

КОГЕРЕНТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ. ДИСПЕРСНЫЕ ПОГЛОТИТЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Б.М. Широков, А.Ф. Корж

*Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”
Украина*

Поступила в редакцию 28.11.2005

В работе представлены результаты расчетов различных конструкций дисперсных структур, в которых дисперсная фракция помещенная, в диэлектрическую матрицу, представляет собой микрочастицы, на поверхность которых нанесено металлическое покрытие. Такие искусственные материалы могут быть использованы как поглотители электромагнитной энергии. В настоящем цикле исследований учтен эффект когерентного взаимодействия волн, излученных каждой частицей, как диполем.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе исследованы процессы поглощения электромагнитной волны длиной порядка 1 – 3 см дисперсной структурой имеющей вид диэлектрической матрицы, в которую помещено облако, состоящее из диэлектрических шариков, покрытых тонким слоем металла.

Рассмотрен случай, когда длина волны падающего излучения λ много больше размера дисперсного элемента “ a ”, который, в свою очередь, больше глубины скин-слоя материала покрытия δ и толщины покрытия Δr :

$$\lambda \gg a \geq \delta \geq \Delta r. \quad (1)$$

Рассмотрение проведено с учетом процессов интерференционного взаимодействия волн, отраженных от отдельных частиц структуры так, что падающая волна воспринимает дисперсную структуру, как однородный образец с некоторыми эффективными диэлектрической и магнитной проницаемостями.

Варьируя геометрическими характеристиками (размер частицы и толщина покрытия), величинами проводимости материала покрытия и концентрацией частиц структуры можно получать композиционные материалы с заданными эффективными магнитными и электрофизическими характеристиками (магнитная и диэлектрическая проницаемости, глубина скин-слоя и др.). Исследование проводилось на основе полученных аналитических выражений для электро- и магнитодипольной поляризуемостей элементов структуры.

Использование в качестве дисперсной фракции диэлектрических микрочастиц с

металлическим покрытием имеет ряд преимуществ по сравнению со случаем частиц в виде однородных металлических шариков. Так, например, при концентрации однородных металлических частиц $N \sim 10^6 \text{ см}^{-3}$ размером $a \sim 1 \text{ мкм}$ такая дисперсная структура по отношению к волне ведет себя, как диэлектрик, а при концентрации $N \sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$ — уже как отражающий волну металл. Для структур с однородными металлическими частицами этот результат ожидаем, поскольку при этом существенно увеличивается удельная доля металлического компонента в структуре.

В случае же, когда дисперсным компонентом являются диэлектрические частицы с металлическим покрытием, даже при плотной упаковке частиц происходит эффективное поглощение волны, поскольку доля металлического компонента в структуре мала. Варьирование размером ядра и толщиной покрытия может приводить к тому, что структуры с меньшими концентрациями частиц и, соответственно, меньшей удельной долей металлического компонента могут быть более эффективными поглотителями. Это связано с особенностью поглощения электромагнитной волны тонкими металлическими пленками из-за интерференционных процессов между волнами, отраженными от элементов дисперсной фракции.

ПОВЕРХНОСТЬ

Категория “поверхность” в рассматриваемой задаче имеет два аспекта:

аспект первый: необходимо определенным образом сформировать поверхность дис-

персного объекта, чтобы обеспечить заданные свойства материала (такие, например, как уровни отраженной и поглощенной мощности падающей волны и др.);

аспект второй: располагая правильным образом сконструированным дисперсным материалом (заданные электрофизические характеристики дисперсной фракции, геометрическая форма элементов структуры, размеры частиц, плотность упаковки, конфигурация структуры и др.), можно использовать ее, в свою очередь, как материал покрытия для формирования поверхности различных конструкций (например, стенок волноводных систем) для обеспечения заданных электромагнитных свойств.

КОНСТРУКЦИИ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ДИСПЕРСНОЙ СТРУКТУРЫ

В работе аналитическим методом проведен расчет величины поглощения электромагнитных волн дисперсной структурой из диэлектрических шариков с тонким металлическим покрытием. Задача о взаимодействии слоистого шара с электромагнитной волной в общей постановке была решена в работах [1, 2].

Учет когерентного взаимодействия отраженных от частиц волн достигался усреднением полей по объему структуры. При таком рассмотрении падающая волна “воспринимала” структуру, как однородное вещество с некоторым эффективным значением диэлектрической проницаемости $\epsilon_{эф.}$, которая зависит от микрохарактеристик структуры (магнито- электрофизические параметры, размеры, концентрация). Так [3]:

$$\epsilon_{эф.} = 1 + 3 \cdot \eta / (1 - \eta), \quad (2)$$

где

$$\eta = (4\pi/3) \cdot N \cdot V \cdot (\alpha_p + \alpha_m), \quad (3)$$

V – объем частицы, N – их концентрация в структуре, α_p и α_m – значения поляризуемостей частицы, связанные с колебаниями электрического и магнитного (созданного наведенными токами) дипольных моментов. При выполнении условия (1) после громоздких расчетов можно получить следующие выражения для электрической и магнитной поляризуемостей частицы:

$$\text{Im}\alpha_p = (9\pi/4) \cdot (\delta/\lambda) \cdot (a/\Delta r), \quad (4)$$

$$\text{Im}\alpha_m = (9/16\pi) \cdot (\delta^2/a \cdot \Delta r). \quad (5)$$

Если материал покрытия металл с хорошей проводимостью 10^{17} с^{-1} , $\delta \sim 1 \text{ мкм}$, то магнито-дипольная диссипация доминирует.

Плотность потока мощности волны, поглощаемой такой дисперсной структурой, определяется выражением [4]:

$$dQ/ds = P_0 \cdot \text{Im}(\epsilon_{эф.}) |W|^2 \cdot (1/2\beta) \cdot (1 - e^{-2(\omega/c) \cdot \beta \cdot d}). \quad (6)$$

Здесь $P_0 = (c/8\pi) \cdot E_0^2$, E_0 и ω – модуль потока мощности, амплитуда электрического поля и циклическая частота падающей волны, c – скорость света в вакууме, $W = 2/(1 + \sqrt{\epsilon_{эф.}})$ – коэффициент прохождения волны через границу дисперсной структуры, $\beta = \text{Im}(\sqrt{\epsilon_{эф.}})$, d – толщина дисперсной структуры. dQ/ds и P_0 в системе единиц СГС измеряются в [эрг/с·см²].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Таким образом диэлектрический шарик с металлическим покрытием размером:

$$a \sim \Delta r \sim 1 \text{ мкм} \quad \text{либо} \quad a \sim 10 \text{ мкм}, \\ \Delta r \sim 0,1 \text{ мкм}$$

является хорошим поглотителем. При этом сечение поглощения слабо зависит от длины волны излучения, а сферическая симметрия обеспечивает слабую зависимость поглощения от угла падения.

Поглотители из таких шариков могут использоваться, например, и для изготовления стенок волноводных систем, где эффект отражения волны является паразитным [5].

Проведены исследования процессов взаимодействия электромагнитной волны с дисперсной структурой, состоящей из облака таких частиц, помещенных в диэлектрическую матрицу. Получены оптимальные значения параметров таких структур, определяющие эффективное поглощение волны.

Толщина дисперсной структуры d находится из условия полного поглощения падающего излучения:

$$dQ/ds = P_0. \quad (7)$$

При значениях эффективной проводимости $\sigma_{эф.}$ дисперсной структуры, состоящей из слоистых шариков, находящихся в интервале $\sigma_{эф.} \in [10^9 - 10^{14}] \text{ с}^{-1}$, которая определяется значением концентрации дисперсной фракции, магнитоэлектрические свойства структуры

меняются от материала – диэлектрика до материала – плохого проводника. Проводящие и поглощающие свойства дисперсной структуры можно оценить, анализируя соотношения (2) – (6). Так, при значениях параметров структуры:

$a \sim 0,1$ мкм, $\Delta r \sim 0,1$ мкм, $\sigma \sim 10^{17} \text{с}^{-1}$, при концентрациях частиц $N < 10^8 \text{см}^{-3}$, композит имеет свойства диэлектрика. При этом волна эффективно поглощается на глубине

$$d = (1 - 3) \cdot (\lambda / \sqrt{\text{Re} \epsilon_{\text{эф.}}}), \text{ т.е. при } d \sim (1 - 5) \text{ см.}$$

В случае, когда $N \sim 10^9 \text{см}^{-3}$, в выражении (2) для $\epsilon_{\text{эф.}}$ возникает резонанс; при этом возрастает $\text{Im} \epsilon_{\text{эф.}} \gg 1$, что приводит к резкому увеличению поглощения. Эффективная проводимость возрастает до значений

$$\sigma_{\text{эф.}} \sim (10^9 - 10^{14}) \text{с}^{-1}.$$

Так, поглощение $(dQ/(P_0 \cdot ds)) \cdot 100\% > 80\%$ достигается на глубине $d \sim \sqrt{\Delta r/a} \cdot \lambda$, т.е. при $d \sim (3 - 5)$ мм.

Имеется еще множество параметорных вариантов, позволяющих подстроить конструкцию дисперсной структуры под имеющиеся или разрабатываемые технологии, не меняя при этом поглощающие характеристики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с многообразием качественных и количественных характеристик дисперсных структур, а также многообразием физических подходов при постановке задач, ориентировке их на конкретные практические приложения, и теперь сохранились “необитаемые островки” в данной тематике, и возможность привнести нечто новое. В настоящее время в различных научных центрах продолжают

проводится теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия электромагнитных волн с дисперсными материалами. Так, в работах [6 – 7] были сделаны оценки параметров дисперсных структур различных конструкций и проведены эксперименты по поглощению волн. Однако эти параметры, не соответствовали оптимальным значениям, из-за чего не были достигнуты, необходимые уровни поглощения электромагнитной энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Aden A.L., Kerker M.S. Scattering of electromagnetic waves from two concentric spheres // J. Appl. Phys. – 1951. – Vol. 2, № 10, – P. 1242-1246.
2. Шифрин К.С. Рассеяние света на двухслойных частицах//Изв. АН СССР, сер. геофизическая. – 1952. – № 2. – С. 15-21.
3. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. – М.: “Изд. иностранной литературы”, 1961. – 465с.
4. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: “Наука”, 1973. – 421с.
5. Ирюшкина Л.И., Воробьева Н.И. Материалы для внутривакуумных поглотителей СВЧ – энергии//Обзоры по электронной технике. Серия 6. Материалы. – 1988. – Вып. 9. – С. 1415-1466.
6. Khlebtsov N.G., Melnikov A.G., Bogatyrev V.A. and all. Can the light – scattering depolarization ratio of small particles be greater – than 1/3// Journal of physical chemistry. – 2005. – Vol. 109, № 28. – P. 13578-13584.
7. Sun W.F., Dai Q., Worden J.G. and all. Optical limiting of a covalent bonded gold nanoparticle/plilysine hybrid material//Jounal of physical chemistry. – 2005. – Vol. 109, № 44. – P. 20854-20857.

КОГЕРЕНТНА ВЗАЄМОДІЯ. ДИСПЕРСНІ ВБИРАЧІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ

Б. М. Широков, О. Ф. Корж

У роботі наведено результати розрахунків різноманітних конструкцій дисперсних структур, в яких дисперсна фракція, поміщена в діелектричну матрицю, являє собою мікрочастинки, на поверхні яких нанесено металеве покриття. Такі штучні матеріали можуть бути використані, як вбирачі електромагнітної енергії. У даному циклі досліджень враховано ефект когерентної взаємодії хвиль, випромінених кожною частинкою, як диполем.

COHERENT INTERACTION. DISPERSE ABSORBERS OF ELECTRO-MAGNETIC WAVES

B. Shyrovkov, A. Korsh

The results of calculations for different disperse structures, in which disperse fraction located in dielectric matrix represents macro-particles with metallic coating deposited on their surface, are presented in the paper. Such artificial materials can be used as electro-magnetic energy absorbers. In the present research cycle the effect of coherent interaction of waves, emitted by each particle as dipole was taken into account.