



Материалы и покрытия для защиты от электромагнитного излучения (обзор)

С. Б. Меньшова

Пензенский государственный университет, Россия, 440026 г. Пенза, ул. Красная, 40

Аннотация. В данной работе дан аналитический обзор назначения современных радиопоглощающих материалов (РПМ) и покрытий (РПП). Выявлены основные тенденции увеличения поглощения электромагнитной энергии. Представлены теоретические основы, а также перспективы создания РПМ и РПП.

Ключевые слова: электромагнитное экранирование, мнимая часть диэлектрической и магнитной проницаемости, согласование волновых сопротивлений, интерференционный минимум, резонанс доменных границ, естественный ферромагнитный резонанс, ферритовые радиопоглощающие материалы.

Materials and coatings for protection against electromagnetic radiation (review)

S. B. Menshova

Penza State University, 40 Krasnaya Street, 440026, Penza, Russia

Abstract. The paper presents an analytical review on the application of modern radio-absorbing materials (RAM) and coatings (RAC). The key trends of increasing the absorption of electromagnetic energy are identified. The theoretical frameworks, as well as the prospects for designing RAM and RAC, are established.

Key words: electromagnetic shielding, imaginary part of dielectric and magnetic permeability, matching of wave impedances, interference minimum, domain-wall resonance, natural ferromagnetic resonance, ferrite radio-absorbing materials.

Назначение РПМ и РПП

Согласно закону РФ «О государственном регулировании в области обеспечения электромагнитной совместимости технических средств» [1] ужесточаются требования к уровню электромагнитного излучения выпускаемых электронных и электрических приборов. Закон направлен на согласованную работу приборов и устройств, а также на защиту человека от электромагнитных излучений. Известно, что электромагнитное излучение техногенного характера нарушает согласованную работу всех систем организма человека [2]. Испытания на соответствие требованиям проводятся в безэховых камерах, стены которых облицованы радиопоглощающими покрытиями (РПП) и радиопоглощающими материалами (РПМ), необходимыми для защиты персонала и измерительных приборов от переотраженного электромагнитного излучения (ЭМИ). Безэховые камеры используются также для тестирования и настройки чувствительных и высокоточных систем, к которым относятся спутниковые системы, георадары, корабельные радиобуи и др. [3].

Во многих странах в целях охраны здоровья людей и защиты чувствительных приборов от ЭМИ применяется экранирование. Экранированные помещения необходимы также для защиты от несанкционированного съема информации с устройств обработки, передачи и хранения информации. При выборе экранирующих материалов, как правило, считают, что на частотах до 1 МГц доминирующим фактором является магнитная проницаемость, а на частотах выше 1 МГц – проводимость

материала. Длительное время в практике электромагнитного экранирования применялись традиционные материалы – металлические листы. Однако при необходимости в более высоком уровне экранировки (более 50–60 дБ) серьезные технические проблемы возникают при обеспечении электрогерметичности контура. При несоблюдении этого условия проникшее внутрь экранируемого объема излучение из-за переотражений от высокопроводящих стенок образует стоячие волны, а сама экранирующая конструкция выступает в качестве резонатора при определенных частотах излучения [4].

Из-за накопления энергии в камере как в резонаторе с определенной добротностью увеличивается мощность электромагнитного излучения через возможные щели, отверстия и другие неоднородности электромагнитного контура [5]. С целью создания электрогерметичного экранирующего контура целесообразно сделать выбор в пользу композиционных материалов на основе полимерного связующего и наполнителей на основе магнитных сплавов (например, магнитоаморфных сплавов, содержащих Fe, Si, B, Cu) или ферритов, характеризующихся высокими магнитными потерями, технологичностью изготовления и сравнительно невысокой ценой.

Применение в качестве наполнителя в композиционной полимерной матрице (КПМ) малых магнитных частиц, например, из феррита, относится к числу перспективных направлений техники электромагнитного экранирования в области частот более 1 ГГц [6]. РПМ на основе Ni-Zn ферритов отличаются технологичностью изготовления, небольшими массогабаритными характеристиками, широким интервалом рабочих частот (от 10 МГц – 1 ГГц). В ряде случаев Ni-Zn ферриты могут быть заменены Mg-Zn ферритами, цена которых меньше примерно на 30 % и в составе которых нет дефицитного оксида никеля (III), эффективных в области частот 40 МГц – 1500 МГц. Известны составы Mn-Zn-ферритов, также не содержащие дефицитного никеля и по своим параметрам близкие к Ni-Zn-ферритам.

Направления создания РПП и РПМ

В настоящее время можно выделить следующие тенденции увеличения поглощения электромагнитной энергии РПМ и РПП:

1. За счет увеличения мнимой части диэлектрической проницаемости ϵ'' и диэлектрических потерь материала. Однако увеличение проводимости и, соответственно, тепловых потерь приводит к увеличению отражения от передней поверхности материала. С целью снижения заметности целесообразно использовать интерференционные явления. При определенной толщине РПП волны, отраженные от передней и задней поверхностей РПП, будут находиться в противофазе, что означает зависимость толщины поглощающего слоя от частоты. Следовательно, приемлемых значений коэффициента поглощения можно добиться лишь на некоторых фиксированных частотах.

2. За счет увеличения мнимой части магнитной проницаемости μ'' и магнитных потерь. Магнитные наполнители, обеспечивающие большие магнитные потери, вводят в состав композиционных материалов и аморфных сплавов, предназначенных для экранирования и поглощения электромагнитной энергии. С целью подавления электромагнитных помех в электрических цепях, в источниках вторичного электропитания широко используют ферритовые фильтры и чип-бусины [7–8]. Ферритовый фильтр – пассивный электрический компонент, изготовленный из ферритового материала в виде кольца, использующийся в качестве фильтра, для подавления высокочастотных помех в электрических цепях. Ферритовое кольцо увеличивает индуктивность проходящего через него участка провода в несколько сотен (вплоть до тысяч) раз, что обеспечивает высокий импеданс и подавление помех высокой частоты. Чаще всего имеют форму цилиндров или параллелепипедов; могут быть съемными с защелками или несъемными литыми. Ферритовые фильтры используются как дополнительные внешние фильтры, как правило, для устройств, имеющих длинные соединительные кабели [9].

3. За счет согласования волновых сопротивлений материала покрытия со средой распространения электромагнитной волны. Для снижения уровня сигнала, отраженного от границы раздела и обусловленного скачком волнового сопротивления, используют многослойные материалы, первый слой которых обладает меньшим значением диэлектрической проницаемости, следовательно, меньшим отражением от границы раздела. Предельным случаем являются материалы градиентного типа, характеристики которых изменяются непрерывно по мере продвижения вглубь материала. С этой целью используют конструкции в виде пирамид или усеченных конусов, обеспечивающих плавное изменение электрических характеристик вдоль распространения волны [10].

Недостатком вышеперечисленных конструкций являются сложность изготовления и необходимость использования РПМ толщиной порядка длины волны в материале, что становится критичным для задач снижения отражений в области частот ниже 1 ГГц, особенно при ограничении на общие

габаритные характеристики. Кроме того, для материалов такого типа нередко необходима пропитка, обеспечивающая пожарную безопасность.

Паразитное отражение от границы раздела из-за рассогласования волновых сопротивлений можно подавить путем введения в материал компонента с отличной от нуля мнимой частью магнитной проницаемости μ'' . И наряду с электропроводящими наполнителями при создании РПМ и РПП используются порошковые наполнители магнитной природы (порошки ферритов, карбонильное железо и т.д.) В ряде работ предлагают использование композиционных материалов, содержащих в диэлектрической матрице (вспененная полимерная композиция) фракцию проводящего наполнителя в форме протяженных включений (например, углеродных или металлических волокон) совместно с мелкодисперсными электропроводящими и магнитными порошками.

Применение ферритовых наполнителей в радиопоглощающих материалах перспективно, так как материал имеет значительные магнитные потери, и наличие больших значений магнитной проницаемости μ'' позволяет обеспечить лучшее согласование металлических и сильно поглощающих слоев со свободным пространством [9].

Значительное число публикаций в России и за рубежом посвящено созданию новых форм ферритовых наполнителей и совместному использованию ферритовых порошков, графитов, металлических волокон. Так, в [11] предложен РПМ, который содержит в качестве полимерного связующего синтетический клей на основе латекса, в качестве магнитного наполнителя – порошкообразный феррит или карбонильное железо.

4. За счет интерференции отражений от разных слоев покрытия, приводящей к уменьшению отражения от материала (многослойные покрытия и покрытия специальной формы). Здесь комплексное волновое сопротивление также уменьшается по мере погружения вглубь покрытия. Это позволяет избежать резких скачков волнового сопротивления и, следовательно, нежелательных отражений. Наиболее простым вариантом такой структуры является двухслойное покрытие из материала с разной проводимостью, где верхний слой с меньшими значениями электрической проводимости часто называют согласующим, а нижний (с большими значениями) – поглощающим.

5. За счет интерференционного минимума волн, отраженных от поверхностей ферритового РПП и металлического экрана, на который наклеены пластины покрытия. При этом толщина покрытия определяется длиной волны падающего излучения.

Увеличение магнитной и диэлектрической проницаемостей снижает длину электромагнитной волны и позволяет уменьшить толщину пластин, что особенно важно при низких частотах [12].

Коэффициент ослабления отраженного электромагнитного излучения в значительной степени зависит не только от интерференционных явлений при отражении электромагнитных волн, а также от процессов поглощения электромагнитного излучения в результате резонансных явлений.

Теоретические основы создания РПМ

Под поглощением электромагнитной энергии понимают электрические и магнитные потери в материале, происходящие за счет процессов релаксации. Энергия, переданная системе, распределится между собственными типами колебаний, амплитуды которых примут значения, соответствующие термодинамическому равновесию. Процессы релаксации будут определять скорость убывания амплитуд колебаний, возбужденных внешними силами. Если система находится под действием периодических внешних сил, то процессы релаксации осуществляют непрерывный отток энергии от первичных типов колебаний и обеспечивают тем самым возможность непрерывного поглощения системой энергии внешних сил. Процессы релаксации в этом случае определяют диссипативные характеристики системы. В [13] приведены математические модели спин-спиновой, спин-решеточной, ионной релаксации, релаксации с участием носителей тока в зависимости от частиц, участвующих в процессе перераспределения энергии. Выделение нескольких типов релаксации условно, так как все частицы связаны силами взаимодействия и одновременно участвуют в процессе перераспределения энергии, однако такое разделение возникло из-за сложности цельного описания процесса релаксации в поликристаллическом материале.

Наиболее сильное поглощение энергии связывают с резонансными явлениями в ферритах. Наибольший интерес представляет резонанс доменных границ (РДГ) и естественный ферромагнитный резонанс (ЕФМР), которые описываются уравнениями Деринга и Ландау – Лифшица соответственно [10]. Известные уравнения практически постулированы, но для решения практических задач пользуются уравнениями, полученными эмпирическим путем.

Установлено, что процессы смещения доменных границ оказывают решающее влияние на многие физические свойства магнитоупорядоченных кристаллов. Нелинейные процессы динамического преобразования намагниченности в системе спинов, локализованной в доменной стенке, определяют способы диссипации энергии, подведенной к доменной границе извне [13].

Известно [14], что магнитные потери ферритовых РПМ в интервале частот 10–100 МГц в значительной степени вызваны процессами резонанса доменных границ (РДГ), приводящими к оттоку внешней электромагнитной энергии благодаря перераспределению энергии между электронами, образующими доменные границы.

Рассеяние электромагнитной энергии происходит на доменных границах [15], часть которых приходится на межзеренные границы. Поэтому на величину электромагнитных потерь влияют не только микропоры, инородные примеси и легирующие добавки, но характер их распределения в материале. Чем массивнее и продолжительнее доменные границы, чем больше содержат микропор, включений инородных атомов, тем эффективнее будет происходить рассеяние падающей электромагнитной волны. Так, при добавлении в Mg-Zn ферритовый материал оксида меди в качестве эвтектики (облегчающей спекания) CuO можно наблюдать включения в форме микроглобул, расположенных в микропорах. Тогда как оксид висмута Bi_2O_3 растекается по границам зерен, занимая большую поверхность, и падающая электромагнитная волна рассеивается на большей площади. Видимо, именно этим можно объяснить, что при одинаковом размере зерна Mg-Zn ферритового материала потери электромагнитной энергии в случае использования оксида висмута больше, чем в случае использования оксида меди [16].

Можно предположить, что средства электронной микроскопии, использованной при анализе ферритовых радиопоглощающих материалов, помогут экспериментальным путем установить все особенности микроструктуры, при которых материал будет наиболее эффективен с точки зрения поглощения электромагнитной энергии.

Перспективы создания новых РПМ

Тенденция миниатюризации технических средств и переход к СВЧ-диапазону блоков питания требует создания РПП гигагерцового диапазона. Как правило, это покрытия из аморфных сплавов, содержащих Fe, Ni, Co, толщина которых составляет несколько мкм. (Как правило, толщина РПП соизмерима с рабочей длиной волны падающего электромагнитного излучения). Изготавливаются покрытия методом напыления или нанесения расплавов на тканевую, пленочную или иную основу.

В случае появления в требуемом диапазоне поглощения мегагерцовых частот, толщина РПП становится значительной и порой может быть соизмерима с ростом человека. Такие громоздкие материалы, используемые в безэховых камерах, сокращают рабочее пространство. Кроме того, они трудны для монтажа, содержат токсичные компоненты и имеют высокую цену.

Диапазон от 10 до 400 МГц – это наиболее проблемная область поглощения электромагнитной энергии РПП и РПМ. Поскольку этот диапазон соответствует частотам РДГ в Ni-Zn и Mg-Zn ферритах, то данные указанные материалы являются перспективными для мегагерцового диапазона. Именно по этой причине изучение резонансных явлений в ферритах, особенно резонанса доменных границ, является актуальным.

Для расширения частотного диапазона поглощения в области частот менее 30 МГц необходимо разрабатывать новые ферритовые материалы с сочетанием высоких значений магнитной и диэлектрической проницаемостей и со значительными проявлениями РДГ. Перспективными наряду с Ni-Zn и Mg-Zn-ферритами являются Mn-Zn-ферриты [17].

Необходимо разрабатывать научные основы создания широкополосных поглотителей на основе ферритовых материалов, в том числе порошковых на основе полимерных связующих, а также выполнять математическое моделирование накопленных экспериментальных данных с целью управления радиопоглощающими свойствами РПМ.

Библиографический список:

1. URL: <http://eurocos.ru/uploads/about%20state%20regulation.doc>
2. От нейрона к мозгу / Джон Г. Николлс, А. Роберт Мартин, Брюс Дж. Валлас, Пол А. Фукс. – М. : Либроком, 2012. – 672 с.
3. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Безэховая_камера
4. Tsanov T., Terlemezyan L. // *Polymers & Polymer Composites*. – 1997. – Vol. 6, № 7. – P. 447–454.
5. Omastova M., Pavlinec J., Pionteck J., Simon F., Kosina S. // *Polymer*. – 1998. – Vol. 39, № 25. – P. 6559–6566.

6. Tsanov, T., Mokreva P., Terlemezyan L. // *Polymers & Polymer Composites*. – 1997. – Vol. 5, № 7. – P. 483–492.
7. Подавление помех с помощью фильтров EMIFIL. Руководство по применению. Руководство пользователя. – М. : Додэка XXI, 2014. – 56 с.
8. URL: [http://www.coretech.com.ua/docs/coretech_EMI_suppression_components-D2U_\[2013\].pdf](http://www.coretech.com.ua/docs/coretech_EMI_suppression_components-D2U_[2013].pdf)
9. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki>.
10. URL: <http://www.radiostrim.ru>
11. URL: <http://www.fips.ru/cdfi/fips.dll?ty=29&docid=2107705>
12. Menshova, S. B. The Influence of Basic Composition and Microstructures on the Properties of Ni-Zn Ferrite Radio-Absorbing Materials / S. B. Menshova, V. G. Andreev, A. N. Klimov, R. M. Vergazov // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2015. – Vol. 393. – P. 569–573.
13. Гуревич, А. Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках / А. Г. Гуревич. – М. : Наука, 1973. – 573 с.
14. Smit J. Ferrites / J. Smit, H. P. J. Wijn. – N. Y. : John Wiley, 1959. – P. 290.
15. Бибиков, С. Б. Влияние параметров микроструктуры на радиофизические характеристики Ni-Zn ферритовых материалов / С. Б. Бибиков, С. Б. Меньшова, М. В. Прокофьев, Р. М. Вергазов // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2010. – № 3 (15). – С. 123–135.
16. Исследование влияния легирующих добавок на микроструктуру и свойства радиопоглощающих Mg-Zn ферритовых материалов / В. Г. Андреев, С. Б. Меньшова, А. Ю. Кирина, С. Б. Бибиков, М. В. Прокофьев, В. М. Прохоров // *Российские нанотехнологии*. – 2016. – Т. 11, № 9–10. – С. 22–28.
17. URL: <http://www.freepatentsonline.com/7108799.html>

Меньшова, С. Б.

Материалы и покрытия для защиты от электромагнитного излучения (обзор) / С. Б. Меньшова // *Инжиниринг и технологии*. – 2017. – Vol. 2(1). – DOI 10.21685/2587-7704-2017-2-1-2