

УДК 621.315.5/7

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОГЛОТИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ТИТАНА

М.О. МОЛОДЕЧКИН, В.А. БОГУШ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 5 мая 2015

Приведено обоснование выбора материала для изготовления поглотителя электромагнитного излучения. Дано описание конструкции многослойного композиционного поглотителя. Представлены результаты исследования характеристик отражения и передачи многослойного композиционного поглотителя электромагнитного излучения на основе порошка диоксида титана в диапазоне частот 0,7–17 ГГц. Даны рекомендации по использованию предложенного композиционного материала в качестве поглотителя электромагнитного излучения.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, металлосодержащие композиты, диоксид титана, резистивный сплав, эффективность экранирования, поглотитель электромагнитного излучения.

Введение

Проблема обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных средств возникла почти одновременно с первыми радиоэлектронными приборами. Первые задачи обеспечения ЭМС были связаны с ослаблением влияния непреднамеренных электромагнитных помех. По мере развития и функционального усложнения радиоэлектронной аппаратуры, с появлением новых видов радиосредств, освоением новых высокочастотных диапазонов задачи стали более сложными, подчас требующими компромиссных решений. В настоящее время проблема обеспечения ЭМС является не менее актуальной, чем обеспечение аппаратурной надежности или миниатюризации. Она решается путем реализации комплекса организационных или технических мероприятий (схемного и конструктивно-технологического характера). Технические мероприятия связаны с ослаблением или подавлением помех в источниках их возникновения, а также с разработкой устройств защиты. Технически это реализуется путем разработки и применения фильтров, экранов, использованием рационального монтажа аппаратуры, заземления [1]. В процессе создания экранов необходимо учитывать, что эффективность их работы связана с явлениями поглощения и отражения электромагнитной энергии, при этом часть энергии затухает в толще материала. В случае обеспечения ЭМС радиоэлектронных устройств важно, чтобы большая часть энергии электромагнитного излучения (ЭМИ) поглощалась, а не переотражалась на соседние устройства или в окружающее пространство.

Проектирование и разработка экранов ЭМИ связаны с аналитическими расчетами, экспериментальными исследованиями, моделированием свойств с применением прикладных пакетов программ. При этом самыми сложными являются вопросы обеспечения возможно меньшего коэффициента отражения в заданном диапазоне частот в сочетании с высоким ослаблением ЭМИ, при обеспечении минимальных массогабаритных характеристиках [2].

Одним из вариантов снижения уровня ЭМИ является использование поглотителей электромагнитного излучения, которые предназначены для следующих целей: избирательное подавление нежелательных видов колебаний, полное поглощение сигнала, снижение уровня отраженного сигнала. Создание хорошо поглощающих электромагнитное излучение

широкодиапазонных структур имеет большое практическое значение. Вот только некоторые примеры использования поглотителей ЭМИ: предупреждение несанкционированного съема информации по электромагнитному каналу, обеспечение электромагнитной совместимости радиоэлектронных устройств, маскировка военной техники от обнаружения с помощью радиолокаторов, защита проживающего населения и работающего персонала от вредного воздействия электромагнитных волн различного частотного диапазона (лаборатории, медицинские центры, компьютерные клубы) [3–5].

Среди большого разнообразия поглотителей ЭМИ наиболее перспективны объемные. Они являются одним из наиболее важных функциональных элементов электронных и измерительных приборов. Известны и широко применяются в качестве поглотителей такие материалы, как науглероженная пористая керамика, карбид кремния, составы «Альсифер», «Альфер» и другие [6]. Разработке подобных изделий ученые в последние годы уделяют достаточно много внимания. Поглотители СВЧ-энергии продолжают совершенствоваться по составу, свойствам, конструкции, технологическим процессам изготовления, для обеспечения повторяемости и стабильности эксплуатационных свойств.

При разработке эффективного широкополосного поглотителя ЭМИ необходимо решить задачи по выбору материала, обоснованию конструкции. Материалы, применяющиеся для изготовления поглотителей ЭМИ, должны кроме высокой эффективности поглощения в рабочем диапазоне частот, иметь большую теплопроводность (для отвода поглощенной энергии), высокую механическую прочность, стойкость к окислению при нагреве на воздухе, обеспечивать минимальное влияние на экранируемый объект, минимальные массогабаритные характеристики, высокую технологичность конструкции, повышенные рабочие температуры и т.д [7]. Использование одного вида материала не всегда позволяет добиться комплекса необходимых эксплуатационных свойств. Поэтому чаще используют композиционные материалы, так как незначительное изменение в их составе и количестве исходных компонентов приводит к существенным изменениям эксплуатационных характеристик поглотителя. Наиболее перспективны композиционные керамико-металлические поглощающие материалы – керметы. Их отличают высокие значения параметров: механическая прочность, уровень удельной поглощаемой мощности на единицу массы, рабочая температура. Основным условием эффективного поглощения керметами СВЧ-энергии является изолированность и равномерность расположения металлических частиц в объеме материала, размер которых близок к величине скин-слоя на данной частоте [2]. Разработка широкодиапазонного поглотителя ЭМИ требует учета различных механизмов его работы и, соответственно, сочетания в конструкции материалов с различающимися электрофизическими свойствами.

Недостаток большинства применяющихся материалов заключается в том, что они содержат компоненты, способные поглощать только электрическую или магнитную составляющие электромагнитного излучения. Кроме того, структура материала не предполагает проявления квантовых эффектов. В результате это приводит к снижению поглощающих свойств материала. Поэтому актуальной задачей синтеза композита является повышение радиопоглощающих свойств материала как по электрической, так и по магнитной составляющей электромагнитного излучения.

В практике экранирования применяют композиционные материалы, которые могут содержать наполнители различных форм: мелкодисперсные порошки, проводящие волокна, сеточные, тканые или фольгированные материалы. Выбор тех или иных электропроводящих наполнителей зависит от решаемой задачи. При правильном выборе проводящих добавок и подходящего метода смешения компонентов можно добиться высокой степени экранирования. Использование добавок в виде волокон и чешуек обеспечивает лучший контакт между частицами при небольшом наполнении, что приводит к увеличению проводимости при более низкой стоимости и при меньшей плотности поглотителя [8].

Экспериментальная часть

Цель исследования – определение состава композиционного материала и разработка конструкции поглотителя электромагнитной энергии в диапазоне СВЧ. Для изучения экранирующих характеристик композиционного материала были изготовлены образцы, содержащие в составе порошок TiO_2 , резистивный сплав, кермет.

Резистивный сплав РС 3710 (ЕТО021.034ТУ) имеет следующий состав: 37,9 % Cr, 9,4 % Ni, 52,7 % Si, удельное сопротивление достигает величины 3000 Ом/□. Кермет К-50С (ЕТО 021.033 ТУ) содержит до 25,2 % Cr, удельное сопротивление от 3 до 10 Ом/□. Порошок диоксида титана модификации рутил был приготовлен по методике [9]. Все компоненты исследуемого материала были равномерно распределены в связующем.

Образцы изготавливали методом печати на полуавтоматическом устройстве трафаретной печати SP002 В (Швейцария). При выборе метода формирования исходили из анализа известных способов: нанесение через сито, при помощи скребка, прокатка через вальцы [7]. Выбранный метод трафаретной печати обеспечивает высокую равномерность нанесения пасты и точность поддержания толщины слоя, при этом достаточно прост в реализации.

Все слои поглотителя формировались из паст, приготовленных на основе одинакового связующего – целлюлозы, что обеспечивает высокую адгезию слоев между собой и увеличивает механическую прочность конструкции поглотителя. При этом композиция хорошо формуется, имеет высокую пластичность. Материал выбранной связки, этилцеллюлоза, обеспечивает минимальный вес, стабильность рабочих характеристик экрана при повышенных рабочих температурах, защищает металлические наполнители от коррозии. Для приготовления пасты использовали растворитель типа толуол (возможно использование скипидара).

Для проведения исследований были изготовлены образцы, имеющие разный состав и количество слоев (таблица). Формирование образцов проводили последовательным нанесением нужного количества слоев. Были исследованы образцы, имеющие градиент основных компонентов по толщине.

Состав исследуемых образцов

Номер образца	Состав 1-го слоя, соотношение компонентов	Состав 2-го слоя, соотношение компонентов
1	РС-3710 + TiO ₂ (2,65:1)	–
2	РС-3710 + TiO ₂ (2,65:1)	РС-3710 + TiO ₂ (2,65:1)
3	РС-3710 + TiO ₂ (5,3:1)	–
4	РС-3710 + TiO ₂ (5,3:1)	РС-3710 + TiO ₂ (5,3:1)

Измерение экранирующих характеристик в диапазоне 8...12 ГГц выполняли на панорамном измерителе ослабления и коэффициента стоячей волны (КСВН) Я2Р-67 с ГКЧ-61. Экранирующие характеристики оценивались через коэффициенты передачи и отражения измерительного тракта с образцом. Коэффициент передачи показывает долю мощности электромагнитной энергии, пошедшей через образец, коэффициент отражения – долю мощности ЭМИ, отраженную от образца.

Поскольку однослойные экраны не всегда отвечают всему комплексу эксплуатационных требований, был изготовлен многослойный комбинированный экран, состоящий из магнитных и немагнитных слоев. Задача, поставленная при разработке многослойного композиционного поглотителя ЭМИ, заключалась в повышении механической прочности конструкции, увеличении адгезии слоев между собой, снижении коэффициента отражения ЭМИ без применения сложной технологии изготовления.

Указанная задача решалась путем разработки конструкции поглотителя и подбором состава композиционного материала. Поглотитель ЭМИ представляет собой многослойную конструкцию, содержащую согласующий, поглощающий и отражающий слои (рис. 1).

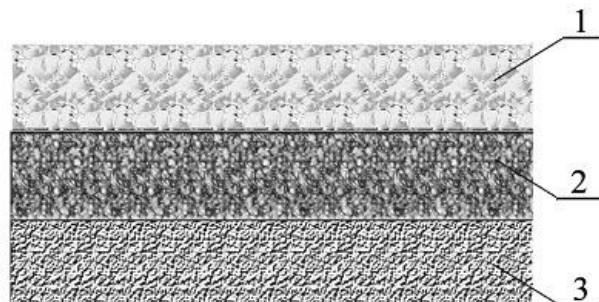


Рис. 1. Конструкция поглотителя электромагнитного излучения:
1 – согласующий слой, 2 – поглощающий слой, 3 – отражающий слой

Требуемая толщина поглотителя каждого конструктивного слоя достигалась путем многократного нанесения пасты соответствующего состава.

В качестве первого, согласующего, слоя использовали целлюлозу с распределенным в ней функциональным наполнителем. Слой 1 должен обладать удельным электрическим сопротивлением, близким к среде распространения, и, следовательно, низким коэффициентом отражения ЭМИ. Согласующий слой выполнен из целлюлозы с распределенной в ней борной кислотой. Второй, поглощающий слой, представляет собой смесь порошков кермета и диоксида титана, равномерно распределенную в целлюлозном связующем. Этот слой имеет более высокую электропроводность, высокую диэлектрическую проницаемость и эффективнее подавляет ЭМИ. Для повышения коэффициента ослабления ЭМИ в конструкции используется третий, отражающий, слой, который представляет собой целлюлозу с равномерно распределенными в ней чешуйками, либо опилками проводящего наполнителя (опилки железа, алюминия).

Измерение экранирующих характеристик проводилось на автоматизированном измерителе модуля коэффициентов передачи и отражения SNA 0.01–18, волноводного тракта с рупорными антеннами 6П-23М, в раскрыве рупора антенны, в диапазоне частот 2...17 ГГц (рис. 2). Ослабление, вносимое исследуемым образцом, определяется отношением напряженностей волн, падающей и прошедшей через образец, выделяемых блоками *A* и *B*. Коэффициент отражения *R* характеризует долю падающей энергии ЭМИ, отраженную от образца. Напряженности поля волн измеряются блоками *A* и *B*, затем блок обработки сигналов производит вычисление отношений. Коэффициент отражения ЭМИ измерялся в режимах согласованной нагрузки и тракта, нагруженного на металлическую отражающую пластину (КЗ).

$$A = 20 \log \left(\sqrt{\frac{E_{\text{пад}}}{E_{\text{прош}}}} \right), \text{дБ}; R = 20 \log \left(\sqrt{\frac{E_{\text{отр}}}{E_{\text{пад}}}} \right), \text{дБ} \quad (1)$$

где $E_{\text{отр}}$, $E_{\text{пад}}$ – напряженность поля, выделенного детектором отраженной и падающей волн *A/R*; $E_{\text{прош}}$ – напряженность поля волны, прошедшей через образец, выделенная блоком *B*.

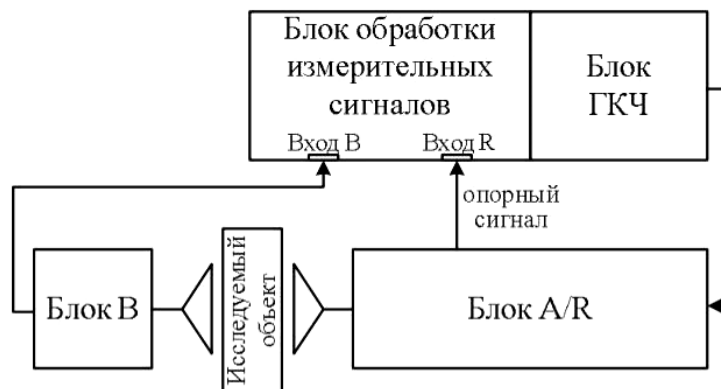


Рис. 2. Схема установки в режиме измерения ослабления ЭМИ

Результаты и обсуждение

Результаты измерения коэффициента передачи образцов № 1 и № 3, отличающихся количеством функциональных наполнителей, представлены на рис. 3. Увеличение массовой доли резистивного сплава в составе композита (5,3:1 для образца № 3 и 2,65:1 для образца № 1) обеспечивает уменьшение коэффициента передачи за счет увеличения электропроводящих свойств композита. Нанесение второго слоя того же состава (образец № 2) приводит к увеличению толщины образца и, как следствие, к уменьшению коэффициента передачи. Причем, в образце № 4, имеющем большее относительное содержание резистивного сплава РС 3710, коэффициент передачи уменьшился на большую величину.

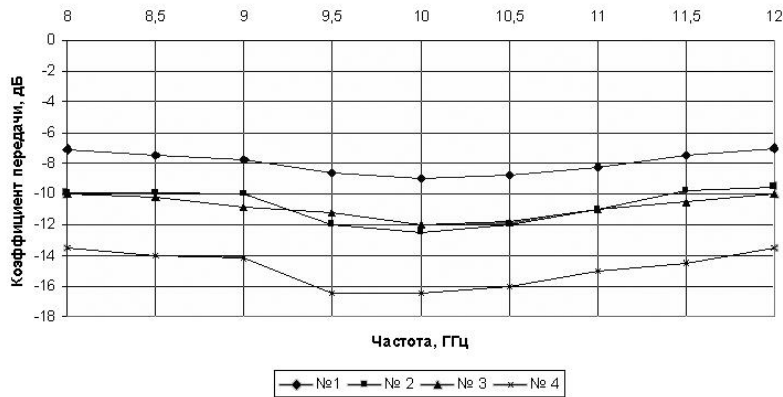


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента передачи электромагнитной энергии образцов

Измерение коэффициента отражения проводили с обеих сторон образцов (рис. 4). Размещая образец № 1 рабочей (1.2) и обратной (1.1) стороной к излучателю, установили, что рабочая сторона обеспечивает меньшее значение коэффициента отражения, что можно объяснить состоянием поверхности образца. Обратная поверхность после отделения от основы (электротехнический картон), используемой при формировании, имеет некоторую шероховатость. Образец № 2, имеющий градиент концентрации компонентов по толщине (после нанесения второго слоя с соотношением компонентов 2,65:1), имеет больший разброс в значениях коэффициента отражения. Сравнение коэффициента отражения с рабочей стороны для образцов № 1 и № 2 (1.2 и 2.2, соответственно) показало: меньшее значение получено для образца № 2, поскольку содержание резистивного сплава в нем меньше, а диоксида титана больше, что и понижает долю отраженной энергии за счет более высокой диэлектрической проницаемости слоя.

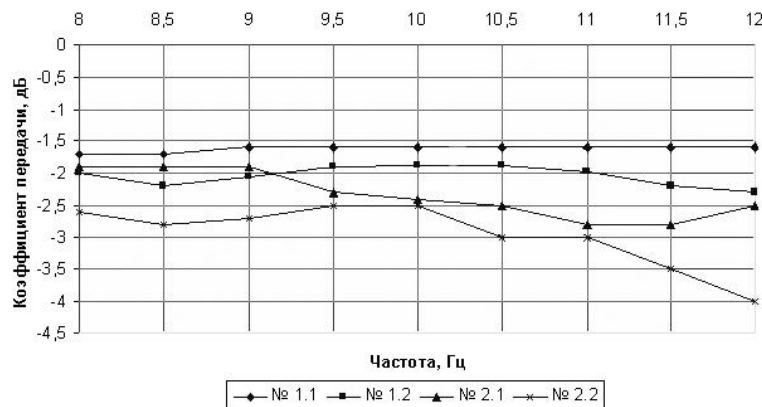


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента отражения электромагнитной энергии образцов на основе диоксида титана и резистивного сплава, при установленной за образцами согласованной нагрузке

Были измерены экранирующие характеристики многослойного поглотителя. Результаты представлены на рис. 5–8.

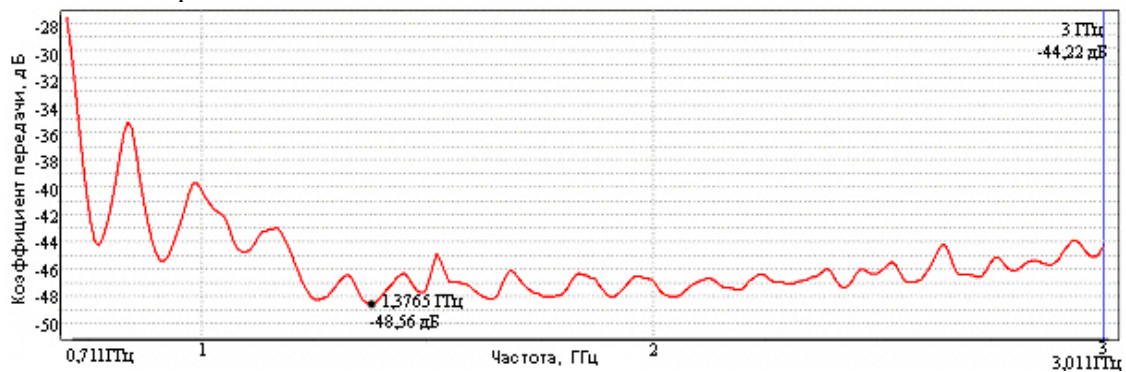


Рис. 5. Зависимость коэффициента передачи ЭМИ многослойного поглотителя в диапазоне от 0,7 до 3 ГГц

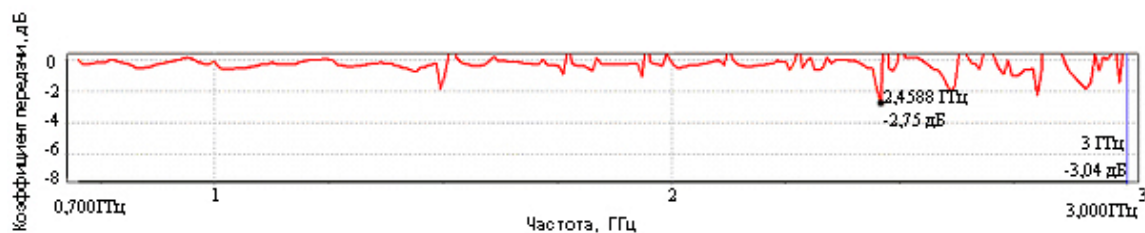


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения многослойного поглотителя в диапазоне от 0,7 до 3 ГГц



Рис. 7. Зависимость коэффициента передачи ЭМИ многослойного поглотителя в диапазоне от 2 до 17 ГГц



Рис. 8. Зависимость коэффициента отражения многослойного поглотителя в диапазоне от 2 до 17 ГГц

Выбирая количество и вид порошковых наполнителей, исходили из следующих соображений. Для эффективного поглощения ЭМИ в диапазоне СВЧ необходимо обеспечить высокие значения электропроводности, диэлектрической проницаемости, магнитной проницаемости материала. Поскольку матрица материала поглотителя (целлюлоза) является непроводящей, необходимую величину можно достичь, вводя добавки проводящих материалов, причем результирующая проводимость будет функцией содержания этой добавки. Проводимость материала не будет линейно увеличиваться при повышении содержания добавки, а достигнет необходимой величины, как только возникнут условия для образования проводящих мостиков в матрице материала. Дальнейшее увеличение количества проводящей добавки не изменит существенно электропроводность материала-матрицы [10]. В результате проведения экспериментов добавляли порошки диоксида титана разных размеров, кристаллографических модификаций (рутил, анатаз). При этом установили, что при использовании добавок, состоящих из крупных частиц, имеющих широкое распределение по размерам, необходимый уровень ослабления ЭМИ достигался при более низком содержании проводящей добавки.

Принцип действия поглотителя следующий. Падающая электромагнитная волна (ЭМВ) частично отражается от поверхности согласующего слоя 1 и частично рассеивается ею. Снижение доли отраженной энергии обеспечивается согласованием волновых сопротивлений поглотителя и среды распространения ЭМВ. Поглощение энергии ЭМВ происходит в слое 2 за счет его высокой диэлектрической проницаемости, что обусловлено распределенным в слое целлюлозы наполнителем (диоксид титана), и потерь на проводимость, что обеспечивается низким удельным сопротивлением слоя, содержащего порошок резистивного сплава (кермета).

