

11.1;06.3

Ослабление нормальной составляющей отраженной электромагнитной волны комбинированными радиопоглощающими покрытиями

© А.С. Мазинов, И.Ш. Фитаев, Н.А. Болдырев

Крымский федеральный университет им. В.И.Вернадского, Симферополь, Россия
E-mail: mazinovas@cfuv.ru

Поступило в Редакцию 27 июля 2022 г.

В окончательной редакции 19 августа 2022 г.

Принято к публикации 22 августа 2022 г.

Исследовано комбинированное радиопоглощающее покрытие, расположенное на сплошной металлической поверхности. Разработана структура подобных покрытий. Экспериментально исследованы их частотные зависимости, а также получены диаграммы рассеяния как комбинированной поверхности, так и составляющих ее элементов. Представлены результаты исследования ослабляющих способностей подобных многослойных структур.

Ключевые слова: диаграмма рассеяния, отражение электромагнитных волн, метаматериалы, сверхтонкие проводящие пленки, комбинированные покрытия.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.19.53592.19324

Построение ослабляющих покрытий базируется на двух основных физических принципах: рассеянии и поглощении. Не затрагивая вопрос создания специальной геометрии поверхности объекта для рассеяния падающей электромагнитной энергии [1], отметим, что ослабление нормальной компоненты отраженной волны на диаграмме рассеяния достигается нанесением на объект специальных покрытий [2]. Большинство поглощающих покрытий, преобразующих электромагнитные волны в колебательную энергию атомов, как правило, представлено многокомпонентными материалами [1,3]. К ним можно отнести и сверхтонкие пленки, которые при наноразмерных толщинах проводящего слоя поглощают до 50% падающей электромагнитной энергии, обладая при этом малой массой и размерами [4] в сравнении с относительно объемными специализированными конструкциями, а также способны благодаря частотно-независимым свойствам ослабить сигнал в широком диапазоне частот [5,6].

Другой подход к достижению эффекта ослабления нормальной составляющей отраженной волны, в основе которого лежит рассеяние падающего излучения, связан с более сложными с точки зрения топологии ослабляющими поверхностями. Так, построение различного типа метаструктурных материалов, базирующихся на основе элементарных резонаторов, позволяет сформировать отрицательные диэлектрические и магнитные проницаемости в определенной полосе частот, что проявляется в деструктивной интерференции отраженной волны [7,8].

Целью настоящей работы является изучение характеристик комбинированного поглощающего покрытия, состоящего из упомянутых выше структур в одном комплексном покрытии, обладающего как поглощающими, так и рассеивающими свойствами. В качестве фронталь-

ной части структуры выступала сверхтонкая проводящая пленка, осажденная на диэлектрическую подложку из ситалла. Следующий проводящий слой представлял собой метаструктуру, состоящую из прямоугольных резонаторов, расположенных на стеклотекстолите марки FR4, за которым помещалось металлическое зеркало.

Для получения диаграмм рассеяния был использован метод бистатического измерения зависимости уровня отраженного излучения от угла приемной антенны. Установка для получения диаграмм рассеяния базировалась на двух пирамидальных рупорных антеннах П6-40 с апертурой 625 mm^2 . К выходу одной из них через волноводный тракт был подключен синтезатор частот G7M-40, выступающий в роли генератора волн СВЧ-диапазона. К выходу другой антенны подключался измеритель мощности PLS-26, фиксирующий уровень принимаемой мощности. Излучающая антенна располагалась в одном фиксированном положении и формировала линейно поляризованную падающую электромагнитную волну, вектор Пойтинга которой направлен по нормали к поверхности структуры. В то же время принимающая антенна вращалась вокруг образца в диапазоне углов $[0-180^\circ]$ относительно излучающей антенны с шагом $\Delta\varphi = 5.0 \pm 0.1^\circ$ и фиксировала показания принимаемой мощности. Исследуемая структура располагалась на диэлектрическом держателе (рис. 1) на расстоянии более шести длин волн падающего излучения от излучателя и приемной антенны.

С целью выявления дополнительного эффекта ослабления плотности падающей на сверхтонкие пленки волны были использованы взаимодействующие элементы в форме простейших полосковых резонаторов. Для поиска максимального ослабления отраженной волны были проведены исследования каждого компонента итоговой

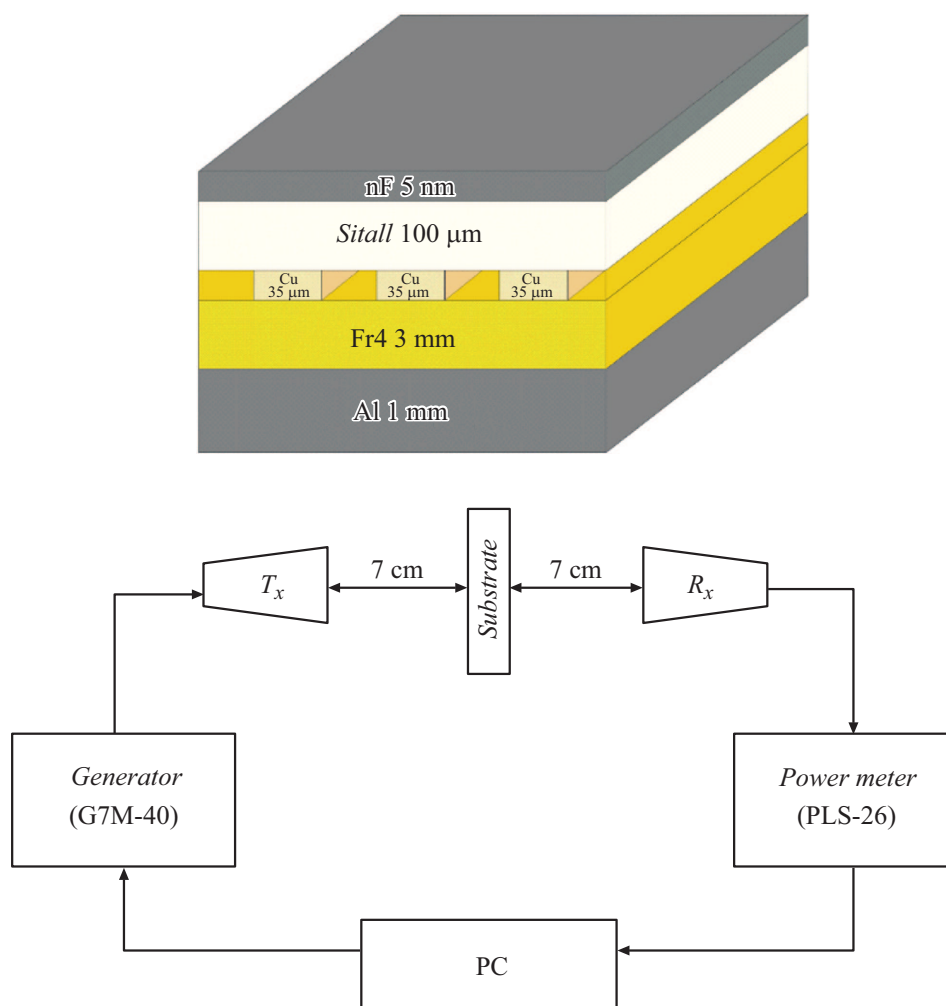


Рис. 1. Элементы, комбинированная структура и измерительная блок-схема.

поверхности: шахматно-подобных метаповерхностей с различными ориентациями проводящих резонаторных элементов, а также сверхтонких проводящих пленочных структур. В ходе исследования были изучены их частотные зависимости и диаграммы рассеяния. На основании полученных частотных характеристик было зафиксировано, что величина отраженной падающей электромагнитной волны в обратном направлении напрямую зависит от коэффициента прохождения (T) волны через структуру. Данное утверждение подтверждается экспериментом, в котором были получены диаграммы рассеяния на различных отрезках частотной характеристики: на участках с наибольшим и наименьшим показателями прохождения, а также с его средним значением относительно двух предельных величин. Результаты показали, что степень ослабления для всех выбранных поддиапазонов была тем выше, чем меньше значение коэффициента T . По итогам серии экспериментов было выявлено, что наименьшим основным лепестком диаграммы рассеяния обладают метаструктуры, состоящие из чередующихся вертикальных и горизонтальных

элементов, резонансная частота которых находится в диапазоне 20–22.5 GHz. Однако следует отметить, что конечный частотный диапазон напрямую зависит от геометрических размеров резонаторов и их непосредственного расположения на самой ячейке, что позволяет изменять результирующие частотные характеристики поверхности, подбирая их для конкретного диапазона.

В качестве поглощающих элементов в работе были задействованы нанометровые проводящие пленки на основе алюминия (nF), осажденные на диэлектрические подложки из ситалла ионным и магнетронным методами. Экспериментальные и теоретические результаты исследования поглощения электромагнитных волн, полученные ранее в интервале частот 2–25 GHz [6,9], показали, что поглощающие свойства тонких пленок напрямую зависят от их поверхностного сопротивления. На основе данных исследований был сделан вывод, что основным механизмом ослабления являются омические потери, наблюдающиеся при взаимодействии падающей электромагнитной волны с нанометровым проводящим слоем. При определенной толщине пленки поглощение

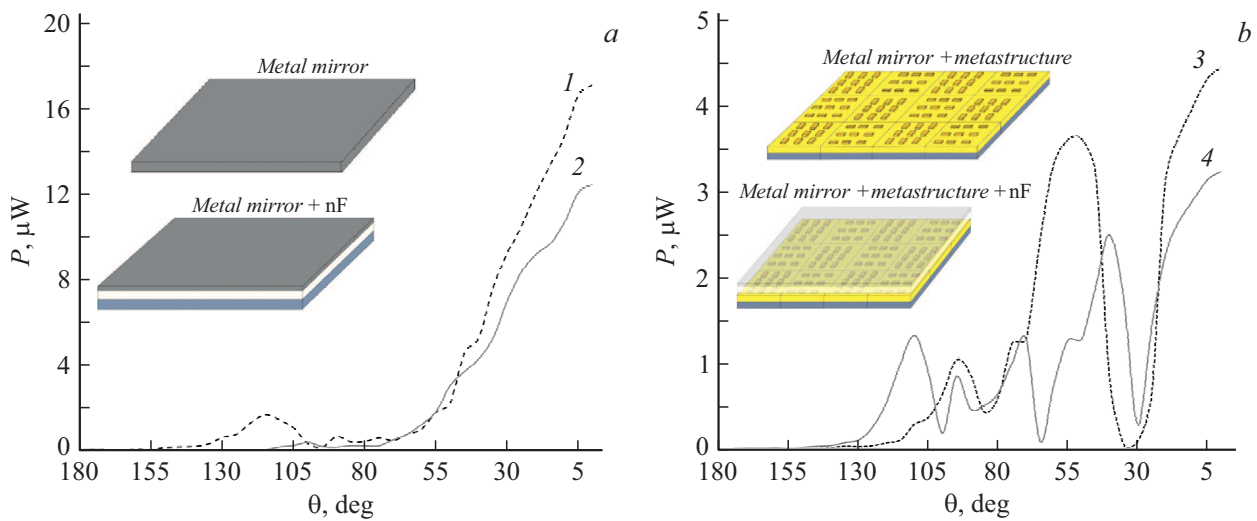


Рис. 2. Угловое распределение мощностей для металлического зеркала (1), нанометровой пленки и металлического зеркала (2), метаструктуры и металлического зеркала (3), комбинированного покрытия (4).

может достигать значений вплоть до 50%. В ходе работы были исследованы пленки различной толщины: 3, 5, 7, 10 и 120 nm. Исходя из полученных экспериментальных данных и соответствующей им теоретической модели [6] было выявлено, что наиболее вероятным коэффициентом поглощения обладали сверхтонкие пленки алюминия толщиной 5 nm, способные поглощать до 25% энергии взаимодействующей с ними падающей волны. В более толстых образцах наблюдалось преобладание коэффициента отражения (R), а в более тонких образцах преобладал коэффициент прохождения. Таким образом, на основе общей оценки для построения комбинированной ослабляющей поверхности были выбраны образцы толщиной в 5 nm. Описанные выше структуры могут быть самостоятельными радиопокрытиями, однако ввиду различия базовых процессов ослабления представляется возможным создание комбинированных покрытий.

Угловое распределение мощностей показало, что при расположении перед металлической пластиной тонкопленочного покрытия (рис. 2, а) форма диаграммы рассеяния не претерпевает особых изменений, однако присутствует количественное ослабление отраженной волны в промежутке $0-45^\circ$. Из рис. 2, б можно видеть, что использованная метаструктура, расположенная на металлической пластине, значительно меняет картину распределения поля. Данная структура ослабляет основной лепесток отраженной волны, а также формирует боковой лепесток значительной амплитуды в промежутке $30-85^\circ$, пиковое значение которого достигается при значении угла, равном 55° . При добавлении к метаструктуре поверхностного тонкопленочного слоя наблюдается дополнительное ослабление амплитуды отраженной мощности на всем участке диаграммы. Однако следует отметить, что при его добавлении форма боковых лепестков изменяется, и их пиковые значения смещаются на 10° в сторону основного лепестка.

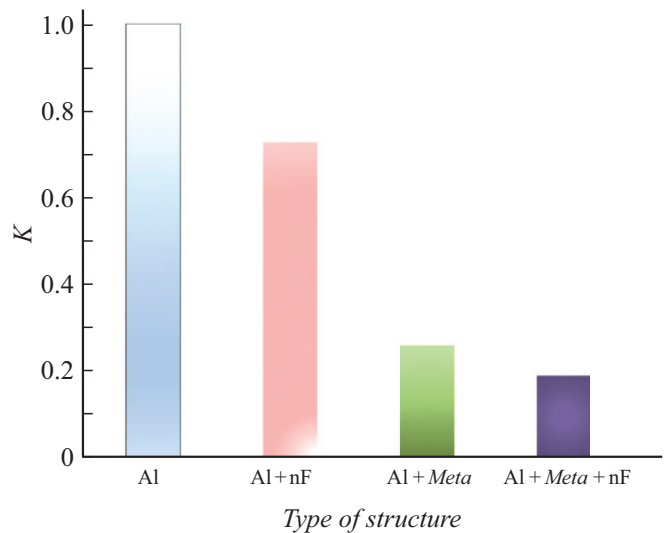


Рис. 3. Относительный коэффициент отражения в зависимости от типа структуры.

Для наглядности эффекта ослабления нормальной составляющей отраженной волны полученные данные сопоставлялись в относительных величинах — как отношение принимаемых мощностей исследуемых структур и металлического зеркала при 0° (рис. 3)

$$K = \frac{P_m}{P_{pl}},$$

где P_m — мощность, полученная исследуемой структуре при 0° , P_{pl} — мощность, полученная на металлическом зеркале при 0° .

Исходя из полученных данных можно утверждать, что предложенная комбинированная структура демонстрирует низкий уровень отраженной по нормали мощности по сравнению с металлическим зеркалом. Это указывает

на возможность использования таких комбинированных структур в качестве ослабляющих покрытий с широким спектром применения.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-22-20126).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] H. Ahmad, A. Tariq, A. Shehzad, M.S. Faheem, M. Shafiq, I.A. Rashid, A. Afzal, A. Munir, M.T. Riaz, H.T. Haider, M.A. Afzal, M.B. Qadir, Z. Khaliq, *Polym. Compos.*, **40**, 4457 (2019). DOI: 10.1002/pc.25311
- [2] J. Sun, Y. Huang, F. Aslani, G. Ma, *Constr. Build. Mater.*, **261**, 120031 (2020). DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120031
- [3] T.I. Silva, K.P. Soares, I.M. Pereira, L.F. Calheiros, B.G. Soares, *J. Aerosp. Technol. Manag.*, **11**, 37 (2019). DOI: 10.5028/jatm.ctmg.23
- [4] A.S. Mazinov, A.S. Tyutyunik, V.S. Gurchenko, I.S. Fitaev, V.M. Vasilchenko, in *2020 Int. Conf. on actual problems of electron devices engineering (APEDE)* (IEEE, 2020), p. 47. DOI: 10.1109/APEDE48864.2020.9255600
- [5] S. Li, S. Anwar, W. Lu, Z.H. Hang, B. Hou, M. Shen, C.-H. Wang, *AIP Adv.*, **4**, 017130 (2014). DOI: 10.1063/1.4863921
- [6] В.В. Старостенко, В.Б. Орленсон, А.С. Мазинов, И.Ш. Фитаев, *ЖТФ*, **90** (8), 1348 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.08.49546.375-19 [V.V. Starostenko, V.B. Orlenon, A.S. Mazinov, I.S. Fitaev, *Tech. Phys.*, **65** (8), 1296 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220080186].
- [7] А.И. Семенихин, Д.В. Семенихина, Ю.В. Юханов, П.В. Благовисный, *Журнал радиоэлектроники*, № 12, 12 (2020). DOI: 10.30898/1684-1719.2020.12.4
- [8] J. Su, Y. Lu, Z. Li, R. Zhang, Y. Yang, *Int. J. Antennas Propag.*, **2016**, 7595921 (2016). DOI: 10.1155/2016/7595921
- [9] V.V. Starostenko, S.P. Arsenichev, E.V. Grigorjev, I.S. Fitaev, A.S. Mazinov, in *2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)* (IEEE, 2021), p. 223. DOI: 10.1109/RSEMW52378.2021.9494075