

**РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ  
ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ**

**д-р физ.-мат. наук, проф. В. А. БОГУШ,  
канд. физ.-мат. наук, В. Н. РОДИОНОВА**  
*(Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники, Минск)*

**О. В. ТАНАНА**  
*(Полоцкий государственный университет  
имени Евфросинии Полоцкой)*

*Выполнен обзор радиопоглощающих материалов нового поколения. Представлена характеристика и обоснованы основные требования к электродинамическим параметрам этих материалов. Полученные теоретические и экспериментальные результаты исследований подтверждают правильность системного подхода при создании углеродных наноматериалов для широкого спектра приложений в радиотехнике и электронике.*

**Ключевые слова:** *сверхвысокие частоты, наноуглерод, ослабление электромагнитных волн, волноводные методы измерений поглощающие материалы.*

**Введение**

Научно-технический прогресс, обусловленный эффективным использованием достижений электроники, радиотехники, вычислительной техники, во многом оказался возможным благодаря уровню и темпам исследований в области создания материалов для данных отраслей техники [1–10]. Так, например, разработка новых материалов для решения проблемы электромагнитной совместимости становится весьма актуальной в связи с развитием и увеличением мощности устройств СВЧ-радиоэлектроники, приводящим к тому, что возникающее при их работе электромагнитное излучение на частотах высших типов гармоник создает значительные помехи радиоэлектронной аппаратуре, и спутниковой связи. Существенное снижение взаимных помех в передающих и приемных трактах устройств, работающих в СВЧ диапазоне, возможно за счет применения радиопоглощающих материалов (РПМ) нового поколения, обеспечивающих расширение функциональных и тактико-технических возможностей электронных средств. Экспериментальные результаты и теоретические оценки показывают, что дальнейшее совершенствование и развитие помехозащищенности радиоаппаратуры в целом, а также повышение стабильности характеристик радиопоглощающих покрытий может быть достигнуто путем разработки нового класса широкодиапазонных композитных высокоэффективных радиопоглощающих материалов [11–18].

### Характеризация радиопоглощающих материалов

Различают радиопоглощающие материалы широкодиапазонные ( $\lambda_{\text{макс}} / \lambda_{\text{мин}} > 3-5$ ), узкодиапазонные ( $\lambda_{\text{макс}} / \lambda_{\text{мин}} \sim 1,5-2,0$ ) и рассчитанные на фиксированную (дискретную) длину волны (рабочий диапазон  $< 10-15\% \lambda_p$ ).

Радиопоглощающие материалы довольно разнообразны по своему устройству и структуре, и все же существуют базовые характеристики для наиболее устойчивых групп РПМ. К базовым характеристикам, отражающим эти значения, можно отнести:

- длину рабочих волн;
- потери на отражение;
- характеристики поглощения;
- механические и эксплуатационные характеристики.

Условно можно выделить следующие классы РПМ:

- а) резонансные, эффективность которых определяется толщиной материала;
- б) нерезонансные магнитные, способные рассеивать электромагнитную энергию на большой поверхности, что позволяет обеспечить широкий рабочий частотный диапазон;
- в) нерезонансные объемные, поглощающие основную часть электромагнитной энергии;
- г) градиентные, у которых согласование со свободным пространством осуществляется за счет постепенного изменения свойств поглощающей среды.

Развитие области создания современных РПМ определяет актуальность поиска путей управления частотной дисперсией комплексной диэлектрической проницаемости с помощью полимерных композитов, наполненных полидисперсными порошками. С этой целью активно проводятся теоретические и экспериментальные исследования полимерных композитных материалов для аппаратуры СВЧ диапазона, устанавливаются закономерности изменения свойств радиопоглощающих композитов в магнитных и электрических полях, что позволяет разработать теоретические положения и рекомендации в области создания и применения композитных материалов для систем СВЧ-техники, обеспечения электромагнитной совместимости и помехозащищенности радиоэлектронной аппаратуры [19–24].

Значительное число публикаций и патентов в России и за рубежом посвящено созданию новых форм ферритовых наполнителей и совместному использованию ферритовых порошков, карбонильного железа, графитов, металлических волокон. Несмотря на расширение общего сегмента РПМ, еще рано говорить об устойчивых и стандартизированных нормах разработки этих материалов. Во многом это связано с конфиденциальностью разработок, а также с технологическими проблемами.

Получение новых перспективных радиопоглощающих материалов сегодня невозможно без применения инновационного исходного сырья. Технологи также активно работают над более точными и эффективными методами оценок поглощающей способности, что расширяет возможности для выявления новых РПМ. И на этом фоне логично утрачивают актуальность уже ставшие традиционными радиопоглощающие средства на основе тех же ферритов. Требуемая эффективность достигается при использовании результатов анализа физических явлений в материалах при действии на них электромагнитного излучения; анализа влияния состава и структуры материалов на показатели их диэлектрических свойств. Поглощающий материал будет соответствовать своему назначению в том случае, если в нём отсутствует отражение электромагнитной волны от внешней поверхности, а энергия, проникающая внутрь такого материала, полностью в нем поглотится.

Совершенствование радиоэкранирующих (РЭМ) и радиопоглощающих материалов достигается использованием электроактивных полимеров, наноразмерных наполнителей в электропроводящих и магнито-диэлектрических материалах. Радиоэкранирующие и радиопоглощающие свойства обеспечиваются соответствующими компонентами (диэлектрики, проводники, магнитные компоненты), которые вводятся в заданном соотношении, при этом, в зависимости от природы и типа они могут выполнять и роль упрочняющих компонентов. В качестве диэлектрических компонентов РЭМ, РПМ, покрытий и конструкций используют термо- и реактопласты и эласты, пенопласты, пенорезины, сферопласты и резины, полимерные композиционные материалы, пленки, клеи, компаунды, лакокрасочные материалы с широким диапазоном диэлектрических свойств. В качестве электропроводящих фаз используют углеродные (технический углерод, графит, сажа, углеродные и графитизированные волокна и текстильные формы из них – нити, жгуты, ленты, ткани, коксы, фуллерены, астралены - многослойные углеродные наночастицы, нанотрубки) и металлические (порошки, волокна, хлопья, металлизированные стеклянные, углеродные, полимерные волокна) материалы.

Радиопоглощающие материалы на основе полимерного материала с токопроводящими компонентами могут использоваться в различных отраслях техники для решения двух задач:

- обеспечение оптимальных условий эксплуатации устройств электроники, электротехники, радиотехники на различных частотах и интенсивностях электромагнитного излучения для устранения нежелательных отражений сигналов;
- обеспечение минимального отражения электромагнитного излучения, уменьшения радиолокационной заметности техники.

### **Заключение**

Экспериментальные результаты и теоретические оценки показывают, что дальнейшее совершенствование и развитие помехозащищенности радиоаппаратуры в целом, а также повышение стабильности характеристик радиопоглощающих

покрытий может быть достигнуто путем использования композиционных радиопоглощающих материалов на основе специальных наполнителей – углеродных наноматериалов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ринкевич, А. Б. Электромагнитные волны в прямоугольном волноводе с металлической наноструктурой / А. Б. Ринкевич, Л. Н. Ромашев, Е. А. Кузнецов // Радиотехника и электроника. – 2004. – Т. 49, № 1. – С.48–53.
2. Раков, Э. Г. Методы получения углеродных нанотрубок / Э. Г. Раков // Успехи химии. – 2000. – Т. 69, № 1. – С.41–59.
3. Николайчук, Г. А. Радиопоглощающие материалы на основе наноструктур / Г. А. Николайчук, В. П. Иванов, С. В. Яковлев // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2010. – № 1. – С. 92–95.
4. Лыньков, Л. М. Новые материалы для экранов электромагнитного излучения / Л. М. Лыньков, В. А. Богуш, Т. В. Борботько, Е. А. Украинец, Н. В. Колбун // Доклады БГУИР. – 2004. – № 3. – С. 152–167.
5. Казанцева, Н. Е. Перспективные материалы для поглотителей волн сверхвысокочастотного диапазона / Н. Е. Казанцева, Н. Г. Рывкина, И. А. Чмутин // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48, № 2. – С. 196–209.
6. Журавлев, В. А. Радиопоглощающие свойства содержащих карбонильное железо композитов на СВЧ и КВЧ / В. А. Журавлев, В. И. Сусляев, Е. Ю. Коровин, О. А. Доценко // Электронный научный журнал «Исследовано в России». – 2010. – № 35. – С. 404–411.
7. Латыпова, А. Ф. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов / А. Ф. Латыпова, Ю. Е. Калинин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 6. – С. 70–76.
8. Банний, В. А. Модифицированные углеродным наполнителем радиопоглощающие композиционные материалы на основе полиэтилена / В. А. Банний, И. В. Царенко, С. И. Красюк // Современные проблемы машиноведения: материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 22–23 нояб. 2018 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Филиал ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 129–130.
9. Власенко, Е. А. Композиционный радиопоглощающий материал на основе наполненной резины и модифицированного нетканого полотна / Е. А. Власенко, Е. С. Бокова, А. В. Дедов // Материаловедение. – 2016. – № 2. – С. 41–43.
10. Краев, И. Д. Обзор композиционных материалов, сочетающих звукозащитные и радиозащитные свойства / И. Д. Краев, Е. М. Шульдешов, М. М. Платонов, Г. Ю. Юрков // Авиационные материалы и технологии. – 2016. – № 4(45). – С. 61–67.
11. Багацкая, О. В. Расчет коэффициентов отражения и прохождения плоской электромагнитной волны для неоднородного гиротропного слоя методом конечных разностей / О. В. Багацкая, Н. П. Жук // Радиотехника и электроника. – 2000. – Т. 45, № 6. – С. 662–669.
12. Ринкевич, А. Б. Измерение высокочастотного гигантского магнитосопротивления наноструктур в режиме бегущих волн / А. Б. Ринкевич, Л. Н. Ромашев, Е. А. Кузнецов // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51, № 1. – С. 93–99.
13. Малюшкин, А. В. Об эффективных электромагнитных свойствах одного класса искусственных бианизотропных сред / А. В. Малюшкин, С. Н. Шульга // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2000. – № 5. – С. 41–47.

14. Rinkevich, A. B. High frequency properties of magnetic multilayers / A. B. Rinkevich, E. A. Kuznetsov // JMMM. – 2003. – V. 254–255. – P. 603–607.
15. Prozorovski, V.D. Set-up for measurements of semimagnetic semiconductor parameters by the electron paramagnetic resonance method / V.D. Prozorovski // Radiophysics and electronics. – 2003. – V. 8, № 1. – P. 78–85.
16. Бибииков, С. Б. Диэлектрические свойства и СВЧ-проводимость пористых радиопоглощающих материалов / С. Б. Бибииков, О. Н. Смольникова, М. В. Прокофьев // Радиотехника. – 2011. – № 3. – С. 62–71.
17. Серебрянников, С. В. Электродинамические свойства радиопоглощающих покрытий на основе ферритмагнитных наполнителей нового поколения / С. В. Серебрянников, А. П. Черкасов, С. С. Серебрянников, А. В. Долгов, Л. Л. Еремцова, П. И. Коньшин // Тр. XXV Междунар. конф. Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)». М. : ИНФРА-М, 2017. – С. 604–616.
18. Кулешов Г. Е., Суляев В. И. Диэлектрическая проницаемость и электропроводность композиционных материалов на основе углеродных наноструктур // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 1(31). – С. 84–87.
19. Филипенко, О. В. Измерение поглощающих характеристик наноразмерных композитов для радиоволн миллиметрового диапазона / О. В. Филипенко, А. М. Немиленцев // сб. научных трудов конференции «Современные проблемы физики», 21–23 июня 2006 г. – Минск, 2006. – С. 188–192.
20. Филипенко, О. В. Стенд для измерения электрофизических характеристик наноматериалов в СВЧ диапазоне / О. В. Филипенко // XI Международный молодежный Форум «Радиоэлектроника и молодежь в 21 веке» Харьков, Украина, 10–12 апреля 2007, ч. 1, ХНУРЭ. – Харьков, 2007. – С.189.
21. Karpovich, V. Electromagnetic wave absorption and reflection by carbon nanotube composites / V. Karpovich, V. Rodionova, A. Rakov, I. Anoshkin, O. Philipenok // The sixth international Kharkov symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter and submillimeter waves and workshop on terahertz technologies, Symposium Proceedings, v. 2, Kharkov, Ukraine, June 25–30. Edited by A. Kostenko, A. Usikov. Institute of Radio-Physics and Electronics of NAS of Ukraine. – Kharkov, 2007. – P. 825–827.
22. Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты / В. А. Богуш, Т. В. Борботько, А. В. Гусинский и др. ; под ред. Л. М. Лынькова. – Минск : Бестпринт, 2003. – 406 с.
23. Краев, И. Д. Конструкционные материалы радиотехнического назначения, модифицированные углеродными нанотрубками / И. Д. Краев, А. Е. Сорокин, Ю. В. Олихова, Ю. М. Титкова // Пластические массы. – 2020. – № 9–10. – С. 62–66.
24. Жданок, С. А. Радиопоглощающие свойства углеродных наноматериалов / С. А. Жданок, А. В. Крауклис, И. Ф. Буюков, В. А. Карпович, В. Н. Родионова, О. В. Танана // Нанотехника. – 2011. – № 2. – С. 72–75.