

Материалы для экранировки СВЧ-техники

Часть 1

К. Матыскин¹, А. Денисенко², Е. Коровин, к. ф-м. н.³, Е. Трофимов⁴

УДК 537.877 | ВАК 2.2.2

Обеспечение электромагнитной совместимости СВЧ-оборудования является одной из важнейших задач современной радиоэлектроники. Сегодня для снижения электромагнитного фона и взаимного влияния радиоаппаратуры перспективно использование композитов. Такие материалы имеют легкий вес, малую цену и просты в обработке относительно классических металлических конструкций. В статье представлены электрофизические свойства в СВЧ-диапазоне электропроводящей силиконовой резины (ЭПР) с наполнителем из порошков Cu/Ag и Ke/Ag и полимерного поглотителя с наполнителем из углеродных материалов, полученного по аддитивной технологии. Исследования показали высокую эффективность материалов для экранировки и поглощения электромагнитного излучения.

ВВЕДЕНИЕ

Ускорение темпов развития радиоэлектронного оборудования, увеличение объемов его производства и внедрение во все сферы жизни современного человека приводят к повсеместному электромагнитному зашумлению окружающего пространства [1, 2]. Электромагнитный фон, генерируемый СВЧ-техникой, воздействует на компоненты близлежащей аппаратуры и нарушает ее нормальное функционирование, делая работу устройств не совместимой. Помимо электромагнитной совместимости, возникают проблемы электромагнитной безопасности и негативного воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ) на биологические объекты [2, 3]. Особенно остро сегодня стоит вопрос об обеспечении радионезаметности. Одним из решений данных проблем является использование композиционных поглотителей электромагнитной энергии, однако каждое конкретное приложение требует индивидуального подхода, поскольку всегда следует учитывать вопросы о важности параметров экранирования, веса, прочности, цены и др.

Традиционно при обеспечении экранировки радиоэлектронного оборудования принято обходиться

металлическими корпусами, обладающими высокой электропроводностью. Тем не менее оболочка любого устройства имеет технологические отверстия и зазоры между панелями или вдоль съемных крышек, через которые может проникать ЭМИ. Кроме того, корпуса данного типа имеют большую массу, а их изготовление очень трудоемко и финансово затратно.

В случае, когда приоритет всецело отдается уровню экранировки, целесообразно применение композитов, армированных металлическими порошками. Металлические порошки являются одним из наиболее важных материалов, используемых в электронике. Они широко применяются в электропроводящей резине, клеях и красках [4, 5]. Одними из распространенных представителей являются графитовые порошки с никелевым покрытием (Ni/C), объединяющие самосмазывающуюся способность графита и эффективную электропроводность никеля. Однако в агрессивных условиях окружающей среды (повышенная температура и влажность) слой никеля на внешней поверхности токопроводящих изделий подвергается окислению, что приводит к резкому снижению электропроводности. Для сохранения электрических свойств системы, вместо никеля возможно использовать драгоценные металлы (серебро, золото, платина). Так в работе [5] исследование показало, что медный порошок с серебряным покрытием (Cu/Ag) имеет лучшую стойкость к окислению, чем чистый медный порошок, однако рецептура изготовления инкапсулированного порошка не позволила получить равномерное покрытие меди серебром, что удалось исправить при разработке

¹ ООО «МК-Полимер», главный инженер.

² ООО «МК-Полимер», технический директор.

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет (НИ ТГУ).

⁴ ООО «МК-Полимер», руководитель направления «Специальные материалы», аспирант НИ ТГУ, trof@mk-polymer.ru.

порошков, содержащихся в композитах, исследуемых в данной статье.

В ряде случаев существенным фактором при проектировании поглотителей микроволнового излучения является эффективность поглощения по отношению к весу. Хорошее соотношение этих параметров дают углеродосодержащие материалы. Низкая плотность наноматериалов на основе углерода способствует тому, что поглотитель имеет малый вес [6]. При этом высокие диэлектрические потери материалов самих по себе вкуче с удачной конструкцией поглотителя способны обеспечить значительный уровень экранировки [7, 8].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной статье описаны электрофизические свойства двух типов материалов с рецептурами собственного производства и полностью изготовленные ООО «МК-Полимер» [9]. Первый основан на матрице из силиконовой резины и наполнителя из порошков меди / керамики, инкапсулированных серебром. Второй основан на полиуретановой матрице с подобранным наполнителем из углеродных материалов.

Измерение удельного объемного электрического сопротивления производилось по государственному стандарту РФ ГОСТ Р 50499-93 (МЭК 93-80). При подключении в соответствие со схемой, показанной на рис. 1, ток протекает лишь через площадь сечения измерительного электрода.

Определение диэлектрических параметров полимера осуществлялось волноводным методом с включением коаксиальной ячейки. Основой измерительной установки послужил векторный анализатор цепей P4M-18 компании «Микран» (рис. 2), частотный диапазон его



Рис. 2. Векторный анализатор P4M-18

работы 0,01–18 ГГц. При реализации стандартной схемы «на прохождение» измеряются мощности излучения, прошедшего сквозь и отраженного от образца в прямом и обратном направлении. На основе измеренных величин по модернизированной методике Беккера-Джарвиса [10] проводился расчет спектров комплексной диэлектрической проницаемости исследуемого материала.

Математическое моделирование распространения электромагнитных волн выполнялось в программе CST MWS с использованием вычислителя в частотной области [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ Композиты на основе проводящих порошков

На рис. 3 приведены спектры комплексной диэлектрической проницаемости силиконовой резины с различным массовым содержанием медного порошка, инкапсулированного серебром. Как видно из рис. 3а, добавление 20 масс. % порошка в силиконовую матрицу приводит к увеличению действительной части диэлектрической проницаемости в среднем на 1,1 отн. ед. в рассматриваемом диапазоне частот. При увеличении массовой доли армирующего вещества до 40% величина ϵ' возрастает, в среднем, еще на 0,5 отн. ед. Дальнейшее увеличение содержания порошка Cu / Ag в силиконе вызывает перколяционный переход материала [12], возникают разрозненные бесконечные кластеры проводящих включений, соответственно резко возрастают потери на проводимость в материале (рис. 3б).

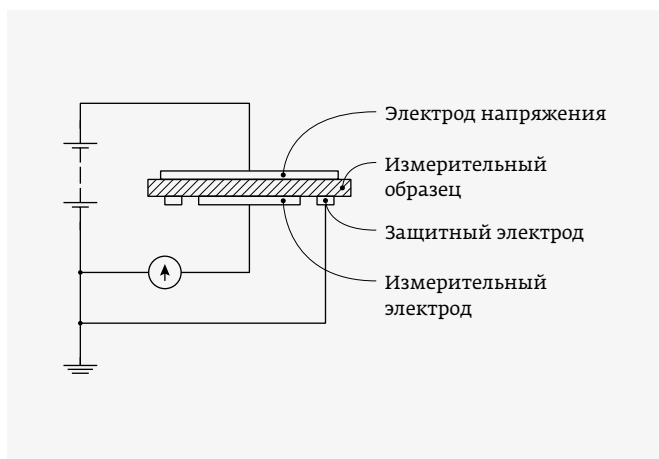


Рис. 1. Принципиальная схема соединения защищенных электродов для измерения удельного объемного сопротивления

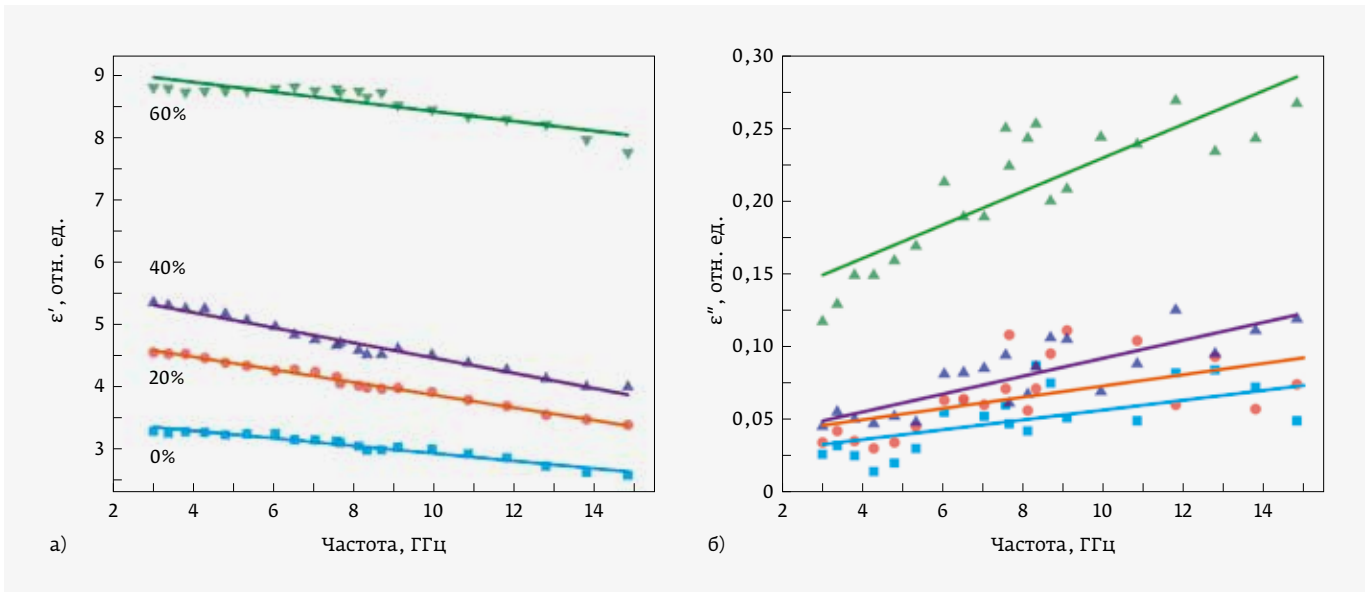


Рис. 3. Спектры действительной (а) и мнимой (б) частей диэлектрической проницаемости серии образцов с различным массовым содержанием порошков Cu/Ag в силиконовой резине

Схожая ситуация наблюдается для композитов с добавлением порошков керамики, покрытых серебром (рис. 4). За исключением того, что рост содержания наполнителя не приводит к существенному увеличению потерь (рис. 4б). Это связано с отсутствием гальванического контакта в порошках керамики между ядром и оболочкой.

При увеличении содержания порошков Cu/Ag или Ke/Ag до 80 масс. % и выше в силиконовой матрице

возникает единый бесконечный кластер. Измерение диэлектрических свойств становится невозможным ввиду возникновения короткого замыкания. Удельное объемное сопротивление данных материалов составляет 0,01 Ом·м и менее по постоянному току при значениях объемного сопротивления чистой силиконовой резины порядка 10^{13} Ом·м в условиях комнатной температуры. При этом плотность электропроводящей резины, определенная по

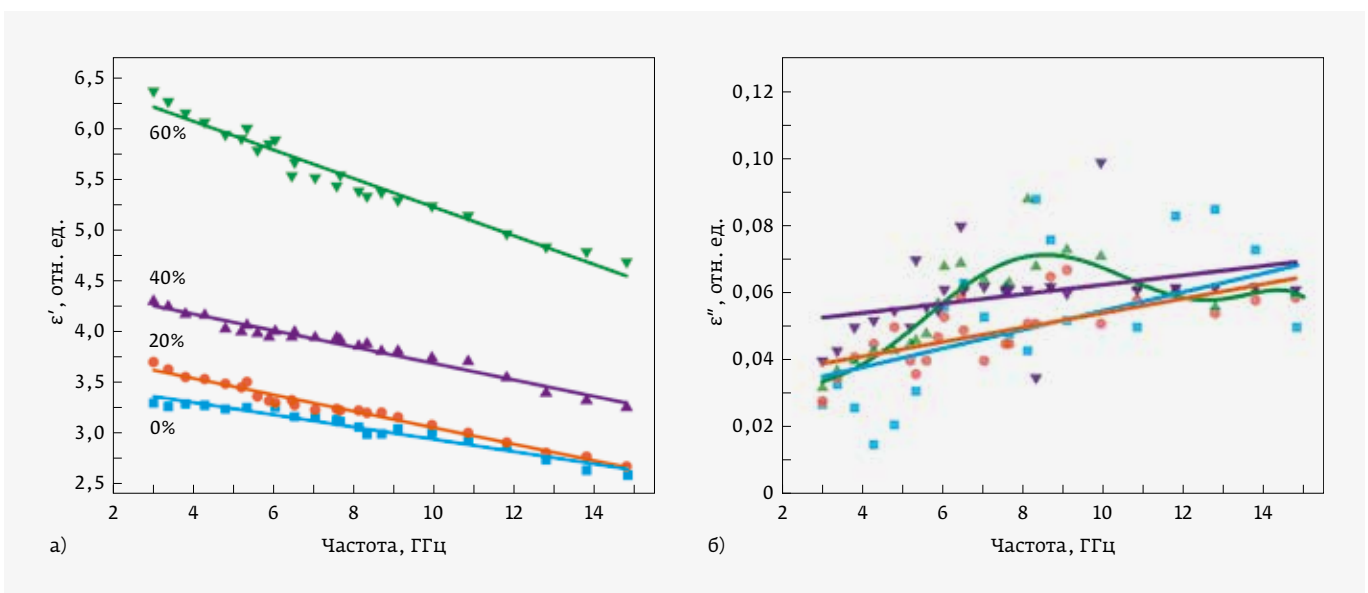


Рис. 4. Спектры действительной (а) и мнимой (б) частей диэлектрической проницаемости серии образцов с различным массовым содержанием порошков Ke/Ag в силиконовой резине

ГОСТ 276-73, достаточно высока. В случае наполнителя из Cu/Ag плотность композита имеет значения в диапазоне $3,5-6,1 \text{ г/см}^3$, в случае $Ke/Ag - 2,4-4,6 \text{ г/см}^3$.

В табл. 1 приведены результаты исследования по определению эффективности экранирования металлического корпуса со жгутом П-типа, размерами $5 \times 5 \text{ мм}$ и толщиной стенки $1,5 \text{ мм}$ (рис. 5а) из электропроводящей резины. Испытания проводились на частоте 869 МГц на передатчике мощностью 100 мВт , помещенном в алюминиевый

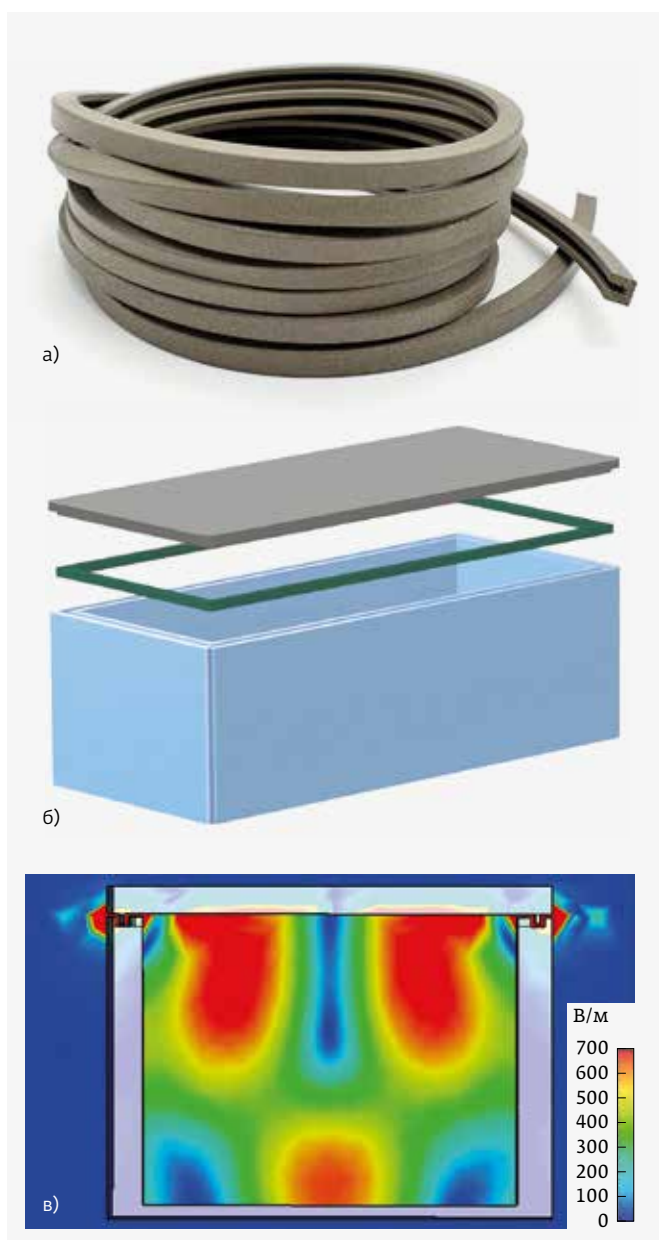


Рис. 5. Моделирование эффективности экранирования металлического корпуса со жгутом П-типа: а - профиль П-типа; б - модель корпуса; в - ЭМИ, выходящее из металлического корпуса через зазоры крышки

Таблица 1. Эффективность экранирования корпуса

Образец	Уровень сигнала, дБм	Привнесенный эффект, дБ
Открытый корпус	-59,92	-
Корпус с крышкой	-105,90	45,98
Корпус с крышкой и прокладкой	Сигнал подавлен полностью	$\geq 47,20$

корпус в форме параллелепипеда, одна из граней которого является съемной крышкой (рис. 5б). Излучение, генерируемое внутри металлического корпуса, попадая в зазор между крышкой и корпусом выходит в окружающее пространство за счет возникающего эффекта волновода (рис. 5в). Помещение проводящего жгута в пространство зазора между крышкой и корпусом позволяет полностью подавить сигнал менее уровня собственных шумов камеры измерения (-153 дБм).

Экспериментальные данные имеют хорошую сходимость с результатами математического моделирования (рис. 6). На частоте 869 МГц уровень экранировки корпуса также составляет около 45 дБ при зазоре $0,5-1,0 \text{ мм}$. Добавление проводящего профиля увеличивает экранирующую

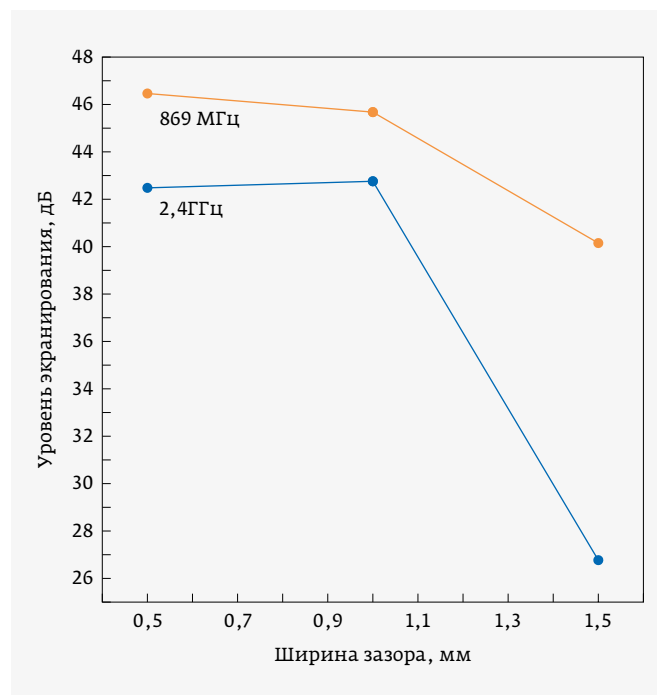


Рис. 6. Зависимость уровня экранирования металлического корпуса от ширины зазора

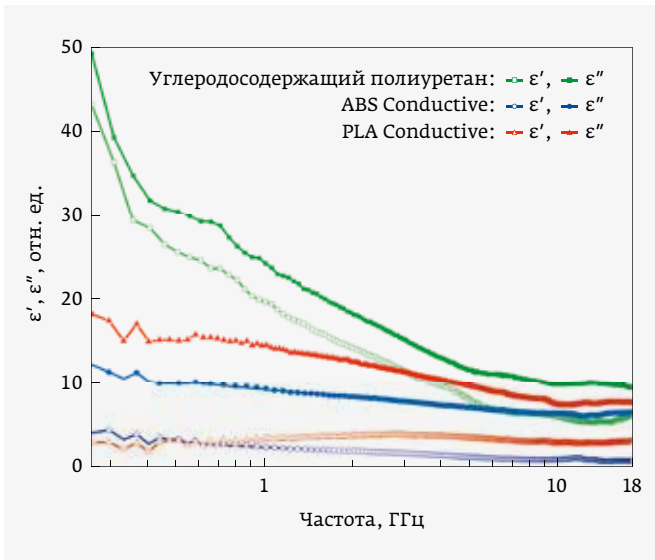


Рис. 7. Спектры комплексной диэлектрической проницаемости проводящих термопластов с углеродными наполнителями

способность системы до 135 дБ. При этом с уменьшением длины волны уровень излучения, проникающего через отверстия того же размера, становится выше, однако затухание волны в материале повышается. Так, на частоте 2,4 ГГц уровень экранирования корпуса с проводящим профилем составляет 163 дБ.

КОМПОЗИТ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

На рис. 7 представлено сравнение спектров комплексной диэлектрической проницаемости поглотителя из углеродосодержащего полиуретана и двух углеродосодержащих пластиков для 3D-печати иностранного производства – PLA Conductive от компании ProtoPlant (США) и ABS Conductive от компании Mellow (Китай) [13]. Как видно из графика, исследуемый материал имеет высокие значения как действительной части диэлектрической проницаемости, так и мнимой, особенно это выражено в низкочастотной области спектра в сравнении с двумя другими композитами. Так, величина ϵ'' , описывающая потери электромагнитной энергии, у разработанного материала изменяется в исследуемом диапазоне от 43 до 5,5 отн. ед., в то время как для американского

и китайского аналогов потери варьируются в диапазоне от 4 до 2 отн. ед. и от 4,5 до 0,8 отн. ед. соответственно. При этом, ввиду повышенной проводимости состава, отражение от передней грани плоского слоя также является повышенным (рис. 8) [13]. Поэтому применение плоских поглотителей как на металле, так и самих по себе, является целесообразным только для узкополосных приложений (коэффициент отражения от слоя 2 мм на металле в диапазоне от 11 до 12,5 ГГц составляет 13–16 дБ). Широкополосности же можно добиться за счет рассеивающих конструктивных особенностей.

На рис. 9 приведен спектр коэффициента прохождения в зависимости от толщины плоского слоя полиуретанового поглотителя. Уровень экранирования, обеспечиваемый данным материалом, выше того, что способен предложить наилучший аналог, PLA Conductive. Так, на частотах от 2 до 18 ГГц для слоя толщиной 3 мм прошедший сигнал ослабевает на 7–13 дБ, тогда как для PLA-Conductive при равных параметрах сигнал ослабевает лишь на 3–9 дБ, то есть уровень экранировки в среднем хуже более чем в два раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Материалы, производимые ООО «МК-Полимер», перспективны для экранирования и снижения радиозаметности. Электропроводящая силиконовая резина имеет отличные свойства для ее применения в качестве прокладок, жгутов и профилей для герметизации СВЧ-техники. Стоит заметить, что для достижения высокой эффективности материалов на основе металлических порошков

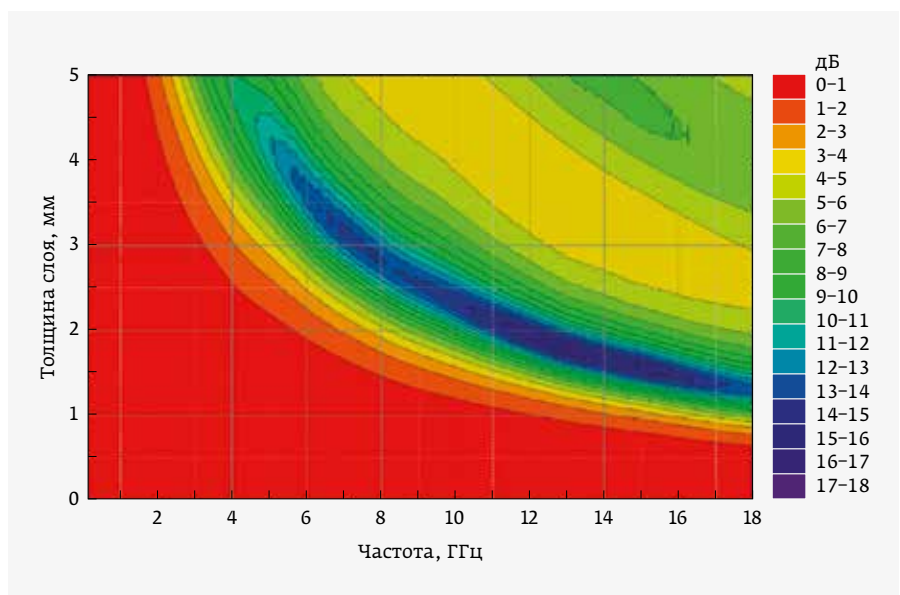


Рис. 8. Зависимость коэффициента отражения от частоты и толщины слоя материала на металле

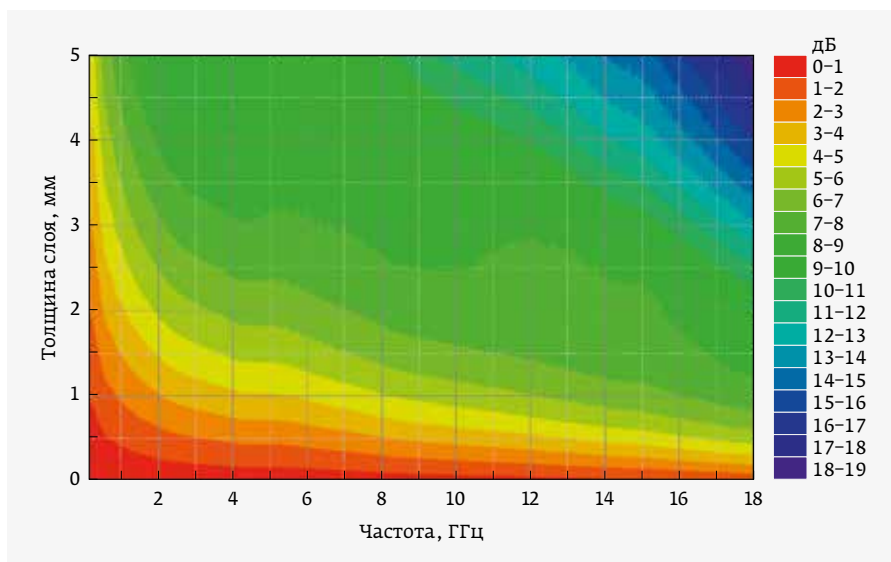


Рис. 9. Зависимость коэффициента прохождения от частоты и толщины слоя материала

в микроволновом диапазоне частот они должны содержать достаточное количество армирующего наполнителя для полного контакта всех частиц. Полиуретановый

углеродосодержащий поглотитель обладает лучшими диэлектрическими свойствами относительно других проводящих термопластов широкого производства. Он имеет перспективы применения в качестве основы для печати экранирующих корпусов и радиопоглощающих конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Redl R.** Power Electronics and Electromagnetic Compatibility // PESCC Record. 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, PP. 15–21.
2. **Shahzad F., Alhabeib M., Hatter C. B., Anasori B., Hong S. M., Koo K. M., Gogotsi Y.** Electromagnetic interference shielding with 2D transition metalcarbides (MXenes) // Materials science, V. 353, PP. 1137–1140.
3. **Орешина М. Н., Савенко Е. Ю.** Исследования воздействия электромагнитных излучений на организм человека // Известия ТулГУ. Технические науки, 2021, Вып. 3, С. 342–347.



МК полимер

МАТЕРИАЛЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ





Электропроводящие материалы

На основе электропроводящих наполнителей для защиты приборов от ЭМИ и обеспечения ЭМС. Выпускаются в виде листов, прокладок, жгутов, гранул и герметиков





Антистатические материалы

Применяются для задач отвода статического электричества. Выпускаются в виде листов, гранул, 3D-нити и готовых изделий



Радиопоглощающие материалы

Применяются для задач поглощения и рассеивания ЭМИ. Выпускаются в виде листов, гранул, 3D-нити и готовых изделий



000 «МК-Полимер»
636000, Томская область, г. Северск
ул. дорога Автодорога 2/3, корпус 91, помещение 5

+7-913-851-10-00
trof@mk-polymer.ru
mk-polymer.ru

4. **Lv X.-K., Yu J.-G.** Novel Silver-Plated Nickel-Coated Graphite Powder with Excellent Heat and Humidity Resistance: Facile Preparation and Performance Investigation // *Molecules*. 2022. V. 27. P. 4007.
5. **Cao X.G., Zhang H.Y.** Fabrication and performance of silver coated copper powder // *Electronic Materials Letters*. 2012. V. 8. PP. 467–470.
6. **Wang R., He M., Zhou Y., Nie S., Wang Y., Liu W., He Q., Wu W., Bu X., Yang X.** Metal-organic frameworks self-templated cubic hollow Co/N/C@MnO₂ composites for electromagnetic wave absorption // *Carbon*. 2000. V. 156. PP. 378–388.
7. **Трофимов Е.А., Кулешов Г.Е., Москаленко В.Д., Бадьин А.В., Дорожкин К.В.** Электромагнитные характеристики композиционных конструкций с пирамидальной и пористой структурами в терагерцовом диапазоне // *Радиоэлектроника и электродинамика СВЧ, КВЧ и ГВЧ*. 2021. С. 133–135.
8. **Malek F., Cheng E.M., Nadiah O., Nornikman H., Ahmed M., Abd Aziz M.Z.A. et al.** Rubber tire dust-rice husk pyramidal microwave absorber // *Progress In Electromagnetics Research*. V. 117. PP. 449–477.
9. ООО «МК-Полимер». <https://mk-polymer.ru>.
10. **Chalapat K., Sarvala K., Li J., Sorin G.** Wideband Reference-Plane Invariant Method for Measuring Electromagnetic Parameters of Materials // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2009. V. 57. Is. 9. PP. 2257–2267.
11. **Курушин А.А., Пластиков А.Н.** Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. Московский энергетический институт. 2011. 150 с.
12. **Шевченко В.Г.** Основы физики полимерных композиционных материалов. Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. 2010. 99 с.
13. **Kuleshov G. E., Badin A. V., Bilinsky K. V., Dorozhkin K. V.** Electromagnetic characteristics of filaments for 3D printing with carbon fillers in the microwave range // *ITM Web of Conferences* V. 30, P. 07010.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 1600 руб.

НАСТОЛЬНАЯ КНИГА ИНЖЕНЕРА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЧ-УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕДОВЫХ МЕТОДИК ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗА ЦЕПЕЙ

Дансмор Джоэль П.

Пер. с англ. и науч. ред. Е. Ю. Харитонова, Е. В. Андропова, А. С. Бондаренко

Издание осуществлено при поддержке компании Keysight Technologies

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2019. – 736 с.,
ISBN 978-5-94836-505-3

В книге рассмотрен широкий круг измерительных задач в СВЧ-диапазоне. В центре внимания – измерения активных и пассивных устройств с использованием новейших методик векторного анализа цепей, методики их калибровки, подходы к анализу полученных результатов. Приведены практические примеры измерений параметров таких устройств, как кабели и соединители, линии передачи, фильтры, направленные ответвители и др.

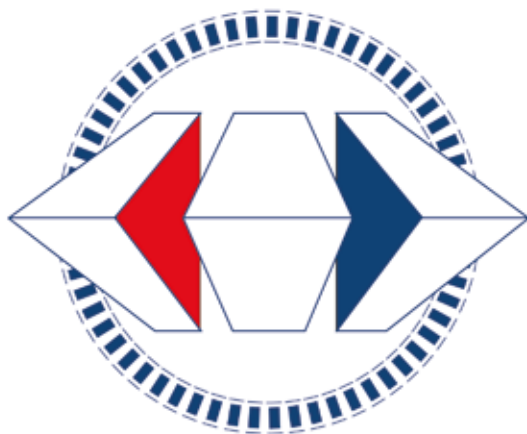
Автор книги – инженер-разработчик с 30-летним стажем – работал над широчайшим кругом измерительных задач в СВЧ-диапазоне: от компонентов сотового телефона до спутниковых мультиплексоров.

Книга станет прекрасным практическим руководством для инженеров-метрологов и разработчиков ВЧ- / СВЧ-устройств, занимающихся моделированием и тестированием как отдельных узлов радиоэлектронной аппаратуры, так и законченных изделий, к примеру систем спутниковой связи, радиолокации и радионавигации. Крайне полезной данная книга будет и в процессе обучения студентов радиотехнических специальностей.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru

**28-30
НОЯБРЯ 2023**



**РОССИЙСКИЙ
ПРОМЫШЛЕННИК**
МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ-ВЫСТАВКА



**УСТОЙЧИВОСТЬ
И РАЗВИТИЕ**

СООРГАНИЗАТОРЫ:



МИНПРОМТОРГ
РОССИИ



ПРАВИТЕЛЬСТВО
САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

EXPOFORUM

12+