УДК 537.876.4

СОЗДАНИЕ СРЕД, ИМЕЮЩИХ БЛИЗКУЮ К НУЛЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

© 2010 г. **Е. О. Лизнев****; **А. В. Дорофеенко***, канд. физ.-мат. наук;
А. П. Виноградов*, доктор физ.-мат. наук

* Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, Москва

** Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный

E-mail: liznev@phystech.edu

В последнее время повышенный интерес вызывают среды с близкой к нулю диэлектрической проницаемостью. Известно, что в оптическом диапазоне благородные металлы вблизи определенной частоты обладают этим свойством. В настоящей работе показано, что для заданной частоты можно подобрать состав композита, у которого диэлектрическая проницаемость близка к нулю, причем потери будут того же порядка, что и для благородного металла на частоте обращения действительной части его диэлектрической проницаемости в нуль.

Ключевые слова: *композит, эффективная диэлектрическая проницаемость композита, создание композитов.*

Коды OCIS: 160.3918.

Поступила в редакцию 31.05.2010.

Как уже упоминалось выше, в последнее время значительно возрос интерес к композитам с близкой к нулю диэлектрической проницаемостью [1]. Рассмотрим возможности получения таких композитов. Простейшим композитом является диэлектрическая матрица, заполненная с объемной концентрацией p металлическими (в нашем случае серебряными) шариками. Эффективная диэлектрическая проницаемость композита может быть оценена в рамках теории М. Гарнетта (см., например [2]) как

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_d + 3p\frac{\varepsilon_d\left(\varepsilon_{\text{Ag}} - \varepsilon_d\right)}{\left(\varepsilon_{\text{Ag}} + 2\varepsilon_d\right) - p\left(\varepsilon_{\text{Ag}} - \varepsilon_d\right)},$$

где ε_{Ag} – диэлектрическая проницаемость серебряных включений, ε_d – диэлектрическая проницаемость диэлектрической матрицы.

Хотя у серебра есть потери, сначала мы ими пренебрежем. В этом случае теория Гарнетта предсказывает два качественно разных поведения $\varepsilon_{\text{eff}}(p)$ [3]. При частотах, когда $-2\varepsilon_d < \varepsilon_{\text{Ag}} < 0$, существует концентрация $p = -\dfrac{1}{2}\dfrac{\varepsilon_{\text{Ag}} + 2\varepsilon_d}{\left(\varepsilon_{\text{Ag}} - \varepsilon_d\right)}$, на которой ε_{eff} обращается в нуль.

На меньших частотах, когда $\varepsilon_{\text{Ag}} < -2\varepsilon_d < 0$, поведение $\varepsilon_{\text{eff}}(p)$ качественно меняется. Теперь уже величина $\varepsilon_{\text{eff}}^{-1}(p)$ принимает значение, равное нулю, при $p = \dfrac{\varepsilon_{\text{Ag}} + 2\varepsilon_d}{\varepsilon_{\text{Ag}} - \varepsilon_d}$, а сама $\varepsilon_{\text{eff}}(p)$ имеет полюс [4–5]). Как следствие $\varepsilon_{\text{eff}}(p)$ ни при каких концентрациях в нуль не обращается. В этом случае при учете потерь полюс превращается в резонансную кривую (рис. 1), а точка, где $\text{Re}\varepsilon_{\text{eff}}(p) = 0$ есть, но потери там очень велики. Иными словами, искомого решения нет.

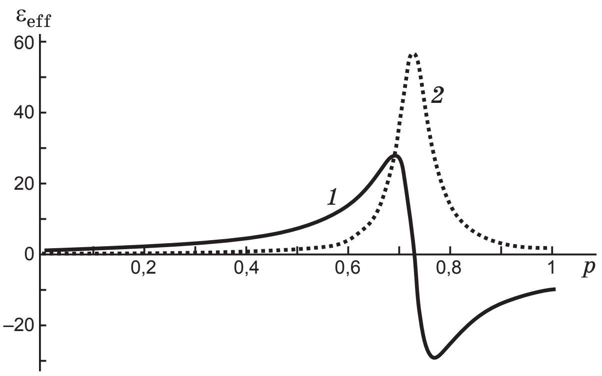

Рис. 1. Действительная (*1*) и мнимая (*2*) части эффективной диэлектрической проницаемости как функции объемной концентрации серебряных включений в диэлектрической матрице с $\varepsilon_m = 1$ на длине волны $\lambda = 500$ нм, соответствует $\varepsilon_i = -9{,}8 + 1{,}5i$.

Для уменьшения потерь имеет смысл уменьшить концентрацию металла. Для этого можно использовать включение в виде диэлектрического шара (core) в металлической оболочке (shell) с отношениями радиусов $q = r_{\text{core}}^3/r_{\text{shell}}^3$. Оценим $\varepsilon_{\text{eff}}(p)$ такого композита среды по формуле Гарнетта, заменив включения однородными шариками, имеющими ту же поляризацию [6]

$$\alpha_{\text{eff}.i} = \frac{3}{4\pi}\,\frac{1 - q\dfrac{\varepsilon_{\text{core}} - \varepsilon_{\text{shell}}}{\varepsilon_{\text{core}} + 2\varepsilon_{\text{shell}}}\,\dfrac{\varepsilon_m + 2\varepsilon_{\text{shell}}}{\varepsilon_m - \varepsilon_{\text{shell}}}}{\dfrac{\varepsilon_{\text{shell}} + 2\varepsilon_m}{\varepsilon_{\text{shell}} - \varepsilon_m} + 2q\dfrac{\varepsilon_{\text{core}} - \varepsilon_{\text{shell}}}{\varepsilon_{\text{core}} + 2\varepsilon_{\text{shell}}}},$$

как составное включение. Иными словами, шар в оболочке рассматривается как однородный шар с диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon_{\text{eff}.i} = \frac{3 + 8\pi\alpha_{\text{eff}.i}}{3 - 4\pi\alpha_{\text{eff}.i}}\varepsilon_m.$$

Тогда эффективная диэлектрическая проницаемость композита (где ε_m – диэлектрическая проницаемость металла) определится как

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_m \frac{1 + 2p\dfrac{\varepsilon_{\text{eff}.i} - \varepsilon_m}{2\varepsilon_m + \varepsilon_{\text{eff}.i}}}{1 - p\dfrac{\varepsilon_{\text{eff}.i} - \varepsilon_m}{2\varepsilon_m + \varepsilon_{\text{eff}.i}}}.$$

В первую очередь мы должны найти функцию $p_0(q)$, которая дает решение p_0 уравнения $\text{Re}\varepsilon_{\text{eff}}(p, q) = 0$ при заданном q. Следующим шагом минимизируем $\text{Im}\varepsilon_{\text{eff}}(p_0(q), q)$ с ограничениями $0 \le q \le 1$, $0 \le p_0(q) \le 1$. Оказывается, что процедура поиска минимума всегда дает $p_0 = 1$.

Итак, при $\varepsilon_{\text{Ag}} < -2\varepsilon_d < 0$ композит есть диэлектрическая матрица, наполненная металлическими включениями с концентрацией q. Второй композит представляет собой серебряную пену с диэлектрическими пузырями с концентрацией q (концентрация серебра $1 - q$).

В первом случае композит с низкими потерями может быть сделан, если $-2\varepsilon_m < \text{Re}\varepsilon_{\text{Ag}} < 0$, что соответствует некоему интервалу длин волн $\{\lambda_0, \lambda_{-2\varepsilon_m}\}$, где $\text{Re}\varepsilon_{\text{Ag}}(\lambda_0) = 0$ и $\text{Re}\varepsilon_{\text{Ag}}(\lambda_{-2\varepsilon_m}) = -2\varepsilon_m$. К сожалению, приближаясь к $\lambda_{-2\varepsilon_m}$, мы наблюдаем увеличение потерь. Резкое увеличение потерь появляется после $\lambda_{-2\varepsilon_m}$, где возникает полюс эффективной диэлектрической проницаемости.

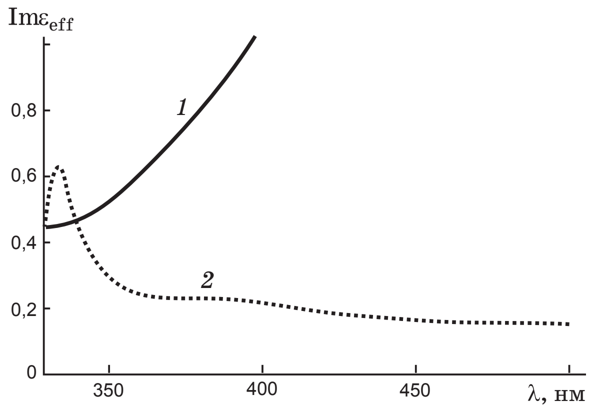

Рис. 2. Зависимости потерь композита от длины волны в случае металлических шариков (*1*) и пены (*2*).

Если оболочка сделана из серебра, то плазмонный резонанс на полости достигается при $\text{Re}\varepsilon_{\text{Ag}}(\lambda_{-0,5\varepsilon_m}) = -0,5\varepsilon_m$. В интервале $\{\lambda_0, \lambda_{-0,5\varepsilon_m}\}$ наблюдается увеличение потерь. Для длин волн больше $\lambda_{-0,5\varepsilon_m}$ наблюдается уменьшение потерь. В итоге приходим к случаю, когда потери композита просто пропорциональны концентрации серебра (рис. 2).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Silverinha M., Engheta N.* Design of matched zero-index metamaterials using nonmagnetic inclusions in epsilon-near-zero media // Physical Review. 2007. V. 75. P. 075119.
2. *Виноградов А.П.* Электродинамика композитов. М.: УРСС, 2001. 176 с.
3. *Виноградов А.П., Дорофеенко А.В., Зухди С.* К вопросу об эффективных параметрах метаматериалов // УФН. 2008. Т. 178. С. 511.
4. *Milton G.W.* The theory of composites. Cambridge University Press, 2001. 749 p.
5. *Bergman D.A.* The dielectric constant of a composite material–a problem in classical physics // Physics Rep. 1978. V. 43. P. 377–407.
6. *Hashin Z., Strikman S.* A variational approach to the theory of the elastic behavior of multiphase materials // J. Mech. Phys. Solid. 1963. V. 11. P. 127–140.