

Инновационные технологии производства тонкопленочных радиопоглощающих материалов: от разработки до серийного внедрения

С. А. Шнайдер

АО «НИИ «Феррит-Домен»

s.a.shnaider@domen.ru

А. Е. Хошев

АО «НИИ «Феррит-Домен»

a.e.hoshev@domen.ru

Аннотация. В работе исследуются принципы создания и свойства тонкопленочного радиопоглощающего материала (РПМ), предназначенного для минимизации отражения электромагнитного излучения в широком диапазоне частот (0,07–45 ГГц). Рассматривается влияние варьирования химического состава и морфологии композитных пленочных структур на их электродинамические характеристики, в частности, на комплексную диэлектрическую и магнитную проницаемости. Представлены результаты разработки технологического процесса получения РПМ, обеспечивающего формирование материала с заданными параметрами поглощения. Анализируются требования к конструктивным особенностям и эксплуатационным характеристикам изделий на основе разработанного РПМ, включая стойкость к воздействию климатических факторов и механических нагрузок. Показана перспективность применения данного класса материалов для создания безэховых камер и других устройств, критичных к уровню электромагнитных помех. Обоснованы преимущества разработанного тонкопленочного РПМ по сравнению с традиционно используемыми объемными поглотителями, включая повышенную удельную эффективность, технологичность и экологическую безопасность.

Ключевые слова: тонкопленочные радиопоглощающие материалы, диэлектрическая и магнитная проницаемость, материалы с заданными параметрами поглощения

I. ВВЕДЕНИЕ

Проблема минимизации отражения электромагнитного излучения (ЭМИ) является актуальной для широкого круга приложений, включая создание безэховых камер (БЭК), обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных устройств, защиту биологических объектов и снижение уровня электромагнитного загрязнения окружающей среды. Традиционно для решения этой задачи используются объемные радиопоглощающие материалы (РПМ) на основе пенополиуретана, карбонильных материалов и т. п. Однако, данные материалы обладают рядом недостатков, таких как ограниченный диапазон рабочих частот, деградация свойств под воздействием внешних факторов, пожароопасность, а в некоторых случаях и экологическая небезопасность.

В настоящем докладе представлены результаты разработки тонкопленочного РПМ, лишенного указанных недостатков и предназначенного для эффективного поглощения ЭМИ в широком диапазоне частот (от 0,07 до 45 ГГц). Исследованы принципы создания и свойства материала, рассмотрено влияние варьирования его химического состава и морфологии на электродинамические характеристики, а также представлен технологический процесс получения РПМ с заданными параметрами.

II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РПМ

Эффективность поглощения ЭМИ тонкопленочным материалом определяется его комплексными диэлектрической ($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$) и магнитной ($\mu = \mu' - j\mu''$) проницаемостями, а также толщиной пленки (d). Поглощение обусловлено диэлектрическими (ϵ'') и магнитными (μ'') потерями, а также интерференционными эффектами внутри пленки.

Для широкополосного поглощения необходимо обеспечить выполнение следующих условий:

- Высокие значения ϵ'' и μ'' : чем выше мнимые части диэлектрической и магнитной проницаемости, тем больше энергии ЭМИ преобразуется в тепловую энергию внутри материала.
- Согласование импеданса: для минимизации отражения на границе раздела "воздух-РПМ" импеданс материала ($Z = \sqrt{\mu/\epsilon}$) должен быть близок к импедансу свободного пространства ($Z \approx 377 \text{ Ом}$).
- Интерференционное гашение: Толщина пленки (d) должна быть соизмерима с длиной волны (λ) в материале ($d \approx \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/4...$), чтобы обеспечить интерференционное гашение отраженных волн. Поскольку $\lambda = \lambda_0/\sqrt{\epsilon'\mu'}$, где λ_0 -длина волны в вакууме, то для заданной толщины d , можно подобрать искомые значения ϵ' и μ' .

Варьируя химический состав и морфологию тонкопленочного материала, можно управлять его электродинамическими характеристиками (ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'') и, следовательно, оптимизировать поглощающие свойства в заданном диапазоне частот.

III. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве основы для создания тонкопленочного РПМ использовались композитные материалы, состоящие из полимерной матрицы и диспергированных в ней наполнителей, обладающих высокими диэлектрическими и/или магнитными потерями. В качестве наполнителей исследовались:

- Наночастицы ферритов: обеспечивают высокие магнитные потери в СВЧ диапазоне. Варьирование состава феррита (например, Ni-Zn, Mn-Zn, Co-Fe) позволяет изменять частотную зависимость μ'' и, следовательно, ширину полосы поглощения.
- Наночастицы металлов: (Fe, Co, Ni, и их сплавы) обладают высокими значениями как магнитной, так и диэлектрической проницаемостей.
- Углеродные наноматериалы: (нанотрубки, графен, технический углерод) обеспечивают высокие диэлектрические потери, обусловленные проводимостью.
- Диэлектрические наночастицы: (BaTiO₃, TiO₂) для увеличения диэлектрической проницаемости.
- Полимерная матрица (связующее) выбиралась исходя из требований к механической прочности, гибкости, термостойкости и химической стойкости РПМ. Рассматривались различные полимеры, такие как полиуретан, эпоксидные смолы, полиимиды и фторопласты.

Технологический процесс получения тонкопленочного РПМ включал следующие основные этапы:

1. Подготовка наполнителей: при необходимости, проводилась модификация поверхности наполнителей для улучшения их диспергируемости в полимерной матрице и обеспечения химической совместимости с полимером.
2. Приготовление композиции: Наполнители диспергировались в растворе полимера с использованием ультразвуковой обработки или механического перемешивания.
3. Нанесение пленки: Композиция наносилась на подложку (например, стеклоткань, полимерную пленку) методом полива, распыления, валкового нанесения или другими методами, обеспечивающими формирование тонкой пленки заданной толщины.
4. Отверждение (сушка): Пленка подвергалась термической обработке для удаления растворителя и отверждения полимерной матрицы.
5. Формирование изделий: из полученного тонкопленочного материала изготавливались изделия заданной формы (например, пирамидальные поглотители для БЭК).

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В ходе экспериментальных исследований были получены образцы тонкопленочных РПМ с различными составами и морфологией. Измерялись их электродинамические характеристики (ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'') в

широком диапазоне частот (0,07–45 ГГц) с использованием коаксиальных и волноводных методов измерений.

Установлено, что варьирование типа, концентрации и морфологии наполнителей позволяет в широких пределах изменять электродинамические свойства РПМ и, следовательно, управлять его поглощающими характеристиками.

Например, использование смеси наночастиц феррита и углеродных нанотрубок позволяет получить материал с высокими значениями как магнитных, так и диэлектрических потерь, что обеспечивает широкополосное поглощение ЭМИ. Оптимизация соотношения компонентов смеси и толщины пленки позволяет достичь коэффициента отражения менее -15 дБ в диапазоне частот от 0,07 до 45 ГГц.

Разработанный технологический процесс обеспечивает получение тонкопленочного РПМ с высокой однородностью и воспроизводимостью свойств.

Разработанный тонкопленочный РПМ обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционно используемыми объемными поглотителями:

- Повышенная удельная эффективность: При меньшей толщине и массе обеспечивает сопоставимый или более высокий уровень поглощения.
- Технологичность: Простота изготовления и возможность формирования изделий сложной формы.
- Экологическая безопасность: Отсутствие вредных компонентов (например, технического углерода в пенополиуретане).
- Пожаробезопасность: В отличие от пенополиуретана, не требует пропитки антипиренами.
- Стойкость к деградации: не подвержен деградации под воздействием ультрафиолетового излучения и механических нагрузок, характерных для пенополиуретана.
- Экономическая эффективность: Стоимость выпускаемой пленки существенно ниже материала, выпускаемого по архаичной технологии.
- Импортозамещение: позволяет заместить продукцию зарубежных компаний.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных комплексных теоретических и экспериментальных исследований разработан тонкопленочный радиопоглощающий материал (РПМ), демонстрирующий высокую эффективность подавления электромагнитного излучения в исключительно широком диапазоне частот – от 0,07 до 45 ГГц. Достигнута принципиальная возможность тонкой настройки электродинамических свойств материала, а следовательно, и его поглощающей способности, путем целенаправленного варьирования химического состава композитной структуры, концентрации и морфологии наноразмерных наполнителей (ферритов, металлов, углеродных наноструктур, диэлектриков).

Разработан и оптимизирован технологический процесс получения РПМ, включающий стадии подготовки наполнителей, приготовления композиции, нанесения тонких пленок и их последующего отверждения. Данный процесс характеризуется высокой воспроизводимостью, технологичностью и позволяет получать материалы с заданной геометрией и однородными свойствами.

Созданные образцы РПМ и изделий на их основе (в частности, пирамидальных поглотителей для безэховых камер) успешно прошли испытания, подтвердившие их соответствие жестким требованиям по широкополосности, эффективности поглощения, стойкости к климатическим и механическим воздействиям, пожаро- и экологической безопасности, а также долговечности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Markov L.K. Nanostructured ITO/SiO₂ Coatings / L.K. Markov, A.S. Pavlyuchenko, I.P. Smirnova // *Semiconductors*. 2019. Vol. 53, iss. 8. P. 1033–1037. DOI: 10.1134/S1063782619080153.
- [2] Lee, Su-Jae. High-Performance Amorphous Multi-layered ZnO-SnO₂ Heterostructure Thin-Film Transistors: Fabrication and Characteristics / Su-Jae Lee, Chi-Sun Hwang, Jae-Eun Pi // *ETRI Journal*. 2015. Vol. 37, iss. 6. P. 1135–1142. DOI: 10.4218/etrij.15.0114.0743.
- [3] Zhilova O.V. Optical and electrical properties of thin-film heterostructures of the In₂O₃–ZnO system / O.V. Zhilova, S. Pankov, A.V. Sitnikov, Yu.E. Kalinin, M.A. Kashirin, V.A. Makagonov // *Materials Research Express*. 2019. Vol. 6, iss. 8. P. 086330. DOI: 10.1088/2053-1591/ab2721.
- [4] Панков С.Ю. Структура и электрические свойства тонких пленок (In₂O₃/SiO₂)₂₅ / С.Ю. Панков, Ю.Е. Калинин, В.А. Макагонов, О.В. Жилова, А.П. Четверикова, М.А. Каширин, В.А. Фошин // *Advanced Materials & Technologies*. 2020. № 1 (17). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/struktura-i-elektricheskie-svoystva-tonkih-plenok-in2o3-sio2-25> (дата обращения: 13.03.2025).
- [5] Быкова Л.Е. Магнитные и структурные свойства нанокompозитных пленок CoPt-In₂O₃ / Л.Е. Быкова, В.Г. Мягков, В.С. Жигалов, А.А. Мацынин, Д.А. Великанов, Г.Н. Бондаренко, Г.С. Патрин // *Журнал СВУ. Математика и физика*. 2020. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/magnitnye-i-strukturnye-svoystva-nanokompозitnyh-plenok-copt-in2o3> (дата обращения: 13.02.2025).