



DOI: <https://doi.org/10.15688/NBIT.jvolsu.2019.2.7>

УДК 537.87.001

ББК 22.374

ПОЛЯРИТОНЫ В НАНОКОМПОЗИТАХ ТИПА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ НАНОЧАСТИЦЫ – ДИЭЛЕКТРИК

Валерий Васильевич Яцышен

Доктор технических наук,
профессор кафедры судебной экспертизы и физического материаловедения,
Волгоградский государственный университет
rgiorgi@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Ирина Игоревна Потапова

Магистрант кафедры судебной экспертизы и физического материаловедения,
Волгоградский государственный университет
rgiorgi@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Вячеслав Викторович Шипаев

Магистрант кафедры судебной экспертизы и физического материаловедения,
Волгоградский государственный университет
rgiorgi@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. В работе были изучены основные характеристики поверхностных поляритонов в наноматериалах. Были рассмотрены композитные среды типа: наночастицы благородных металлов, распределенные случайным образом в прозрачной матрице диэлектрика. Построены дисперсионные кривые для поляритонов в таких нанокompозитах. Рассчитаны оптические параметры поверхностного поляритона при нескольких значениях радиуса наночастиц металла и параметра заполнения нанокompозита. Также расчеты комплексного показателя преломления были сделаны для поляритонов в композитах с наночастицами из различных металлов. Кроме того найдены зависимости действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления нанокompозита от нормированной частоты для пленок с разными толщинами. Были рассчитаны действительные и мнимые части диэлектрической проницаемости для поляритонов в нескольких металлах. Помимо этого выполнен обзор важных этапов в изучении поверхностных электромагнитных волн. Показано, что варьирование материалами структуры, размером и концентрацией наночастиц открывает широкие возможности для управления оптическими свойствами композитных сред и практического их применения.

Ключевые слова: поверхностный поляритон, показатель преломления, благородные металлы, диэлектрическая проницаемость, наночастица, нанокompозит.

Введение

Изучение поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ) начал А. Зоммерфельдом в 1899 г., описав случай распространения волны вдоль цилиндрического проводника [8]. Математическое описание ПЭВ получили в 1907 г. благодаря работе И. Ценнека по объяснению дальней радиосвязи [3]. Экспериментальное проявление поверхностных электромагнитных волн на границе металла обнаружено Робертом Вудом в 1912 г. в виде решеточных аномалий Вуда, их интерпретация в терминах поверхностных плазмонных поляритонов дана У. Фано (1941) [12]. Впервые выражение для спектра поляритона получили К.Б. Толпыго [10] в 1950 г. и К. Хуанг [13] в 1951 г. в рамках классической теории для двухатомного кубического кристалла в фононной области спектра.

Поверхностные поляритоны (ПП) (англ. *surface polariton*) – это поверхностные электромагнитные волны, распространяющиеся вдоль границы раздела двух разнородных сред и существующие одновременно в них обеих [5; 14].

Согласно представлению макроскопической теории «...при взаимодействии электромагнитной волны с возбуждениями среды возникают связанные волны – поляритонные волны, энергия которых частично состоит из электромагнитной и частично из энергии собственных возбуждений среды» [4].

При удалении от границы двух сред интенсивность таких волн значительно убывает, для линейных сред экспоненциально. На плоской границе раздела сред с одинаковыми физическими свойствами ПП может существовать только при условии, что хотя бы одна из этих сред обладает областью отрицательных значений диэлектрической или магнитной проницаемости (ДП и МП) [1].

Возможность эффективного возбуждения ПЭВ на реальных поверхностях (металлах, полупроводниках, диэлектриках) и влияние ПЭВ на многие фотофизические процессы, протекающие на поверхности исследуемых материалов объясняет важность теоретических и экспериментальных исследований поверхностных поляритонов и их основных характеристик [9].

Среди таких процессов рассеяние света адсорбированными на поверхности частица-

ми, генерация второй гармоники при отражении лазерного излучения от металла, изменение поглощения, фотохимические реакции, а также физико-химические процессы, сопровождающие действие на поверхность интенсивного лазерного излучения, в первую очередь образование поверхностных периодических структур [5].

На базе структур, где возможно возбуждение ПП (плазмонных структур), можно создать оптические устройства и сенсоры, которые будут обладать высокой чувствительностью и компактными размерами [12]. Это имеет большое практическое значение для разработок во многих областях. Например, таких как нелинейная оптика, оптическая спектроскопия, микроскопия высокого разрешения и других [9].

Значительный интерес вызывают металл-диэлектрические структуры, в которых возможно возбуждение ПП. В этих структурах концентрация энергии электромагнитного поля (ЭМП) высока вблизи металлической границы [10]. В настоящее время разработки современной науки в области нанотехнологий предоставляют возможность создавать нанокompозитные среды с включениями различной формы, размера, концентрации, а также состоящие из различных материалов [2].

Композитные среды с наночастицами благородных металлов представляют большой практический интерес при разработке широкого спектра оптических устройств. Линеинные и нелинейные оптические свойства таких сред определяются плазмонным резонансом металлических наночастиц и свойствами прозрачной матрицы. Возникновение резонанса диэлектрической проницаемости в нанокompозите, состоящем из металлических наночастиц, взвешенных в прозрачной матрице. Причем положение резонанса зависит как от диэлектрической проницаемости исходных материалов, так и от концентрации наночастиц. Представляет большой интерес, как с прикладной, так и с фундаментальной точки зрения, использование таких нанокompозитов в качестве материалов фотонных кристаллов.

Расчеты

Рассмотрим задачу: наночастицы распределены в матрице случайным образом, но

однородно. Будем считать, что наночастицы имеют форму шара, с радиусом в пределах нескольких нанометров, что значительно меньше длины волны и глубины проникновения поля в материал. Диэлектрическую проницаемость металла, из которого изготовлены наночастицы, найдем, используя приближение Друде, в следующем виде:

$$\epsilon_m(\omega) = \epsilon_0 - \frac{1}{y * (y + i * G)}, \quad (1)$$

где ϵ_0 – постоянная; ω_p – плазменная частота; g_m – релаксационная постоянная; $y = \frac{\omega}{\omega_p}$ – нормированная частота; $G = \frac{g_m}{\omega_p}$ – нормированное затухание.

Для определенности, в качестве металла мы будем использовать серебро и золото. В дальнейших расчетах используются результаты исследования оптических постоянных

тонких пленок благородных металлов [6] 1972 г., данные из более новой статьи [11], в которой освещаются результаты измерений комплексной диэлектрической проницаемости металлических пленок различной толщины.

Величины, используемые в формуле 1 для серебра по данным работы [3]:

$$\epsilon_0 = 5, \omega_p = 9\text{эВ}, g_m = 0,02\text{эВ}.$$

На рисунке 1 представлены зависимости $\text{Re}\epsilon_m(\omega)$ и $\text{Im}\epsilon_m(\omega)$ действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости наночастиц серебра $\epsilon_m(\omega)$.

Найдем диэлектрическую проницаемость нанокompозита $\epsilon_{\text{mix}}(\omega)$ в следующем виде:

$$\epsilon_{\text{mix}}(\omega) = \frac{\epsilon_d * (1 + 2 * x)}{1 - x} \quad (2)$$

На рисунке 2 представлены зависимости $\text{Re}\epsilon_{\text{mix}}(\omega)$ и $\text{Im}\epsilon_{\text{mix}}(\omega)$, при $\epsilon_d = 2,56$,

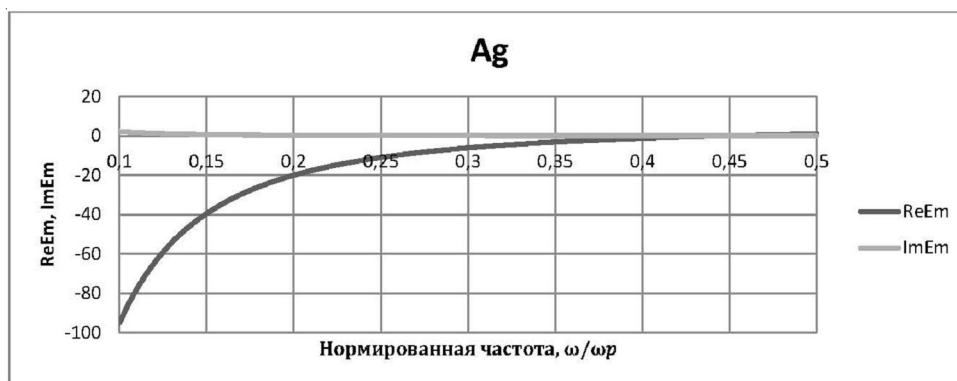
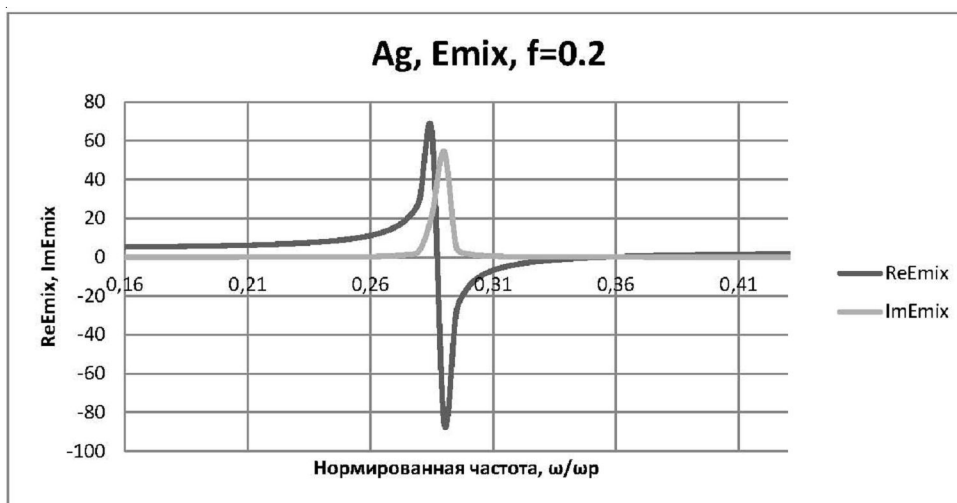


Рис. 1. Функции $\text{Re}\epsilon_m(\omega)$ и $\text{Im}\epsilon_m(\omega)$ для серебряных наночастиц



а)

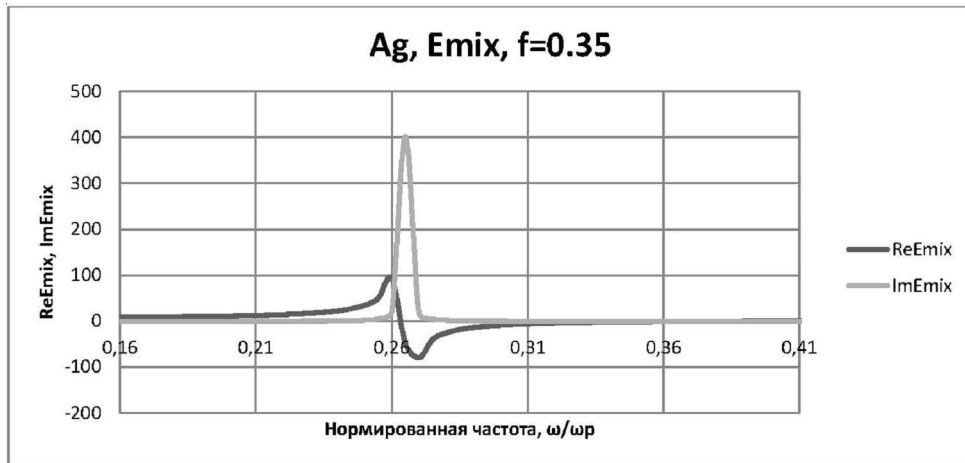
Рис. 2. Функции $\text{Re}\epsilon_m(\omega)$ и $\text{Im}\epsilon_m(\omega)$ для серебряных наночастиц, взвешенных в прозрачной матрице:

а) при $f = 0,2, \epsilon_d = 2,56$

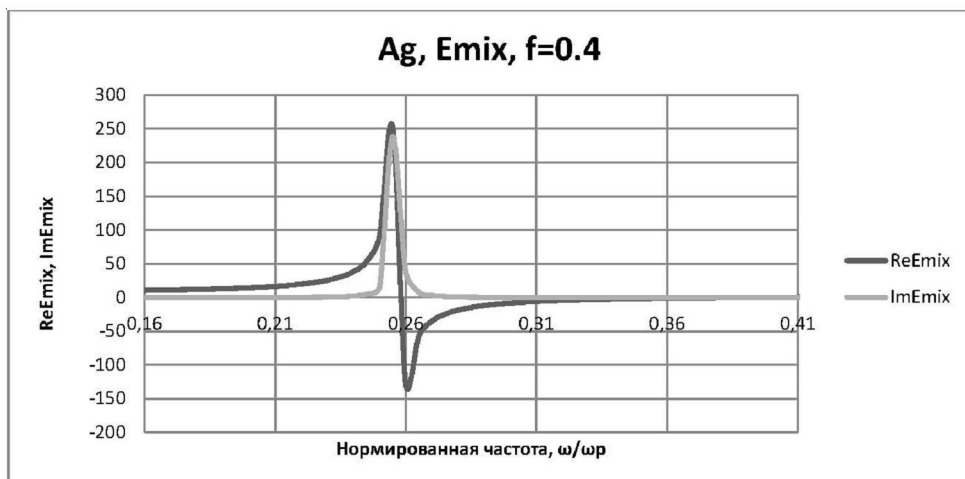
$f = 0,2, f = 0,35, f = 0,4, f = 0,5$. Кривые на рисунке 2, как видно, имеют резонансный характер. Найдем точки, в которых $\epsilon_{\text{mix}}(\omega)$ превращается в ноль, пренебрегая малым g_m .

$$\omega_{10} = \omega_p \sqrt{\frac{1-f}{\epsilon_0 + 2*\epsilon_d - f*(\epsilon_0 - \epsilon_d)}} \quad (3)$$

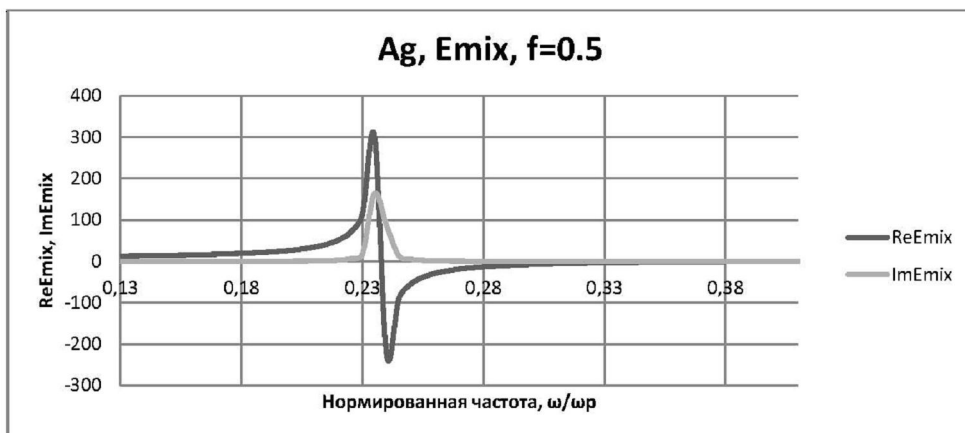
$$\omega_{20} = \omega_p \sqrt{1 + \frac{\epsilon_0 * (\epsilon_0 + 2*\epsilon_d - f*(\epsilon_0 - \epsilon_d))}{\epsilon_d * (\epsilon_0 + 2*\epsilon_d + 2*f*(\epsilon_0 - \epsilon_d))}} \quad (4)$$



б)



б)



з)

Рис. 2. Окончание:

б) при $f = 0,35, \epsilon_d = 2,56$; в) при $f = 0,4, \epsilon_d = 2,56$; з) при $f = 0,5, \epsilon_d = 2,56$

$$\frac{\omega_{10}}{\omega_p} = 0,288 \text{ и } \frac{\omega_{20}}{\omega_p} = 0,355, \text{ при } f = 0,2, \epsilon_d = 2,56;$$

$$\frac{\omega_{10}}{\omega_p} = 0,265 \text{ и } \frac{\omega_{20}}{\omega_p} = 0,379, \text{ при } f = 0,35, \epsilon_d = 2,56;$$

$$\frac{\omega_{10}}{\omega_p} = 0,256 \text{ и } \frac{\omega_{20}}{\omega_p} = 0,386, \text{ при } f = 0,4, \epsilon_d = 2,56;$$

$$\frac{\omega_{10}}{\omega_p} = 0,237 \text{ и } \frac{\omega_{20}}{\omega_p} = 0,399, \text{ при } f = 0,5, \epsilon_d = 2,56.$$

В отличие от работы [7], в нашем случае максимальные значения $\text{Re}\epsilon_{\text{mix}}(\omega)_{\text{max}} = 64,95912$, $\text{Im}\epsilon_{\text{mix}}(\omega)_{\text{max}} = 54,47379$ при $f = 0,2$, $\epsilon_d = 2,56$, что меньше тех же показателей в ранее указанной работе.

В области частот $\omega_{10} > \omega > \omega_{20}$ наблюдается отрицательная действительная часть диэлек-

трической проницаемости (ДП) нанокompозита. В этих частотах вдоль границы раздела возможно распространение поверхностных волн – поверхностных поляритонов. Следовательно, нанокompозит подобен металлу в этой области.

Далее найдены дисперсионные зависимости для действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости композитной среды, представленной в виде наночастиц серебра, распределенные случайно, но однородно в матрице диэлектрика (рис. 3, 4).

На рисунке 5 представлены зависимости $\epsilon_1(\lambda)$ и $\epsilon_2(\lambda)$ действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости наночастиц золота $\epsilon_m(\lambda)$ на основе данных из работы [6]. Толщина пленки металла в

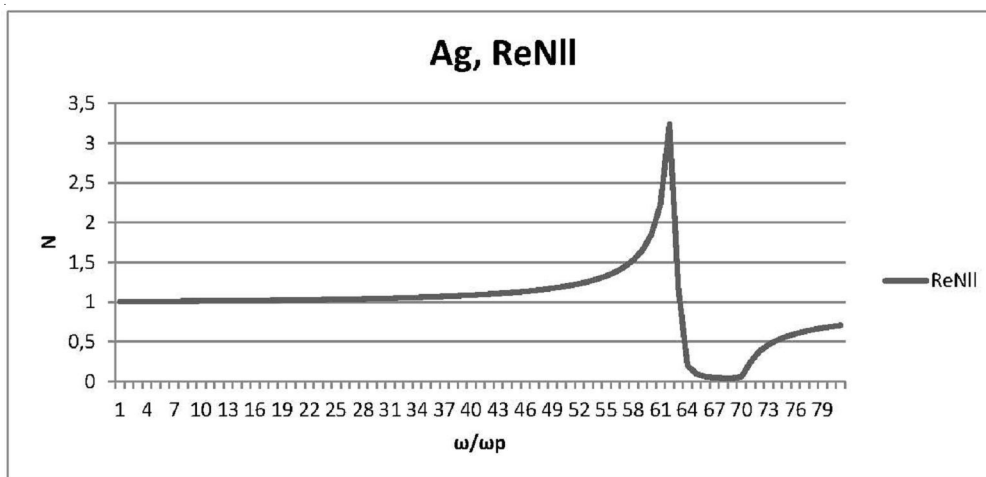


Рис. 3. Дисперсионная кривая для действительной части диэлектрической проницаемости нанокompозита: наночастицы серебра, распределенные случайным образом в прозрачной матрице

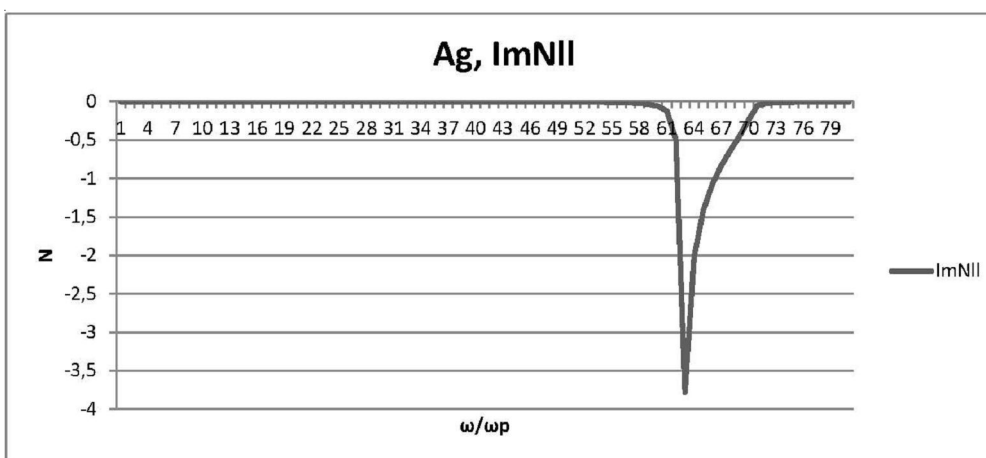


Рис. 4. Дисперсионная кривая для мнимой части диэлектрической проницаемости нанокompозита: наночастицы серебра, распределенные случайным образом в прозрачной матрице

этом исследовании равна от 18,5 до 50 нм с погрешностью измерений в 0,2 нм.

На рисунке 6, 7 представлены зависимости $\epsilon_1(\lambda)$ и $\epsilon_2(\lambda)$ действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости наночастиц золота $\epsilon_m(\lambda)$ на основе данных из работы [11]. Толщина пленок в этом исследовании равна 25 нм, 53 нм и 117 нм.

Затем, для того, чтобы найти диэлектрическую проницаемость нанокompозита $\epsilon_{mix}(\omega)$ используем формулу Максвелла-Гарнета [15]:

$$\frac{\epsilon_{mix}(\omega) - \epsilon_d}{\epsilon_{mix}(\omega) + 2\epsilon_d} = f \frac{\epsilon_m(\omega) - \epsilon_d}{\epsilon_m(\omega) + 2\epsilon_d} \quad (5)$$

где ω – частота излучения; f – относительный объем занимаемый наночастицами; ϵ_d – диэлектрическая постоянная матрицы, в которую погружаются наночастицы ($\epsilon_d = 2,56$), $\epsilon_m(\omega)$ – диэлектрическая проницаемость металла, из которого изготовлены наночастицы.

Подставим (1) в (5) и найдем $\epsilon_{mix}(\omega)$ в следующем виде:

$$\epsilon_{mix}(\omega) = \frac{\epsilon_d(1+2x)}{1-x}, \quad (6)$$

где
$$x = \frac{f(\epsilon_m - \epsilon_d)}{\epsilon_m + 2\epsilon_d}. \quad (7)$$

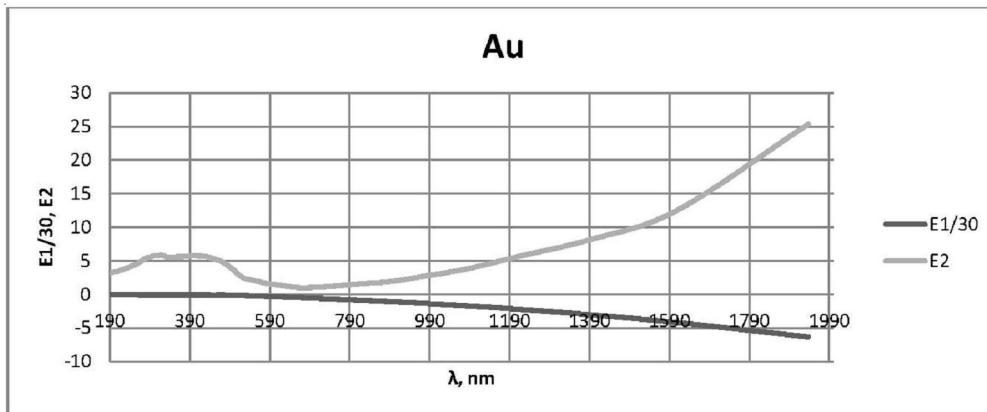
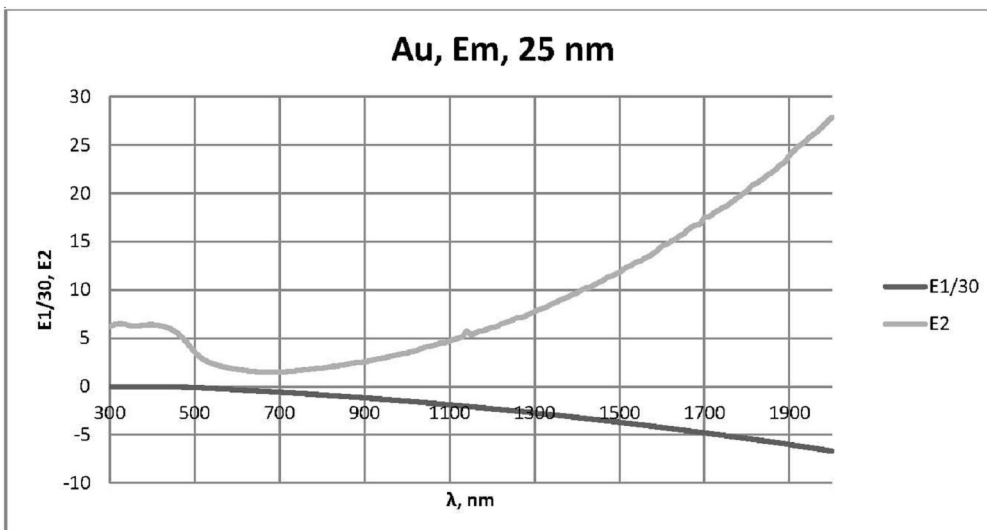


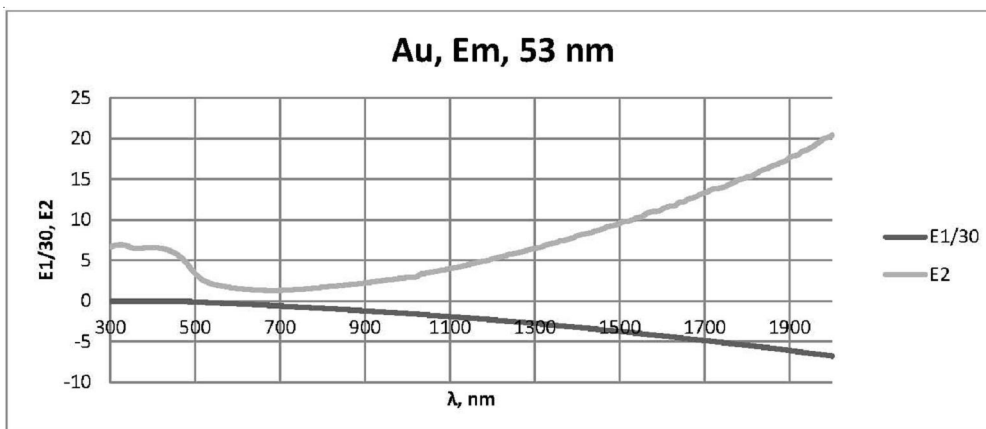
Рис. 5. Зависимости $\epsilon_1(\lambda)$ и $\epsilon_2(\lambda)$ действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости наночастиц золота $\epsilon_m(\lambda)$



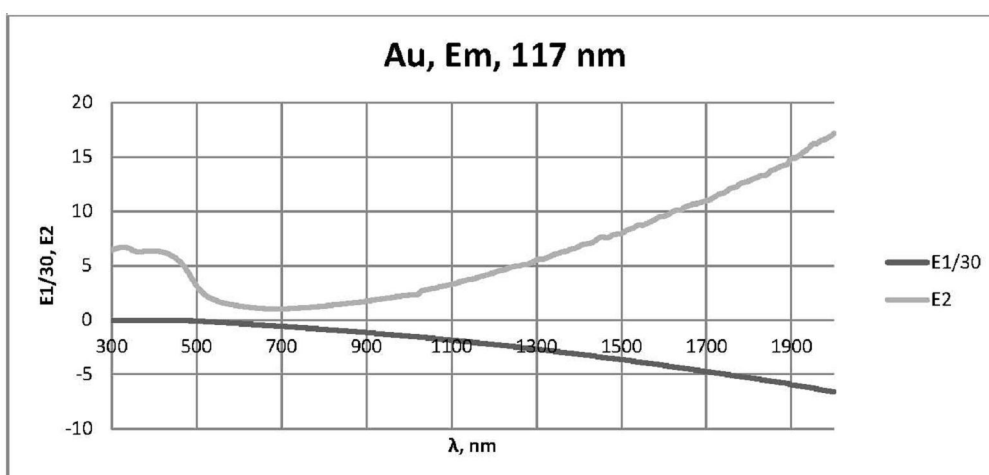
a)

Рис. 6. Зависимости $\epsilon_1(\lambda)$ и $\epsilon_2(\lambda)$ действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости наночастиц золота $\epsilon_m(\lambda)$ для пленок толщиной:

a) 25 нм



б)



в)

Рис. 6. Окончание:
б) 53 нм; в) 117 нм

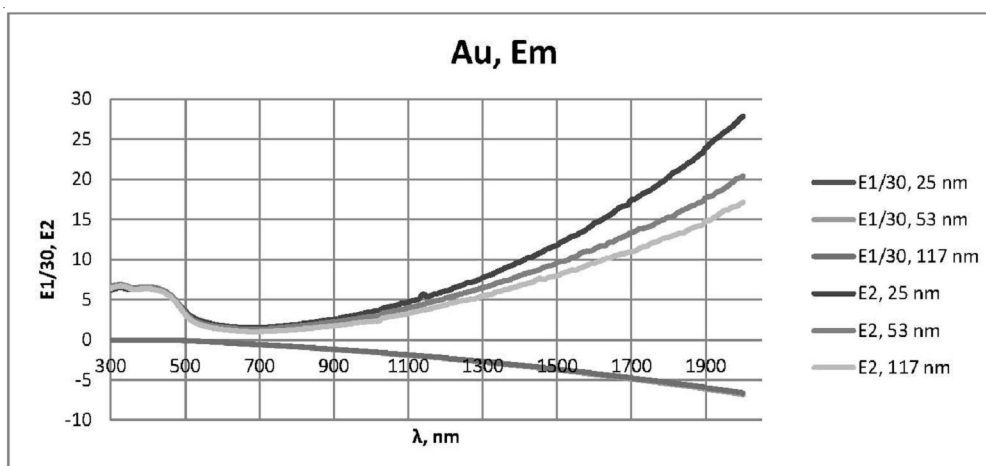
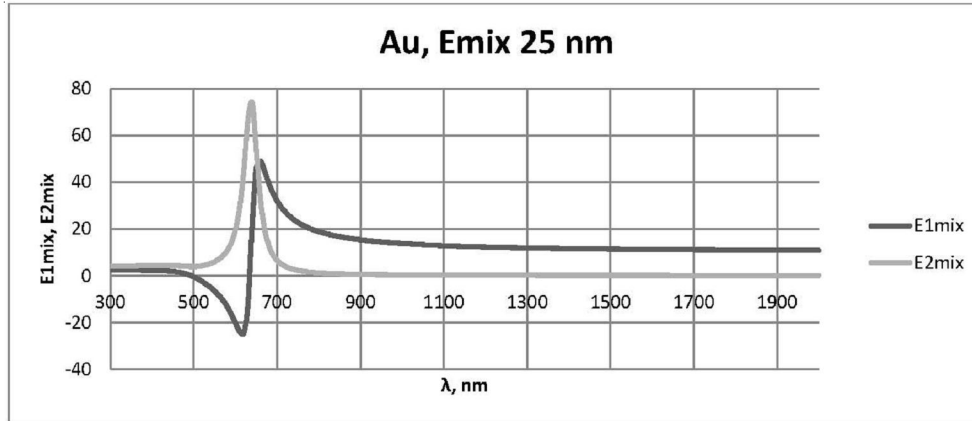


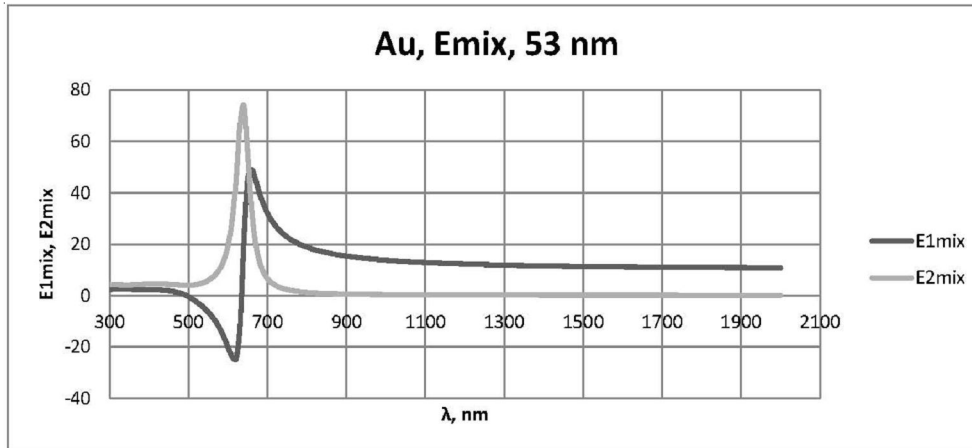
Рис. 7. Зависимости $\epsilon_1(\lambda)$ и $\epsilon_2(\lambda)$ действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости наночастиц золота $\epsilon_m(\lambda)$ для пленок с толщинами 25 нм, 53 нм и 117 нм

Зависимости $\epsilon_{1mix}(\lambda)$ и $\epsilon_{2mix}(\lambda)$ действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости нанокomp-

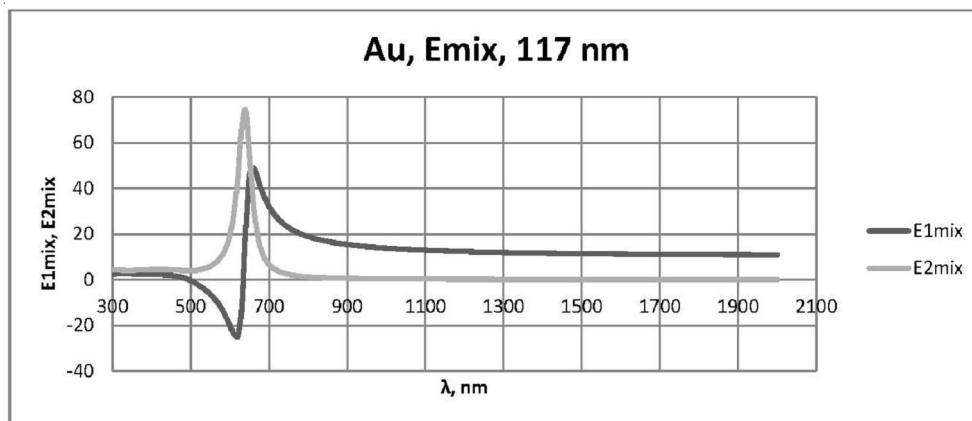
зита с частицами золота $\epsilon_{mix}(\lambda)$ для пленок различной толщины показаны на рисунке 8.



a)



б)



в)

Рис. 8. Зависимости $\epsilon_{1mix}(\lambda)$ и $\epsilon_{2mix}(\lambda)$ действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости нанокompзита с частицами золота $\epsilon_{mix}(\lambda)$ для пленок толщиной:

a) 25 нм; б) 53 нм; в) 117 нм, при $\epsilon_d = 2,56$, $f = 0,5$

Кривые на рисунке 9, как видно, имеют резонансный характер (вид кривых аналогичен случаю ионного материала).

Функция $\epsilon_{mix}(\omega)$ в интервале $[\omega_{10}, \omega_{20}]$ отрицательна. Следовательно, нанокompозит подобен металлу в этой области. В области частот $\omega_{10} > \omega > \omega_{20}$ наблюдается отрицательная действительная часть ДП нанокompозита. В этих частотах вдоль границы раздела возможно распространение поверхностных волн – поверхностных поляритонов. Варьирование материалами структуры, размером и концентрацией наночастиц открывает широкие возможности для управления оптическими свойствами нанокompозитной среды (НКС) и практического их применения.

Дисперсионное уравнение для поверхностного поляритона на границе нанокompозит-воздух в случае s-поляризации будет иметь вид:

$$k_s = k_0 n_s \quad (8)$$

$$k_0 = \omega / c_0 \quad (9)$$

Показатель преломления нанокompозита в случае s-поляризации.

$$n_s = \sqrt{\frac{\epsilon_{mix}(\omega)\epsilon_0}{\epsilon_{mix}(\omega) + \epsilon_0}} \quad (10)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость воздуха ($\epsilon_0 = 1$).

На рисунке 10 представлены графики зависимости n_{s1} и n_{s2} действительной и мнимой частей комплексного показателя прелом-

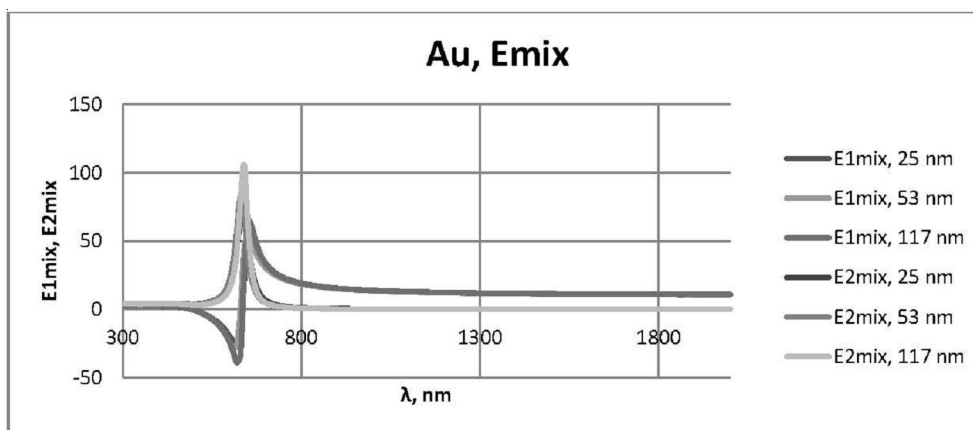
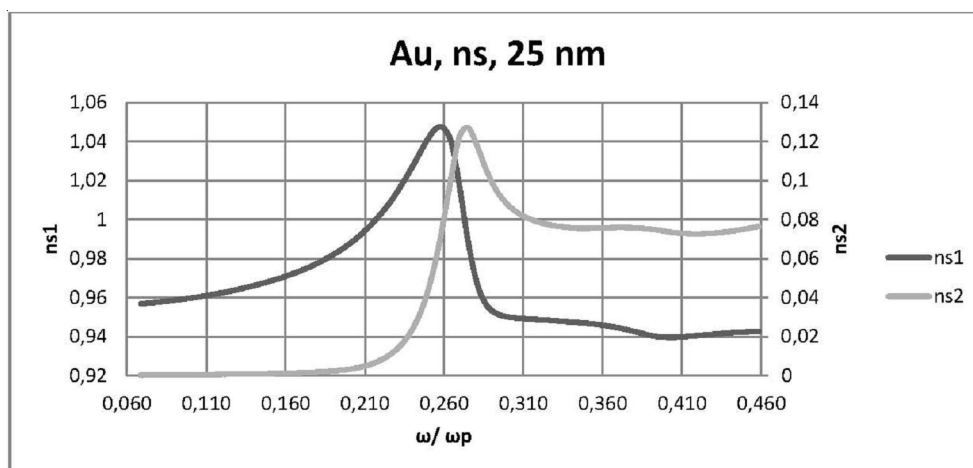


Рис. 9. Зависимости $\epsilon_{1mix}(\lambda)$ и $\epsilon_{2mix}(\lambda)$ действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости нанокompозита с частицами золота $\epsilon_{mix}(\lambda)$ для пленок с толщинами 25 нм, 53 нм, 117 нм, при $\epsilon_d = 2,56$, $f = 0,5$



a)

Рис. 10. Зависимости n_{s1} и n_{s2} действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления нанокompозита n от нормированной частоты ω/ω_p в случае s-поляризации для пленок толщиной:

a) 25 нм;

ления нанокompозита соответственно от нормированной частоты ω/ω_p , для случая s -поляризации при $\epsilon_d = 2,56$, $f = 0,5$.

Таким образом, как можно видеть из графиков на рисунках 10–18, варьирование параметрами структуры, размером и концентрацией наночастиц открывает широкие возможности для изменения показателя преломления нанокompозитных сред и практического их применения.

Используя формулу 8 для дисперсионного уравнения для поверхностного поляритона на границе нанокompозит-воздух получим следующие результаты.

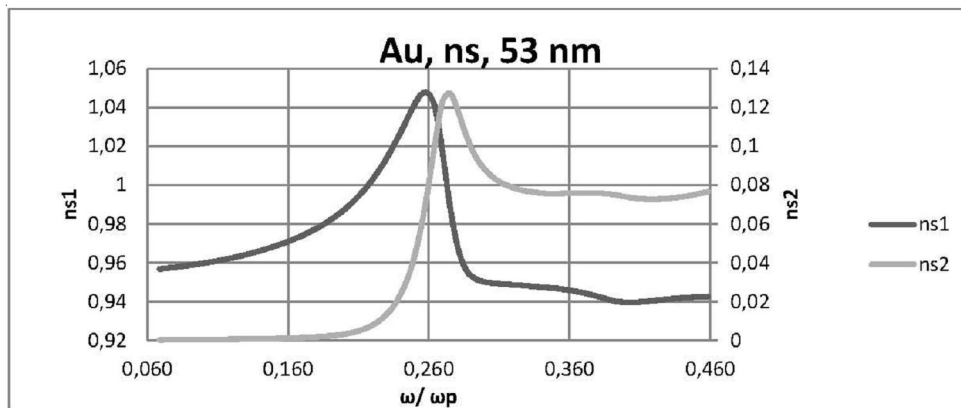
Выводы

В работе были изучены объемные и поверхностные поляритоны в наноматериалах. Поляритонные модели позволяют описать динамику генерации и распространения линейных и нелинейных волн в различных средах в широком частотном диапазоне. На основе

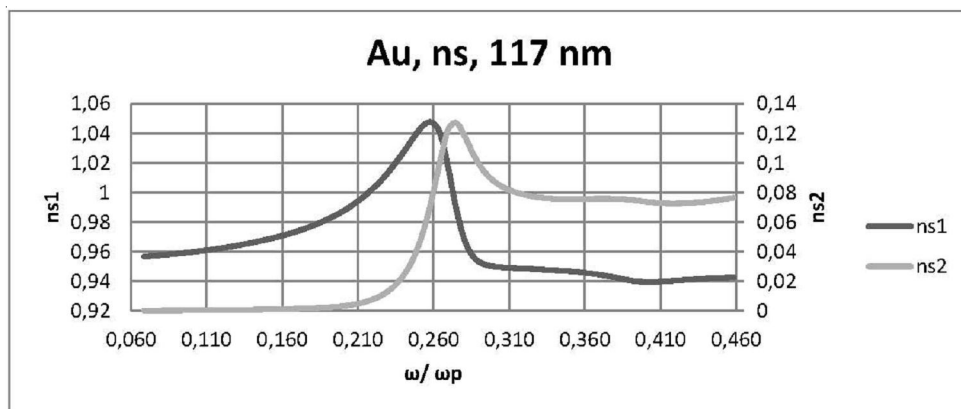
поляритонных моделей удастся наиболее полно описать физические механизмы взаимодействия электромагнитного излучения со средой.

Изучение поверхностных поляритонов и их основных характеристик на сегодняшний день представляют важную задачу для создания оптических устройств и сенсоров, которые будут обладать высокой чувствительностью и компактными размерами, для создания оптических линий передачи данных с наноразмерными устройствами генерации и для управления излучением.

Были рассчитаны действительные и мнимые части диэлектрической проницаемости для поляритонов в нанокompозите. Найдены значения показателя преломления композитного наноматериала при различных концентрациях металлических наночастиц в матрице диэлектрика. Кроме того построены дисперсионные кривые для нахождения поляритонов в нанокompозитах типа: наночастицы благородных металлов, распределенные случайным образом в прозрачной матрице.



б)



в)

Рис. 10. Окончание:

б) 53 нм; в) 117 нм, при $\epsilon_d = 2,56$, $f = 0,5$

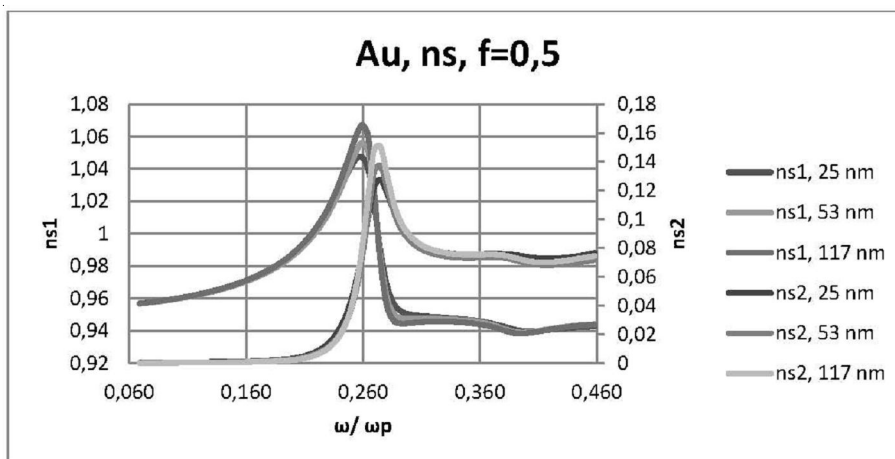


Рис. 11. Зависимости n_{s1} и n_{s2} действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления нанокompозита n от нормированной частоты ω/ω_p в случае s -поляризации для пленок толщинами 25 нм, 53 нм, 117 нм, при $\epsilon_d = 2,56$, $f = 0,5$

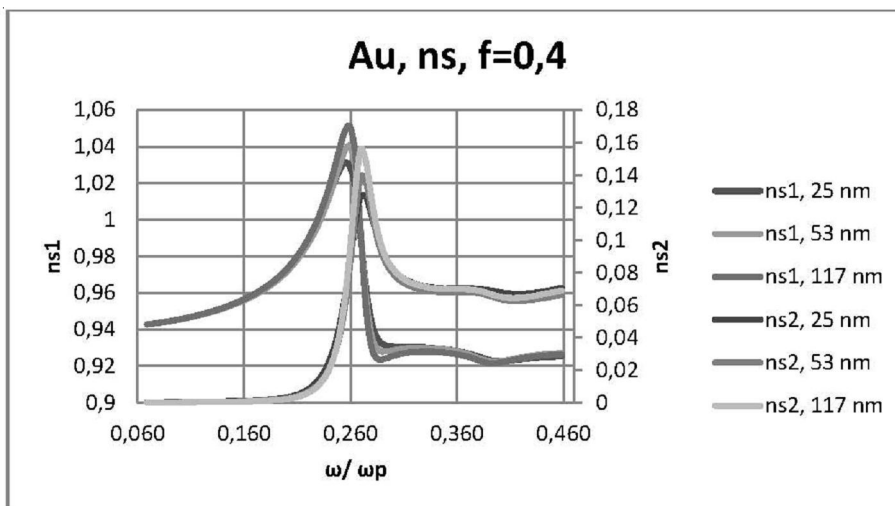


Рис. 12. Зависимости n_{s1} и n_{s2} действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления нанокompозита n от нормированной частоты ω/ω_p в случае s -поляризации для пленок толщинами 25 нм, 53 нм, 117 нм, при $\epsilon_d = 2,56$, $f = 0,4$

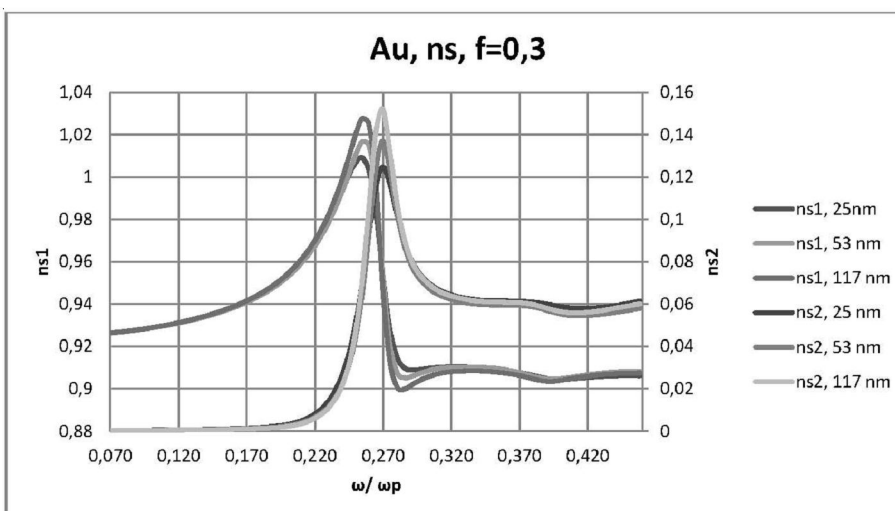


Рис. 13. Зависимости n_{s1} и n_{s2} действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления нанокompозита n от нормированной частоты ω/ω_p в случае s -поляризации для пленок толщинами 25 нм, 53 нм, 117 нм, при $\epsilon_d = 2,56$, $f = 0,3$

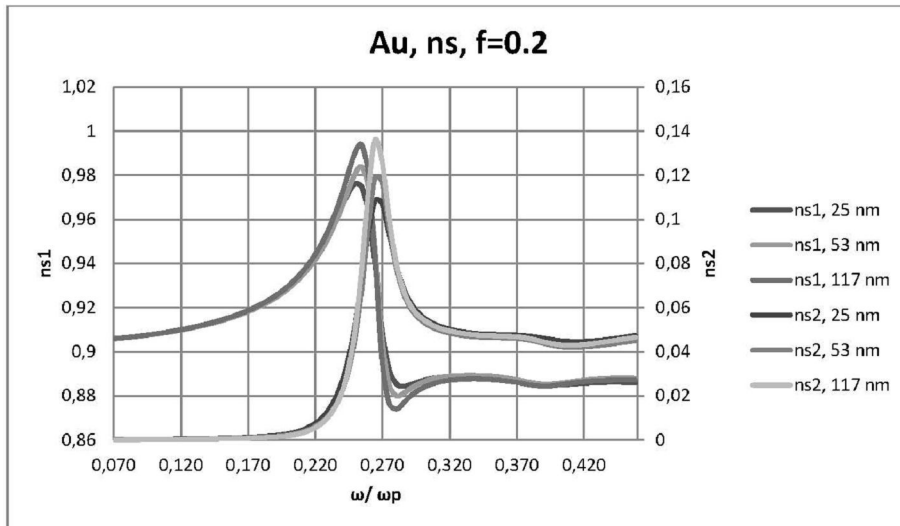


Рис. 14. Зависимости n_{s1} и n_{s2} действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления нанокompозита n от нормированной частоты ω/ω_p в случае s -поляризации для пленок толщинами 25 нм, 53 нм, 117 нм, при $\epsilon_d = 2,56$, $f = 0,2$

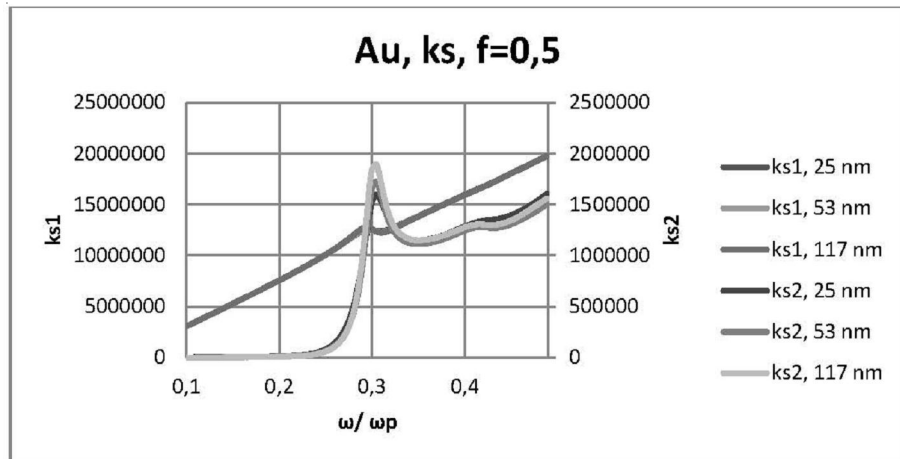


Рис. 15. Дисперсионные кривые для действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости нанокompозита: наночастицы золота, распределенные случайным образом в прозрачной матрице для пленок толщинами 25 нм, 53 нм, 117 нм, при $\epsilon_d = 2,56$, $f = 0,5$

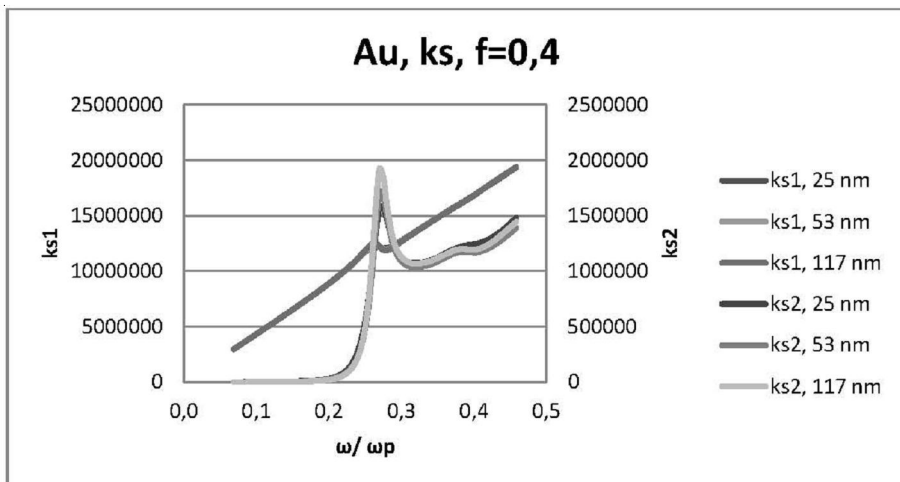


Рис. 16. Дисперсионные кривые для действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости нанокompозита: наночастицы золота, распределенные случайным образом в прозрачной матрице для пленок толщинами 25 нм, 53 нм, 117 нм, при $\epsilon_d = 2,56$, $f = 0,4$

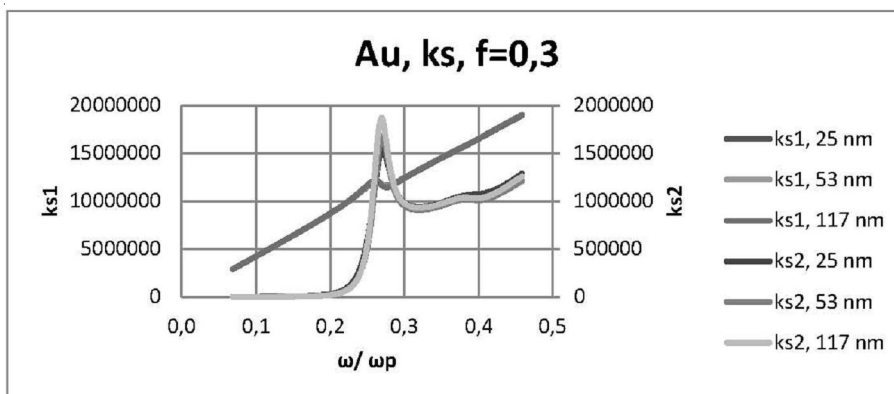


Рис. 17. Дисперсионные кривые для действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости нанокompозита: наночастицы золота, распределенные случайным образом в прозрачной матрице для пленок толщинами 25 нм, 53 нм, 117 нм, при $\epsilon_d = 2,56$, $f = 0,3$

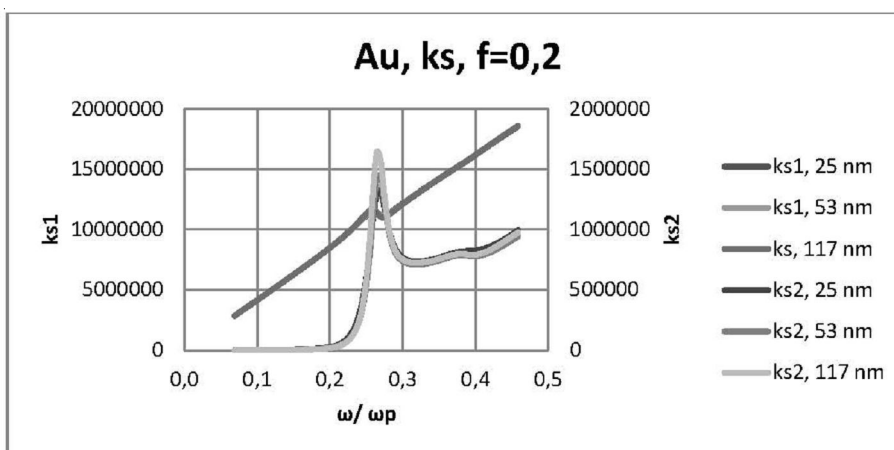


Рис. 18. Дисперсионные кривые для действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости нанокompозита: наночастицы золота, распределенные случайным образом в прозрачной матрице для пленок толщинами 25 нм, 53 нм, 117 нм, при $\epsilon_d = 2,56$, $f = 0,2$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамова, А. В. Поверхностные плазмон-поляритоны на границе «металл – диэлектрик» в структурах на основе ниобата лития / А. В. Абрамова, А. Д. Безпальный, А. Н. Тимофеев. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа : https://storage.tusur.ru/files/8888%D0%A1%D0%92%D0%A7%D0%B8%D0%9A%D0%A01301_%D0%91%D0%B5%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%BB%D1%8B%D0%B9,%20%D0%90%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D0%B0,%20%D0%A2%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D1%84%D0%B5%D0%B5%D0%B2.pdf. – Загл. с экрана.

2. Агранович, В. М. Поверхностные поляритоны и волны Брюстера в спектрах экситонной люминесценции / В. М. Агранович, Т. А. Лескова // Письма в ЖЭТФ : сбор. науч. тр. – Институт спек-

троскопии академии наук СССР, 1979. – Т. 29. – Вып. 2. – С. 151–153.

3. Бабичева, В. Е. Поверхностные плазмон-поляритоны в периодических наноструктурах : автореф. ... дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук (01.04.02) / Бабичева Виктория Евгеньевна. – Московский физ.-техн. ин-т (гос. ун-т). – Долгопрудный, 2012.

4. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – СПб. : Москва, 1973. – С. 74–78.

5. Горелик, В. С. Унитарные поляритоны в однородных средах и фотонных кристаллах / В. С. Горелик, В. В. Филатов // Инженерный журнал: наука и инновации, 2013. – Вып. 8. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/fundamentals/physics/907.html>. – Загл. с экрана.

6. Дьяченко, П. Н. Одномерный фотонный кристалл на основе нанокompозита: металличес-

кие наночастицы – диэлектрик / П. Н. Дьяченко, Ю. В. Микляев. – Компьютерная оптика, 2007. – Т. 31, № 1. – С. 31–34.

7. Евсеев, Д. А. Поверхностные плазмон-поляритоны на границе диэлектрика и анизотропного нанокompозита / Д. А. Евсеев, Д. Г. Санников, Д. И. Семенов. – Радиотехника и Электроника, 2015, Т. 60, № 2. – С. 165–172.

8. Либенсон, М. Н. Поверхностные электромагнитные волны оптического диапазона / М. Н. Либенсон // Соросский образов. журн. – 1996. – № 1. – С. 92–98.

9. Названов, В. Ф. Поверхностные электромагнитные волны оптического диапазона (плазмон-поляритоны): свойства, применение / В. Ф. Названов // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. – 2015. – Т. 15. – № 1. – С. 5–14.

10. Толпыго, К. Б. Физические свойства решетки типа каменной соли, построенной из деформируемых ионов / К. Б. Толпыго // ЖЭТФ. – 1950. – Т. 20, вып. 6. – С. 497–509.

11. Abeles F., Borensztein Y., Lopez-Rios T. Adv. Solid State Phys. / Ed. P. Grosse. Springer Berlin Heidelberg 24, 93 (1984). pp. 93-117.

12. Fano, U. Atomic theory of electromagnetic interaction in dense materials / U. Fano // Phys. Rev. – 1956. – V. 103. – No. 5. – P. 1202–1218.

13. Huang, K. On the interaction between the radiation field and ionic crystals / K. Huang // Proc. Roy. Soc. – 1951. – V. a 208. – P. 352–365.

14. Johnson, P. B. Optical constant of the noble metals / P. B. Johnson, R. W. Christy // Phys. Rev. B, 1972. – V. 6. – P. 4370–4379.

15. Optical constants and structural properties of thin gold films / D. I. Yakubovsky, A. V. Arsenin, Y. V. Stebunov, D. Yu. Fedyanin, V. S. Volkov. – OPTICSEXRESS, 2017. – Vol. 25, No. 21. – P. 25574–25587.

REFERENCES

1. Abramova A.V. *Poverkhnostnye plazmon-polyaritonny na granitse «metall – dielektrik» v strukturakh na osnove niobata litiya* [Surface Plasmon Polaritons at the Metal – Dielectric Boundary in Lithium Niobate-Based Structures]. URL: https://storage.tusur.ru/files8888%D0%A1%D0%92%D0%A7%D0%B8%D0%9A%D0%A01301_%D0%91%D0%B5%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%BB%D1%8B%D0%B9,%20%D0%90%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D0%B0,%20%D0%A2%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D1%84%D0%B5%D0%B5%D0%B2.pdf.

2. Agranovich V.M., Leskova T.A. *Poverkhnostnye polyaritonny i volny Bryustera v spektrakh eksitonnoy lyuminesentsii* [Surface Polaritons and Wave Brewster in the Spectra of Exciton Luminescence]. *Pisma v ZhETF: sbor. nauch. tr.* [Writing to the Journal of Experimental

and Theoretical Physics. Collection of Scientific Works], 1979, vol. 29, iss. 2, pp. 151-153.

3. Babicheva V.E. *Poverkhnostnye plazmon-polyaritonny v periodicheskikh nanostrukturakh : avtoref. ... dis. kand. fiz.-mat. nauk* [Surface Plasmon Polaritons in Periodic Nanostructures. Cand. phys.-math. sci. abs. diss.]. Dolgoprudny, 2012.

4. Born M., Volf E. *Osnovy optiki* [Basics of Optics]. Saint Petersburg, Moscow, 1973, pp. 74-78.

5. Gorelik V.S., Filatov V.V. *Unitarnye polyaritonny v odnorodnykh sredakh i fotonnykh kristallakh* [Unitary Polaritons in Homogeneous Media and Photonic Crystals]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, iss. 8. URL: <http://engjournal.ru/catalog/fundamentals/physics/907.html>, svobodnyj.

6. Dyachenko P.N., Miklyaev Yu.V. *Odnomernyy fotonnyy kristall na osnove nanokompозита: metallicheskie nanochastitsy – dielektrik* [One-Dimensional Photonic Crystal Based on Nanocomposite: Metal Nanoparticles –Dielectric]. *Kompyuternaya optika* [Computer Optics], 2007, vol. 31, no. 1, pp. 31-34.

7. Evseev D.A., Sannikov D.G., Sementsov D.I. *Poverkhnostnye plazmon-polyaritonny na granitse dielektrika i anizotropnogo nanokompозита* [Surface Plasmon Polaritons at the Boundary of Dielectric and Anisotropic Nanocomposite]. *Radiotekhnika i Elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 2015, vol. 60, no. 2, pp. 165-172.

8. Libenson M.N. *Poverkhnostnye elektromagnitnye volny opticheskogo diapazona* [Surface Electromagnetic Waves of Optical Range]. *Sorovskiy obrazovatelnyy zhurnal* [Soros Educational Journal], 1996, no. 1, pp. 92-98.

9. Nazvanov V.F. *Poverkhnostnye elektromagnitnye volny opticheskogo diapazona (plazmony-polyaritonny): svoystva, primenenie* [Surface Electromagnetic Waves of Optical Range (Plasmons-Polaritons): Properties, Application]. *Izvestiya Saratovskogo Universiteta. Novaya seriya. Seriya Fizika* [Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Physics], 2015, vol. 15, no. 1, pp. 5-14.

10. Tolpygo K.B. *Fizicheskie svoystva reshetki tipa kamennoy soli, postroennoy iz deformiruemykh ionov* [Physical Properties of a Rock Salt Lattice Constructed from Deformable Ions]. *ZhETF* [Journal of Experimental and Theoretical Physics], 1950, vol. 20, iss. 6, pp. 497-509.

11. Abeles F., Borensztein Y., Lopez-Rios T. Adv. Solid State Phys. Springer, Berlin; Heidelberg, 1984, pp. 93-117.

12. Fano U. Atomic Theory of Electromagnetic Interaction in Dense Materials. *Phys. Rev.*, 1956, vol. 103, no. 5, pp. 1202-1218.

13. Huang K. On the Interaction Between the Radiation Field and Ionic Crystals. *Proc. Roy. Soc.*, 1951, vol. a 208, pp. 352-365.

14. Johnson P.B., Christy R.W. Optical Constant of the Noble Metals. *Phys. Rev. B*, 1972, vol. 6, pp. 4370-4379.

15. Yakubovsky D.I., Arsenin A.V., Stebunov Y.V., Fedyanin D.Yu., Volkov V.S. Optical Constants and Structural Properties of Thin Gold Films. *OPTICSEXPRESS*, 2017, vol. 25, no. 21, pp. 25574-25587.

POLARITONS IN NANOCOMPOSITES OF METAL NANOPARTICLES – DIELECTRIC

Valeriy V. Yatsyshen

Doctor of Sciences (Engineering), Professor,
Department of Forensic Science and Physical Materials Science,
Volgograd State University
priori@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Irina I. Potapova

Master Student, Department of Forensic Science and Physical Materials Science,
Volgograd State University
priori@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Vyacheslav V. Shipaev

Master Student, Department of Forensic Science and Physical Materials Science,
Volgograd State University
priori@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Abstract. The article studies the main characteristics of surface polaritons in composite nanomaterials. The authors consider composite media such as noble metal nanoparticles randomly distributed in a transparent dielectric matrix and build dispersion curves of polaritons in such nanocomposites. The paper shows calculating optical parameters of the surface polariton for several values of the radius of metal nanoparticles and the nanocomposite filling parameter. The authors also present the calculations of the complex refractive index for polaritons in composites with nanoparticles of different metals. In addition, the authors find the dependences of the real and imaginary parts of the complex refractive index of the nanocomposite on the normalized frequency for membranes with different thicknesses and calculate real and imaginary parts of dielectric constant for waves in several metals. Besides, the article provides an overview of important stages in the study of surface electromagnetic waves. It shows that the variation of the structure materials, size and concentration of nanoparticles opens wide possibilities for controlling the optical properties of composite mediums and their practical application. The considered nanocomposites are artificially created media whose material parameters can be controlled. The first method consists in changing the relative volume of the nanoparticles filling of the dielectric matrix. The second method consists in changing the dielectric constant of the nanocomposite matrix. The authors emphasize that the dielectric constant of the nanocomposite in this case acquires resonant properties in contrast to the permeability of the nanoparticles themselves.

Key words: surface polariton, refractive index, noble metals, dielectric constant, nanoparticle, nanocomposite.