

УДК 537.621.3

Пономаренко В.И., Попов В.В.

ОДНОСЛОЙНЫЕ ПОГЛОЩАЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ДВУХУРОВНЕВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

ВВЕДЕНИЕ

Синтез радиопоглощающих покрытий (РПП), наряду с обеспечением необходимых радиотехнических характеристик, предполагает также выполнение требований, налагаемых на прочие параметры покрытия. Одним из условий оптимальности РПП, обеспечивающего в рабочем диапазоне длин волн $\lambda_{\min} < \lambda < \lambda_{\max}$ значения коэффициента отражения $R(\lambda) \leq R_0$, где R_0 - предельно допустимый уровень отражения, является минимальность толщины покрытия d .

Задача синтеза немагнитных РПП с минимизированным значением параметров $k_1 = d/\lambda_{\max}$, $k_2 = d/(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})$ рассматривалась рядом авторов как в общей постановке в предположении, что дисперсия диэлектрической проницаемости материала покрытия удовлетворяет соотношениям Крамерса-Кронига [1, 2], так и для материалов с конкретным характером дисперсии [3, 4, 5]. В частности, в [5] проанализированы поглощающие структуры на основе композиционных материалов с резонансной частотной зависимостью диэлектрической проницаемости [6],

$$\tilde{\epsilon} = 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega}, \quad (1)$$

причём резонанс может иметь место на нескольких частотах.

Нами рассматривается поглощающий слой из материала на основе проводящих волокон, именуемых далее включениями первого уровня, распределенных в среде – матрице, которая, в свою очередь, представляет собой композит с аналогичными, но намного меньшего размера включениями второго уровня, распределенными в недиспергирующем связующем, рис 1. Рассмотрен также случай, когда матрица является композитом с дисперсией резонансного типа.

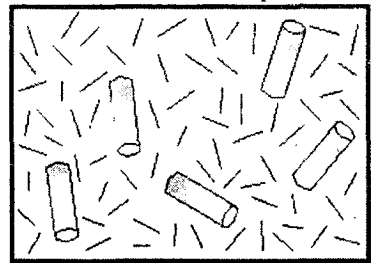


Рис. 1 Двухуровневый композиционный

ДИСПЕРСИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

Для композита в виде упорядоченной системы отрезков цилиндрических проводящих волокон, распределенных в среде с диэлектрической проницаемостью

**Однослойные поглощающие покрытия на основе
двухуровневых композиционных материалов**

$$F(\{x_i\}, d) = \max_{\lambda_{\min} < \lambda < \lambda_{\max}} R(\{x_i\}, d, \lambda), \quad (5)$$

где R – коэффициент отражения по мощности,

$$R = \left| \frac{i \operatorname{tg}(2\pi d \sqrt{\varepsilon / \lambda}) + \sqrt{\varepsilon}}{i \operatorname{tg}(2\pi d \sqrt{\varepsilon / \lambda}) - \sqrt{\varepsilon}} \right|^2, \quad (6)$$

зависящий от параметров $\{x_i\}$ через посредство ε . На величину диэлектрической проницаемости связующего накладывалось ограничение $\varepsilon_1 \geq 1$.

Минимизация проводилась путем пошагового поочередного изменения параметров $\{x_i\}$, причем величина шага уменьшалась при приближении к минимуму. В качестве начального приближения использовались значения $\{x_i\}$, полученные в результате минимизации тем же методом функционала

$$F_0(\{x_i\}, d) = \frac{1}{\lambda_{\min} - \lambda_{\max}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R^n(\{x_i\}, d, \lambda) d\lambda, \quad (7)$$

имеющего смысл усредненного по рабочему диапазону длин волн коэффициента отражения, возведенного в степень n, причем параметр n, как показали расчеты, целесообразно выбирать в пределах от 6 до 8. Такой алгоритм позволил в значительной степени уменьшить известные трудности, отмеченные, в частности, в [5], связанные с тем, что функционал (5) имеет большое число близких друг к другу локальных минимумов, вследствие чего результат минимизации зависит от выбора начального приближения. Вместе с тем необходимо отметить, что гарантированного нахождения глобального минимума описанный алгоритм не обеспечивает, так же как и другие известные методы минимизации, например, симплекс-метод [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЁТОВ

При проведении численных расчетов полагалось $\lambda_{\min} = 1$ см, $\lambda_{\max} = 10$ см, $R_0 = 0,1$ (-10 Дб).

Как видно из таблицы 1, в которой приведены оптимальные значения параметров для различных вариантов однослойного покрытия, наименьшую толщину $d = 1.832$ см имеет покрытие на основе композита, оба уровня которого содержат проводящие волокна с сильным скин-эффектом.

Таблица 1. Оптимальные значения параметров покрытий.

№	1: уровень I 2: уровень II	Параметры оптимизации					Толщина d (см)
		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	
1	1: волокна с сильным скин- эффектом (BC) 2: BC	A 0.67 8	G (ГГц ^{-3/2}) 13.1·10 ⁻⁷	A ₁ 1.662	G ₁ (ГГц ^{-3/2}) 15.2·10 ⁻⁷	ε_1 1.661	0.832

2	1: ВС 2: волокна со слабым скин-эффектом (ВСЛ)	A 0.64 8	G (ГГц ^{-3/2}) 11.9·10 ⁻⁴	A ₁ 1.443	Q ₁ (ГГц ⁻¹) 0.02	ε ₁ 1.61	0.87
3	1: ВСЛ 2: ВС	A 0.51	Q (ГГц ⁻¹) 67.4·10 ⁻⁴	A ₁ 7.99	G ₁ (ГГц ^{-3/2}) 31.1·10 ⁻⁴	ε ₁ 1.0	0.935
4	1: ВС 2: резонансный диэлектрик (РД)	A 0.77 8	G (ГГц ^{-3/2}) 3.4·10 ⁻⁴	γ (ГГц) 73.32	ω _p (ГГц) 60.88	ω ₀ (ГГц) 40.89	0.94
5	1: ВСЛ 2: РД	A 1.31	Q (ГГц ⁻¹) 42.1·10 ⁻⁴	γ (ГГц) 86.71	ω _p (ГГц) 77.28	ω ₀ (ГГц) 44.05	1.0
6	1: ВСЛ 2: ВСЛ	A 38.6	Q (ГГц ⁻¹) 27.4·10 ⁻³	A ₁ 0.163	Q ₁ (ГГц ⁻¹) 9.91·10 ⁻³	ε ₁ 1.01	1.08

Зависимость КО от частоты для этого покрытия приведена на рис. 2. На рис. 3 показана зависимость от частоты компонент эффективной диэлектрической

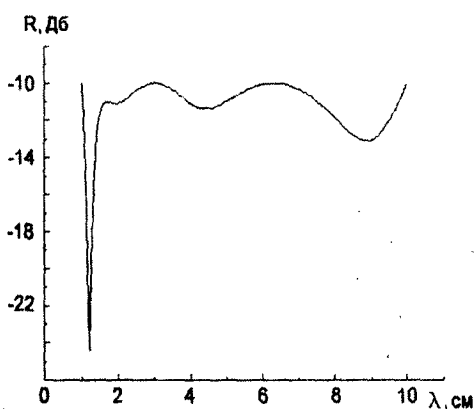


Рис. 2 Зависимость КО от длины волны для оптимального варианта покрытия

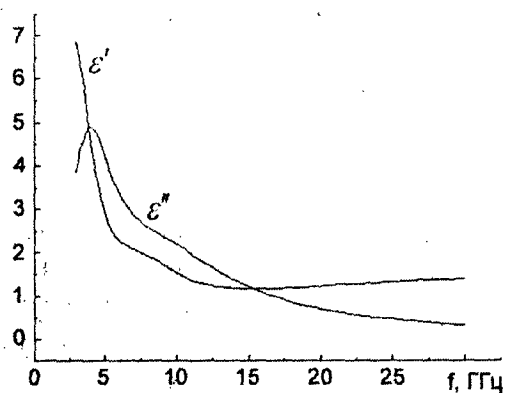


Рис. 3 Зависимость действительной (ε') и мнимой (ε'') частей диэлектрической проницаемости от частоты для оптимального варианта

проницаемости материала покрытия. Отметим, что приведенные зависимости $\varepsilon(\omega)$, $R(\lambda)$, для оптимального двухуровневого покрытия с относительной толщиной $d/\lambda_{\max}=1/12$ очень близки к соответствующим зависимостям, полученным в [1] для поглощающего слоя практически такой же толщины из композиционного материала с четырьмя частотными резонансами диэлектрической проницаемости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы различные варианты однослойных покрытий из двухуровневых композиционных материалов. Определены оптимальные параметры покрытий, а также их дисперсионные и радиотехнические характеристики при значениях коэффициента отражения по мощности, не превышающих 10% в диапазоне длин волн 1-10 см. Показано, что наименьшую относительную толщину имеет покрытие на основе композиционного материала, оба уровня которого содержат отрезки проводящих волокон с сильным скин-эффектом. Такое покрытие практически тождественно по своим свойствам покрытию на основе композита с четырьмя резонансами частотной зависимости диэлектрической проницаемости.

Список литературы

1. J.J. Pesque, D.P. Bouche, R. Mittra, Optimization of Multi-Layer Antireflection Coatings Using an Optimal Control Method, IEEE Trans. – vol. MTT-40 – no 3 – Sep. 1992 – pp.1789-1796.
2. Розанов К.Н. Фундаментальные ограничения для ширины рабочего диапазона радиопоглощающих покрытий. // Материалы 8-ой международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 1998г. – Т.2 – стр.537-538
3. Будагян И.Ф., Мировицкий Д.И., Пономаренко В.И. Оптимизация неоднородного радиопоглощающего диэлектрического слоя. // Радиотехника. – 1982. – Т. 37. – № 7. – С. 22-27.
4. Казанцев Ю.Н., Красножен А.П., Тихонравов А.В. Многослойные поглощающие структуры с дебаевской дисперсией диэлектрической проницаемости. // РЭ. – 1990. – Т. 35. – № 6. – С.1140
5. Виноградов А.П., Лагарьков А.Н., Сарычев А.К., Стерлина И.Г. Многослойные поглощающие структуры из композитных материалов. // РЭ. – 1996. – Т. 41. – № 2. – С. 158-161.
6. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир, 1986. – 660 с.
7. Пономаренко В.И. Эффективная диэлектрическая проницаемость искусственного диэлектрика с проводящими волокнами. // Радиотехника. – 1990. – Т. 45. – № 5. – С. 82-84.
8. Антонов А.С., Батенин В.М., Виноградов А.П., Калачев А.А., Кулаков А.В., Лагарьков А.Н., Матицын С.М., Панина Л.В., Розанов К.Н., Сарычев А.К., Смычковская Ю.Р., Электрофизические свойства перколяционных систем. – М.: изд. ИВТАН, 1990. – 199 с.

Статья поступила в редакцию 12.04.2001 г.