

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-

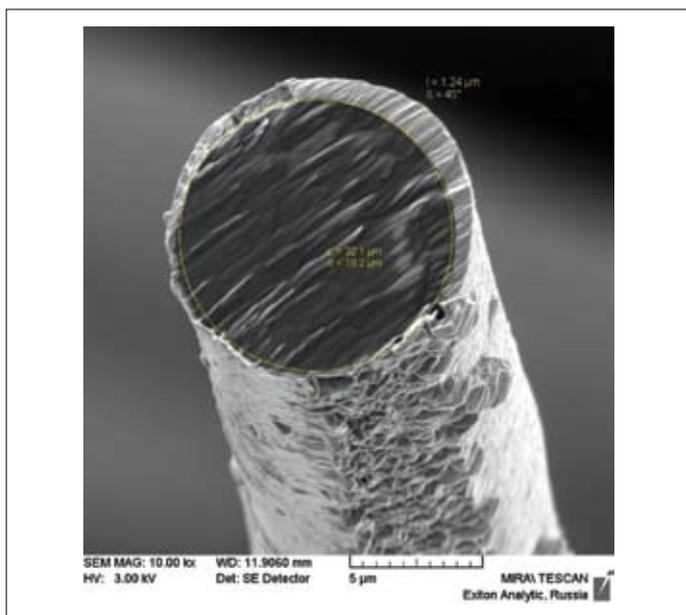


Рис.2. SE-изображение среза арамидной нити с напыленной пленкой состава: α -CH:(Ni) во вторичных электронах (ионный пучок PECS Slope cutting tool при 10 кВ)

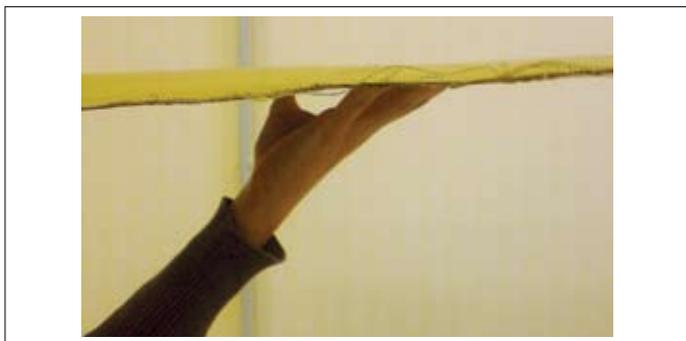


Рис.3. Вид многослойного радиопоглощающего покрытия с геометрическими размерами (600×600×3) мм, вес 1 м² составляет 1,4 кг

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;

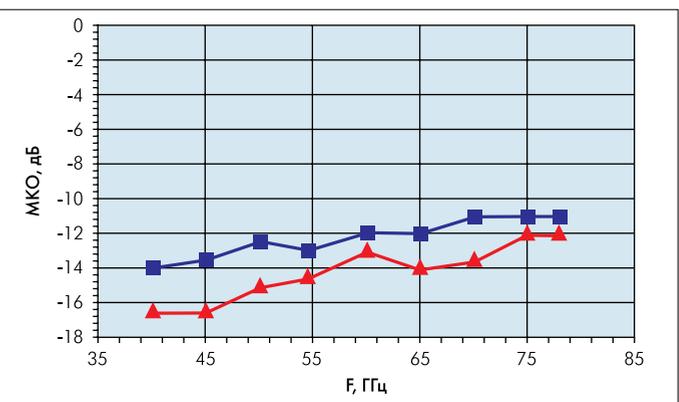


Рис.5. График частотной зависимости модуля коэффициента отражения образца РПП (толщина 3 мм) при двух взаимноперпендикулярных поляризациях падающей электромагнитной волны в диапазоне частот 37,5 ГГц – 78 ГГц

- 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.