

РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУР

Радиопоглощающие материалы (РПМ) применяются для решения проблем электромагнитной совместимости радиоэлектронных устройств, защиты компьютерных систем обработки информации от несанкционированного доступа, защиты биологических объектов от электромагнитного излучения, а также для снижения радиолокационной заметности объектов военного и гражданского назначения. Специалисты ОАО "НИИ "Феррит-Домен" разработали технологию получения радиопоглощающих материалов на основе тонких пленок аморфного гидрогенизированного углерода с наночастицами 3d металлов (Ni, Co, Fe и др.), нанесенных методом ионно-плазменного магнетронного напыления на гибкие подложки из арамидной ткани (кевлар). Новые материалы позволяют создавать легкие сверхширокополосные радиопоглощающие покрытия с высоким уровнем поглощения электромагнитного излучения (модуль коэффициента отражения электромагнитной волны не хуже -10 дБ) в сверхвысокочастотном, инфракрасном и оптическом диапазонах частот.

При современном развитии и эксплуатации радиотехнических СВЧ-систем возникают проблемы электромагнитной безопасности. Длительное и регулярное воздействие СВЧ-излучения на организм человека отрицательно влияет на мозг, сосуды, кровь, зрение, провоцирует образование опухолей. Вот почему так важно обеспечить генетически безопасный уровень излучения и соблюдать требования санитарно-гигиенических норм безопасности, чтобы такая техника не вредила здоровью людей.

Не менее важной для эффективного функционирования технических устройств СВЧ является проблема устранения помех. Во многих случаях поля, создаваемые излучателями СВЧ-энергии, необходимо локализовать в некотором объеме, чтобы исключить или ослабить их воздействие на соседние чувствительные элементы радиоаппаратуры. Паразитные переотражения и интерференция электромагнитных волн (ЭМВ) также могут быть серьезными источниками помех.

Г.Николайчук, В.Иванов, С.Яковлев
niko@domen.ru

Эффективный способ, который позволяет обеспечить требования электромагнитной экологии, снизить до приемлемого уровня естественные и искусственные помехи при работе радиоэлектронных систем, основан на применении экранирующих и радиопоглощающих материалов (РПМ) и покрытий (РПП). Последние являются также перспективным средством снижения радиолокационной заметности (РЛЗ) объектов военной техники (самолетов, кораблей, ракет, наземного стационарного и мобильного оборудования и т.д.). Использование РПМ и РПП существенно расширяет возможности технологий Stealth, с помощью которых создаются объекты с низким уровнем РЛЗ. РПП могут быть использованы и для защиты компьютерных систем обработки информации от несанкционированного доступа, в космической технике, для поглощения электромагнитного излучения в экранирующих устройствах, в поглощающих облицовках и корпусах, а также в беззювых измерительных камерах.

Радиопоглощающие покрытия, которые применяются сегодня, представляют собой композиты на основе ферритовых материалов, имеют значительную массу (8–15 кг/м²), низкие механическую прочность и термостойкость, их нельзя задействовать в миниатюрных радиоэлектронных устройствах, для защиты биологических объектов, радиомаскировки летательных аппаратов и кораблей легких классов.

ОАО "НИИ "Феррит-Домен" в течение ряда лет проводит исследовательские работы по созданию тонкопленочных наноструктурированных радиопоглощающих материалов нового поколения для СВЧ-диапазона от 1 ГГц до 300 ГГц [1–5]. В предлагаемой технологии применяется принципиально новый материал на основе тонких пленок аморфного гидрогенизированного углерода с ферромагнитными наночастицами, нанесенными на гибкую подложку из арамидной ткани методом ионно-плазменного магнетронного напыления (рис.1).

Пленки аморфного гидрогенизированного углерода с магнитными наночастицами составов α -CH:(Ni), α -CH:(Co) и α -CH:(Fe) на подложках из арамидной ткани размерами



Рис. 1. Вид пленки аморфного гидрогенизированного углерода с ферромагнитными наночастицами на гибкой подложке из арамидной ткани (кевлар)

620×750 мм были получены реактивным ионно-плазменным методом при одновременном распылении мишеней из графита и соответствующего металла в аргон-водородной среде на вакуумной установке магнетронного напыления конвейерного типа фирмы Leybold Heraus (Германия).

Уровень микроволнового поглощения зависит от толщины, химического состава, микроструктуры, концентрации и размера магнитных частиц в пленке.

Микроструктура и химический состав пленок исследовались на электронном микроскопе VEGA/LMU с энергодисперсионным микроанализатором JNCA Energy 350DC и полевым микроскопе MIRA/TESCAN.

Толщина пленок определялась как непосредственно на рабочих образцах на срезе арамидной нити, так и на образцах-свидетелях, полученных в тех же условиях на подложках из ситалла и кремния.

Изображение среза нити (рис.2) во вторичных электронах (арамидная нить – темный фон, напыленная пленка состава α -CH:(Ni) – светлый фон) получено с помощью ионного пучка в PECS Slope cutting tool при 3 кВ и увеличении в 10000 раз. По оценочным данным толщина напыляемой пленки составляет 0,17–1,25 мкм в зависимости от расположения поверхности нити к направлению напыления.

Для определения микроволновых свойств пленок аморфного гидрогенизированного углерода с магнитными наночастицами разработана методика измерения комплексных диэлектрической $\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon''$ и магнитной $\mu^* = \mu' - i\mu''$ проницаемостей. Это резонаторный метод, который позволил решить проблему измерения μ^* и ϵ^* тонких пленок в диапазоне частот от 300 МГц до 40 ГГц [6]. Значения величин комплексных магнитной μ^* и диэлектрической ϵ^* проницаемостей тонких пленок составляют единицы и несколько тысяч соответственно.

С целью расширения границ частотного диапазона и повышения уровня поглощающих свойств разработаны многослойные радиопоглощающие покрытия (РПП) с геометрическими размерами 600×600 мм, толщиной 1–3 мм и приведенной удельной массой от 1,0 до 1,5 кг/м². РПП представляют собой набор слоев пленок аморфного гидрогенизированного углерода с магнитными наночастица-

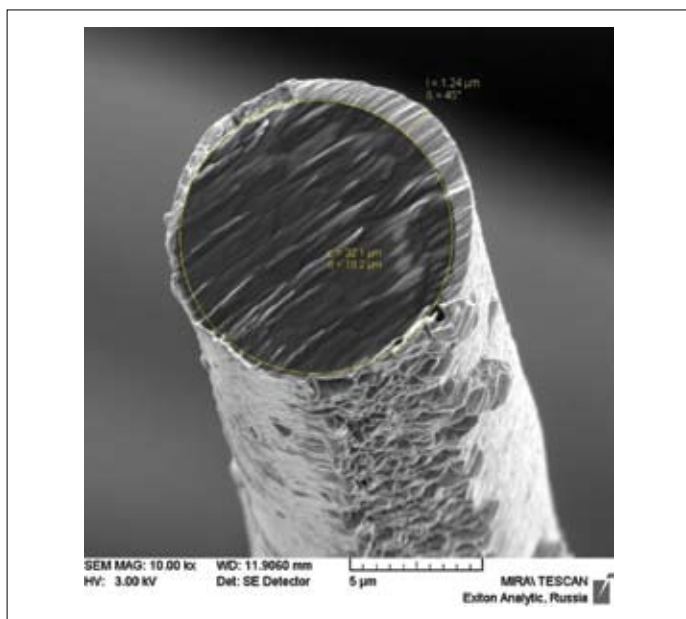


Рис.2. SE-изображение среза арамидной нити с напыленной пленкой состава: α -CH:(Ni) во вторичных электронах (ионный пучок PECS Slope cutting tool при 10 кВ)

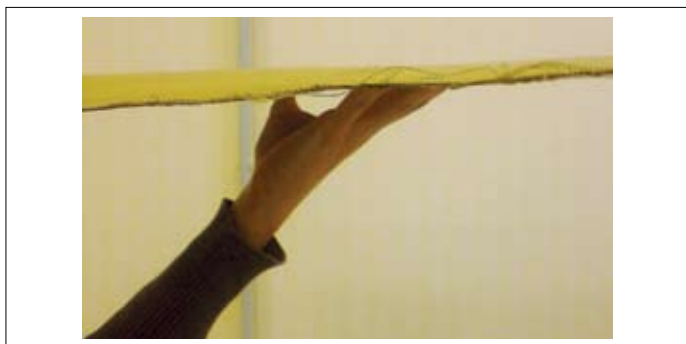


Рис.3. Вид многослойного радиопоглощающего покрытия с геометрическими размерами (600×600×3) мм, вес 1 м² составляет 1,4 кг

ми на подложке из арамидной ткани, количество которых рассчитывается по известным алгоритмам с использованием значений комплексных магнитных μ^* и диэлектрических ε^* проницаемостей каждого слоя (рис.3).

В настоящее время в НИИ "Феррит-Домен" изготавливаются экспериментальные образцы радиопоглощающих покрытий, модуль коэффициента отражения (МКО) которых не хуже -10 дБ в частотном диапазоне от 7 до 300 ГГц.

На рис.4, 5 приведены частотные зависимости модуля коэффициента отражения РПП в СВЧ-диапазоне от 1 до 78 ГГц, измеренные с помощью рупорных антенн при двух взаимноперпендикулярных поляризациях (плоскостях) падающей электромагнитной волны.

В диапазоне 1,0–37,5 ГГц измерения проводились с помощью анализатора цепей ZVA-40 фирмы Rohde&Schwarz (Германия) при расположении образца в дальней зоне по схеме построения измерительной установки с разнесенными излучающим и приемным каналами. В диапазоне частот 37,5–78 ГГц измерения величины МКО проводились в ближней зоне с помощью автоматических панорамных измерителей КСВН Р2-68 и Р2-69.

В диапазоне частот 7–37,5 ГГц значение МКО образца радиопоглощающего покрытия составляет от -10 дБ до -30 дБ. Экспериментальные образцы РПП были исследова-

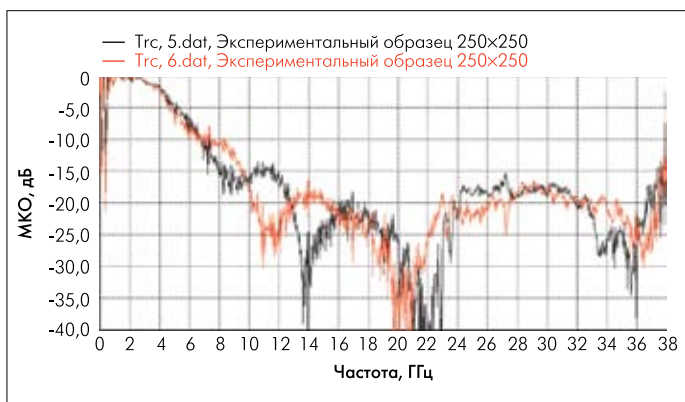


Рис.4. Графики частотной зависимости модуля коэффициента отражения образца РПП (толщина 3 мм) при двух взаимно перпендикулярных поляризациях падающей электромагнитной волны в диапазоне частот 1,0–37,5 ГГц

ны в оптическом и ИК-диапазонах. Результаты измерений МКО не хуже -20 дБ.

РПП на основе наноструктурированных пленок с высоким равномерным уровнем поглощения (МКО от -10 до -30 дБ) не имеют мировых аналогов по сверхширокополосности и позволяют с помощью одного вида покрытия решить задачи радиолокационной заметности в диапазонах от СВЧ до оптического.

Разработанные покрытия легко совместимы со сложными формами защищаемых объектов, а также могут быть использованы в качестве конструкционного материала для изготовления корпусов летательных аппаратов, в том числе беспилотных, легких морских катеров и других изделий военной техники.

На разработанные материалы получены патенты:

- патент на изобретение RU 222 8565 С1 "Радиопоглощающие покрытия и способ его получения" (2004 г.);
- патент на полезную модель "Радиопоглощающее покрытие" №84161 от 24.12.2008;

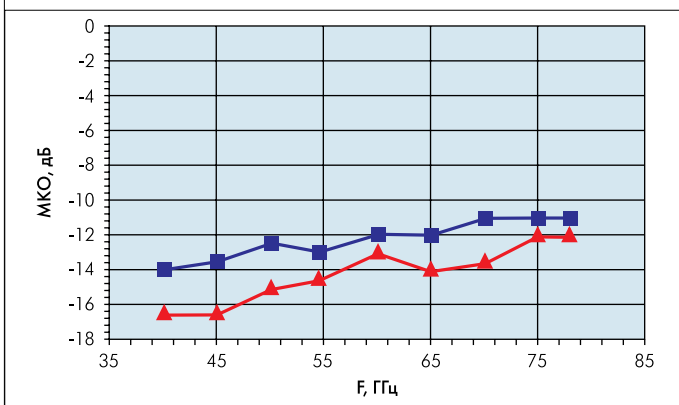


Рис.5. График частотной зависимости модуля коэффициента отражения образца РПП (толщина 3 мм) при двух взаимноперпендикулярных поляризациях падающей электромагнитной волны в диапазоне частот 37,5 ГГц – 78 ГГц

- патент на изобретение "Электромагнитное поглощающее покрытие" МПК НОIQ от 11.01.2009.
- положительное решение о выдаче патента на полезную модель, заявка № 2009129433 от 30.07.2009 г. "Устройство для измерения комплексной диэлектрической проницаемости тонкопленочных материалов на сверхвысоких частотах".

Основные преимущества тонкопленочных радиопоглощающих покрытий на основе наноструктурированных пленок перед традиционными материалами:

- использование одного вида покрытий с высоким поглощением в сверхшироком диапазоне частот 7–300 ГГц;
- малая приведенная удельная масса (на единицу площади) 1–1,5 кг/м²;
- высокие механическая прочность и термостойкость;
- устойчивость к климатическим воздействиям и агрессивным средам;

- экологически чистая и безотходная технология получения.

Созданные радиопоглощающие покрытия прошли испытания в научно-техническом центре кораблестроения и морской техники ФГУП ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова и в крупнейшем российском авиационном холдинге ОАО "ОКБ Сухого", получены заключения о перспективности и актуальности разрабатываемых материалов для военного и гражданского применения.

В настоящее время проводятся работы по расширению нижней границы частотного диапазона до 1 ГГц и снижению себестоимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Lutsev L.V., Yakovlev S.V., Zvonareva T.K., Alexeyev A.G., Starostin A.P., Kozyrev S.V.** Microwave Properties of Granular Amorphous Carbon Films with Cobalt Nanoparticles. – *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 97, №. 10, 104327.

2. **Луцев Л.В., Николайчук Г.А., Петров В.В., Яковлев С.В.** Многоцелевые радиопоглощающие материалы на основе магнитных наноструктур: получение, свойства и применение. – *Нанотехника*, 2008, № 2(14), с. 37–42.

3. **Николайчук Г.А., Петров В.В., Яковлев С.В., Лу-**

цев Л.В. Радиопоглощающие материалы на основе наноструктур. – *Нанотехника*, 2009, № 1(17), с. 41–44.

4. **Лебедев В.М., Звонарева Т.К., Луцев Л.В.** Исследование состава и структуры модифицированных кобальтом и медью пленок аморфного гидрогенизированного углерода $\alpha\text{-C:H} < \text{Co} + \text{Cu} >$ ядерно-физическими методами. – Тезисы докладов XIV Международной конференции по электростатическим ускорителям и пучковым технологиям, Обнинск, 5–8 июня, 2001 г.

3. **Nikolaychuk G.A., Lutsev L.V., Yakovlev S.V., Petrov V.V.** Properties and technology of broadband microwave absorbing covers of the base of hydrogenated carbon with 3d-metal nanoparticles. – *Proceedings of the International Conference "Functional Materials" (ICFM-2007)*, Ukraine, Crime, Partenit, 2007, p. 344.

6. **Яковлев С.В., Иванов В.П., Николайчук Г.А.** Измерение комплексной диэлектрической проницаемости тонкопленочных радиопоглощающих материалов в диапазоне частот от 300 МГц до 40 ГГц резонансным методом. – Труды XVII Международной конференции "Магнетизм, дальнее и ближнее спин-спиновое взаимодействие", с. 57–58.