

Модель радиолокационного покрытия на основе сегнетоэлектрических пленок

В. М. Гусаков

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

vka@mil.ru

Аннотация. В статье представлена электродинамическая модель многослойного радиолокационного покрытия с управляемыми параметрами на основе сегнетоэлектрической пленки, а также результаты численного моделирования отражательных свойств такого покрытия.

Ключевые слова: покрытие, управляемые параметры, сегнетоэлектрическая пленка, отражательные свойства

I. ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений в области создания радиолокационных материалов является создание покрытий с управляемыми параметрами [1, 2]. Для управления параметрами покрытия необходим элемент, способный изменять свои свойства под воздействием внешнего сигнала, например, частотно-селективная структура, пьезокерамика, ферромагнетик или сегнетоэлектрик. Как правило, управление параметрами покрытия связано с изменением резонансной частоты или коэффициента поглощения. В статье рассмотрено покрытие, основной задачей которого является изменение фазы отражаемого сигнала в соответствии с законом управления параметрами покрытия. Такое покрытие представляет собой пространственный модулятор, который можно использовать как для искажения, отражаемого от цели радиолокационного сигнала, так и для получения информации от удаленного объекта, на котором установка передающих устройств затруднена. В качестве управляющего элемента такого покрытия предложено использование сегнетоэлектрических пленок.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основной проблемой при создании покрытий на основе сегнетоэлектрических пленок является их высокая диэлектрическая проницаемость, из-за чего необходимо использование дополнительных согласующих слоев, импеданс которых близок к импедансу среды распространения [3]. Структура предлагаемого покрытия представлена на рис. 1.

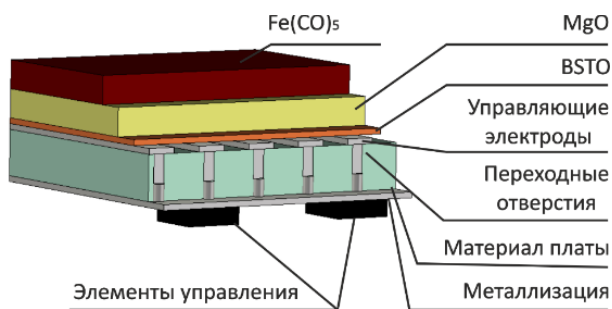


Рис. 1. Структура покрытия на основе сегнетоэлектрической пленки

Управляющие элементы размещены на нижнем слое двухслойной печатной платы, выполняющем также роль экрана. На верхнем слое платы располагаются управляющие электроды, к которым приклеивается сегнетоэлектрическая пленка, нанесенная на подложку. Верхний слой – компаунд на основе карбонильного железа ($\text{Fe}(\text{CO})_5$), необходимый для согласования структуры с окружающим пространством.

Задачей разработанной модели является получение зависимости комплексного коэффициента отражения от частоты при фиксированных параметрах слоев покрытия.

III. МОДЕЛЬ ПОКРЫТИЯ И ОСОБЕННОСТИ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ

Электродинамическая модель покрытия представлена на рис. 2. Покрытие представляется в виде совокупности слоев с волновыми сопротивлениями $Z_0 \dots Z_6$, при этом верхний слой – воздух, а нижний – идеальный проводник. Посадочные места управляющих элементов и переходные отверстия не учитываются. Управляющие электроды рассматриваются как ленточная дифракционная решетка бесконечной длины, на которой падающая электромагнитная волна распадается на совокупность отраженных и прошедших волн, амплитуды, фазы и направления распространения которых определяются следующими соотношениями [4]:

$$a_0 = -\frac{1}{1 + ik \cos \varphi \ln \frac{1 - \cos \pi \theta}{2}},$$

$$b_0 = \frac{ik \cos \varphi \ln \frac{1 - \cos \pi \theta}{2}}{1 + ik \cos \varphi \ln \frac{1 - \cos \pi \theta}{2}},$$

$$a_n = b_n = -\frac{\sin n\pi(1-\theta)}{n\pi} - \frac{(-1)^n}{4\pi k} \left[\frac{\exp(-in\pi\theta)}{1 + \sin \varphi} + \frac{\exp(in\pi\theta)}{1 - \sin \varphi} \right],$$

$$\theta_n = a \sin \left[\sin \varphi + \frac{n}{k} \right]; \quad |\theta_n| < \frac{\pi}{2}$$

$$k = \frac{l\sqrt{\varepsilon}}{\lambda},$$

$$\theta = \frac{d}{l},$$

где φ – угол падения волны, a , b – коэффициенты отражения и прохождения соответственно; λ – длина волны; n – номер гармоники пространственного спектра; d – ширина электрода; l – период решетки, θ_n – угол распространения моды.

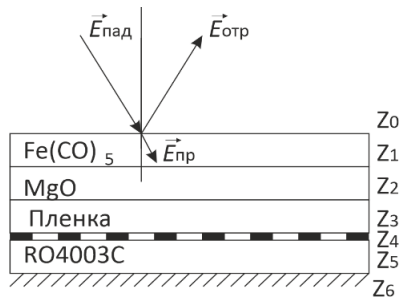


Рис. 2. Электродинамическая модель покрытия на основе сегнетоэлектрических пленок

При расчете отношения периода решетки к длине волны для определения отраженных мод в качестве диэлектрической проницаемости берется проницаемость сегнетоэлектрической пленки, а при расчете коэффициентов отражения – диэлектрическая проницаемость материала платы.

Из-за возможного наличия дополнительных составляющих в отражении от решетки для расчета коэффициента отражения использован метод обобщенных матриц рассеяния [5], при котором отраженная электромагнитная волна представляется в виде сумм волн, прошедших и отраженных через слой покрытия (рис. 3).

В этом случае коэффициент отражения определяется следующим образом:

$$a = a^{AA} + b^{AB} a^{BB2} b^{BA} E^{B1} E^{B2} + \dots$$

где a , b – коэффициенты отражения и прохождения на границе раздела сред AA , AB , BA и BB соответственно; E^{XY} – постоянная распространения моды, возникающей при распространении волны в слое X на шаге Y .

Коэффициенты отражения на каждой границе раздела сред за исключением дифракционной решетки определяются как соотношение импедансом верхнего (B) и нижнего (H) слоев:

$$a_{BH} = \frac{Z_H - Z_B}{Z_H + Z_B}$$

Угол входа для расчета волновых сопротивлений каждого слоя определяется как соотношение фазовых скоростей в верхнем и нижнем слоях:

$$\sin \varphi_H = \sin \varphi_B \cdot \beta_B / \beta_H$$

Таким образом, перед расчетом коэффициента отражения методом обобщенных матриц рассеяния сначала определяются углы входа волны в каждый слой с учетом изменения направления на дифракционной решетке, далее определяются волновые сопротивления.

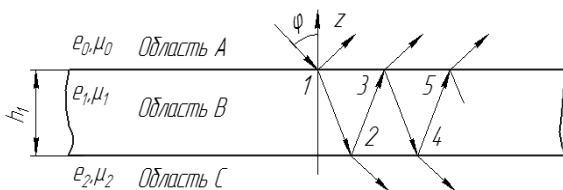


Рис. 3. Иллюстрация метода обобщенных матриц рассеяния для трехслойного покрытия

При реализации алгоритма на основе указанных соотношений упрощение и обобщение не производилось, а использован массив переменной длины, в который вносятся все вновь возникающие составляющие на каждом шаге расчета и номер шага. Ветвление для вновь возникающей моды прекращается в случае, когда ее амплитуда на 60 дБ меньше исходной падающей волны. Расчет заканчивается в случае, когда все вновь появляющиеся моды становятся меньше указанного порога, далее производится суммирование комплексных постоянных распространения всех мод, вышедших в верхний слой Z_0 (рис. 2).

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПОКРЫТИЯ

Для моделирования отражательных свойств рассматриваемого покрытия были приняты:

- материал платы RO4003C толщиной 2 мм;
- сегнетоэлектрическая пленка с $\epsilon = 1000-3500$ и толщиной 10 мкм [6], толщина подложки 200 мкм;
- верхний слой с $\epsilon=20$, $\text{tg}\epsilon=0,233$, $\mu=4,88$, $\text{tg} \mu = 0,387$ и толщиной 0,8 мм.

Толщины верхнего слоя и платы подбирались по результатам моделирования при нахождении варианта с наибольшими фазовыми искажениями.

На рис. 3, 4 представлены зависимости амплитуды и фазы коэффициента отражения при управлении параметрами сегнетоэлектрической пленки (сплошная линия – напряжение не подведено, пунктирная – подведено максимальное значение). Как видно из рисунков, на частоте 10 ГГц наблюдается изменение как модуля коэффициента отражения в 5 раз, так и сдвига фазы на 60 градусов. Максимальная разница составляет 150 градусов. На частоте 5,5 ГГц. Значительные изменения фазы при включении управляющего напряжения наблюдаются в диапазоне частот 5–13 ГГц, то есть перекрывают дециметровый и сантиметровый диапазоны длин волн.

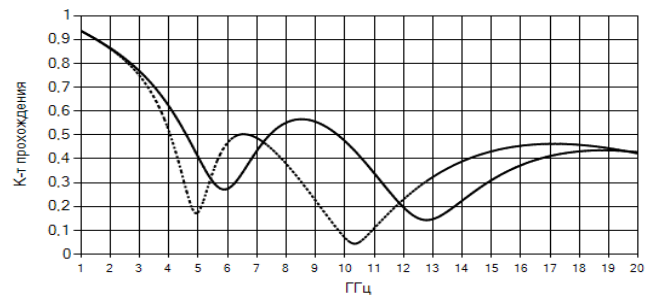


Рис. 4. Зависимость амплитуды коэффициента отражения от частоты

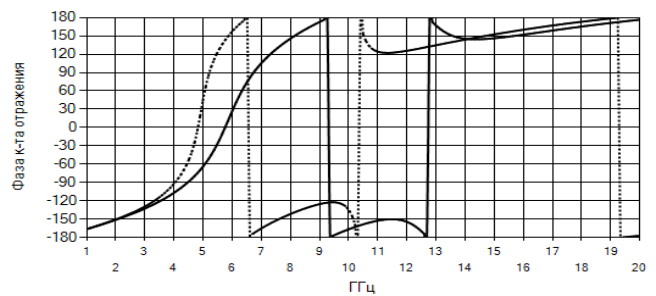


Рис. 5. Зависимость фазы коэффициента отражения от частоты

Таким образом, подобранные параметры слоев модели позволяют изменять отражательные характеристики рассматриваемой структуры.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложена модель радиолокационного покрытия на основе сегнетоэлектрических пленок, построенная на основе метода обобщенных матриц рассеяния, которая позволяет получать зависимости амплитуды и фазы коэффициента отражения от частоты при фиксированных параметрах слоев. Результаты расчетов позволяют подобрать материалы и толщины слоев, а также толщину и период управляющих электродов, необходимых для управления диэлектрической проницаемостью сегнетоэлектрической пленки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты // Первая миля. 2010. Т. 18-19. № 3-4. С. 44-60.
- [2] Лагарьков А.Н., Кисель В.Н., Семенов В.Н. Радиопоглощающие материалы на основе метаматериалов // Радиотехника и электроника. 2012. Т.57. №10, с. 1122-1129.
- [3] Пат. РФ № 106046. Радиопоглощающее покрытие / И.Г. Лукица, Г.А. Николайчук, В.П. Иванов, С.В. Яковлев. Опубл. 27.06.11.
- [4] Резонансное рассеяние волн. Том 1. Дифракционные решетки / В.П. Шестопалов, А.А. Кириленко, С.А. Масалов, Ю.К. Сиренко. Киев: Наукова думка, 1986. 232 с.
- [5] Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: «Наука», 1973, с. 15-25.
- [6] Harris D.T., Lam P.G., Burch M.J., Li J., Rogers B.J., Dickey E.C., Maria J.P. Ultra-high tenability in polycrystalline Ba₁₂Sr_xTiO₃ thin films // Appl.Phys. Lett., Vol. 105, 2014. P. 072904.