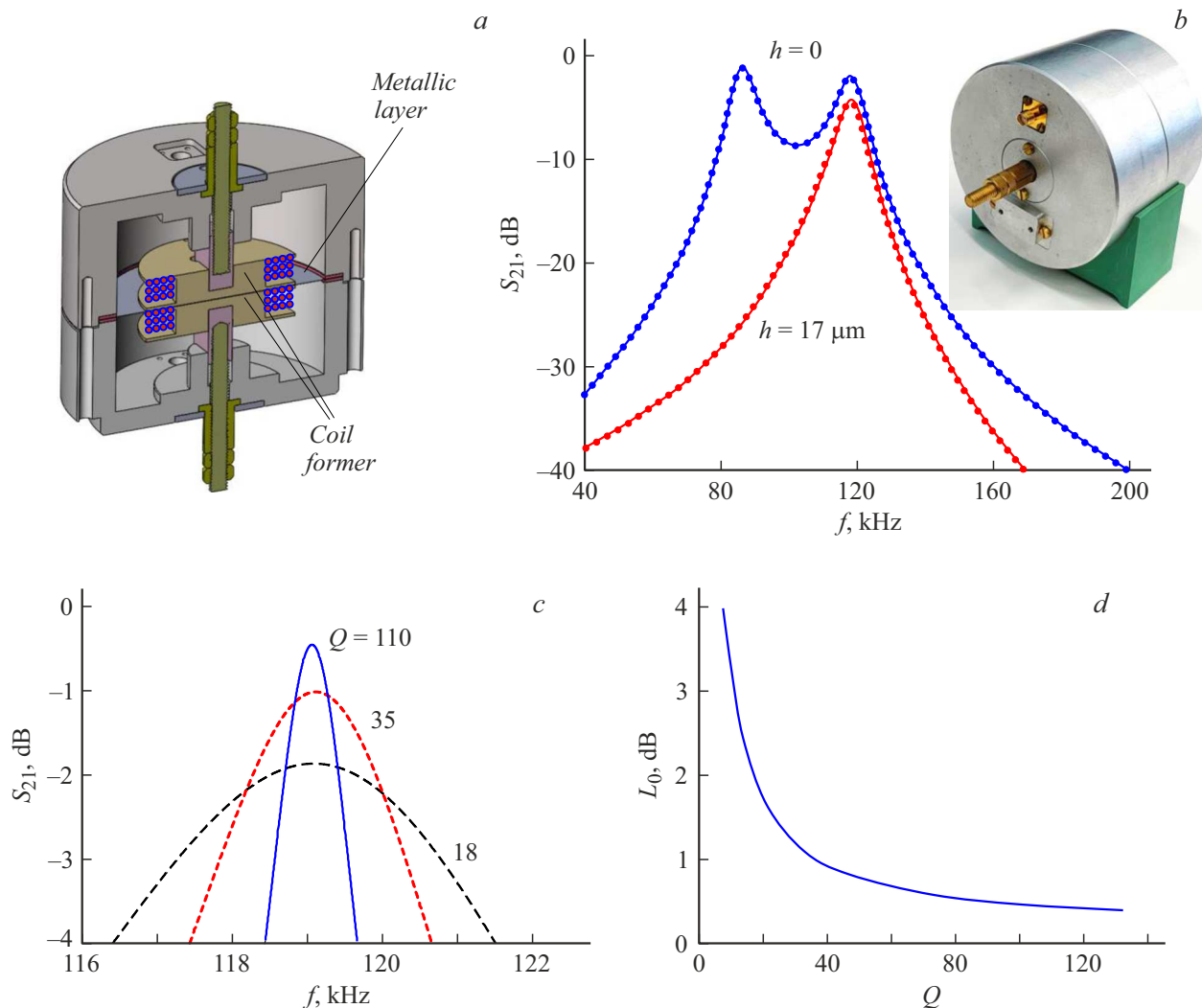


Рис. 3. *a* — конструкция образца из двух связанных через металлический слой колебательных контуров. *b* — измеренные (точки) и рассчитанные по эквивалентной схеме (линии) АЧХ экспериментального образца при наличии и отсутствии прослойки (на вставке — фотография изготовленного образца). *c* — АЧХ при различных значениях нагруженной добротности резонанса нечетной моды колебаний. *d* — зависимость вносимого затухания от нагруженной добротности резонанса.

ренная добротность резонанса на частоте нечетной моды $Q = 14$. Очевидно представляет интерес рассчитать затухание L_0 прошедшей электромагнитной волны на частоте нечетной моды колебаний с увеличением нагруженной добротности резонанса. Это несложно сделать путем увеличения выходного волнового сопротивления генератора на входе и детектора на выходе устройства от исходного сопротивления 50Ω для того, чтобы уменьшить связь колебательных контуров с входом и выходом. На рис. 3, *c* представлены АЧХ для различных значений нагруженной добротности резонанса нечетной моды колебаний, рассчитанные в отсутствие потерь в катушках индуктивностей, а на рис. 3, *d* показана зависимость потерь прошедшей мощности на частоте нечетной моды колебаний от нагруженной добротности резонанса. Видно, что с ростом добротности уменьшаются потери

прошедшей мощности, достигая величины 0.5 dB при $Q = 110$.

Таким образом, обнаруженная в настоящей работе особенность поведения АЧХ связанных через более тонкую, чем скин-слой, металлическую прослойку двухпроводниковых резонаторов или пары колебательных контуров не только представляет теоретический интерес, но и может найти практическое применение. В частности, продемонстрированное на экспериментальном образце прохождение сигнала на частоте 119 kHz по двум контурам, взаимодействующим через металлический слой толщиной $17 \mu\text{m}$, свидетельствует о возможности на низких частотах беспроводной передачи электрической энергии в экранированные устройства. Продемонстрированная также возможность создания полосно-пропускающих фильтров с рекордно широкой полосой заграждения указывает на перспективность конструиру-

вания на исследованной полосковой структуре устройств частотной селекции сигналов. Природа слабого поглощения высокочастотной мощности на частоте нечетной моды колебаний двухпроводникового резонатора объясняется тем, что в этом случае в отличие от четной моды колебаний токи, наводимые в металлической прослойке от двух проводников резонатора, компенсируют друг друга, так как они имеют противоположные направления.

Благодарности

При проведении работ использовано оборудование Учебного центра коллективного прототипирования пассивной электроники антенно-фидерного тракта ФИЦ КНЦ СО РАН.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание FEFE-2023-0004).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Р. Суху, *Магнитные тонкие пленки* (Мир, М., 1967).
- [2] B.A. Belyaev, A.V. Izotov, P.N. Solovev, N.M. Boev, *Phys. Status Solidi RRL*, **14**, 1900467 (2020). DOI: 10.1002/pssr.201900467
- [3] А.Б. Ринкевич, Е.А. Кузнецов, М.А. Милыев, Л.Н. Ромашев, В.В. Устинов, *ФММ*, **121** (12), 1239 (2020). DOI: 10.31857/S0015323020120116 [A.B. Rinkevich, E.A. Kuznetsov, M.A. Milyaev, L.N. Romashev, V.V. Ustinov, *Phys. Met. Metallogr.*, **121** (12), 1137 (2020). DOI: 10.1134/S0031918X2012011X].
- [4] А.Н. Бабицкий, Б.А. Беляев, Г.В. Скоморохов, А.В. Изотов, Р.Г. Галеев, *Письма в ЖТФ*, **41** (7), 36 (2015). [A.N. Babitskii, B.A. Belyaev, G.V. Skomorokhov, A.V. Izotov, R.G. Galeev, *Tech. Phys. Lett.*, **41** (4), 324 (2015). DOI: 10.1134/S1063785015040021].
- [5] G.Yu. Melnikov, S.V. Komogortsev, A.V. Svalov, A.A. Gorchakovskiy, I.G. Vazhenina, V. Kurylanskaya, *Sensors*, **24**, 6308 (2024). DOI: 10.3390/s24196308
- [6] A.N. Lagarkov, K.N. Rozanov, *J. Magn. Magn. Mater.*, **321**, 2082 (2009). DOI: 10.1016/j.jmmm.2008.08.099
- [7] B.A. Belyaev, A.O. Afonin, A.V. Ugrymov, I.V. Govorun, P.N. Solovev, A.A. Leksikov, *Rev. Sci. Instrum.*, **91**, 114705 (2020). DOI: 10.1063/5.0009045
- [8] Z. Li, S. Butun, K. Aydin, *ACS Photon.*, **2**, 183 (2015). DOI: 10.1021/ph500410u
- [9] Б.А. Беляев, В.В. Тюрнев, Д.А. Шабанов, *Изв. вузов. Физика*, **68** (1), 76 (2025). DOI: 10.17223/00213411/68/1/9
- [10] И.В. Антонец, Л.Н. Котов, С.В. Некипелов, Е.Н. Корпушов, *ЖТФ*, **74** (11), 102 (2004). [I.V. Antonets, L.N. Kotov, S.V. Nekipelov, E.N. Karpushov, *Tech. Phys.*, **49** (11), 1496 (2004). DOI: 10.1134/1.1826197].
- [11] N. Ahmad, J. Stokes, M.J. Cryan, *J. Opt.*, **16**, 125003 (2014). DOI: 10.1088/2040-8978/16/12/125003
- [12] G. Nimtz, U. Panten, *Ann. Phys.*, **19** (1-2), 53 (2010). DOI: 10.1002/andp.200910389
- [13] Н.М. Боев, А.М. Сержантов, Н.Б. Завьялов, С.Д. Креков, Я.Ф. Бальва, А.А. Александровский, А.А. Лексиков, *Полосковый полосно-пропускающий фильтр гармоник*, патент RU 2793079 (заявл. 28.11.2022, опубл. 28.03.2023). БИ № 10 (2023).
- [14] В.В. Тюрнев, Б.А. Беляев, *Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ*, № 4 (428), 25 (1990).