

ПРИМЕНЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЭКРАНИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Р.К. Абасов

rasim-0594@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрено применение углеродных материалов для экранирования электромагнитных полей. Доказано, что использование в композитных материалах углеродных нитей субмикронного диаметра, гальванически осажденных никелем, позволяет получить высокую эффективность экранирования. Описан механизм защиты от электромагнитных полей, который заключается в отражении и/или поглощении электромагнитного излучения. Приведена классификация электромагнитных материалов. Описан способ получения терморасширенного графита, который применяют для изготовления эластичных прокладок и который обладает экранирующими свойствами

Ключевые слова

Электромагнитное излучение, скин-эффект, углеродные нити, терморасширенный графит, эффективность экранирования

Поступила в редакцию 30.11.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

Экранирование электромагнитных полей (ЭМП) является актуальной задачей защиты здоровья, информационной безопасности, электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии жилых помещений, защиты помещений для серверов и электронного оборудования. ЭМП относят к отражению и/или поглощению электромагнитного излучения материалом, который выступает в качестве защитного элемента.

Известно, что электромагнитное излучение может взаимодействовать с электроникой (например, компьютерами), особенно на высоких частотах (например, радиочастотах, исходящих от сотовых телефонов), поэтому необходимо экранирование электромагнитного излучения как электроники, так и источников излучения.

Обычно под экранированием понимают защиту приборов от воздействия внешних полей и локализацию излучения каких-либо средств, препятствующих проявлению этих излучений в окружающей среде [1]. В общем случае защита от электромагнитных воздействий может быть осуществлена пассивными и активными методами. Пассивными — путем применения новых конструкторско-технологических решений, новых материалов, активные — с использованием электронных методов и средств защиты.

Важной проблемой конструкторско-технологического проектирования электронной аппаратуры является автоматизация инженерных расчетов электромагнитных полей [2]. В работах [3–6] представлена обобщенная методика применения программного обеспечения для инженерных методов экранирования радиоэлек-

тронной аппаратуры (РЭА) и электронно-вычислительной аппаратуры (ЭВА) на стадиях технического и рабочего проектирования. В них раскрывается функциональное назначение программ, приводятся входные и выходные данные, дается описание логической структуры и инструкция по эксплуатации инструментов автоматизированного моделирования электромагнитных полей.

Одним из эффективных подходов к решению задачи экранирования является использование новых материалов. Экранирование электромагнитных полей следует отличать от магнитного экранирования, которое относят к экранированию магнитных полей на низких частотах (например, 60 Гц). Материалы для экрана от электромагнитных полей отличаются от магнитных [7, 8].

Анализ механизмов защиты от электромагнитных полей. Основным механизмом защиты от электромагнитных помех является отражение. Для отражения излучения материал экрана имеет подвижные носители заряда (электроны или дырки), которые взаимодействуют с электромагнитными полями в излучении. Отражение обуславливается несоответствием электромагнитных свойств среды, в которой распространяется электромагнитная энергия с материалом экрана. На рис. 1 показан общий механизм защиты от ЭМП плоским экраном.



Рис. 1. Экранирование ЭМП плоским экраном

Таким образом, электромагнитная волна при взаимодействии с экраном отражается от его поверхности, частично проникает в стенку экрана, претерпевает поглощение в материале экрана, многократно отражается от его стенок и, в результате, частично проникает в экранируемую область.

Металлические экраны известны уже давно и активно применяются. Они отличаются высокой эффективностью работы на радиочастотах, которая увеличивается при повышении частоты падающего электромагнитного излучения, их изготавливают в виде сплошных и перфорированных листов, сеток и могут быть нанесены в виде тонкопленочных покрытий. Однако металлические экраны обладают

одним существенным недостатком, связанным с их высокой электропроводностью: высоким коэффициентом отражения, обусловленным большим различием волнового сопротивления свободного пространства и экрана. Кроме того, эффективность таких экранов очень сильно зависит от качества и надежности монтажа электрических контактов, при нарушении которых появляются области переизлучения электромагнитной волны [2, 7, 8].

Вторичный механизм защиты от электромагнитных помех — это поглощение. Для значительного поглощения излучения экран должен иметь электрические и/или магнитные диполи, которые взаимодействуют с электромагнитными полями в излучении. Такие диполи могут быть представлены титаном бария (BaTiO_3) или другим материалом, имеющим высокое значение диэлектрической проницаемости. Магнитные диполи могут быть представлены магнетитом (Fe_3O_4) или другим материалом, имеющим высокое значение магнитной проницаемости [8].

Потери поглощения определяют функцией $f(\delta_r, \mu_r)$, в то время как потери на отражение — функцией отношения $f((\delta_r/\mu_r))$, где δ_r — электропроводность, μ_r — относительная магнитная проницаемость. Серебро, медь, золото и алюминий отлично подходят для отражения, так как обладают высокой проводимостью. С увеличением частоты потери отражения уменьшаются, в то время как потери поглощения возрастают. Потери поглощения прямо пропорциональны толщине экрана и частоте электромагнитного поля. Электромагнитное излучение на высоких частотах проникает только вблизи поверхностной области электрического проводника. Такое явление называют скин-эффектом. Объемная плотность тока максимальна у поверхности проводника. При удалении от поверхности она убывает экспоненциально и на глубине δ становится меньше в несколько раз. Эта глубину называют толщиной скин-слоя, ее вычисляют по формуле [2]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}},$$

где f — частота; μ — магнитная проницаемость, $\mu = \mu_0 \mu_r$; μ_r — относительная магнитная проницаемость; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн·м⁻²; σ — электропроводность (Ом·м)⁻¹. Таким образом, глубина скин-слоя уменьшается с увеличением частоты и с увеличением проводимости или проницаемости. Обозначенные показатели для меди: $\mu_r = 1$, $\sigma = 5,8 \cdot 10^{-7}$ (Ом·м)⁻¹, $\delta = 2,09$ мкм на частоте 1 ГГц; для никеля: $\mu_r = 100$, $\sigma = 1,15 \cdot 10^{-7}$ (Ом·м)⁻¹, $\delta = 0,47$ мкм на частоте 1 ГГц. Малая глубина скин-слоя никеля, по сравнению с медью, обусловлена ферромагнитными свойствами никеля.

Классификация экранирующих материалов. Сложный механизм распространения и поглощения электромагнитного излучения (ЭМИ), а также технологические сложности синтеза материалов с заранее заданными электромагнитными свойствами в широком диапазоне частот обуславливают разнообразие

существующих экранирующих материалов, основное деление которых можно провести по их элементному составу и микроструктуре. По фазовому составу материалы бывают гомогенными и гетерогенными. Наиболее перспективны композиционные радиоматериалы на основе углеродсодержащих наноструктур, оксидных ферритмагнетиков (в том числе наноструктурные), пеностекольного материала и мезопористых структур [9, 10]. На рис. 2. представлена классификация экранирующих материалов.



Рис. 2. Классификация экранирующих материалов

Металлические экраны являются более привлекательными для экранирования, чем углеродные вследствие их более высокой проводимости, но атомы углерода более стойки к окислению и термически стабильны. Металлические волокна малого диаметра, изготовленные путем формовки или отливки, не могут быть тоньше 2 мкм. Тем не менее, диаметр субмикронного металлического волокна возможно получить путем нанесения металла на углеродные нити субмикронного диаметра. Так, никелевые нити диаметром 0,4 мкм могут быть получены путем гальванического осаждения на углеродных нитях диаметром 0,1 мкм, при этом эффективность экранирования резко возрастет. Применение никеля является более эффективным, чем применение меди, отчасти благодаря его превосходной стойкости к окислению. Оксидная пленка низко проводима и, тем самым, наносит вред связи между частицами.

Существующее многообразие материалов используют в различных сочетаниях в конструкциях экранов и поглотителей ЭМИ, число и функциональное назначение которых весьма велико. Стоит отметить, что в большинстве случаев для обеспечения необходимых коэффициентов отражения и подавления ЭМП требуется жесткая фиксация конструкции экрана, параметры которого критически зависят от формоустойчивости конструкции и способа монтажа.

Анализ решений на основе гибкого графита. При получении терморасширенного графита (ТРГ), предназначенного для изготовления графитовых уплотне-

ний, применяют крупночешуйчатый природный графит, интеркалированный серной кислотой, отмытый от непрореагировавшей кислоты и просушенный. Готовый интеркалированный графит (ИГ) подвергают кратковременной термообработке (ударному нагреву) при температуре 900–1500 °С со скоростью 400–600 °С/с. Полученный таким образом ТРГ имеет насыпную плотность 1–4 г/дм³ и удельную поверхность 30–80 г/м² в зависимости от морфологических особенностей исходного графита. В процессе термического расширения ИГ воздействие продуктов деструкции внедренной серной кислоты приводит к увеличению размеров кристаллитов графита по оси с в 300–500 раз и образованию червеобразных частиц ТРГ [10].

С целью получения графитовых уплотнений червеобразные частицы ТРГ формуют методом прокатки без добавления связующего в фольгу или картон (прокладочный материал) необходимой толщины. Полученные гибкие графитовые прокладки обладают высокой электропроводностью, прочностью, термостойкостью.

Поскольку электропроводность примерно равна 10⁵ (Ом·м)⁻¹, то эффективность этого материала для экранирования является исключительно высокой (до 130 дБ на частоте 1 ГГц).



Рис. 3. Области применения гибких электромагнитных экранов

Гибкие электромагнитные экраны находят широкое применение. На рис. 3 представлены области использования таких экранов. Их применяют не только для подавления нежелательных ЭМИ электронной техники и в качестве экологической защиты живых организмов от вредного воздействия ЭМИ, но и для создания одежды специального назначения, защиты устройств обработки информации, в военном деле при производстве изделий электроники для снижения заметности объектов и повышения их помехозащищенности. Особое внимание уделяется использованию таких экранов в конструкциях авиационной техники, надводных и подводных кораблей, где большое количество электронной аппаратуры сконцентрировано на ограниченной площади, при создании электромагнитной маскировки, способной снизить дальность обнаружения наземных объектов.

Анализ решений на основе коллоидного графита. Коллоидный графит представляет собой тонкоизмельченный природный или искусственный графит в виде коллоидной суспензии в воде или другой среде (спирте, минеральном масле), в которую добавляют небольшое количество танина или аммиака, в целях стабилизации суспензии. Коллоидный графит обычно является полужидким веществом. После его нанесения на поверхность молекулы жидкости испаряются, частицы графита находятся в тесном контакте, обеспечивая необходимую высокую электропроводность.

Полученное покрытие является эффективным для экранирования электромагнитных полей, находящихся на телевизионных диапазонах частот и предохранения от электростатических разрядов.

Выводы. Проблема разработки новых материалов для электромагнитных экранов с повышенной эффективностью весьма актуальна, поскольку электромагнитные ресурсы широко используют, число действующих радиоэлектронных средств постоянно увеличивается. Применение композиционных и углеродных материалов для защиты от электромагнитных полей является перспективным направлением.

В отдельный класс выделяют гибкие конструкции электромагнитных экранов, для изготовления которых должны использоваться материалы, обладающие, кроме заданных электромагнитных свойств, еще и определенными механическими характеристиками. Гибкость конструкции обеспечивают за счет использования гибкой основы или связующего в композиционных материалах. Особый интерес представляет использование волокнистых материалов, отличающихся улучшенными механическими характеристиками, гибкостью и позволяющих реализовать более высокую эффективность поглощения за счет использования особенностей распространения ЭМВ в волокнистых средах.

Выбор материала экрана проводят исходя из обеспечения требуемой эффективности экранирования в заданном диапазоне частот при определенных ограничениях. Эти ограничения связаны с габаритами и массой экрана, его влиянием на экранируемый объект, механической прочностью и устойчивостью экрана к коррозии, технологичностью конструкции и т. д.

Литература

1. Хандогина Е.Н., Владимиров Д.Н. Экранирование электромагнитных волн — основа экологической безопасности и эффективное средство защиты от промышленного шпионажа // Конфидент. 1999. № 6. С. 68–72.
2. Камышная Э.Н., Маркелов В.В., Соловьев В.А. Конструкторско-технологические расчеты электронной аппаратуры. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 165 с.
3. Камышная Э.Н., Парфенов Е.М., Шерстнев В.В. Программное обеспечение конструкторских расчетов РЭА и ЭВА. Т. 1. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1988. 34 с.
4. Барат В.А., Власов А.И., Гомонов Д.А., Подобедов Д.В. Применение методов МКЭ и МГЭ при сеточном моделировании объектов типа среда–структура // Научные технологии и интеллектуальные системы в XXI веке. Сб. науч. трудов молодежн. науч.-техн. конф. 2000. С. 145–159.

5. *Экранирование и межсоединения в ЭВА и РЭА. Расчеты надежности ЭВА и РЭА* / Б.И. Белов, В.В. Шерстнев, В.В. Маркелов, В.В. Съедугин, А.Н. Чеканов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1980. 40 с.
6. *Власов А.И., Володин Е.А., Семенцов С.Г., Шахнов В.А. Электронные системы активного управления волновыми полями: история и тенденции развития // Успехи современной радиоэлектроники. 2002. № 4. С. 3–23.*
7. *Лыньков Л.М., Богуш В.А., Борботько Т.В., Украинец Е.А., Колбун Н.В. Новые материалы для экранов электромагнитного излучения // Доклады БГУИР. 2004. № 3. С. 152–167.*
8. *Садчиков В.В., Прудникова З.Г. Аморфные материалы в электромагнитных экранах // Сталь. 1997. № 4. С. 66–69.*
9. *Еременко А.С. Исследование углеродных волокон и углеродных нанотрубок // Сб. тр. двенадцатой науч. конф. молод. исслед. «Шаг в будущее». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2009. № 2. URL: <http://www.myshared.ru/slide/183345/> (дата обращения: 01.12.2016).*
10. *Фиалков А.С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе. М.: Аспект-Пресс, 1997. 718 с.*

Абасов Расим Кайбулахович — магистрант кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

USE OF CARBON MATERIALS IN ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE SHIELDING

R.K. Abasov

rasim-0594@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article examines application of carbon materials for electromagnetic interference shielding. It is proved that the use of electrodeposited with nickel carbon fibers of submicron diameter in composite materials, allows us to obtain high shielding effectiveness. The paper describes a mechanism for protecting against electromagnetic fields, which includes the reflection and / or absorption of electromagnetic radiation, and moreover, gives the classification of electromagnetic materials. The work also offers a method for producing thermally expanded graphite, which is used for manufacturing elastic spacers and which possesses shielding properties

Keywords

Electromagnetic radiation, skin effect, carbon fibers, thermally expanded graphite, shielding effectiveness

© Bauman Moscow State Technical University, 2016

References

- [1] Khandogina E.N., Vladimirov D.N. Electromagnetic waves shielding — basis of environmental safety and effective protection from industrial spying. *Konfident*, 1999, no. 6, pp. 68–72. (in Russ.).
- [2] Kamyshnaya E.N., Markelov V.V., Solov'yev V.A. Konstruktorsko-tehnologicheskie raschety elektronnoy apparatury [Design-engineering calculations of electronic equipment]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. 165 p. (in Russ.).
- [3] Kamyshnaya E.N., Parfenov E.M., Sherstnev V.V. Programmnoe obespechenie konstruktorskikh raschetov REA i EVA. T. 1 [Engineering design software of EVA and REVA engineering design. Vol. 1]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1988. 34 p. (in Russ.).
- [4] Barat V.A., Vlasov A.I., Gomonov D.A., Podobedov D.V. [Using FEM and BEM approach for grid modelling of «medium-structure» like objects]. *Naukoemkie tekhnologii i intellektual'nye sistemy v XXI veke. Sbornik nauchnykh trudov molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Knowledge intensive technologies and intelligent systems in XXI. Proc. Youth sci.-tech. conf.]. 2000. Pp. 145–159. (in Russ.).
- [5] Belov B.I., Sherstnev V.V., Markelov V.V., S'edugin V.V., Chekanov A.N. Ekranirovanie i mezhsoedineniya v EVA i REA. Raschety nadezhnosti EVA i REA [Shielding and interconnections in EVA and REA. Calculations of reliability of EVA and REA]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1980. 40 p. (in Russ.).
- [6] Vlasov A.I., Volodin E.A., Sementsov S.G., Shakhnov V.A. Electronic systems of active management of wave fields: history and tendencies of development. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Achievements of Modern Radioelectronics], 2002, no. 4, pp. 3–23 (in Russ.).
- [7] Lyn'kov L.M., Bogush V.A., Borbot'ko T.V., Ukrainets E.A., Kolbun N.V. New materials for EMI screens. *Doklady BGUIR*, 2004, no. 3, pp. 152–167 (in Russ.).

- [8] Sadchikov V.V., Prudnikova Z.G. Amorphous materials in electromagnetic shields. *Stal'*, 1997, no. 4, pp. 66–69 (in Russ.).
- [9] Eremenko A.S. [Research on carbon fibers and carbon nanotubes]. *Sbornik trudov dvenadtsatoy nauchnoy konferentsii molodykh issledovateley "Shag v budushchee"* [Proc. 10th sci. conf. of young researchers "Step into the future"]. Moscow, Bauman MSTU, 2009, no. 2. URL: <http://www.myshared.ru/slide/183345/> (accessed 01.12.2016) (in Russ.).
- [10] Fialkov A.S. Uglerod, mezhsloevye soedineniya i kompozity na ego osnove [Carbon, interlaminar bondings and composites on its base]. Moscow, Aspekt-Press Publ., 1997. 718 p. (in Russ.).

Abasov R.K. — Master's Degree student of Department of Design and Technology of Electronic Equipment Manufacturing, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.