

## Секция 2

---

### Физико-математические науки

---

УДК 535.3  
ББК 22.343  
ГРНТИ 29.31.21  
ВАК 01.04.05

#### Исследование оптического пропускания и отражения нанокомпозитных структур с металлическими наночастицами

К. К. Алтунин , Е. В. Александрова  <sup>1</sup>

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432071,  
Ульяновск, Россия*

Поступила в редакцию 7 июня 2021 года  
После переработки 12 октября 2021 года  
Опубликована 10 декабря 2021 года

---

**Аннотация.** Рассматриваются физические особенности оптических процессов в нанокомпозитных структурах с металлическими наночастицами. Проведены численные расчёты пропускательной и отражательной способностей нанокомпозитных структур с металлическими наночастицами, находящихся во внешнем поле оптического излучения. Для вычисления оптических характеристик составлена компьютерная программа на языке программирования Python, которая позволяет строить графики зависимостей отражательной и пропускательной способностей нанокомпозитных структур с металлическими наночастицами от длины волны внешнего оптического излучения. Получены зависимости энергетических коэффициентов оптического пропускания и отражения нанокомпозитных структур с металлическими наночастицами от длины волны излучения в оптическом диапазоне длин волн при различных значениях параметров нанокомпозитных структур. Показано, что можно эффективно управлять величиной оптического пропускания оптического излучения путём изменения параметров нанокомпозитных структур с металлическими наночастицами.

**Ключевые слова:** нанокомпозит, нанокомпозитная плёнка, наноматериал, оптическое излучение, коэффициент оптического пропускания, коэффициент оптического отражения, просветляющее оптическое покрытие, оптические приборы

PACS: 42.25.Bs

---

<sup>1</sup>E-mail: e10a1@yandex.ru

## Введение

Работа посвящена теоретическому исследованию оптических процессов в нанокompозитных структурах с металлическими наночастицами.

Полимерные нанокompозиты являются важной категорией наноматериалов, которые демонстрируют отличные физико-химические свойства, недоступные для отдельных компонентов, действующих в одиночку. Эти нанокompозиты в последнее время вызывают интенсивный исследовательский интерес в связи с их многообещающим потенциалом для широкого спектра применений в экологической реабилитации и решении различных экологических проблем.

Целью работы является исследование оптических свойств нанокompозитных структур с наночастицами, находящихся во внешнем поле оптического излучения.

В работе поставлены следующие задачи:

1. написание обзора работ по нанокompозитным структурам,
2. разработка теоретической модели процессов оптического пропускания и отражения от нанокompозитных структур с металлическими наночастицами,
3. проведение численных расчётов оптических характеристик оптического пропускания и отражения от нанокompозитных структур с металлическими наночастицами.

Объектом исследования являются нанокompозитные структуры.

Предметом исследования являются оптические свойства плёночных нанокompозитных структур с металлическими наночастицами.

Гипотеза исследования заключается в том, что если провести численные расчёты характеристик оптического пропускания и отражения от однослойных и двухслойных нанокompозитных структур с металлическими наночастицами, то можно прогнозировать поведение нанокompозитных структур с металлическими наночастицами в составе более сложных структур в наноразмерных оптоэлектронных приборах.

Методами исследования являются теоретические и численные методы классической, нелинейной и квантовой нанооптики, численные методы для решения задач теоретической нанооптики, методы программирования для задач теоретической нанооптики.

## Обзор работ по свойствам нанокompозитных структур

Полимерный нанокompозит — это композит, в котором объединяется полимерная матрица (которая может быть термореактивной или термопластичной) с каким-либо наноматериалом. В соответствии с обычными полимерными композитами, могут также быть включены некоторые другие формы обычного армирования волокном (например, углеродные волокна). Ряд наноматериалов демонстрирует исключительные и уникальные свойства — например, прочность, жёсткость, электрическая и теплопроводность — когда они присутствуют в наноформе. В области нанотехнологий одним из самых популярных направлений текущих исследований и разработок являются полимерные нанокompозиты, а область исследований охватывает широкий круг тем. Сюда входят наноэлектроника, полимерные бионаноматериалы, армированный полимерный нанокompозит, системы доставки лекарств на основе нанокompозитов. Согласно теоретическим предположениям, идея полимерного нанокompозитного материала основана на концепции создания очень большой границы раздела между наноразмерными неоднородностями и макромолекулами чистого полимера. Предполагается, что большая граница

раздела между наночастицами и макромолекулами приводит к необычным свойствам по сравнению с обычными микронаполненными полимерными композитами. В нанокompозитах большое усиление и улучшение других свойств, таких как пониженная воспламеняемость и повышенная проводимость, часто достигаются при низкой концентрации нанонаполнителей. Однако эти эффекты сильно зависят от однородного распределения нанодобавки в полимерной матрице, чего трудно добиться.

Полимерные нанокompозиты как основа нанотехнологии вызвали большой научный интерес и нашли широкое применение от игрушек до самолётов. По определению, полимерные нанокompозиты — это полимеры, армированные наноматериалами в качестве нанонаполнителей. В полимерных нанокompозитах наиболее важной темой, которую следует рассматривать, является диспергирование нанонаполнителей в массивной полимерной матрице. Однородное распределение нанонаполнителей приводит к улучшению свойств получаемых полимерных нанокompозитов. Но склонность наноматериалов к агломерации из-за сильных ван-дер-ваальсовых сил между частицами приводит к ухудшению свойств полимерных нанокompозитов. В настоящее время хорошо установлено, что для лучшего диспергирования наноматериалов в полимерных матрицах наноматериалы могут быть модифицированы и функционализированы. Модификация поверхности и функционализация наноматериалов улучшают межфазное взаимодействие или совместимость между полимерной матрицей и наполнителем, что приводит к лучшему диспергированию для разработки высокоэффективных нанокompозитов для передовых приложений. О полимерных нанокompозитах более подробно описано в [1].

Исследование наноматериалов представляют значительный интерес с учётом возможного применения в наноразмерной оптоэлектронике и солнечной энергетике. Одно из основных направлений развития электромагнитных наноматериалов заключается в разработке наноструктур, которые характеризуются малыми значениями диэлектрической проницаемости и магнитной проницаемости в ответ на воздействие электрических и магнитных полей. Область исследования наноматериалов развивается, в частности, из-за интереса для потенциальных применений в поисках идеальной линзы [2], устройствах с замедлением света [3], наноматериалах с отрицательной диэлектрической проницаемостью и магнитной проницаемостью [4], наноматериалах с отрицательным показателем преломления [5]. Известен эффект усиления действующего электромагнитного поля вблизи поверхности металлических наночастиц [6], позволяющий создавать лазерные среды в виде композитов из лазерно-активных молекул на поверхности наночастиц. Композитные среды с наночастицами благородных металлов представляют большой практический интерес при разработке быстродействующих оптических переключателей.

В настоящее время повышенный интерес вызывают композитные материалы, включая металл–полимерные нанокompозитные материалы, содержащие наночастицы благородных металлов, добавленных в полимерную матрицу. Этот интерес обусловлен их необычными физическими свойствами. Нанокompозитные материалы могут применяться в обеспечении оптической невидимости, в конструировании новых оптоэлектронных приборов для обнаружения слабых световых потоков, а также в солнечной энергетике. Нанокompозитные материалы могут применяться в широком диапазоне технологических применений, таких как цветные покрытия [7], солнечные батареи [8], разнообразные датчики [9, 10], наноструктурные покрытия с металлическими нанокластерами [11], фотокатализ [12–14], и нелинейная оптика наноструктурных систем [8, 15, 16]. Интенсивное оптическое излучение нанокompозитов, содержащих включения из наночастиц благородных металлов, возникают из-за поверхностного плазмонного резонанса в металлической фазе [17]. Важное направление современной физики в изучении наноматериалов связано с конструированием различных наноструктур из наноматериалов с

разными диэлектрическими и магнитными проницаемостями.

В статье [18] говорится о индуцированной размерности изменения топологического порядка в мультиферроичных оксидных сверхрешётках.

В статье [19] разработано широкополосное удержание сильного света на границе раздела металлов по всему солнечному спектру. Используя спектроскопию потерь энергии электронов, доказано, что в этой системе горячие носители генерируются широкополосным способом в пределах 10 нм.

В статье [20] показано, что спектральное закрепление нескольких мод приводит к тому, что для системы получается почти монохроматический, но в то же время многомодовый отклик. Также наблюдается связь этих мод с квазинулевой модой Берремана для диэлектрической проницаемости, поддерживаемой тонким материалом с квазинулевой диэлектрической проницаемостью.

В статье [21] предлагается управляемое нейронной сетью решение, которое позволяет осуществлять точное и эффективное сканирование, обработку данных и идентификацию образцов экспериментально значимых двумерных материалов.

В статье [22] обнаружено, что эти металлические решётки из платины с беспрецедентно большим отношением площади поверхности к объёму демонстрируют положительное магнитосопротивление при низких температурах, изменяющееся с положительного на отрицательное в слабых магнитных полях в узком температурном окне при повышении температуры.

В статье [23] суммируются основные принципы, связанные с ними новые физические эффекты, фундаментальные принципы реализации фотонных систем на основе наноматериалов с квазинулевой диэлектрической проницаемостью и интегрированные приложения фотоники на основе наноматериалов с квазинулевой диэлектрической проницаемостью.

Интерференционные эффекты в нанокompозитных плёнках рассматривались в работе [24]. Некоторые из новых наноматериалов с квазинулевым показателем преломления [25] и наноматериалов с сильно отрицательными значениями комплексного показателя преломления [24] могут быть использованы в наноразмерных оптоэлектронных устройствах с управлением при помощи излучения оптического диапазона. Эффект идеального оптического просветления в нанокompозитах рассматривался в [26].

Чтобы понять изменения свойств полимерной матрицы, важно распознать поведение макромолекул в присутствии наночастиц или нановолокон, что важно для оптимизации свойств нанокompозита и расширения границ улучшения свойств. Наноразмерные добавки могут изменять механические свойства, барьерные свойства, огнестойкость, электрические и оптические свойства, а также термические свойства.

Рассмотрим основные модели в приближении эффективной среды для наноструктурных материалов. Для твердотельных наноструктурных сред используются три основные модели гомогенизации в приближении эффективной среды. Этими тремя моделями являются следующие модели: модель Максвелл-Гарнетта, симметричная модель Бруггемана, асимметричная модель Бруггемана.

Модель Максвелл-Гарнетта для наноструктурного материала в приближении эффективной среды основана на формуле эффективной диэлектрической проницаемости

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_m \left( \frac{1 + 2f \left( \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_m}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_m} \right)}{1 - f \left( \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_m}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_m} \right)} \right), \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{\text{eff}}$  – эффективная диэлектрическая проницаемость среды,  $\varepsilon_i$  – диэлектрическая проницаемость наноразмерных включений,  $\varepsilon_m$  – диэлектрическая проницаемость ма-

териала матрицы наноструктурной среды,  $f$  – фактор заполнения наноструктурной среды наноразмерными включениями.

Симметричная модель Бруггемана для наноструктурного материала в приближении эффективной среды основана на формуле эффективной диэлектрической проницаемости

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{1}{4} \left( 3f(\varepsilon_i - \varepsilon_m) + 2\varepsilon_m - \varepsilon_i + \sqrt{(1 - 3f)^2 \varepsilon_i^2 + 2(2 + 9f - 9f^2) \varepsilon_i \varepsilon_m + (3f - 2)^2 \varepsilon_m^2} \right). \quad (2)$$

Асимметричная модель Бруггемана для наноматериала в приближении эффективной среды основана на формуле эффективной диэлектрической проницаемости

$$\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{\text{eff}}}{\varepsilon_i - \varepsilon_m} = (1 - f) \left( \frac{\varepsilon_{\text{eff}}}{\varepsilon_m} \right)^{\frac{1}{A}}, \quad (3)$$

где  $A = 0.5$  для наноразмерных включений в виде дисков,  $A = 0.33$  для наноразмерных включений в виде сфер.

Для одного из типичных наноразмерных включений в виде сферических наночастиц золота диэлектрическая проницаемость включений имеет вид [27]:

$$\varepsilon_i = 1 - \frac{\omega_{pf}}{\omega(\omega + i\gamma_f)} + \frac{\omega_{pf}^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_b}, \quad (4)$$

где  $\omega_{pf} = 1.3 \cdot 10^{16}$  Гц,  $\gamma_f = 2.65 \cdot 10^{14}$  Гц,  $\gamma_b = 2.4 \cdot 10^{14}$  Гц,  $\omega_0 = 7.0 \cdot 10^{15}$  Гц,  $\omega_{pf} = 1.3 \cdot 10^{16}$  Гц. Проведённый анализ научной литературы по оптическим свойствам нанокompозитных структур показал актуальность направления исследования оптических свойств нанокompозитных структур, включая однослойные и двухслойные плёночные нанокompозитные структуры.

## Теоретическая модель оптических процессов в нанокompозитных структурах с металлическими наночастицами

Вычислим коэффициенты оптического отражения и пропускания нанокompозитной плёнки. Амплитудные коэффициенты Френеля для оптического отражения от одной границы раздела сред вычисляются для  $s$ -поляризации по формулам [28]:

$$r_{01}^s = \frac{n_0 \cos \theta_0 - n_1 \cos \theta_1}{n_0 \cos \theta_0 + n_1 \cos \theta_1}, \quad (5)$$

$$r_{12}^s = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}, \quad (6)$$

где  $n_0$  – показатель преломления среды 0,  $n_1$  – показатель преломления среды 1,  $\theta_0$  – угол падения внешнего оптического излучения,  $\theta_1$  – угол преломления внешнего оптического излучения в среде 1,  $\theta_2$  – угол преломления внешнего оптического излучения в среде 2.

Амплитудные коэффициенты Френеля для оптического пропускания от одной границы раздела сред вычисляются для  $s$ -поляризации по формулам

$$t_{01}^s = \frac{2n_0 \cos \theta_0}{n_0 \cos \theta_0 + n_1 \cos \theta_1}, \quad (7)$$

$$t_{12}^s = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}. \quad (8)$$

Амплитудные коэффициенты Френеля для оптического отражения от одной границы раздела сред вычисляются для  $p$ -поляризации по формулам

$$r_{01}^p = \frac{n_0 / \cos \theta_0 - n_1 / \cos \theta_1}{n_0 / \cos \theta_0 + n_1 / \cos \theta_1}, \quad (9)$$

$$r_{12}^p = \frac{n_1 / \cos \theta_1 - n_2 / \cos \theta_2}{n_1 / \cos \theta_1 + n_2 / \cos \theta_2}, \quad (10)$$

где  $n_0$  – показатель преломления среды 0,  $n_1$  – показатель преломления среды 1,  $\theta_0$  – угол падения внешнего оптического излучения,  $\theta_1$  – угол преломления внешнего оптического излучения в среде 1,  $\theta_2$  – угол преломления внешнего оптического излучения в среде 2.

Амплитудные коэффициенты Френеля для оптического пропускания от одной границы раздела сред вычисляются для  $p$ -поляризации по формулам

$$t_{01}^p = \frac{2n_0 / \cos \theta_0}{n_0 / \cos \theta_0 + n_1 / \cos \theta_1}, \quad (11)$$

$$t_{12}^p = \frac{2n_1 / \cos \theta_1}{n_1 / \cos \theta_1 + n_2 / \cos \theta_2}. \quad (12)$$

Для нанокompозитной плёнки амплитудные коэффициенты оптического отражения и пропускания вычисляются для  $s$ -поляризации по формулам:

$$r_1^s = \frac{r_{01}^s + r_{12}^s \exp\{i2\phi_1\}}{1 + r_{01}^s r_{12}^s \exp\{i2\phi_1\}}, \quad (13)$$

$$t_1^s = \frac{t_{01}^s t_{12}^s \exp\{i\phi_1\}}{1 + r_{01}^s r_{12}^s \exp\{i2\phi_1\}}. \quad (14)$$

где  $\phi_1 = k_0 n_1 d_1 \cos \theta_1$ .

Для нанокompозитной плёнки амплитудные коэффициенты оптического отражения и пропускания вычисляются для  $p$ -поляризации по формулам:

$$r_1^p = \frac{r_{01}^p + r_{12}^p \exp\{i2\phi_1\}}{1 + r_{01}^p r_{12}^p \exp\{i2\phi_1\}}, \quad (15)$$

$$t_1^p = \frac{t_{01}^p t_{12}^p \exp\{i\phi_1\}}{1 + r_{01}^p r_{12}^p \exp\{i2\phi_1\}}. \quad (16)$$

где  $\phi_1 = k_0 n_1 d_1 \cos \theta_1$ .

Для нанокompозитной плёнки энергетические коэффициенты оптического отражения и пропускания вычисляются для  $s$ -поляризации по формулам:

$$R_1^s = |r_1^s|^2, \quad (17)$$

$$T_1^s = \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_0 \cos \theta_0} |t_1^s|^2. \quad (18)$$

Для нанокompозитной плёнки энергетические коэффициенты оптического отражения и пропускания вычисляются для  $p$ -поляризации по формулам:

$$R_1^p = |r_1^p|^2, \quad (19)$$

$$T_1^p = \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_0 \cos \theta_0} |t_1^p|^2. \quad (20)$$

Для нанокompозитной плёнки энергетические коэффициенты оптического отражения и пропускания вычисляются для неполяризованного света по формулам:

$$R_1 = \frac{1}{2} (R_1^s + R_1^p) , \quad (21)$$

$$T_1 = \frac{1}{2} (T_1^s + T_1^p) . \quad (22)$$

Рассмотрим рекуррентный метод для вычисления коэффициентов оптического отражения и пропускания многослойных нанокompозитных структур. Для описания распространения оптического излучения в настоящее время широко используется оптическое приближение. При прохождении оптическим излучением среды в ней может формироваться канал оптической прозрачности или зона просветления. Такие зоны могут быть использованы для оптической связи.

Рекуррентный метод для вычисления коэффициентов оптического отражения и пропускания для многослойных нанокompозитных структур основан на введении амплитудного коэффициента отражения, который вычисляется по рекуррентной формуле:

$$r_j = \frac{r_j^F + r_{j+1} \exp\{i2\zeta_{j+1}d_{j+1}\}}{1 + r_j^F r_{j+1} \exp\{i2\zeta_{j+1}d_{j+1}\}} , \quad (23)$$

которая продолжается до

$$r_{n+1} = 0 , \quad (24)$$

где  $j = 0, 1, 2, \dots, n$ . Амплитудный коэффициент Френеля для оптического отражения равен

$$r_j^F = \frac{\zeta_j - \zeta_{j+1}}{\zeta_j + \zeta_{j+1}} , \quad (25)$$

$$\zeta_j = k_0 \sqrt{\varepsilon_j - \varepsilon_0 \cos^2 \theta_0} , \quad (26)$$

где  $d_j$  – толщина  $j$ -го слоя,  $k_0$  – волновой вектор оптической волны в вакууме,  $\theta_0$  – угол падения внешнего оптического излучения,  $\zeta_j$  – компонента волнового вектора падающей оптической волны в  $j$ -ом слое нанокompозитной структуры,  $\varepsilon_j$  – диэлектрическая проницаемость материала  $j$ -го слоя,  $n$  – число слоёв в многослойной нанокompозитной структуре. Вычисление коэффициентов отражения начинается с нижнего слоя (подложки) и заканчивается на внешней среде ( $j = 0$ ).

Можно также применять рекуррентный метод Власова для вычисления коэффициентов оптического отражения и пропускания многослойных нанокompозитных структур. Рассмотрим рекуррентный метод Власова для вычисления коэффициентов оптического отражения и пропускания многослойных нанокompозитных структур. В методе Власова коэффициенты отражения и пропускания вычисляются по формулам:

$$R_{j+1} = \frac{r_{j+1} + r_j X_{j+1}}{1 + r_{j+1} r_j X_{j+1}} , \quad (27)$$

$$T_{j+1} = \frac{t_{j+1} t_j X_{j+1}^{\frac{1}{2}}}{1 + r_{j+1} r_j X_{j+1}} , \quad (28)$$

где фазовая толщина  $j$ -го слоя равна  $X_j = \exp\left\{i2k_0 d_j \sqrt{n_j^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_0}\right\}$ . Введены  $r_{j+1}$  и  $t_{j+1}$  – коэффициенты Френеля  $j + 1$  слоя относительно среды 0.

Стартовыми значениями для организации рекуррентного процесса являются

$$r_0 = \frac{R_0 - r_1}{1 - r_1 R_0} , \quad (29)$$

$$t_0 = T_0 \frac{(1 + r_1 r_0)}{t_1} , \quad (30)$$



Вычисление коэффициентов оптического отражения и пропускания по методу Власова для однослойной структуры даёт формулы:

$$R_1 = \frac{r_1 + r_0 X_1}{1 + r_1 r_0 X_1}, \quad (31)$$

$$T_1 = T_0 \frac{(1 - r_1 R_0 + r_1 (R_0 - r_1)) X_1^{\frac{1}{2}}}{1 - r_1 R_0 + r_1 (R_0 - r_1) X_1}. \quad (32)$$

Для произвольного числа наноструктурных слоёв в нанокompозитной структуре пригодны для *s*-поляризации и *p*-поляризации с соответствующими коэффициентами Френеля следующие формулы:

$$R_{j+1} = \frac{r_{j+1} (1 - r_{j+1} R_j) + (R_j - r_{j+1}) X_{j+1}}{1 - r_{j+1} R_j + r_{j+1} (R_j - r_{j+1}) X_{j+1}}, \quad (33)$$

$$T_{j+1} = T_j \frac{1 - r_{j+1} R_j + r_{j+1} (R_j - r_{j+1}) X_{j+1}^{\frac{1}{2}}}{1 - r_{j+1} R_j + r_{j+1} (R_j - r_{j+1}) X_{j+1}} \quad (34)$$

с граничными условиями

$$R_0 = r_{02} = \frac{r_{01} + r_{12}}{1 + r_{01} r_{12}}, \quad (35)$$

$$T_0 = \frac{t_1 t_0}{1 + r_0 r_1}. \quad (36)$$

Рассмотрим рекуррентный метод Паррата для вычисления коэффициентов оптического отражения и пропускания многослойных нанокompозитных структур. Введём обозначения:

$$g_{jm} = \exp\{i s_{jm} d_m\}, \quad (37)$$

$$\bar{g}_{jm} = g_{jm}^{-1} = \exp\{-i s_{jm} d_m\}, \quad (38)$$

$q_m = 1$ ,  $b_{jm} = s_{jm}$  для *s*-поляризованного оптического излучения,  $q_m = s_{jm}/n_{jm}$ ,  $b_{jm} = n_{jm}$  для *p*-поляризованного оптического излучения.

Величины  $R_{jm} = E_{jm}^-/E_{jm}^+$  имеют смысл “парциальных” амплитудных коэффициентов отражения. Рекуррентное соотношение Паррата, которое выражает коэффициент  $R_{jm}$  в *m*-м слое через величину  $R_{j,m+1}$  в нижнем слое с номером  $m + 1$ :

$$R_{jm} = \frac{(r_{j,m+1} + R_{j,m+1}) g_{jm}^2}{1 + r_{j,m+1} R_{j,m+1}}, \quad (39)$$

где

$$r_{j,m,n} = \frac{p (s_{jm} - s_{jn} \sigma_{jm,n}^2)}{s_{jm} + s_{jn} \sigma_{jm,n}^2}, \quad (40)$$

$p = 1$ ,  $\sigma_{jm,n} = 1$  для *s*-поляризованного оптического излучения,  $p = -1$ ,  $\sigma_{jm,n} = n_{jm}/n_{jn}$  для *p*-поляризованного оптического излучения. Здесь  $r_{j,m,n}$  – формула Френеля для коэффициента отражения излучения с частотой  $\omega_j$  от границы раздела двух полубесконечных сред с показателями преломления  $n_{jm}$  и  $n_{jn}$ .

Коэффициенты пропускания  $T_m$  находятся с помощью рекуррентного соотношения

$$T_m = \frac{r_{m,m-1} + T_{m-1} g_{m-1}^2}{1 + r_{m,m-1} T_{m-1} g_{m-1}^2}, \quad (41)$$

которое решается “сверху – вниз” с граничным условием  $T_0 = 0$ .



Найдём коэффициенты отражения для двухслойной нанокompозитной структуры на подложке. Оптическое излучение падает из среды 0. Первый слой нанокompозитной структуры имеет эффективный показатель преломления  $n_1$  и толщину  $d_1$ . Второй слой нанокompозитной структуры имеет эффективный показатель преломления  $n_2$  и толщину  $d_2$ . подложка имеет эффективный показатель преломления  $n_3$ .

Вычисление амплитудных коэффициентов по методу Власова даёт следующие формулы:

$$r_{03} = \frac{r_{01} + r_{13} \exp(-i2\phi_1)}{1 + r_{01}r_{13} \exp(-i2\phi_1)}, \quad (42)$$

$$t_{03} = \frac{t_{01}t_{13} \exp(-i\phi_1)}{1 + r_{01}r_{13} \exp(-i2\phi_1)}, \quad (43)$$

где фазовая толщина первого слоя  $\phi_1 = k_0 n_1 d_1 \cos \theta_1$ .

$$r_{13} = \frac{r_{12} + r_{23} \exp(-i2\phi_2)}{1 + r_{12}r_{23} \exp(-i2\phi_2)}, \quad (44)$$

$$t_{13} = \frac{t_{12}t_{23} \exp(-i\phi_2)}{1 + r_{12}r_{23} \exp(-i2\phi_2)}, \quad (45)$$

где фазовая толщина второго слоя  $\phi_2 = k_0 n_2 d_2 \cos \theta_2$ .

Для одной границы раздела коэффициенты вычисляются по формулам:

$$r_{01}^s = \frac{n_0 \cos \theta_0 - n_1 \cos \theta_1}{n_0 \cos \theta_0 + n_1 \cos \theta_1}, \quad (46)$$

$$r_{12}^s = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}, \quad (47)$$

$$r_{13}^s = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_3 \cos \theta_3}{n_1 \cos \theta_1 + n_3 \cos \theta_3}, \quad (48)$$

$$r_{23}^s = \frac{n_2 \cos \theta_2 - n_3 \cos \theta_3}{n_2 \cos \theta_2 + n_3 \cos \theta_3}. \quad (49)$$

Углы преломления вычисляется по формулам:

$$\theta_1 = \arcsin(n_0 \sin \theta_0 / n_1), \quad (50)$$

$$\theta_2 = \arcsin(n_0 \sin \theta_0 / n_2), \quad (51)$$

$$\theta_3 = \arcsin(n_0 \sin \theta_0 / n_3). \quad (52)$$

Энергетические коэффициенты оптического отражения и пропускания двухслойной структуры на подложке для *s*-поляризованной волны вычисляются по формулам:

$$R_2^s = |r_{03}^s|^2, \quad (53)$$

$$T_2^s = \frac{n_3 \cos \theta_3}{n_0 \cos \theta_0} |t_{03}^s|^2. \quad (54)$$

Энергетические коэффициенты оптического отражения и пропускания двухслойной структуры на подложке для *p*-поляризованной волны вычисляются по формулам:

$$R_2^p = |r_{03}^p|^2, \quad (55)$$

$$T_2^p = \frac{n_3 \cos \theta_0}{n_0 \cos \theta_3} |t_{03}^p|^2. \quad (56)$$

Для двухслойной нанокompозитной структуры энергетические коэффициенты отражения и пропускания вычисляются для неполяризованного света по формулам:

$$R_2 = \frac{1}{2} (R_2^s + R_2^p) , \quad (57)$$

$$T_2 = \frac{1}{2} (T_2^s + T_2^p) . \quad (58)$$

Рассмотрим модель нанокompозитной структуры в приближении эффективной среды. Произведём описание нанокompозитной структуры для двух нанокompозитных сред в приближении эффективной среды. Эффективная диэлектрическая проницаемость первой нанокompозитной среды находится по формуле Максвелл-Гарнетта:

$$\varepsilon_1(\omega) = \varepsilon_1^m(\omega) \left( 1 + \frac{f_1(\varepsilon_1^p(\omega) - \varepsilon_1^m(\omega))}{\varepsilon_1^m + g_1(1 - f_1)(\varepsilon_1^p(\omega) - \varepsilon_1^m(\omega))} \right) , \quad (59)$$

где  $f_1$  – фактор заполнения первой нанокompозитной среды металлическими наночастицами,  $g_1$  – деполяризующий фактор системы наноразмерных включений в первой нанокompозитной среде,  $\varepsilon_1^p$  – диэлектрическая проницаемость наноразмерных включений в виде металлических наночастиц,  $\varepsilon_1^m$  – диэлектрическая проницаемость материала матрицы первой нанокompозитной среды.

Эффективная диэлектрическая проницаемость второй нанокompозитной среды находится по формуле Максвелл-Гарнетта:

$$\varepsilon_2(\omega) = \varepsilon_2^m(\omega) \left( 1 + \frac{f_2(\varepsilon_2^p(\omega) - \varepsilon_2^m(\omega))}{\varepsilon_2^m + g_2(1 - f_2)(\varepsilon_2^p(\omega) - \varepsilon_2^m(\omega))} \right) , \quad (60)$$

где  $f_2$  – фактор заполнения второй нанокompозитной среды металлическими наночастицами,  $g_2$  – деполяризующий фактор системы наноразмерных включений во второй нанокompозитной среде,  $\varepsilon_2^p$  – диэлектрическая проницаемость наноразмерных включений в виде металлических наночастиц,  $\varepsilon_2^m$  – диэлектрическая проницаемость материала матрицы второй нанокompозитной среды.

Диэлектрическая проницаемость материала матрицы нанокompозитной среды находится по формуле:

$$\varepsilon_1^m(\lambda) = \varepsilon_1^{PMA}(\lambda) = 1 + \frac{1.1819\lambda^2}{\lambda^2 - 0.011313} , \quad (61)$$

где длина волны подставляется в микрометрах.

Диэлектрическая проницаемость материала наноразмерных включений в виде наночастиц серебра сферической формы находится по формуле:

$$\varepsilon_1^p(\omega) = \varepsilon_{\infty 1} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma_{e1})} , \quad (62)$$

где циклическая частота излучения  $\omega = 2\pi c/\lambda$ . Коэффициент затухания находится по формуле

$$\gamma_{e1} = \gamma_{01} + (0.71 + (1 - f_1)0.31) \frac{v_{F1}}{a_1} , \quad (63)$$

для серебра скорость Ферми равна  $v_F = 1.39 \cdot 10^6$  м/с. Для объёмного серебра известны следующие параметры:  $\varepsilon_{\infty 1} = 4.1$ ,  $\omega_p = 1.33 \cdot 10^{16}$  с<sup>-1</sup>,  $\gamma_{01} = 7.7 \cdot 10^{13}$  с<sup>-1</sup>.

## Разработка компьютерной программы и результаты компьютерного моделирования оптического пропускания и отражения нанокompозитных структур с металлическими наночастицами

Приведём результаты численных расчётов оптического пропускания однослойной нанокompозитной плёнки с металлическими наночастицами на подложке из стекла. В работе составлена компьютерная программа для расчёта оптического пропускания нанокompозитной структуры с металлическими наночастицами.

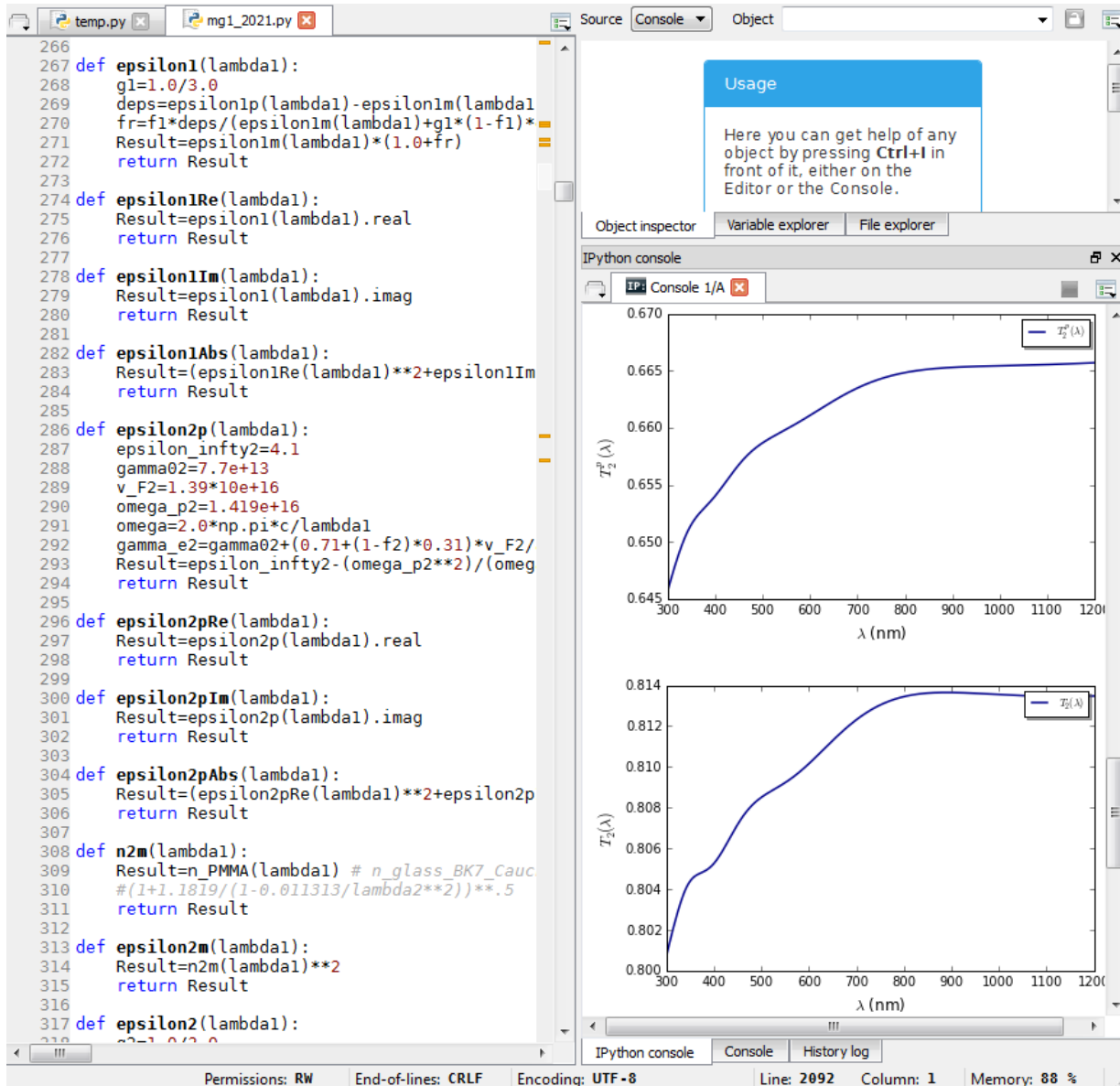


Рис. 1. Первая часть программы на языке программирования Python для расчёта оптического пропускания и отражения от нанокompозитной плёнки с металлическими наночастицами.

На рис. 1 изображена первая часть программы на языке программирования Python для расчёта оптического пропускания нанокompозитной плёнки с металлическими наночастицами.

Рассмотрим результаты численных расчётов оптического пропускания однослойной нанокompозитной плёнки с металлическими наночастицами, расположенной на подложке из стекла BK7.

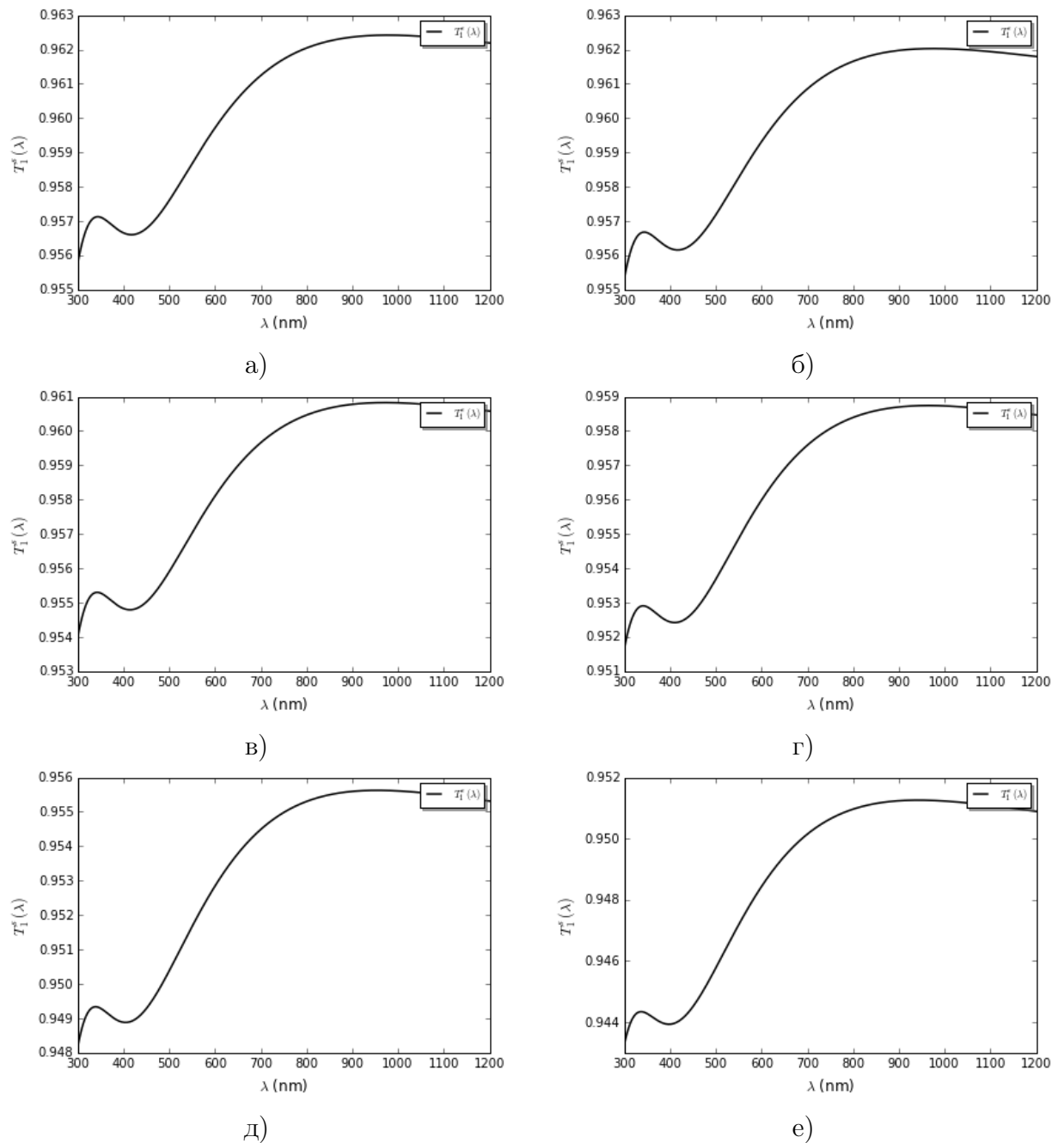


Рис. 2. Зависимость энергетического коэффициента пропускания от длины волны оптического излучения для случая падения  $s$ -поляризованной оптической волны из воздуха на нанокompозитную плёнку толщиной  $d_1 = 150$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм, фактором заполнения  $f_1 = 2.5\%$ , расположенную на подложке из стекла BK7 при угле падения излучения а)  $\theta_0 = 0^\circ$ , б)  $\theta_0 = 5^\circ$ , в)  $\theta_0 = 10^\circ$ , г)  $\theta_0 = 15^\circ$ , д)  $\theta_0 = 20^\circ$ , е)  $\theta_0 = 25^\circ$ .

На рис. 2 изображена зависимость энергетического коэффициента пропускания от длины волны оптического излучения для случая падения  $s$ -поляризованной оптической волны из воздуха на нанокompозитную плёнку толщиной  $d_1 = 150$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм, фактором заполнения  $f_1 = 2.5\%$ , расположенную на подложке из стекла BK7 при угле падения излучения а)  $\theta_0 = 0^\circ$ , б)  $\theta_0 = 5^\circ$ , в)  $\theta_0 = 10^\circ$ , г)  $\theta_0 = 15^\circ$ , д)  $\theta_0 = 20^\circ$ , е)  $\theta_0 = 25^\circ$ . Из графиков видно, что нанокompозитная плёнка обладает высоким пропусканием в широком диапазоне оптических длин волн.

При помощи разработанной компьютерной программы получены результаты численных расчётов оптического пропускания нанокomпозитной структуры из двух плёнок с металлическими наночастицами на подложке из стекла. Рассмотрим результаты численных расчётов оптического пропускания нанокomпозитной структуры из двух плёнок с металлическими наночастицами, расположенной на подложке из стекла ВК7.

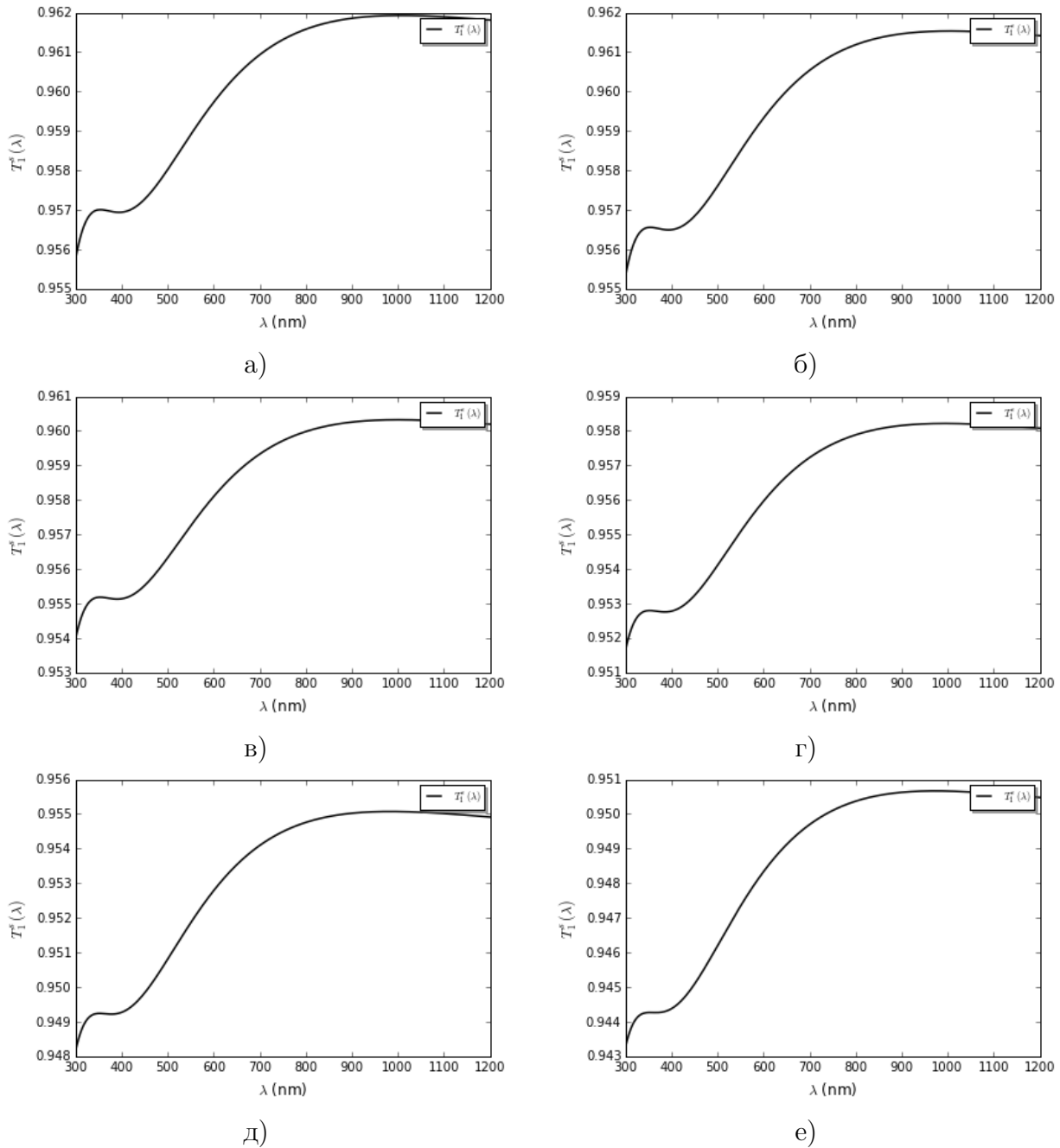


Рис. 3. Зависимость энергетического коэффициента пропускания от длины волны оптического излучения для случая падения s-поляризованной оптической волны из воздуха на двухплёночную нанокomпозитную структуру из первой нанокomпозитной плёнки толщиной  $d_1 = 150$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм, фактором заполнения  $f_1 = 2.5\%$ , второй нанокomпозитной плёнки толщиной  $d_2 = 240$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_2 = 4.5$  нм, фактором заполнения  $f_2 = 4.5\%$ , расположенную на подложке из стекла ВК7 при угле падения излучения а)  $\theta_0 = 0^\circ$ , б)  $\theta_0 = 5^\circ$ , в)  $\theta_0 = 10^\circ$ , г)  $\theta_0 = 15^\circ$ , д)  $\theta_0 = 20^\circ$ , е)  $\theta_0 = 25^\circ$ .

На рис. 3 изображена зависимость энергетического коэффициента пропускания от длины волны оптического излучения для случая падения *s*-поляризованной оптической волны из воздуха двухплёночную нанокompозитную структуру из первой нанокompозитной плёнки толщиной  $d_1 = 150$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм, фактором заполнения  $f_1 = 2.5\%$ , второй нанокompозитной плёнки толщиной  $d_2 = 240$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_2 = 4.5$  нм, фактором заполнения  $f_2 = 4.5\%$ , расположенную на подложке из стекла ВК7 при угле падения излучения а)  $\theta_0 = 0^\circ$ , б)  $\theta_0 = 5^\circ$ , в)  $\theta_0 = 10^\circ$ , г)  $\theta_0 = 15^\circ$ , д)  $\theta_0 = 20^\circ$ , е)  $\theta_0 = 25^\circ$ . Из графиков видно, что нанокompозитная плёнка обладает высоким оптическим пропусканием в широком диапазоне оптических длин волн.

## Заключение

В работе проведено теоретическое и численное исследование оптических свойств нанокompозитных структур с наночастицами серебра, находящихся во внешнем поле оптического излучения. Построена теоретическая модель оптических процессов в однослойной и двухслойной плёночной нанокompозитной структуре. Компьютерная программа, которая была написана на языке программирования Python, позволяет вычислять оптические характеристики однослойной и двухслойной плёночных нанокompозитных структур с металлическими наночастицами. В результате численных расчётов оптических характеристик нанокompозитных плёнок показано, что возможно оптическое просветление однослойной и двухслойной плёночных нанокompозитных структур за счёт добавления металлических наночастиц. Гипотеза исследования заключающаяся в том, что если провести численные расчёты характеристик оптического пропускания и отражения от однослойных и двухслойных нанокompозитных структур с металлическими наночастицами, то можно прогнозировать поведение нанокompозитных структур с металлическими наночастицами в составе более сложных структур в наноразмерных оптоэлектронных приборах, подтверждена полностью.

## Список использованных источников

1. Kikuchi Hideyuki, Hanawa Hidehito, Honda Yuki. Development of polyamide-imide/silica nanocomposite enameled wire // *Electronics and Communications in Japan*. — 2013. — . — Vol. 96, no. 6. — P. 41–48. — URL: <https://doi.org/10.1002/ecj.11456>.
2. Pendry J. B. Negative refraction makes a perfect lens // *Physical Review Letters*. — 2000. — oct. — Vol. 85, no. 18. — P. 3966–3969. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.85.3966>.
3. Alekseyev Leonid V., Narimanov Evgenii. Slow light and 3D imaging with non-magnetic negative index systems // *Opt. Express*. — 2006. — Vol. 14, no. 23. — P. 11184–11193. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/OE.14.011184>.
4. Veselago V. G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$  // *Usp. Fiz. Nauk*. — 1967. — Vol. 92, no. 7. — P. 517. — URL: <http://dx.doi.org/10.3367/UFNr.0092.196707d.0517>.
5. A negative permeability material at red light / H.-K. Yuan [et al.] // *Opt. Express*. — 2007. — Vol. 15, no. 3. — P. 1076. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/OE.15.001076>.
6. Shalaev V. M., Sarychev A. K. Nonlinear optics of random metal-dielectric films // *Phys. Rev. B*. — 1998. — may. — Vol. 57, no. 20. — P. 13265–13288. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.57.13265>.

7. Plasmonic properties of Ag nanoclusters in various polymer matrices / H. Takele [et al.] // *Nanotechnology*. — 2006. — jun. — Vol. 17, no. 14. — P. 3499–3505. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-4484/17/14/023>.
8. Walters G., Parkin I. P. The incorporation of noble metal nanoparticles into host matrix thin films: synthesis, characterisation and applications // *J. Mater. Chem.* — 2009. — Vol. 19, no. 5. — P. 574–590. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/B809646E>.
9. Hutter E., Fendler J. H. Exploitation of Localized Surface Plasmon Resonance // *Adv. Mater.* — 2004. — oct. — Vol. 16, no. 19. — P. 1685–1706. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/adma.200400271>.
10. Development of new decorative coatings based on gold nanoparticles dispersed in an amorphous TiO<sub>2</sub> dielectric matrix / M. Torrell [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. — 2010. — jan. — Vol. 204, no. 9-10. — P. 1569–1575. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.10.003>.
11. Atomic level imaging of Au nanocluster dispersed in TiO<sub>2</sub> and SrTiO<sub>3</sub> / C. M. Wang [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. — 2006. — jan. — Vol. 242, no. 1-2. — P. 380–382. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2005.08.144>.
12. Pacholski C., Kornowski A., Weller H. Site-specific photodeposition of silver on ZnO nanorods // *Angewandte Chemie International Edition*. — 2004. — sep. — Vol. 43, no. 36. — P. 4774–4777. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/anie.200453880>.
13. Wu J.-J., Tseng Ch.-H. Photocatalytic properties of nc-Au/ZnO nanorod composites // *Applied Catalysis B: Environmental*. — 2006. — jun. — Vol. 66, no. 1-2. — P. 51–57. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2006.02.013>.
14. Synthesis of CdS Nanorods by an Ethylenediamine Assisted Hydrothermal Method for Photocatalytic Hydrogen Evolution / Yu. Li [et al.] // *J. Phys. Chem. C*. — 2009. — may. — Vol. 113, no. 21. — P. 9352–9358. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/jp901505j>.
15. Optical properties of Au nanocluster embedded dielectric films / S. Cho [et al.] // *Thin Solid Films*. — 2000. — dec. — Vol. 377-378. — P. 97–102. — URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6090\(00\)01391-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6090(00)01391-2).
16. The optical Kerr effect in small metal particles and metal colloids: The case of gold / F. Hache [et al.] // *Applied Physics A: Solids and Surface*. — 1988. — dec. — Vol. 47, no. 4. — P. 347–357. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00615498>.
17. Absorption and scattering of light by small particles / Ed. by C. F. Bohren, D. R. Huffman. — Wiley-Blackwell, 1998. — apr. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/9783527618156>.
18. Dimensionality-Induced Change in Topological Order in Multiferroic Oxide Superlattices / Megan E. Holtz [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2021. — apr. — Vol. 126, no. 15. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.126.157601>.
19. Enhanced Solar-to-Hydrogen Generation with Broadband Epsilon-Near-Zero Nanostructured Photocatalysts / Yi Tian [et al.] // *Advanced Materials*. — 2017. — may. — Vol. 29, no. 27. — P. 1701165. — URL: <https://doi.org/10.1002/adma.201701165>.



20. Monochromatic Multimode Antennas on Epsilon-Near-Zero Materials / Owen Dominguez [et al.] // *Advanced Optical Materials*. — 2019. — mar. — Vol. 7, no. 10. — P. 1800826. — URL: <https://doi.org/10.1002/adom.201800826>.
21. Fully Automated Identification of Two-Dimensional Material Samples / Eliska Greplova [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2020. — jun. — Vol. 13, no. 6. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.13.064017>.
22. Quantum transport in three-dimensional metalattices of platinum featuring an unprecedentedly large surface area to volume ratio / Yixuan Chen [et al.] // *Physical Review Materials*. — 2020. — mar. — Vol. 4, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevmaterials.4.035201>.
23. Epsilon-Near-Zero Photonics: A New Platform for Integrated Devices / Xinxiang Niu [et al.] // *Advanced Optical Materials*. — 2018. — mar. — Vol. 6, no. 10. — P. 1701292. — URL: <https://doi.org/10.1002/adom.201701292>.
24. Altunin K. K., Gadomsky O. N. High-negative effective refractive index of silver nanoparticles system in nanocomposite films // *Optics Communications*. — 2012. — mar. — Vol. 285, no. 5. — P. 816–820. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2011.11.033>.
25. Near-field effect in composite nanomaterials with a quasi-zero refractive index / O. N. Gadomsky [et al.] // *Optics Communications*. — 2014. — mar. — Vol. 315. — P. 286–294. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2013.11.035>.
26. Gadomsky O. N., Altunin K. K., Ushakov N. M. Ideal optical antireflection of composite films activated by spherical nanoparticles // *JETP Letters*. — 2009. — oct. — Vol. 90, no. 4. — P. 251–256. — URL: <https://doi.org/10.1134/s0021364009160061>.
27. Neeves A. E., Birnboim M. H. Composite structures for the enhancement of nonlinear-optical susceptibility // *Journal of the Optical Society of America B*. — 1989. — apr. — Vol. 6, no. 4. — P. 787. — URL: <https://doi.org/10.1364/josab.6.000787>.
28. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*. — Oxford : Pergamon Press, 1969. — 720 p.

#### Сведения об авторах:

**Константин Константинович Алтунин** — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики и технических дисциплин ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: [kostya\\_altunin@mail.ru](mailto:kostya_altunin@mail.ru)

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207



**Елена Владимировна Александрова** — студент факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: [el0al@yandex.ru](mailto:el0al@yandex.ru)

ORCID iD  0000-0002-0107-3143

Web of Science ResearcherID  AAX-8431-2021

# Investigation of optical transmission and reflection of nanocomposite structures with metal nanoparticles

K. K. Altunin , E. V. Alexandrova 

*Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia*

Submitted June 7, 2021

Resubmitted October 12, 2021

Published December 10, 2021

---

**Abstract.** The physical features of optical processes in nanocomposite structures with metal nanoparticles are considered. Numerical calculations of the transmittance and reflectivity of nanocomposite structures with metal nanoparticles in an external field of optical radiation have been carried out. To calculate the optical characteristics, a computer program was compiled in the Python programming language, which allows plotting the dependences of the reflectance and transmission abilities of nanocomposite structures with metal nanoparticles on the wavelength of external optical radiation. The dependences of the energy coefficients of optical transmission and reflection of nanocomposite structures with metal nanoparticles on the radiation wavelength in the optical wavelength range are obtained for various values of the parameters of nanocomposite structures. It is shown that it is possible to effectively control the optical transmission of optical radiation by changing the parameters of nanocomposite structures with metal nanoparticles.

**Keywords:** nanocomposite, nanocomposite film, nanomaterial, optical radiation, optical transmittance, optical reflection coefficient, antireflection optical coating, optical devices

PACS: 42.25.Bs

---

## References

1. Dimensionality-Induced Change in Topological Order in Multiferroic Oxide Superlattices / Megan E. Holtz [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2021. — apr. — Vol. 126, no. 15. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.126.157601>.
2. Kikuchi Hideyuki, Hanawa Hidehito, Honda Yuki. Development of polyamide-imide/silica nanocomposite enameled wire // *Electronics and Communications in Japan*. — 2013. — . — Vol. 96, no. 6. — P. 41–48. — URL: <https://doi.org/10.1002/ecj.11456>.
3. Enhanced Solar-to-Hydrogen Generation with Broadband Epsilon-Near-Zero Nanostructured Photocatalysts / Yi Tian [et al.] // *Advanced Materials*. — 2017. — may. — Vol. 29, no. 27. — P. 1701165. — URL: <https://doi.org/10.1002/adma.201701165>.
4. Monochromatic Multimode Antennas on Epsilon-Near-Zero Materials / Owen Dominguez [et al.] // *Advanced Optical Materials*. — 2019. — mar. — Vol. 7, no. 10. — P. 1800826. — URL: <https://doi.org/10.1002/adom.201800826>.
5. Fully Automated Identification of Two-Dimensional Material Samples / Eliska Greplova [et al.] // *Physical Review Applied*. — 2020. — jun. — Vol. 13, no. 6. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.13.064017>.

6. Quantum transport in three-dimensional metalattices of platinum featuring an unprecedentedly large surface area to volume ratio / Yixuan Chen [et al.] // *Physical Review Materials*. — 2020. — mar. — Vol. 4, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevmaterials.4.035201>.
7. Epsilon-Near-Zero Photonics: A New Platform for Integrated Devices / Xinxiang Niu [et al.] // *Advanced Optical Materials*. — 2018. — mar. — Vol. 6, no. 10. — P. 1701292. — URL: <https://doi.org/10.1002/adom.201701292>.
8. Neeves A. E., Birnboim M. H. Composite structures for the enhancement of nonlinear-optical susceptibility // *Journal of the Optical Society of America B*. — 1989. — apr. — Vol. 6, no. 4. — P. 787. — URL: <https://doi.org/10.1364/josab.6.000787>.
9. Pendry J. B. Negative refraction makes a perfect lens // *Physical Review Letters*. — 2000. — oct. — Vol. 85, no. 18. — P. 3966–3969. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.85.3966>.
10. Alekseyev Leonid V., Narimanov Evgenii. Slow light and 3D imaging with non-magnetic negative index systems // *Opt. Express*. — 2006. — Vol. 14, no. 23. — P. 11184–11193. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/OE.14.011184>.
11. Veselago V. G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\varepsilon$  and  $\mu$  // *Usp. Fiz. Nauk*. — 1967. — Vol. 92, no. 7. — P. 517. — URL: <http://dx.doi.org/10.3367/UFNr.0092.196707d.0517>.
12. A negative permeability material at red light / H.-K. Yuan [et al.] // *Opt. Express*. — 2007. — Vol. 15, no. 3. — P. 1076. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/OE.15.001076>.
13. Shalaev V. M., Sarychev A. K. Nonlinear optics of random metal-dielectric films // *Phys. Rev. B*. — 1998. — may. — Vol. 57, no. 20. — P. 13265–13288. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.57.13265>.
14. Plasmonic properties of Ag nanoclusters in various polymer matrices / H. Takele [et al.] // *Nanotechnology*. — 2006. — jun. — Vol. 17, no. 14. — P. 3499–3505. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-4484/17/14/023>.
15. Walters G., Parkin I. P. The incorporation of noble metal nanoparticles into host matrix thin films: synthesis, characterisation and applications // *J. Mater. Chem*. — 2009. — Vol. 19, no. 5. — P. 574–590. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/B809646E>.
16. Hutter E., Fendler J. H. Exploitation of Localized Surface Plasmon Resonance // *Adv. Mater*. — 2004. — oct. — Vol. 16, no. 19. — P. 1685–1706. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/adma.200400271>.
17. Development of new decorative coatings based on gold nanoparticles dispersed in an amorphous TiO<sub>2</sub> dielectric matrix / M. Torrell [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. — 2010. — jan. — Vol. 204, no. 9-10. — P. 1569–1575. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.10.003>.
18. Atomic level imaging of Au nanocluster dispersed in TiO<sub>2</sub> and SrTiO<sub>3</sub> / C. M. Wang [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. — 2006. — jan. — Vol. 242, no. 1-2. — P. 380–382. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2005.08.144>.


19. Pacholski C., Kornowski A., Weller H. Site-specific photodeposition of silver on ZnO nanorods // *Angewandte Chemie International Edition*. — 2004. — sep. — Vol. 43, no. 36. — P. 4774–4777. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/anie.200453880>.
20. Wu J.-J., Tseng Ch.-H. Photocatalytic properties of nc-Au/ZnO nanorod composites // *Applied Catalysis B: Environmental*. — 2006. — jun. — Vol. 66, no. 1-2. — P. 51–57. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2006.02.013>.
21. Synthesis of CdS Nanorods by an Ethylenediamine Assisted Hydrothermal Method for Photocatalytic Hydrogen Evolution / Yu. Li [et al.] // *J. Phys. Chem. C*. — 2009. — may. — Vol. 113, no. 21. — P. 9352–9358. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/jp901505j>.
22. Optical properties of Au nanocluster embedded dielectric films / S. Cho [et al.] // *Thin Solid Films*. — 2000. — dec. — Vol. 377-378. — P. 97–102. — URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6090\(00\)01391-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6090(00)01391-2).
23. The optical Kerr effect in small metal particles and metal colloids: The case of gold / F. Hache [et al.] // *Applied Physics A: Solids and Surface*. — 1988. — dec. — Vol. 47, no. 4. — P. 347–357. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00615498>.
24. Absorption and scattering of light by small particles / Ed. by C. F. Bohren, D. R. Huffman. — Wiley-Blackwell, 1998. — apr. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/9783527618156>.
25. Altunin K. K., Gadomsky O. N. High-negative effective refractive index of silver nanoparticles system in nanocomposite films // *Optics Communications*. — 2012. — mar. — Vol. 285, no. 5. — P. 816–820. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2011.11.033>.
26. Near-field effect in composite nanomaterials with a quasi-zero refractive index / O. N. Gadomsky [et al.] // *Optics Communications*. — 2014. — mar. — Vol. 315. — P. 286–294. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2013.11.035>.
27. Gadomsky O. N., Altunin K. K., Ushakov N. M. Ideal optical antireflection of composite films activated by spherical nanoparticles // *JETP Letters*. — 2009. — oct. — Vol. 90, no. 4. — P. 251–256. — URL: <https://doi.org/10.1134/s0021364009160061>.
28. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*. — Oxford : Pergamon Press, 1969. — 720 p.

#### Information about authors:

**Konstantin Konstantinovich Altunin** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics and Technical Disciplines of the Ulyanovsk State Pedagogical University, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: [kostya.altunin@mail.ru](mailto:kostya.altunin@mail.ru)


ORCID iD  0000-0002-0725-9416


Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

**Elena Vladimirovna Alexandrova** — student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Ulyanovsk State Pedagogical University, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: [el0al@yandex.ru](mailto:el0al@yandex.ru)

ORCID iD  0000-0002-0107-3143

Web of Science ResearcherID  AAX-8431-2021