

УДК 621.372

КОМПОЗИТНАЯ СРЕДА НА ОСНОВЕ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ С ОБОЛОЧКОЙ

Алеева Л.Н., Головкина М.В.

*ФГБОУ ВО Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Самара, e-mail: aleeva.leysen@mail.ru*

В работе рассматриваются наночастицы сферической формы, состоящие из диэлектрического ядра и металлической оболочки. Исследуется положение максимума плазмонного резонанса на границе раздела металлической оболочки с ядром и с окружающей средой. Поляризуемость наночастиц рассчитывается в рамках модели невырожденного электронного газа, диэлектрическая проницаемость металлической оболочки рассчитывается в рамках модели Друде. В работе показано наличие двух плазмонных резонансов в наночастицах, положением которых существенным образом зависит от радиуса ядра и оболочки наночастиц. Также в работе исследованы электродинамические свойства композитной среды, содержащей наночастицы с оболочкой, проведен расчет коэффициента прохождения электромагнитной волны через композитную среду. Показано, что такая композитная среда может использоваться в качестве полосового фильтра, положением полосы задержки которого можно управлять, меняя геометрические размеры наночастиц.

Ключевые слова: наночастица с оболочкой, поверхностный плазмонный резонанс, композитная среда

COMPOSITE MEDIA BASED ON CORE-SHELL NANOPARTICLES

Aleeva L.N., Golovkina M.V.

*Povolzhskiy State University of Telecommunications & Informatics, Samara, e-mail:
aleeva.leysen@mail.ru*

In this paper are the spherical nanoparticles with dielectric core and a metal shell considered. The position of the surface plasmon resonance maximum at the interface between the metal shell and the core and between the metal shell and the surrounding medium is studied. The polarizability of nanoparticles is calculated in the approximation of the nondegenerate electron gas, the dielectric constant of the metal shell is described by the Drude model. The paper shows the presence of two plasmon resonances in nanoparticles, the position of which depends substantially on the radius of the core and the nanoparticle shell. Also, the electrodynamic properties of the composite medium containing nanoparticles with a cladding were studied, and the coefficient of the electromagnetic wave transmission through a composite medium was calculated. It is shown that such composite medium can be used as a bandpass filter, the position of the delay band that can be controlled by changing the geometric dimensions of nanoparticles.

Keywords: core-shell nanoparticle, surface plasmon resonance, composite media

Введение

Оптические свойства наночастиц различной формы являются предметом пристальных исследований на протяжении последних лет. Нелинейно-оптические свойства наночастиц из различных материалов используются в изготовленных на их основе композитных сред [1]. Такие композитные среды обладают высоким быстродействием, достаточной простотой изготовления или синтеза наночастиц на современном этапе и возможностью изменения оптических свойств композитных сред путем изменения геометрических размеров наночастиц [2]. Особый интерес вызывают металлические наночастицы и частицы с металлической оболочкой. Особенностью оптических свойств металлических наночастиц является возникновение плазмонных резонансов, связанных с

взаимодействием электромагнитного излучения с плазмой свободных электронов в металле. Данный эффект приводит к появлению полос поглощения и рассеяния, связанных с плазмонными резонансами. Спектральное положение этих особенностей зависит от материала наночастиц, их размера, формы и энергетического состояния свободных электронов в наночастице [5]. Важным свойством плазмонных резонансов является локальное увеличение амплитуды поля электромагнитной волны внутри и вблизи наночастицы в десятки раз, по сравнению со средней амплитудой поля в среде [5]. Композитные среды, которые содержат наночастицы сложной формы, обладающие диэлектрическим ядром и металлической оболочкой, проявляют высокую чувствительность положения максимума плазмонного резонанса по отношению к соотношению радиусов ядра и оболочки таких наночастиц.

Расчет параметров наночастиц с оболочкой

Рассмотрим наночастицу сферической формы, состоящей из концентрических, вложенных друг в друга сфер. Сердцевина наночастицы может представлять собой диэлектрический шар, а оболочка – металлический или полупроводниковый слой. В зависимости от типа материала оболочки и температуры электронный газ, может рассматриваться либо как вырожденный, либо как классический. Рассмотрим наночастицу с оболочкой сферической формы, находящуюся в среде с диэлектрической проницаемостью ϵ_m (см. рис. 1). Пусть R_1 – радиус ядра, R_2 – радиус оболочки, ϵ_c – диэлектрическая проницаемость ядра, $\epsilon(\omega)$ – диэлектрическая проницаемость оболочки (металла), рассматриваемая в рамках модели Друде.

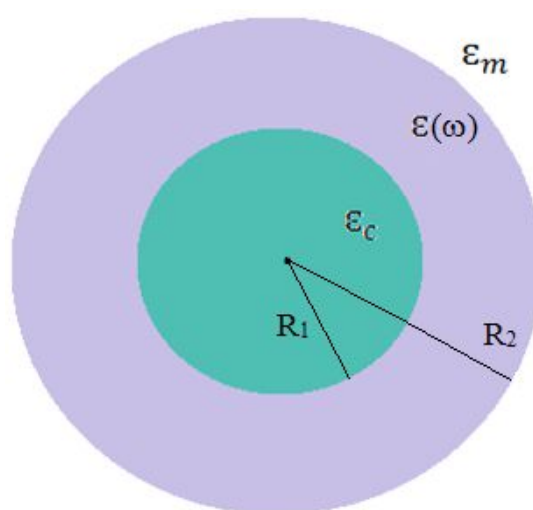


Рис.1. Наночастица с оболочкой

Как известно, существование плазменных возбуждений на границе раздела металла с диэлектриком может резонансно изменять оптические свойства не только отдельных наночастиц, но и композитных сред, содержащих плазмонные наночастицы.

Рассмотрим расчет поляризуемости для наночастиц сферической формы. В зависимости от типа материала оболочки и температуры электронный газ в металле может рассматриваться либо как вырожденный, либо как классический. Если донорный диполь расположен достаточно далеко от шарового композита, его поле в области шара может рассматриваться как однородное и тогда в нанокompозите наводится поляризация лишь дипольного типа [3].

В общем случае в рамках модели невырожденного электронного газа формула для поляризуемости $\alpha(\omega)$ оболочки содержит комплекснозначную функцию $\varepsilon(\omega)$ диэлектрической проницаемости [3]

$$\alpha(\omega) = \frac{(\varepsilon(\omega) - 1)(2\varepsilon(\omega) + 1)(R_2^3 - R_1^3)}{(\varepsilon(\omega) + 2)(2\varepsilon(\omega) + 1) - 2(\varepsilon(\omega) - 1)^2 \xi^3}. \quad (1)$$

Дипольная поляризуемость нанокompозита «шар-оболочка» выражается формулой [4]

$$\alpha(\omega) = \frac{(\varepsilon(\omega) - \varepsilon_m)(2\varepsilon(\omega) + \varepsilon_c) - (2\varepsilon(\omega) + \varepsilon_m)(\varepsilon(\omega) - \varepsilon_c)\xi^3}{(\varepsilon(\omega) + 2\varepsilon_m)(2\varepsilon(\omega) + \varepsilon_c) - (2\varepsilon(\omega) - \varepsilon_m)(\varepsilon(\omega) + \varepsilon_c)\xi^3} R_2^3. \quad (2)$$

$$\xi = \frac{R_1}{R_2}. \quad (3)$$

Рассмотрим композитную среду, которая содержит нановключения с оболочкой, находящихся в матрице из стекла. Расчет параметров композитной структуры проведем в рамках формулы Клаузиуса-Мосотти. Если размеры включений меньше длины волны применяемого излучения, то можно ввести понятие эффективной диэлектрической проницаемости. Эффективная диэлектрическая проницаемость композитной среды будет рассчитываться по известной формуле

$$\varepsilon = \frac{3 + 8\pi \cdot N\alpha}{3 - 4\pi \cdot N\alpha}. \quad (4)$$

Здесь N – концентрация включений, α - поляризуемость отдельного нановключения.

Результаты расчетов эффективной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$ композитной среды показаны на рисунке 2. Хорошо заметно наличие двух максимумов диэлектрической проницаемости на рисунке 2. Эти максимумы соответствуют двум плазмонным резонансам: на границе раздела металл – сердцевина и на границе раздела металл – окружающая среда. Теоретические расчеты показывают, что на величину максимумов плазмонного резонанса и на их положение влияют геометрические размеры наночастиц, а именно радиусы ядра и оболочки. Также, на положение максимума плазмонного резонанса влияет и концентрация нановключений.

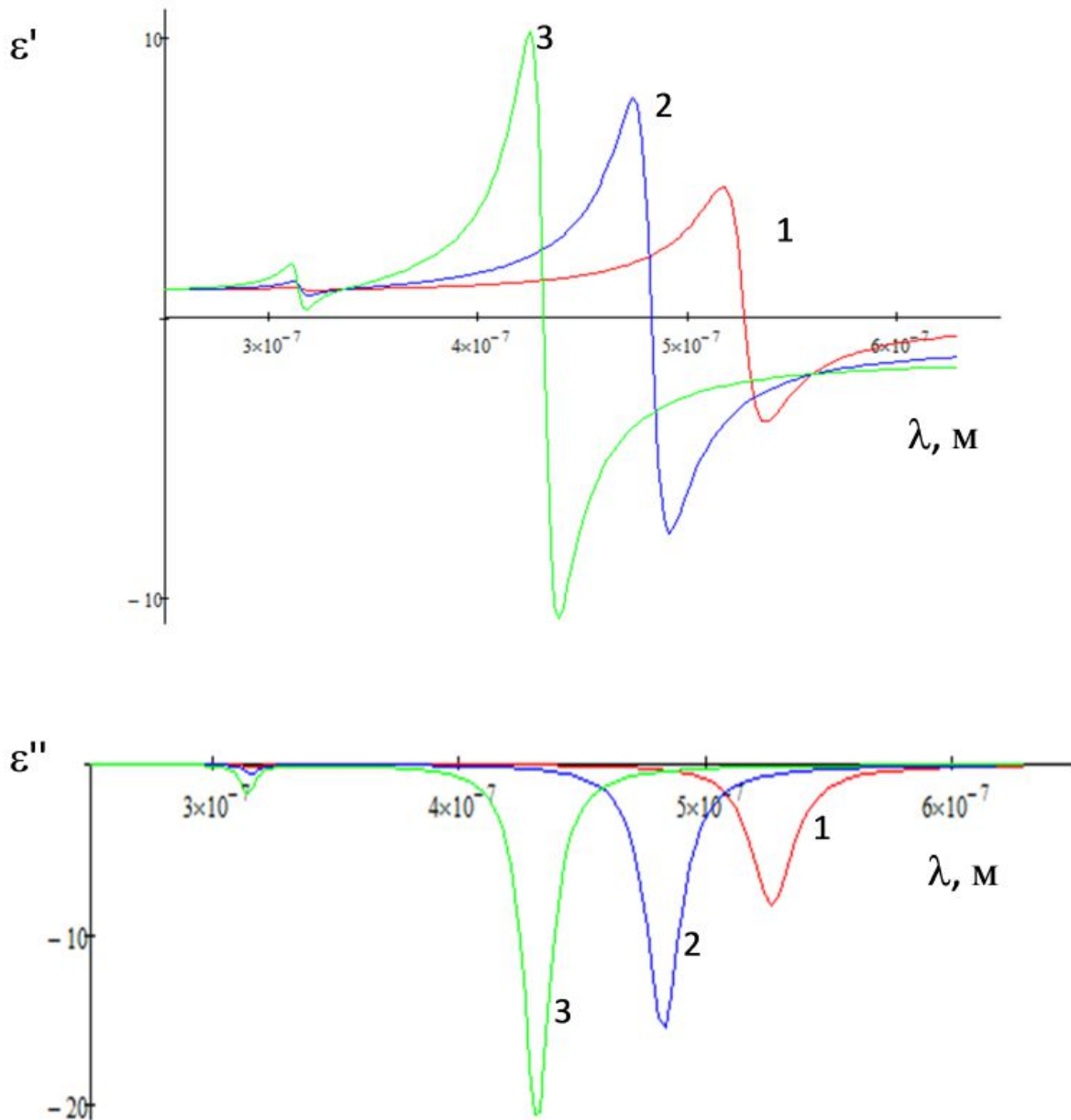


Рис. 2. График зависимости действительной ϵ' и мнимой ϵ'' части диэлектрической проницаемости композитной среды с наночастицами с оболочкой от длины волны. Радиус оболочки $R_2 = 10$ нм, $R_1/R_2 = 0,8$. Кривая 1: концентрация наночастиц: $N = 0,3 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, кривая 2: $N = 1 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, кривая 3: $N = 3 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$

Зная частотную зависимость диэлектрической проницаемости композитной среды, зная ее действительную и мнимую часть, можно найти коэффициент прохождения T электромагнитной волны через композитную среду толщиной d . Для этого используется закон Бугера-Ламберта [6]:

$$T = e^{-\alpha d}, \quad (5)$$

где α – коэффициент поглощения:

$$\alpha = \text{Im} \left(\frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon} \right), \quad (6)$$

d – толщина слоя композитной среды.

На рисунке 3 представлены результаты расчета коэффициента прохождения электромагнитной волны через композитную среду для разных соотношений радиуса ядра и радиуса оболочки в сферических нановключениях с оболочкой. Из рисунка видно, что коэффициент прохождения через композитную среду практически равен нулю во всем диапазоне длин волн, кроме области, соответствующей положению плазмонного резонанса. При равенстве длины волны падающей электромагнитной волны длине волны поверхностного плазмона коэффициент прохождения резко уменьшается до нуля. Таким образом, исследуемая композитная среда может использоваться как полосовой фильтр. Причем из рисунка 3 видно, что при неизменном радиусе оболочки $R_2=14$ нм увеличение соотношения R_1/R_2 от величины 0,1 до 0,25 приводит к увеличению ширины полосы задержки. Меняя параметры, такие как концентрация включений, величину радиуса ядра и радиуса оболочки можно влиять на положение и величину двух максимумов плазмонного резонанса в структуре, а соответственно, на две полосы задержки фильтра на основе композитной структуры.

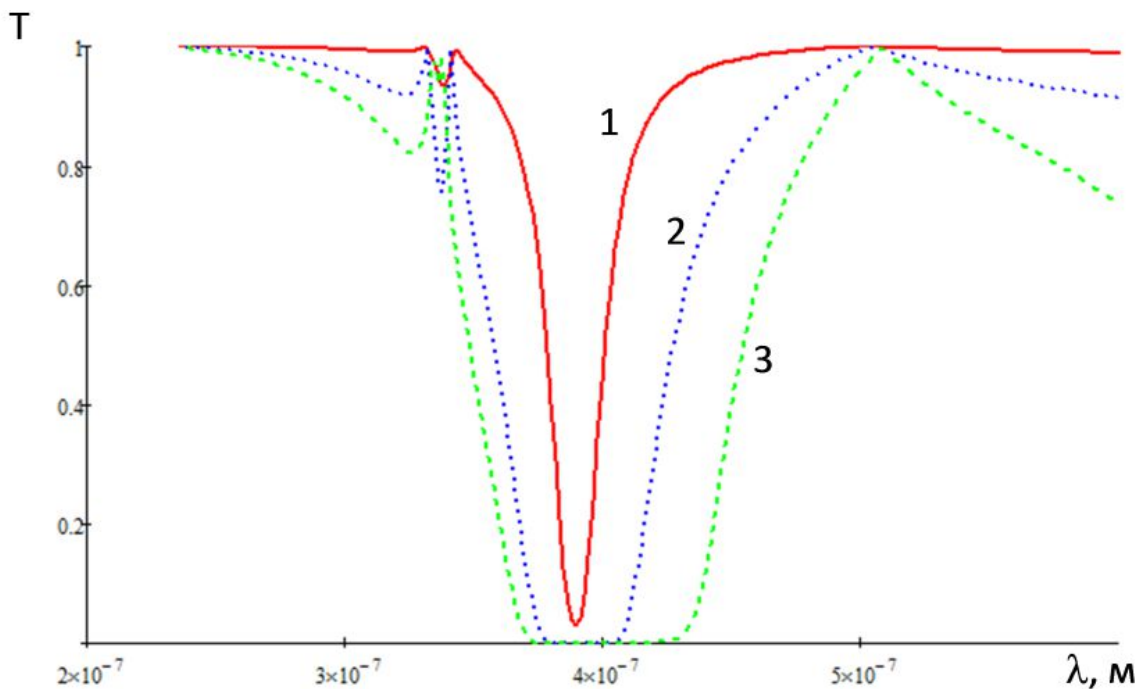


Рис. 3. График зависимости коэффициента прохождения через композитную среду от длины волны. Толщина композитной среды $d = 1$ мкм, концентрация наночастиц $N=1 \cdot 10^{23}$ м⁻³, радиус оболочки $R_2 = 14$ нм. Кривая 1: $R_1/R_2 = 0,1$, кривая 2: $R_1/R_2 = 0,2$, кривая 3: $R_1/R_2 = 0,25$

Выводы

В работе рассмотрены свойства наночастиц сферической формы, состоящих из диэлектрического ядра и металлической оболочки. Проведено исследование поляризуемости наночастиц с оболочкой из металла. Рассчитаны параметры композитной среды, содержащей рассматриваемые наночастицы с оболочкой. Показано, что наличие двух плазмонных резонансов на границах раздела ядро-оболочка и оболочка-окружающая среда приводит к появлению двух максимумов на зависимости эффективной диэлектрической проницаемости композитной среды от длины волны, положение которых зависит от геометрических размеров наночастиц. Проведенные расчеты коэффициента прохождения через композитную среду показывают возможность ее использования в качестве полосового фильтра, полосой задержки которого можно эффективно управлять, меняя радиусы ядра и оболочки наночастиц.

Список литературы

1. Головкина М.В. Особенности распространения электромагнитных волн в волноводной структуре со сверхпроводящей пленкой и метаматериалом // Известия Российской академии наук. Серия физическая. –2010. – Т. 74. – № 12. – С. 1739-1743.
2. Головкина М.В. Магнитные свойства композита со сверхпроводящими включениями // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. –2010. – Т. 3. – № 104. – С. 105-109.
3. Кучеренко М. Г. Динамическая поляризуемость наношара в случае вырожденного электронного газа и ее роль в плазмонном механизме передачи энергии / М. Г. Кучеренко // Вестник ОГУ. – 2012. – №1. – С. 141-149.
4. Кучеренко, М. Г. Влияние шаровых наноразмерных металлокомпозитов на скорость безызлучательной передачи энергии между молекулами / М. Г. Кучеренко // Матер.Всеросс. научно-метод. конфер. "Университетский комплекс как регион.центр образования, науки и культуры". Сек. 8. Вопросы фундам. и прикл. физики. Оренбург: ОГУ, – 2012. – С. 926-933.
5. Сидоров А.И. Двойной плазмонный резонанс в сферических наноструктурах металл–диэлектрик–металл // Журнал технической физики, – 2006. – Т. 76. – Вып. 4. – С.86-90.
6. Кашкаров П.К. Оптика твердого тела и низкоразмерных структур / П.К. Кашкаров, В.Ю. Тимошенко. – Москва: Пульс, – 2008. – 292 с.