

# 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 ( $\epsilon''$ ) и магнитными ( $\mu''$ ) потерями, а также интерференционными эффектами внутри пленки.

Для широкополосного поглощения необходимо обеспечить выполнение следующих условий:

- Высокие значения  $\epsilon''$  и  $\mu''$ : 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 ( $\lambda$ ) 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  $\lambda_0$ -длина волны в вакууме, то для заданной толщины  $d$ , можно подобрать искомые значения  $\epsilon'$  и  $\mu'$ .

Варьируя химический состав и морфологию тонкопленочного материала, можно управлять его электродинамическими характеристиками ( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ,  $\mu'$ ,  $\mu''$ ) 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  $\mu''$  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: (BaTiO<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>) 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 ( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ,  $\mu'$ ,  $\mu''$ ) 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.
- Импортзамещение: 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/SiO<sub>2</sub> 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-SnO<sub>2</sub> 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 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–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 (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>)<sub>25</sub> / 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-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / 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-nanokompozitnyh-plenok-copt-in2o3> (дата обращения: 13.02.2025).