

УДК 621.3.029.6

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТА: МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ НАНОЧАСТИЦЫ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ И МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ НА ЕГО ОСНОВЕ

© 2021 г. Б. А. Беляев<sup>1,2,\*</sup>, Ан. А. Лексиков<sup>3</sup>, В. В. Тюрнев<sup>3</sup>, Д. А. Шабанов<sup>2,3</sup>

Представлено академиком РАН В.Ф. Шабановым 11.01.2021 г.

Поступило 12.01.2021 г.

После доработки 12.01.2021 г.

Принято к публикации 18.01.2021 г.

Исследованы частотные и концентрационные зависимости эффективной комплексной диэлектрической проницаемости композита: наночастицы серебра в диэлектрической матрице из полистирола. Установлено, что с ростом объемной концентрации частиц в композите до ~33% действительная компонента его относительной диэлектрической проницаемости увеличивается с 2.6 до  $\sim 10^3$ , при этом вплоть до частоты 1 ТГц тангенс угла диэлектрических потерь не превышает  $10^{-2}$ . Показана возможность создания на композитных слоистых структурах полосно-пропускающих фильтров, настройка которых осуществляется подбором концентрации частиц в четвертьволновых слоях зеркал, обеспечивающих оптимальное взаимодействие полуволновых резонаторов друг с другом, а крайних резонаторов – со свободным пространством. Высокий контраст диэлектрических проницаемостей матрицы и композита позволяет изготавливать зеркала с требуемой отражательной способностью на минимальном количестве слоев.

*Ключевые слова:* композит, металлические наночастицы, комплексная диэлектрическая проницаемость, полосно-пропускающий фильтр

DOI: 10.31857/S2686740021020024

Современные технологии способны производить металлические частицы размерами от единиц до сотен нанометров и создавать на их основе композиты с уникальными свойствами, используя различные материалы в качестве матриц. В частности, водные суспензии с наночастицами применяют в медицине [1] в качестве диагностических и терапевтических средств. Бактерицидная и фунгицидная активность таких суспензий уменьшает время заживления ран и снижает биологическую нагрузку на организм. Для оптических приложений важны результаты исследований нематических или холестерических жидких кристаллов с наночастицами [2], демонстрирующие возможность увеличения анизотропных свойств та-

ких композитов. Просветляющие покрытия из частиц серебра и кремния обладают резонансными свойствами и влияют на поглощение света в активной области тонкопленочной солнечной батареи [3]. Металлические наночастицы, внедренные в диэлектрическую матрицу, например, в полистирол, существенно изменяют его диэлектрические и магнитные свойства в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) [4], и такой композит представляет большой интерес для создания СВЧ-устройств.

Важной особенностью металлических наночастиц является наличие в них плазменных мультипольных колебаний, резонансные частоты которых попадают в оптический диапазон [5]. Для металлических и диэлектрических сфер частоты резонансов и их добротность монотонно увеличиваются с ростом номера моды колебаний. При этом увеличение радиуса сфер приводит к значительному уменьшению добротности резонанса только первой (дипольной) моды колебаний [6] за счет быстрого роста потерь на излучение на ее собственной частоте по сравнению с частотами высших мод колебаний. Отметим, что резонансы мультипольных колебаний в диэлектрических сферах наблюдаются на частотах, при которых размеры сферы соизмеримы с длиной электро-

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

<sup>3</sup> Институт физики им. Л.В. Киренского Федерального исследовательского центра "Красноярский научный центр" Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Россия

\*E-mail: belyaev@iph.krasn.ru

магнитной волны в материале сферы. Однако для мультипольных колебаний в металлических наночастицах, которые называют плазмонными колебаниями, резонансные возбуждения (плазмонны) наблюдаются на частотах, когда длина волны в материале частицы много больше ее радиуса [6]. Как показал электродинамический расчет [7], плазмонные резонансы металлических частиц, внедренных в диэлектрическую матрицу, хорошо проявляются на частотных зависимостях эффективных диэлектрической и магнитной проницаемости такого композита.

В настоящей работе в широком диапазоне частот исследуются концентрационные зависимости эффективной комплексной диэлектрической проницаемости композита, образованного наночастицами серебра в диэлектрической матрице из полистирола. На основе слоистых структур из такого нанокompозита с различной концентрацией частиц в слоях разработаны полосно-пропускающие фильтры третьего порядка терагерцового диапазона, отличающиеся от известных конструкций [8–10] значительно меньшим количеством диэлектрических слоев в зеркалах.

### ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ НАНОКОМПОЗИТА

Для изучения поведения частотных и концентрационных зависимостей эффективной диэлектрической проницаемости исследуемого композитного материала воспользуемся формулой, полученной в работе [7] электродинамическим расчетом диэлектрической матрицы, содержащей металлические наночастицы сферической формы:

$$\epsilon_{eff} = \frac{H_\epsilon + i\sqrt{-H_\epsilon^2 - 8\epsilon_m\epsilon_d J(k_m a)}}{4}. \quad (1)$$

Здесь  $\epsilon_m$  — относительная комплексная диэлектрическая проницаемость материала наночастицы,  $\epsilon_d$  — относительная комплексная диэлектрическая проницаемость матрицы,  $a$  — радиус частицы,  $k_m = \sqrt{\epsilon_m \mu_m} \omega / c$  — волновое число для материала наночастицы (металла),  $\mu_m$  — относительная комплексная магнитная проницаемость металла,  $\omega$  — угловая частота падающей волны,  $c$  — скорость света в вакууме,  $H_\epsilon = (2 - 3c_m)\epsilon_d - (1 - 3c_m)\epsilon_m J(k_m a)$ ,  $c_m$  — относительная объемная концентрация наночастиц в композите,  $J(x) = 2 \frac{1 - x \operatorname{ctg} x}{x^2 + x \operatorname{ctg} x - 1}$ .

Как известно, относительная комплексная диэлектрическая проницаемость металлической наночастицы в рамках модифицированной модели Друде [11] выражается формулой

$$\epsilon_m(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma}, \quad (2)$$

где  $\epsilon_\infty$  — оптическая диэлектрическая проницаемость, равная единице для металла,  $\omega_p$  — частота плазменных колебаний в металле, а  $\gamma$  — частота релаксации носителей заряда, зависящая от проводимости материала. В исследуемом композитном материале в качестве диэлектрической матрицы выбран полистирол, обладающий сравнительно высокой добротностью в широком диапазоне частот, относительная комплексная диэлектрическая проницаемость которого  $\epsilon_d = 2.6 + i \cdot 3 \cdot 10^{-4}$ . В матрицу вводились металлические наночастицы сферической формы радиуса  $a = 5$  нм из серебра, имеющего плазменную частоту  $\omega_p/2\pi = 1600$  ТГц и частоту релаксации  $\gamma/2\pi = 2.3$  ТГц [6].

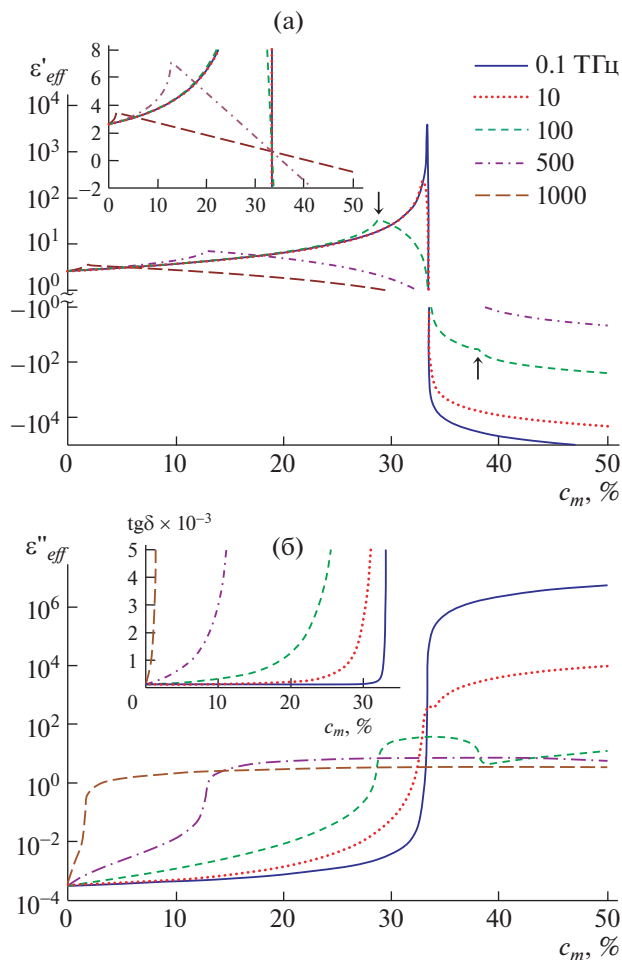
На рис. 1 для нескольких частот  $f$  электромагнитной волны построены зависимости действительной  $\epsilon'_{eff}$  и мнимой  $\epsilon''_{eff}$  компонент эффективной относительной диэлектрической проницаемости от концентрации наночастиц в рассматриваемом композите. На рис. 1 видно, что на частотах ниже 10 ТГц с ростом концентрации наночастиц растет  $\epsilon'_{eff}$ , достигая максимальных значений, превышающих  $10^3$  при концентрации  $c_m = 33.3\%$ , которая, как известно, соответствует точки протекания для двухкомпонентных смесей, а затем  $\epsilon'_{eff}$  быстро падает, принимая отрицательные значения, и при  $c_m = 50\%$  проницаемость  $\epsilon'_{eff} \approx -1.2 \cdot 10^5$ . С увеличением частоты положение максимума  $\epsilon'_{eff}$  смещается в область меньших концентраций, при этом сама величина максимума быстро уменьшается. Отметим, что в оптическом диапазоне электромагнитных волн на частоте  $f = 500$  ТГц (длина волны  $\lambda = 0.6$  мкм) максимум  $\epsilon'_{eff} = 6.96$  наблюдается при концентрации частиц  $c_m = 13.0\%$ , показывая превышение эффективной диэлектрической проницаемости композита в 2.7 раза относительно полистироловой матрицы ( $\epsilon' = 2.6$ ). Однако на частоте  $f = 1000$  ТГц ( $\lambda = 0.3$  мкм) максимум  $\epsilon'_{eff} = 3.42$  наблюдается при  $c_m = 1.68\%$ , т.е. добавление в матрицу менее 2% металлических наночастиц приводит к увеличению эффективной диэлектрической проницаемости композита больше, чем на 30%. Важно заметить, что все представленные зависимости  $\epsilon'_{eff}(c_m)$  при концентрации частиц  $c_m \approx 33.4\%$  пересекаются в одной точке  $\epsilon'_{eff} \approx 0.65$  (см. вставку на рис. 1а).

Как и следовало ожидать, с ростом концентрации металлических частиц в композите увеличивается мнимая компонента  $\epsilon''_{eff}$  его эффективной диэлектрической проницаемости (рис. 1), с которой связаны потери энергии электромагнитных

волн в материале. Видно, что для каждой частоты существует узкий интервал концентраций, в котором наблюдается резкое (на порядки) увеличение  $\epsilon''_{eff}$ , причем с повышением частоты этот интервал смещается от  $c_m = 33.3\%$  в область малых концентраций. На вставке рис. 1б приведены зависимости от концентрации наночастиц тангенса угла диэлектрических потерь исследуемого композита  $\text{tg } \delta = \epsilon''_{eff} / \epsilon'_{eff}$ , обратная величина которого, как известно, характеризует добротность материала  $Q$ . Видно, что на частотах ниже 10 ТГц добротность композита превышает 200 ( $\text{tg } \delta < 5 \times 10^{-3}$ ) даже в интервале больших концентраций ( $30\% < c_m < 33\%$ ). При этом на оптических частотах  $Q$  больше 200 только при  $c_m < 15\%$ . В табл. 1 представлены значения  $c_m$ , обеспечивающие добротность композита  $Q = 200$  на заданных частотах  $f$ , приведены также значения действительной  $\epsilon'_{eff}$  и мнимой  $\epsilon''_{eff}$  компонент его относительной диэлектрической проницаемости. Из таблицы видно, что значительное повышение диэлектрической проницаемости композита при сохранении его высокой добротности достигается лишь на частотах ниже 100 ТГц.

Важно отметить, что на зависимости  $\epsilon''_{eff}(c_m)$ , построенной для частоты  $f = 100$  ТГц (см. рис. 1б), хорошо видна область, соответствующая концентрациям наночастиц  $c_m \sim (28 \div 38)\%$ , в которой наблюдаются максимальные значения мнимой компоненты диэлектрической проницаемости, достигающие величины  $\epsilon''_{eff} > 36$ . Очевидно, что в этой области концентраций на частоте  $f = 100$  ТГц в композите возбуждаются резонансы плазменных колебаний наночастиц [7], что отражается и на зависимости действительной компоненты  $\epsilon'_{eff}(c_m)$  (границы названной области концентраций обозначены стрелками на рис. 1а). С уменьшением частоты область концентраций, в которой наблюдаются “плазменные” резонансы, приводящие к увеличению  $\epsilon''_{eff}$ , монотонно сужается и на частоте 5 ТГц превращается в точку при  $c_m \approx 33.6\%$ , а затем исчезает. С увеличением частоты, напротив, область монотонно расширяется, при этом максимальные значения  $\epsilon''_{eff}$  в ней уменьшаются. На частоте  $f = 200$  ТГц она охватывает диапазон концентраций  $c_m \sim (24 \div 43)\%$  при максимальном значении  $\epsilon''_{eff} \approx 18$ , а на частоте  $f = 338$  ТГц диапазон концентраций расширяется до  $c_m \sim (19 \div 50)\%$ , при максимальном значении  $\epsilon''_{eff} \approx 10$ .

На рис. 2 показаны частотные зависимости действительной (а) и мнимой (б) компонент эффективной относительной диэлектрической проницаемости композита, построенные для нескольких фиксированных концентраций наночастиц. Видно,



**Рис. 1.** Концентрационные зависимости действительной и мнимой компонент эффективной относительной диэлектрической проницаемости композита на различных частотах. а – фрагмент зависимости  $\epsilon'_{eff}(c_m)$  в линейном масштабе, б – концентрационная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь.

что для каждой концентрации величина  $\epsilon'_{eff}$  остается почти постоянной в широкой области, начиная с  $f = 0$ , до границы полосы частот, в которой возбуждаются резонансы плазменных колебаний, а частота этой границы с уменьшением концентрации частиц монотонно повышается. На всех зависимостях  $\epsilon'_{eff}(f)$  вблизи этой границы наблюдаются небольшие максимумы, после которых действительная компонента эффективной диэлектрической проницаемости стремительно уменьшается. На рис. 2б видно, что величина мнимой компоненты  $\epsilon''_{eff}$  с ростом частоты увеличивается, достигая своего максимума также на границе полосы частот, в которой возбуждаются резонансы плазменных колебаний, а затем  $\epsilon''_{eff}$  монотонно уменьшается.

**Таблица 1.** Значения концентраций металлических наночастиц  $c_m$ , обеспечивающих добротность композита  $Q = 200$  на заданных частотах  $f$ , а также значения его действительной  $\varepsilon'_{eff}$  и мнимой  $\varepsilon''_{eff}$  компонент относительной диэлектрической проницаемости

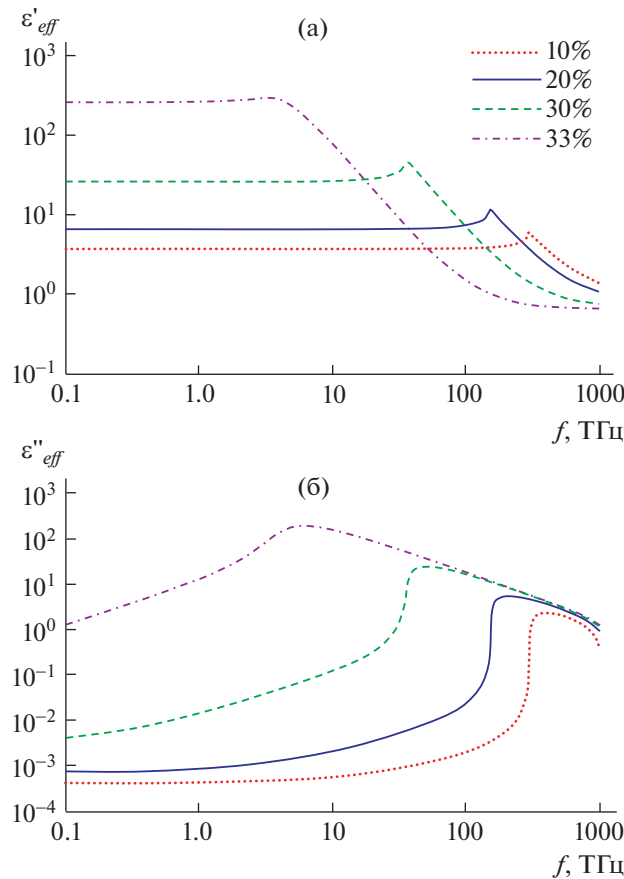
$f$ , ТГц	$c_m$ , %	$\varepsilon'_{eff}$	$\varepsilon''_{eff}$	$\lambda$ , мкм
0.1	33.1	388	1.94	3000
1.0	32.6	118	0.59	300
10	31.0	40.0	0.20	30
100	25.5	12.2	0.061	3
428.6	13.31	5.45	0.027	0.7
500	11.2	4.98	0.025	0.6
750	5.17	3.84	0.019	0.4
1000	1.44	3.15	0.016	0.3

Очевидно, что исследованный композит, обладающий высокой добротностью при определенных концентрациях металлических наночастиц в матрице, полезно использовать в конструкциях многослойных полосно-пропускающих фильтров [8–10]. В таких фильтрах можно значительно уменьшить

количество слоев в зеркалах при их заданной отражательной способности благодаря возможности регулировки в широких пределах диэлектрической проницаемости композитного материала.

### ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

Для исследований были выбраны две конструкции полосно-пропускающих фильтров третьего порядка на слоистых структурах из композитных материалов. В первой конструкции (рис. 3а) полуволновыми резонаторами служат слои толщиной  $R$  из полистирола (матрица без частиц), а зеркалами  $M_1$  и  $M_2$  служат четвертьволновые слои из композитных материалов толщиной  $d_1$  (у наружных зеркал) и  $d_2$  (у внутренних зеркал) с различным содержанием металлических частиц в матрице. Во второй конструкции (рис. 3б), напротив, полуволновыми резонаторами служат слои из композита толщиной  $R$ . При этом наружные зеркала  $M_1$  состоят из двух четвертьволновых слоев из композитного материала (толщиной  $d_1$ ) и



**Рис. 2.** Частотные зависимости действительной и мнимой компонент относительной диэлектрической проницаемости для различных концентраций наночастиц в композите.

**Таблица 2.** Параметры 7-слойной структуры полосно-пропускающего фильтра третьего порядка с относительной шириной полосы пропускания 10% и центральной частотой 1 ТГц на резонаторах из полистирола (конструкция (а) на рис. 3)

$R = 93.0$ мкм			$d_1 = 21.1$ мкм			$d_2 = 5.7$ мкм		
$c_m, \%$	$\epsilon'$	$\text{tg}\delta$	$c_m, \%$	$\epsilon'$	$\text{tg}\delta$	$c_m, \%$	$\epsilon'$	$\text{tg}\delta$
0	2.6	$1.2 \times 10^{-4}$	26.5	12.6	$1.6 \times 10^{-4}$	32.8	170	$88 \times 10^{-4}$

**Таблица 3.** Параметры 13-слойной структуры полосно-пропускающего фильтра третьего порядка с относительной шириной полосы пропускания 10% и центральной частотой 1 ТГц на резонаторах из композита (конструкция (б) на рис. 3)

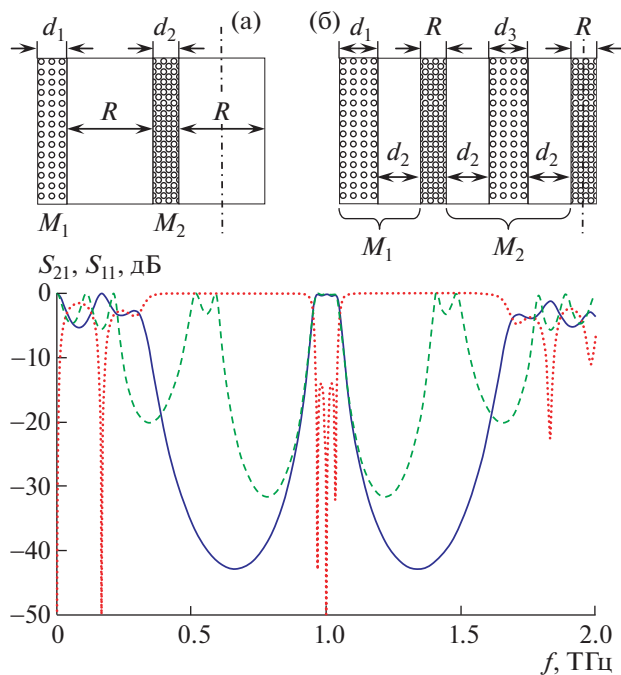
$R = 24.6$ мкм			$d_1 = 43.5$ мкм			$d_2 = 46.5$ мкм			$d_3 = 26.4$ мкм		
$c_m, \%$	$\epsilon'$	$\text{tg}\delta$	$c_m, \%$	$\epsilon'$	$\text{tg}\delta$	$c_m, \%$	$\epsilon'$	$\text{tg}\delta$	$c_m, \%$	$\epsilon'$	$\text{tg}\delta$
31.1	38.8	$5.4 \times 10^{-4}$	4.2	3.0	$1.2 \times 10^{-4}$	32.8	170	$1.2 \times 10^{-4}$	22.6	8.1	$1.3 \times 10^{-4}$

полистирола (толщиной  $d_2$ ), а внутренние зеркала  $M_2$  трехслойные: два четвертьволновых слоя из полистирола (толщиной  $d_2$ ), разделенных четвертьволновым слоем из композита (толщиной  $d_3$ ).

Для объективного сравнения частотно-селективных свойств обе конструкции фильтров настраивались на одну и ту же центральную частоту полосы пропускания  $f_0 = 1$  ТГц, и они имели одну и ту же относительную ширину полосы пропускания  $\Delta f / f_0 = 10\%$ . Настройка фильтров производилась параметрическим синтезом с помощью численного электродинамического анализа их одномерных моделей. При этом подбирались толщины всех слоев и концентрации металлических частиц в слоях из композитного материала так, чтобы максимумы потерь на отражение в полосе пропускания были на уровне  $-14$  дБ.

Полученные численным расчетом амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) фильтров представлены на рис. 3. Частотная зависимость прямых потерь  $S_{21}(f)$  для первой (7-слойной) конструкции показана сплошной линией, для второй (13-слойной) конструкции – штриховой линией, а точками представлена частотная зависимость потерь на отражение  $S_{11}(f)$ , но только для первой конструкции, чтобы не загромождать рисунок. Видно, что фильтр с однослойными зеркалами имеет более высокие частотно-селективные свойства. У него значительно шире низкочастотная и высокочастотная полосы заграждения, а также на  $\sim 12$  дБ больше затухание в них. Однако потери мощности в полосе пропускания у обоих фильтров совпадают, их минимальная величина  $\sim 0.4$  дБ. Отметим, что внешние зеркала в многослойных фильтрах обеспечивают оптимальную связь крайних резонаторов со свободным пространством, а центральное зеркало обеспечивает оптимальную связь внутреннего резонатора с внешними резонаторами.

В табл. 2 и 3 для обеих конструкций настроенных фильтров представлены толщины и диэлектрические параметры всех слоев с указанием концентраций частиц в них. Как и следовало ожидать, в 7-слойном фильтре для обеспечения требуемой отражательной способности однослойных зеркал необходим высокий контраст диэлектрических проницаемостей зеркал и резонаторов, что достигается большими концентрациями металлических частиц в композите. В 13-слойном фильтре самая большая концентрация частиц содержится



**Рис. 3.** АЧХ конструкций фильтров третьего порядка. Сплошная линия для конструкции с резонаторами из полистирола (а), штриховая линия для конструкции с резонаторами из композита (б). Точки – частотная зависимость потерь на отражение.

в композите, из которого состоят слои-резонаторы. Принимая во внимание тот факт, что относительная ширина полосы пропускания обоих фильтров одинакова, можно считать, что отражательные способности однослойных зеркал в первой конструкции фильтра совпадают с отражательными способностями соответствующих двухслойных и трехслойного зеркала в конструкции второго фильтра.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследовано поведение частотных и концентрационных зависимостей действительной и мнимой компонент эффективной комплексной диэлектрической проницаемости композита, представляющего собой матрицу из полистирола с наночастицами серебра сферической формы диаметром 10 нм. Исследования проведены на основе электродинамического расчета диэлектрической матрицы, содержащей металлические наночастицы сферической формы, полученные в работе [7]. Показано, что с ростом объемной концентрации частиц  $c_m$  в композите до  $\sim 33\%$  действительная компонента его относительной диэлектрической проницаемости увеличивается с 2.6 до  $\sim 10^3$ , при этом вплоть до частоты 1 ТГц тангенс угла диэлектрических потерь композита не превышает  $10^{-2}$ . Показано также, что на зависимостях мнимой компоненты диэлектрической проницаемости  $\epsilon''_{eff}(c_m)$  существует область изменений  $c_m$ , в которой наблюдаются максимальные значения  $\epsilon''_{eff}$ . Причем с повышением частоты эта область расширяется, а величина максимальных значений  $\epsilon''_{eff}$  в ней уменьшается. В этой области концентраций в композите возбуждаются резонансы плазменных колебаний наночастиц, что отражается и на зависимостях действительной компоненты  $\epsilon'_{eff}(c_m)$ .

Продемонстрирована возможность создания на композитных материалах многослойных полосно-пропускающих фильтров с высокими характеристиками, настройка которых осуществляется подбором концентрации частиц в четвертьволновых слоях зеркал и полуволновых слоях резонаторов, что обеспечивает оптимальное взаимодействие полуволновых резонаторов друг с другом, а крайних резонаторов со свободным пространством. Высокий контраст диэлектрических проницаемостей матрицы и композита позволяет изготавливать зеркала с требуемой отражательной способностью на минимальном количестве слоев, что, очевидно, значительно упрощает изготовление многослойных полосно-пропускающих фильтров, а также существенно расширяет полосы заграждения устройств.

### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России по гос. заданию № FEFE-2020-0013 “Развитие теории самоконфигурирующихся алгоритмов машинного обучения для моделирования и прогнозирования характеристик компонентов сложных систем”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mishra M., Chauhan P.* Nanosilver and Its Medical Implications // *J. Nanomed. Res.* 2015. V. 2. Iss. 5. P. 00039 (1–10).
2. *Осунов М.А.* Теория диэлектрической проницаемости нематических нанокомпозитов, содержащих сферические наночастицы // *Вестн. Моск. гос. обл. ун-та. Серия Физика-Математика.* 2019. № 2. С. 14–23.
3. *Барышникова К.В., Петров М.И., Бабичева В.Е., Чебыкин А.В., Белов П.А.* Влияние включения плазмонных и диэлектрических наночастиц на просветляющие свойства однородных покрытий фотовольтаических кремниевых структур // *Науч.-техн. вестн. информ. технологий, механики и оптики.* 2015. Т. 15. № 5. С. 767–774.
4. *Ansari A., Akhtar M. J.* Investigation on electromagnetic characteristics, microwave absorption, thermal and mechanical properties of ferromagnetic cobalt–polystyrene composites in the X-band (8.4–12.4 GHz) // *RSC Adv.* 2016. V. 6. P. 13846–13857.
5. *Jacak W., Krasnyj J., Jacak J., Gonczarek R., Chepok A., Jacak L., Hu D. Z., Schaadt D.* Radius dependent shift in surface plasmon frequency in large metallic nanoparticles: Theory and experiment // *J. Appl. Phys.* 2010. V. 107. P. 124317-1–124317-13.
6. *Belyaev B.A., Tyurnev V.V.* Resonances of Electromagnetic Oscillations in a Spherical Metal Nanoparticle // *Microw. Opt. Tech. Lett.* 2016. V. 58. № 8. P. 1883–1886.
7. *Беляев Б.А., Тюрнев В.В.* Электродинамический расчет эффективных электромагнитных параметров диэлектрической среды с металлическими наночастицами заданных размеров // *ЖЭТФ.* 2018. Т. 154. Вып. 4 (10). С. 716–729.
8. *Беляев Б.А., Тюрнев В.В., Шабанов В.Ф.* Полосно-пропускающие фильтры на одномерных фотонно-кристаллических структурах // *ДАН.* 2014. Т. 454. № 6. С. 651–656.
9. *Беляев Б.А., Тюрнев В.В., Шабанов В.Ф.* Оптический полосно-пропускающий фильтр на основе трехкомпонентной многослойной структуры // *ДАН.* 2014. Т. 456. № 4. С. 413–416.
10. *Belyaev B.A., Tyurnev V.V., Shabanov V.F.* Design of optical bandpass filters based on a two-material multilayer structure // *Opt. Lett.* 2014. V. 39. № 12. P. 3512–3515.
11. *Choy T.C.* Effective medium theory: Principles and applications. Oxford: Oxford University Press, 2016. 241 p.

## COMPOSITE RESEARCH: METAL NANOPARTICLES IN A DIELECTRIC MATRIX AND MULTILAYER BANDPASS FILTERS BASED ON IT

**B. A. Belyaev<sup>a,b</sup>, An. A. Leksikov<sup>c</sup>, V. V. Tyurnev<sup>c</sup>, and D. A. Shabanov<sup>b,c</sup>**

<sup>a</sup> *Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation*

<sup>b</sup> *Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation*

<sup>c</sup> *L.V. Kirensky Institute of Physics, Krasnoyarsk Science Centre, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS V. F. Shabanov

We have investigated the frequency and concentration dependences of the effective complex permittivity of the composite: silver nanoparticles in a polystyrene dielectric matrix. It was found that with an increase in the volume concentration of particles in the composite up to  $\sim 33\%$ , the real component of its relative permittivity increases from 2.6 to  $\sim 10^3$ , while up to a frequency of 1 THz the dielectric loss tangent does not exceed  $10^{-2}$ . We show the possibility to design bandpass filters based on composite layered structures, the tuning of which is carried out by selecting the concentration of particles in quarter-wavelength layers of mirrors, which provide an optimal interaction of half-wavelength resonators with each other, and the outer resonators with free space. The high contrast between the permittivity of the matrix and the composite makes it possible to design mirrors with the required reflectivity with a minimum number of layers.

*Keywords:* composite, metal nanoparticles, complex permittivity, bandpass filter