

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР МЕТАЛЛ/ДИЭЛЕКТРИК

В.А. ПЕТРОВИЧ, В.В. БАРАНОВ, С.В. РЕДЬКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
ml.redkov@gmail.com*

Исследованы частотные зависимости иммитансных характеристик многослойных периодических структур «металл-диэлектрик» в частотном диапазоне 25 Гц – 1 МГц. Диэлектрик обладает релаксационными механизмами поляризации, свойственными церезину, воде и др. Выявлены области частот, где структура обладает как положительными, так и отрицательными значениями действительной части комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости, а также отрицательным значением эффективного удельного сопротивления.

Ключевые слова: метаматериалы, комплексные электрофизические параметры, периодические композитные структуры.

За последние два десятилетия наблюдается резкий рост исследований, посвященных изучению материалов, имеющих отрицательное значение действительной части комплексного коэффициента оптического преломления n [1]. Величина n определяется как $\sqrt{\epsilon\mu}$. Здесь ϵ и μ – действительные части комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей соответственно. В том случае, когда ϵ и μ – положительные числа, величина n также положительна. Этот случай соответствует природным материалам. В том случае, когда ϵ и μ одновременно являются отрицательными, знак n тоже должен быть отрицательным, как этого требуют фундаментальные уравнения Максвелла и векторная форма уравнения Пойнтинга:

$$[\mathbf{K} \times \mathbf{E}] = \frac{\omega}{c} \mu \mathbf{H}, \quad [\mathbf{K} \times \mathbf{H}] = \frac{\omega}{c} \epsilon \mathbf{E}, \quad \mathbf{S} = [\mathbf{E} \times \mathbf{H}],$$

где ω – круговая частота, c – скорость электромагнитной волны в вакууме.

Искусственно созданные периодические решетки из отрезков проводников или рассеянных кольцевых проводников обеспечивают в первом случае отрицательное значение ϵ , а во втором случае – отрицательное значение μ . Совокупность этих двух решеток обеспечивает отрицательное значение n . При этом важно то, что уже созданные структуры с отрицательным n функционировали при частотах порядка 1 – 100 ГГц, что затруднительно для их экспериментальных исследований [2].

В настоящей работе исследовали многослойную структуру «металл-диэлектрик». Она представляла собой чередующиеся пластинки алюминиевой фольги и электрокартона толщиной 10 и 20 мкм соответственно. Электрокартон был пропитан полярной пастой церезин. Из чередующихся алюминиевых пластин была сформирована встречно-штыревая конденсаторная структура, аналогичная встречно-штыревым преобразователям, используемым в акустоэлектронике. Количество чередующихся слоев составило 600 единиц при площади каждого слоя 50 см².

Регистрацию иммитансных характеристик осуществляли в диапазоне частот 25 Гц – 1 МГц с помощью прибора E7-25.

На частотах 25 – 100 Гц $C_S = C_P = 15$ мкФ, $R_S = 520$ Ом, $R_P = 48$ кОм, $\text{tg}\delta = 0,005$, $|Z| = 108$ Ом, $\varphi = -89,7^\circ$. Совокупность этих данных указывает на то, что изготовленная структура на низких частотах представляет собой конденсатор с «хорошим» диэлектриком.

В диапазоне частот 200 – 320 кГц наблюдается переход значений C_S и C_P из области положительных значений (частоты до 270 кГц) в область отрицательных значений (частоты свыше 270 кГц). В совокупности с величиной и знаком угла сдвига фаз φ , можно утверждать следующее: структура до частоты 270 кГц обладает емкостным характером с положительной ϵ , а далее – отрицательной. Это же положение применительно к магнитной проницаемости, выглядит так: до частоты 270 кГц величина μ отрицательна, а затем она становится величиной положительной.

В целом иммитансные характеристики, представленные на рис. 1, согласуются с аналогичными характеристиками резонансных последовательных (для рис. 1, а) и параллельных (для рис. 1, б) колебательных контуров (здесь не приводятся).

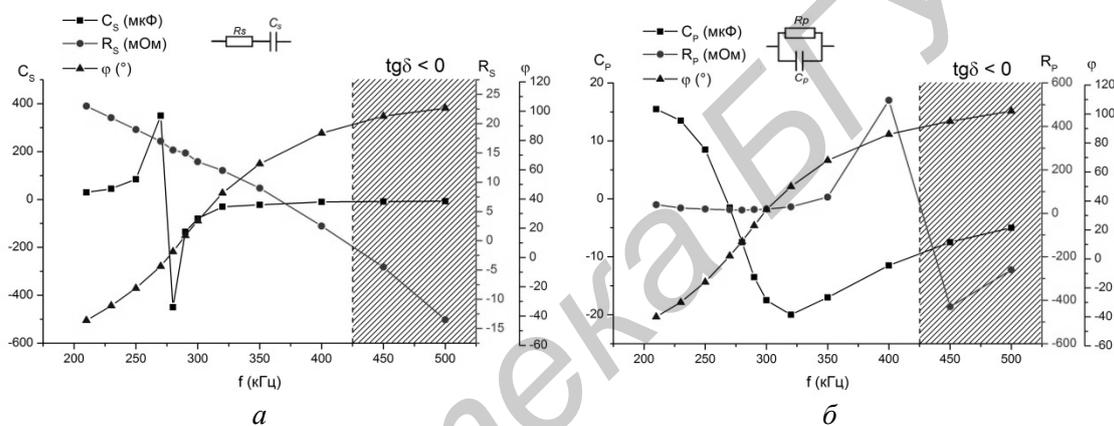


Рис. 1. Иммитансные характеристики многослойной структуры для последовательной (а) и параллельной (б) схемы замещения

Существенным отличием представленных зависимостей на рис. 1 от аналогичных зависимостей для обычных LC- контуров является наличие отрицательных значений R_S , R_P , а так же угла сдвига фаз φ свыше 90° (заштрихованные области на рис. 1). Этот факт указывает на то, что многослойная структура металл/диэлектрик на частотах свыше 420 кГц является не потребителем, а источником активной энергии P . При $R_{S(P)} > 0$ $P = \frac{U^2}{R_{S(P)}} = I^2 R_{S(P)}$ и является величиной положительной. Знак P меняется на минус, когда $R_{S(P)} = \rho \frac{1}{S} < 0$, т.е. при $\rho < 0$, где ρ – эффективное удельное сопротивление структуры.

Предложена модель, объясняющая поведение многослойной структуры.

Представленные материалы исследований используются в учебном процессе БГУИР на кафедрах МНЭ и ПИКС.

Список литературы

1. Веселаго В.Г. // Электродинамика материалов с отрицательным коэффициентом преломления. Успехи физических наук. 2003. Т.173. № 7. С. 790–794.
2. Воронов В.К., Подоплелов А.В. Современная физика: конденсированное состояние. М. ЛКИ. 2008. С. 18–23.