

УДК 535.3  
ББК 22.343  
ГРНТИ 29.31.21  
ВАК 01.04.05

## Исследование оптического пропускания и отражения границы раздела с нанокompозитной плёнкой на подложке из аморфного кремния

К. К. Алтунин<sup>id</sup>, Е. А. Гришанина<sup>id</sup><sup>1</sup>

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

Поступила в редакцию 14 ноября 2020 года

После переработки 1 декабря 2020 года

Опубликована 12 декабря 2020 года

---

**Аннотация.** Исследованы оптические свойства границы раздела воздуха с плёнкой из металл-полимерного нанокompозитного материала, расположенной на подложке из аморфного кремния. Матрицей нанокompозитной среды является полигидроксиэтилметакрилат. Система наноразмерных включений состоит из наночастиц серебра, имеющих сферическую форму. Рассчитаны зависимости энергетических коэффициентов пропускания и отражения от длины волны оптического излучения при различных углах падения внешнего оптического излучения на плёнку из металл-полимерного нанокompозитного материала, расположенную на подложке из аморфного кремния. Показано, что граница раздела воздуха с полубесконечной средой из металл-полимерного нанокompозитного материала имеет достаточно высокое оптическое пропускание и малое оптическое отражение в широком диапазоне оптических длин волн.

**Ключевые слова:** нанокompозит, нанокompозитная среда, наночастица, оптическое пропускание, оптическое отражение, оптическое излучение, граница раздела сред

---

## Введение

В работе рассматриваются нанокompозиты с металлическими наночастицами в полимерной матрице, находящиеся во внешнем поле оптического излучения. Исследование свойств нанокompозитных сред представляет собой важную задачу, встающую перед современной физикой твёрдого тела. Свойства таких сред могут значительно отличаться от свойств объёмных материалов, так и отдельных наночастиц, формирующих нанокompозит. Актуальность работы заключается в разработке методов и моделей для описания оптических процессов в нанокompозитах, которые могут быть использованы в разработке новых приборов и устройств наноразмерной оптоэлектроники, нанофотоники и наноплазмоники.

Целью работы является исследование оптических свойств металл-полимерных нанокompозитных плёнок с матрицей из полигидроксиэтилметакрилата с металлическими

---

<sup>1</sup>E-mail: grishanina1998@list.ru

наночастицами, находящимися во внешнем поле оптической волны. Матрицей нанокompозитной среды является полигидроксиэтилметакрилат. Система наноразмерных включений состоит из наночастиц серебра, имеющих сферическую форму.

Задачи исследования включают создание теоретической модели для адекватного описания оптических процессов в металл-полимерных нанокompозитных плёнках с матрицей из полимера с системой наноразмерных включений из металлических наночастиц, находящихся во внешнем поле оптического излучения; проведение компьютерных вычислений зависимости эффективного показателя преломления и эффективной диэлектрической проницаемости от длины волны излучения, коэффициентов отражения и пропускания оптического излучения нанокompозитной плёнки с матрицей из полимера с включениями из металлических наночастиц от длины волны оптического излучения при различных значениях параметров нанокompозитной плёнки и наночастиц, находящихся в поле оптического излучения, от длины волны излучения и угла падения излучения.

Объектом исследования является металл-полимерный нанокompозит с металлическими наночастицами. Предметом исследования выбрана металл-полимерная нанокompозитная плёнка, находящаяся во внешнем поле оптического излучения. В качестве материала нанокompозита исследуются металл-полимерные нанокompозитные материалы на примере полигидроксиэтилметакрилата с наночастицами серебра сферической формы.

Гипотеза исследования состоит в возможности численного прогнозирования оптических свойств металл-полимерных нанокompозитов.

В качестве методов исследования используются теоретические и численные методы расчёта оптических характеристик нанокompозитов, методы программирования задач нанооптики.

В качестве методов исследования выбраны металл-полимерные нанокompозитные плёнки с наночастицами серебра, расположенные на подложке из аморфного кремния.

## **Обзор работ по оптическим свойствам наноструктурных сред**

В последние десятилетия были проведены обширные исследования и документирование синтеза и характеристики наноразмерных материалов, что позволило учёным не только получить глубокие знания о взаимосвязи между свойствами, размером, формой и составом, но и также огромный контроль над производством материалов в диапазоне от 1 до 100 нм и нескольких сотен нанометров.

Наноструктурные материалы с отрицательными значениями эффективной диэлектрической проницаемости и эффективной магнитной проницаемости находят применение в новых устройствах оптики и оптоэлектроники.

Область исследования наноструктурных материалов развивается, в частности, из-за интереса для потенциальных применений в поисках новых оптоэлектронных устройств с замедлением света [2], идеальной линзы [3], наноматериалов с отрицательными значениями диэлектрической проницаемости и магнитной проницаемости [1], наноматериалов с отрицательным показателем преломления [4]. Известен эффект усиления действующего электромагнитного поля вблизи поверхности металлических наночастиц [5], позволяющий создавать лазерные среды в виде композитов из лазерно-активных молекул на поверхности наночастиц. Нанокompозитные материалы, содержащие оксиды титана, представляют научный интерес из-за их возможного применения в оптоэлектронных устройствах [6, 7]. Усилия исследователей направлены на синтез высококачественных прозрачных плёнок, состоящих из полимерно- $\text{TiO}_2$  гибридных нанокompозитов, а также проведение всесторонних исследований линейных оптических свойств [8–12]. В настоящее время разработан ряд общих методов получения наночастиц, обзор которых

приведён в работе [13].

В последние годы значительный интерес к фундаментальным исследованиям в области квантовой оптики связан с появлением новых объектов исследования, таких как квантовые нити, квантовые точки, наноструктуры и атомные системы [14–17], а также развитием экспериментальных методов оптической микроскопии ближнего поля [18].

От атомов и молекул до кристаллов и объёмных компонентов, оптические материалы имеют естественную структуру в разных масштабах. Благодаря огромному прогрессу в нанотехнологиях, оптические материалы также могут быть искусственно структурированы в разных масштабах. Взаимодействие материалов с оптическими волнами и фотонами сильно зависит от структуры, которую затем можно использовать для управления распределением светового поля и распространением света. Это позволяет разрабатывать широкий спектр ключевых компонентов для оптических систем, и в настоящее время это основная область фотоники. Рефракция, интерференция, дифракция, рассеяние, анизотропия, поглощение, излучение света и нелинейные эффекты — всё это широко используется для разработки фотонных компонентов. Здесь попытаться в общем взглянуть на линейное и пассивное взаимодействие света со структурированными прозрачными материалами. Области применения многочисленны и в целом относятся к так называемым информационно-коммуникационным технологиям в более широком смысле и зелёной фотонике, в частности к фотоэлектрическим солнечным элементам.

Электромагнитная теория, основанная на феноменологических уравнениях Максвелла со строгим теоретическим подходом или с более или менее упрощёнными соображениями, позволяет описать распространение света в сложных средах, когда известны комплексные показатели преломления материалов. Понятие показателя преломления должно быть пересмотрено в некоторых случаях наноструктур. С увеличением вычислительной мощности уравнения Максвелла могут быть решены, какой бы ни была структура, но следует помнить, что выборка пространственных и временных переменных, которая обязательно конечна, всё ещё является приближённой.

Общей целью применения фотонных компонентов является возможность контролировать способ распространения и распространения света, его поляризацию и частоту.

Для поверхностных структур шероховатость поверхности вызывает рассеяние оптического излучения даже при высококачественном процессе полировки. Поверхность также может быть искусственно структурирована с периодическим рисунком или случайной поверхностью, чтобы иметь антиотражающие свойства или управлять направлением света посредством дифракции. Укладка тонких плёнок из разных материалов и различной толщины является важной областью оптических интерференционных покрытий. В зависимости от физического процесса осаждения и материала, естественная микроструктура или наноструктура плёнок может быть более или менее сложной. Это имеет различные последствия для их оптических свойств. Когда плёнки периодически структурированы в одном, двух или трёх измерениях, говорят о фотонных кристаллах, потому что световые волны ведут себя подобно волновой функции электронов в кристаллах. Оптически интерференционные покрытия можно рассматривать как одномерные фотонные кристаллы. Метаматериалы также относятся к области фотонных кристаллов. Название фотонный кристалл в настоящее время используется в более широком смысле, поскольку оно может также касаться непериодических структур.

Другая область нанофотоники, которая сильно развивается, состоит из плазмоники. Это касается использования плазмонного резонанса в небольших металлических наноструктурах различной формы. В этой области проделана большая работа для различных применений, таких как плазмонные схемы, плазмонные солнечные элементы, поверхностное комбинационное рассеяние или комбинационное рассеяние. Ещё одна область, появившаяся десять лет назад и являющаяся ещё одной актуальной темой, каса-

ется оптических свойств квантовых структур, позволяющих создавать биологические метки, эффективные светоизлучающие диоды, эффективные солнечные элементы или плоские дисплеи с низким потреблением. Моделирование определяющих свойств плёнок, включая квантовые точки, не может быть выполнено с помощью обычной модели гармонического осциллятора. Поэтому необходимы новые подходы, учитывающие квантовое удержание электронов в наноструктурах различной формы.

Развитие нанотехнологии открывает широкие горизонты в проектировании новых оптоэлектронных приборов и устройств на основе наноразмерных систем. В настоящее время интенсивно исследуются технологии получения и физические свойства новых искусственных наноматериалов и метаматериалов с атомными кластерами [19, 20] и металлическими наночастицами [21–24]. Некоторые из новых наноматериалов с усиленным оптическим пропусканием [21, 22], наноматериалов с квази нулевым показателем преломления [25] и наноматериалов с сильно отрицательными значениями комплексного показателя преломления [26] могут быть использованы в наноразмерных оптоэлектронных устройствах с управлением при помощи излучения оптического диапазона.

Большое число теоретических и экспериментальных работ посвящено исследованию свойств метаматериалов с отрицательным показателем преломления (см. обзор [13]).

Физика наноматериалов с диэлектрической проницаемостью, обладающей квази нулевыми значениями, которые поддерживаются нанослоем на частоте обнуления диэлектрической проницаемости, в последнее время является предметом дискуссий. Квази нулевое значение действительной части диэлектрической проницаемости нанокompозитной плёнки из полимерной матрицы с металлическими наночастицами превышает значение диэлектрической проницаемости для алмазоподобных просветляющих покрытий и согласуется со значением диэлектрической проницаемости, полученного из экспериментальных данных по оптическому отражению от металл-полимерного нанокompозитной плёнки [21]. Оптический отклик систем с квази нулевым показателем преломления в последнее время стал предметом интереса, поскольку было показано, что электромагнитное поле внутри среды с квази нулевыми параметрами, то есть исчезающими значениями диэлектрической проницаемости и магнитной проницаемости, обладает уникальными оптическими свойствами.

Эти особенности могут использоваться в различных оптических приложениях, таких как проектирование волнового фронта, адаптация диаграммы направленности [27, 28], невзаимные магнитооптические эффекты [29], нелинейное сверхбыстрое оптическое переключение [30, 31], измерение диэлектрической проницаемости [32, 33], и широкополосное идеальное поглощение [34, 35]. Недавние исследования показывают, что эpsilon-близкие к нулю свойства также могут наблюдаться в одной тонкоплёночной оксидной плёнке с высокой степенью легирования. Наблюдаемые уникальные свойства включают улучшенное поглощение в прозрачных проводящих оксидных слоях с квази нулевой диэлектрической проницаемостью [34, 36–39], улучшенные свойства резонансной связи с антенной [37, 40, 41] и сильно увеличенный нелинейный отклик и генерацию света в прозрачной проводящей оксидной плёнке [31, 42–45]. Кроме того, электрическая настройка проводящих оксидных материалов на эpsilon-почти нулевой режим приводит к эффективной манипуляции и модуляции света [46–48]. Однако большинство исследований оптических свойств сред с квази нулевой диэлектрической проницаемостью ограничиваются возбуждением эpsilon-близких к нулю мод в плоских структурах или металловых поверхностях с малой длиной взаимодействия, что ограничивает платформу возбуждения для новых оптических применений.

В статье [30] продемонстрировано теоретически, что электромагнитные волны могут быть «сжаты» и могут туннелировать через очень узкие каналы, заполненные эpsilon-близкие к нулю материалами. Фронт входящей плоской волны повторяется на выход-

ной границе раздела независимо от конкретной геометрии канала. Получена замкнутая аналитическая формула для параметров рассеяния определённого класса геометрий. Обсуждается, что в некоторых случаях изотропия эpsilon-близкого к нулю материала не может быть проблемой. Предложена и численно изучена метаматериальная реализация анизотропного материала с квазиулевым диэлектрической проницаемостью.

В статье [31] показано, что нелинейно-оптические явления имеют решающее значение для широкого спектра приложений, таких как микроскопия, полностью оптическая обработка данных и квантовая информация. Однако материалы обычно демонстрируют слабую оптическую нелинейность даже при интенсивном когерентном освещении. Сообщается, что оксид индия и олова может приобретать сверхбыстрый и большой зависящий от интенсивности показатель преломления в области спектра, где реальная часть его диэлектрической проницаемости обращается в нуль. Наблюдается изменение действительной части показателя преломления на  $0.72 \pm 0.025$ , что соответствует 170% линейного показателя преломления. Это изменение показателя преломления является обратимым со временем восстановления около 360 фемтосекунд. Это даёт возможность конструировать материальные структуры со значительной сверхбыстрой нелинейностью для приложений в нанопотонике.

В статье [32] использовано усиление поля, вызванное сжатием и туннелированием энергии в сверхплоских волноводных каналах, наполненных метаматериалом, с практически нулевой эффективной диэлектрической проницаемостью, чтобы ощутить небольшие изменения диэлектрической проницаемости в нанобъекте.

В работе [33] показано, что эpsilon-близкое к нулю явление туннелирования позволяет полностью передавать волны через узкий канал даже при сильном геометрическом несоответствии. Продемонстрировано нелинейное управление эpsilon-близким к нулю туннелированием внешним полем, а также автомодуляция резонанса пропускания за счёт падающей волны. Используя секцию волновода вблизи частоты среза в качестве системы эpsilon-близкий к нулю, вводим диод с перестраиваемой и нелинейной ёмкостью, чтобы продемонстрировать оба этих эффекта. Эти результаты подтверждают более ранние теоретические идеи об использовании канала с квазиулевым диэлектрической проницаемостью для диэлектрического зондирования и их потенциальное применение для перестраиваемых структур медленного света.

Идеальное поглощение падающего света важно как для фундаментальных исследований взаимодействия света с веществом, так и для практических применений устройств. До настоящего времени в исследованиях идеального поглощения в основном использовались резонансные наноструктуры, которые требуют деликатного структурного рисунка. В статье [34] описана реализация настраиваемого и широкополосного поглощения в ближней инфракрасной области, используя относительно простые тонкоплёночные покрытия. Скорректированы условия роста плёнки оксида индия и олова и контролируется длина волны среды с квазиулевым диэлектрической проницаемостью. Показано, что это приводит к высоконастраиваемому идеальному поглощению в телекоммуникационном окне. Затем, используя многослойный оксид индия и олова с различными длинами волн, близкими к нулю, продемонстрировано широкополосное идеальное поглощение, которое охватывает широкий диапазон длин волн, близких к инфракрасному.

Проведённый анализ научных работ по исследованиям наноконструктивных материалов доказывает научную актуальность и практическую значимость рассматриваемых проблем в современной оптике наноструктур. Это объясняется тем, что наноконструктивные материалы из полимерной матрицы с наноразмерными металлическими включениями, содержащими наночастицы из благородных металлов, играют особую роль в быстро развивающихся отраслях современной оптики, оптоэлектроники и оптической техники, специализирующихся на изучении нанобъектов.

## Теоретическая модель и результаты численных расчётов отражения и пропускания нанокompозитной плёнки

Амплитудные коэффициенты Френеля для плёнки могут быть записаны в точной форме [49], как

$$r_1^s = \frac{E_r^s(0)}{E_{in}^s(0)} = \frac{r_{01}^s + r_{12}^s \exp(i2\phi_1)}{1 + r_{01}^s r_{12}^s \exp(i2\phi_1)}, \quad (1)$$

$$r_1^p = \frac{E_r^p(0)}{E_{in}^p(0)} = \frac{r_{01}^p + r_{12}^p \exp(i2\phi_1)}{1 + r_{01}^p r_{12}^p \exp(i2\phi_1)}, \quad (2)$$

где фазовая толщина нанокompозитной плёнки имеет вид

$$\phi_1 = \frac{2\pi d_1}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_1 - \varepsilon_0 \sin^2 \theta_0}, \quad (3)$$

где  $\theta_0$  – угол падения внешнего излучения. Амплитудные коэффициенты Френеля для оптического пропускания нанокompозитной плёнки определяются выражениями:

$$t_1^s = \frac{E_t^s(0)}{E_{in}^s(0)} = \frac{t_{01}^s t_{12}^s \exp(i\phi_1)}{1 + r_{01}^s r_{12}^s \exp(i2\phi_1)}, \quad (4)$$

$$t_1^p = \frac{E_t^p(0)}{E_{in}^p(0)} = \frac{t_{01}^p t_{12}^p \exp(i\phi_1)}{1 + r_{01}^p r_{12}^p \exp(i2\phi_1)}. \quad (5)$$

Рассмотрим коэффициенты Френеля для отражения и пропускания оптического излучения по энергии для нанокompозитной плёнки. Энергетические коэффициенты отражения и пропускания нанокompозитной плёнки определим по формулам:

$$R_1^s = |r_1^s|^2, \quad (6)$$

$$T_1^s = \frac{q_2^s}{q_0^s} |t_1^s|^2. \quad (7)$$

Для границы раздела двух нанокompозитных сред энергетические коэффициенты отражения и пропускания границы раздела определяем по формулам:

$$R_{01}^s = |r_{01}^s|^2, \quad (8)$$

$$T_{01}^s = \frac{q_1^s}{q_0^s} |t_{01}^s|^2. \quad (9)$$

В случае  $s$ -поляризации волновые числа равны  $q_0^s = n_0 \cos \theta_0$ ,  $q_1^s = n_1 \cos \theta_1$ .

Для оптического отражения и пропускания от нанокompозитной плёнки, расположенной на подложке, энергетические коэффициенты отражения и пропускания равны

$$R_1^s = |r_1^s|^2, \quad R_1^p = |r_1^p|^2, \quad R_1 = \frac{1}{2} (R_1^s + R_1^p), \quad (10)$$

$$T_1^s = \frac{q_2^s}{q_0^s} |t_1^s|^2, \quad T_1^p = \frac{q_2^p}{q_0^p} |t_1^p|^2, \quad T_1 = \frac{1}{2} (T_1^s + T_1^p), \quad (11)$$

где  $q_j^s = n_j \cos \theta_j$ ,  $q_j^p = n_j / \cos \theta_j$ .

В случае нормального падения излучения внешней оптической волны коэффициенты Френеля для отражения и пропускания по энергии имеют вид

$$R_1 = \frac{(n_0^2 + n_1^2)(n_1^2 + n_2^2) - 4n_0 n_1^2 n_2 + (n_0^2 - n_1^2)(n_1^2 - n_2^2) \cos 2\phi_1}{(n_0^2 + n_1^2)(n_1^2 + n_2^2) + 4n_0 n_1^2 n_2 + (n_0^2 - n_1^2)(n_1^2 - n_2^2) \cos 2\phi_1}, \quad (12)$$

$$T_1 = \frac{8n_0 n_1^2 n_2}{(n_0^2 + n_1^2)(n_1^2 + n_2^2) + 4n_0 n_1^2 n_2 + (n_0^2 - n_1^2)(n_1^2 - n_2^2) \cos 2\phi_1}, \quad (13)$$

где введена фазовая толщина нанокompозитной плёнки  $\phi_1 = k_0 n_1 d_1 \cos \theta_1$ .

Эффективная диэлектрическая проницаемость нанокompозитной среды в приближении эффективной среды может быть найдена из формулы

$$\frac{\varepsilon_{\text{eff}} - \varepsilon_m}{g(\varepsilon_{\text{eff}} - \varepsilon_m) + \varepsilon_m} = f \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_m}{g(\varepsilon_p - \varepsilon_m) + \varepsilon_m}, \quad (14)$$

где  $f$  – фактор заполнения металлическими наночастицами нанокompозитной среды,  $g$  – фактор деполяризации, определяемый формой и ориентацией частицы. Для наночастиц сферической формы деполяризующий фактор принимает значение  $g = 1/3$ . Выразим эффективную диэлектрическую проницаемость нанокompозитной среды в явном виде. Тогда получим следующее выражение

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_m \left( 1 + \frac{f(\varepsilon_p - \varepsilon_m)}{\varepsilon_m + (1-f)g(\varepsilon_p - \varepsilon_m)} \right), \quad (15)$$

которое будет пригодно для проведения численных расчётов без численного решения уравнения (14) для нахождения эффективной поляризуемости металл-полимерной нанокompозитной среды.

Приведём результаты расчёта энергетических коэффициентов отражения, пропускания и поглощения от длины волны излучения для структуры, в которой оптическое излучение падает из среды 0 (воздух) на нанокompозитную среду 1 (PHEMA+Ag), находящуюся на подложке из аморфного кремния.

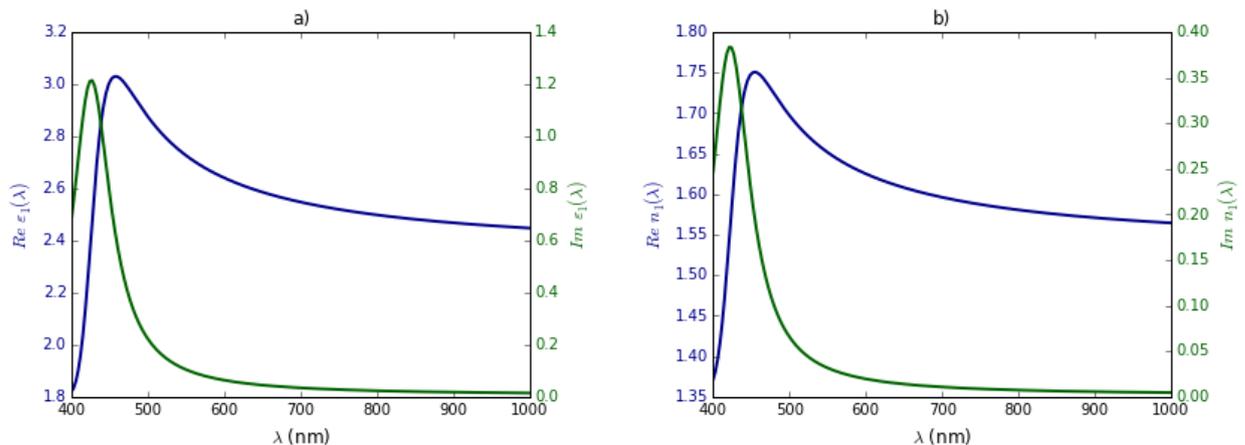


Рис. 1. Зависимость эффективной диэлектрической проницаемости (а) и эффективного показателя преломления (б) нанокompозитной плёнки (PHEMA+Ag), находящейся на подложке из аморфного кремния, от длины волны оптического излучения. Угол падения внешнего оптического излучения  $\theta_0 = 0^\circ$ . Толщина нанокompозитной плёнки равна  $d_1 = 85$  мкм. Радиус наночастиц серебра  $a_1 = 2.5$  нм, фактор заполнения  $f_1 = 3\%$ .

На рис. 1 изображена зависимость диэлектрической проницаемости (а) и эффективного показателя преломления (б) нанокompозитной плёнки (PHEMA+Ag), находящейся на подложке из аморфного кремния, от длины волны оптического излучения. Угол падения внешнего оптического излучения  $\theta_0 = 0^\circ$ . Матрицей нанокompозитной среды является полигидроксиэтилметакрилат. Толщина нанокompозитной плёнки равна  $d_1 = 85$  мкм. Радиус наночастиц серебра  $a_1 = 2.5$  нм, фактор заполнения  $f_1 = 3\%$ .

На рис. 2 изображена зависимость энергетических коэффициентов оптического отражения (а) и оптического пропускания (б) нанокompозитной плёнки (PHEMA+Ag), находящейся на подложке из аморфного кремния, от длины волны оптического излучения. Угол падения внешнего оптического излучения  $\theta_0 = 0^\circ$ . Толщина нанокompозитной

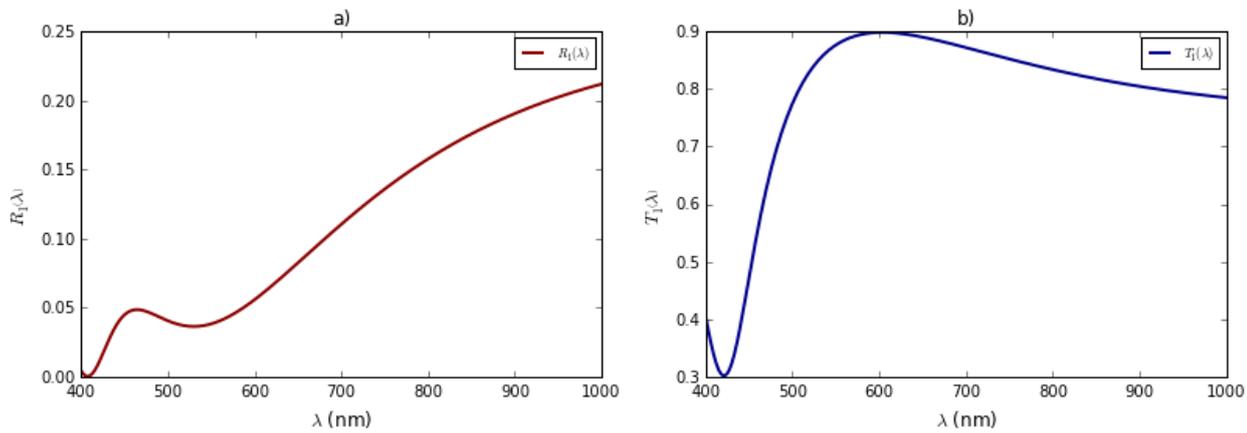


Рис. 2. Зависимость энергетических коэффициентов оптического отражения (а) и оптического пропускания (б) нанокompозитной плёнки (PHEMA+Ag), находящейся на подложке из аморфного кремния, от длины волны оптического излучения. Угол падения внешнего оптического излучения  $\theta_0 = 0^\circ$ . Толщина нанокompозитной плёнки равна  $d_1 = 85$  мкм. Радиус наночастиц серебра  $a_1 = 2.5$  нм, фактор заполнения  $f_1 = 3\%$ .

плёнки равна  $d_1 = 85$  мкм. Радиус наночастиц серебра  $a_1 = 2.5$  нм, фактор заполнения  $f_1 = 3\%$ .

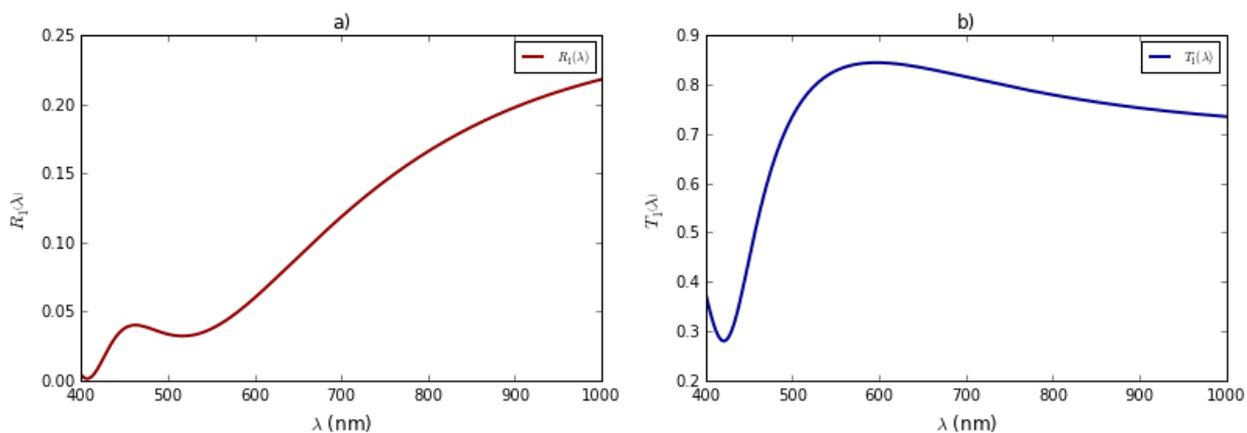


Рис. 3. Зависимость энергетических коэффициентов оптического отражения (а) и оптического пропускания (б) нанокompозитной плёнки (PHEMA+Ag), находящейся на подложке из аморфного кремния, от длины волны оптического излучения. Угол падения внешнего оптического излучения  $\theta_0 = 20^\circ$ . Толщина нанокompозитной плёнки равна  $d_1 = 85$  мкм. Радиус наночастиц серебра  $a_1 = 2.5$  нм, фактор заполнения  $f_1 = 3\%$ .

На рис. 3 изображена зависимость энергетических коэффициентов оптического отражения (а) и оптического пропускания (б) нанокompозитной плёнки (PHEMA+Ag), находящейся на подложке из аморфного кремния, от длины волны оптического излучения. Угол падения внешнего оптического излучения  $\theta_0 = 20^\circ$ . Толщина нанокompозитной плёнки равна  $d_1 = 85$  мкм. Радиус наночастиц серебра  $a_1 = 2.5$  нм, фактор заполнения  $f_1 = 3\%$ .

На рис. 4 изображена зависимость энергетических коэффициентов оптического отражения (а) и оптического пропускания (б) нанокompозитной плёнки (PHEMA+Ag), находящейся на подложке из аморфного кремния, от длины волны оптического излучения. Угол падения внешнего оптического излучения  $\theta_0 = 40^\circ$ . Толщина нанокompозитной плёнки равна  $d_1 = 85$  мкм. Радиус наночастиц серебра  $a_1 = 2.5$  нм, фактор

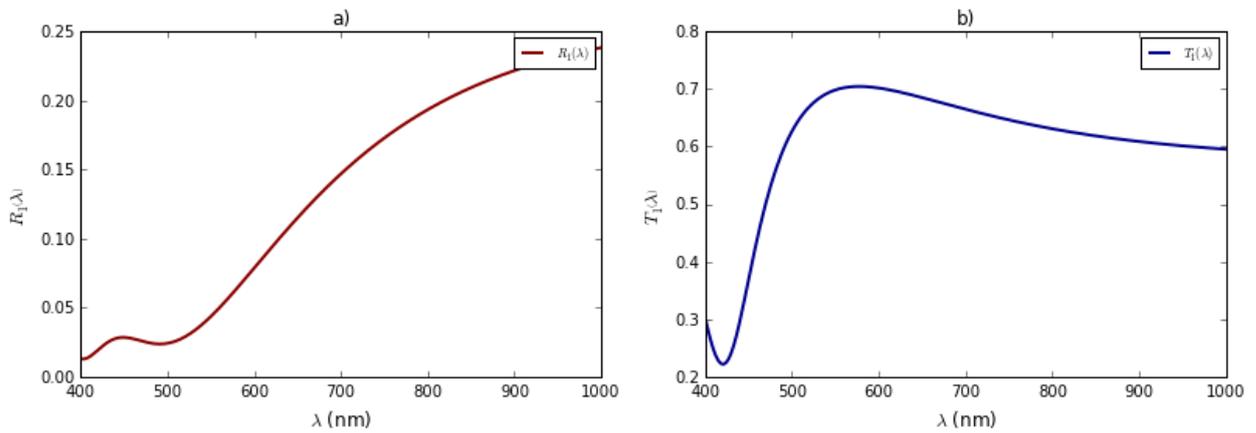


Рис. 4. Зависимость энергетических коэффициентов оптического отражения (а) и оптического пропускания (б) нанокompозитной плёнки (PHEMA+Ag), находящейся на подложке из аморфного кремния, от длины волны оптического излучения. Угол падения внешнего оптического излучения  $\theta_0 = 40^\circ$ . Толщина нанокompозитной плёнки равна  $d_1 = 85$  мкм. Радиус наночастиц серебра  $a_1 = 2.5$  нм, фактор заполнения  $f_1 = 3\%$ .

заполнения  $f_1 = 3\%$ .

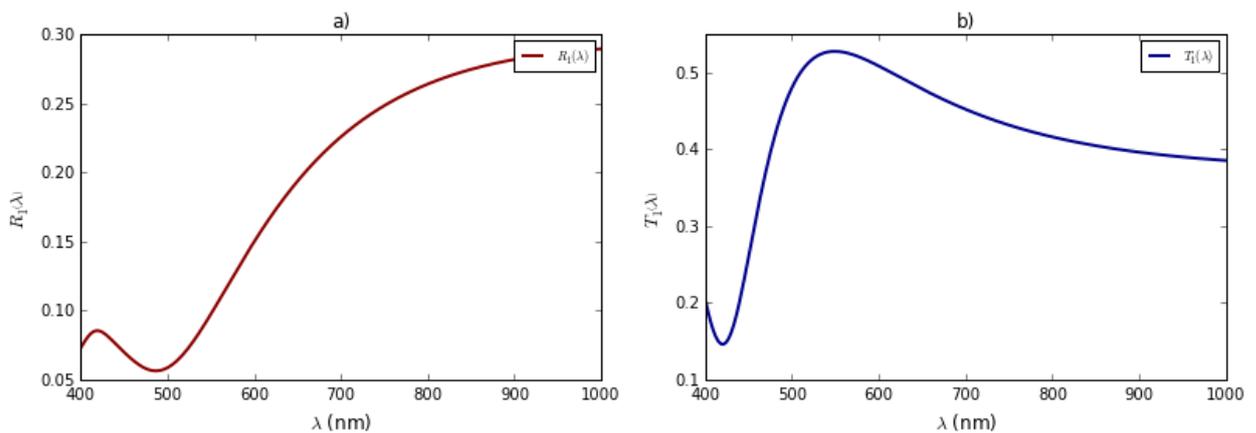


Рис. 5. Зависимость энергетических коэффициентов оптического отражения (а) и оптического пропускания (б) нанокompозитной плёнки (PHEMA+Ag), находящейся на подложке из аморфного кремния, от длины волны оптического излучения. Угол падения внешнего оптического излучения  $\theta_0 = 60^\circ$ . Толщина нанокompозитной плёнки равна  $d_1 = 85$  мкм. Радиус наночастиц серебра  $a_1 = 2.5$  нм, фактор заполнения  $f_1 = 3\%$ .

На рис. 5 изображена зависимость энергетических коэффициентов оптического отражения (а) и оптического пропускания (б) нанокompозитной плёнки (PHEMA+Ag), находящейся на подложке из аморфного кремния, от длины волны оптического излучения. Угол падения внешнего оптического излучения  $\theta_0 = 60^\circ$ . Толщина нанокompозитной плёнки равна  $d_1 = 85$  мкм. Радиус наночастиц серебра  $a_1 = 2.5$  нм, фактор заполнения  $f_1 = 3\%$ .

На рис. 6 изображена зависимость диэлектрической проницаемости (а) и эффективного показателя преломления (б) нанокompозитной плёнки (PHEMA+Ag), находящейся на подложке из аморфного кремния, от длины волны оптического излучения. Угол падения внешнего оптического излучения  $\theta_0 = 0^\circ$ . Матрицей нанокompозитной среды является полигидроксиэтилметакрилат. Толщина нанокompозитной плёнки равна  $d_1 = 85$  мкм. Радиус наночастиц серебра  $a_1 = 4.5$  нм, фактор заполнения  $f_1 = 5\%$ .

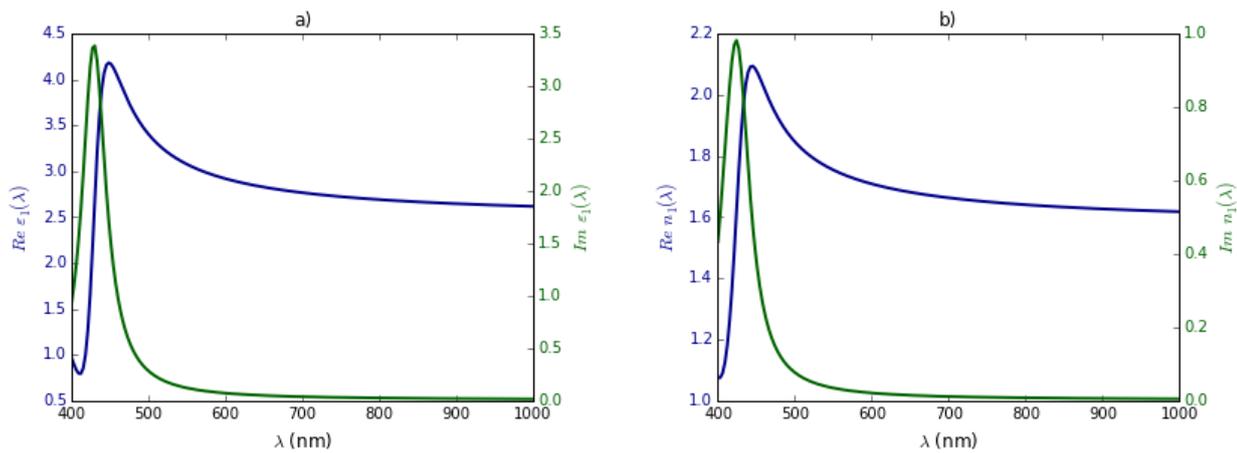


Рис. 6. Зависимость эффективной диэлектрической проницаемости (а) и эффективного показателя преломления (b) нанокompозитной плёнки (PHEMA+Ag), находящейся на подложке из аморфного кремния, от длины волны оптического излучения. Угол падения внешнего оптического излучения  $\theta_0 = 0^\circ$ . Толщина нанокompозитной плёнки равна  $d_1 = 85$  мкм. Радиус наночастиц серебра  $a_1 = 4.5$  нм, фактор заполнения  $f_1 = 5\%$ .

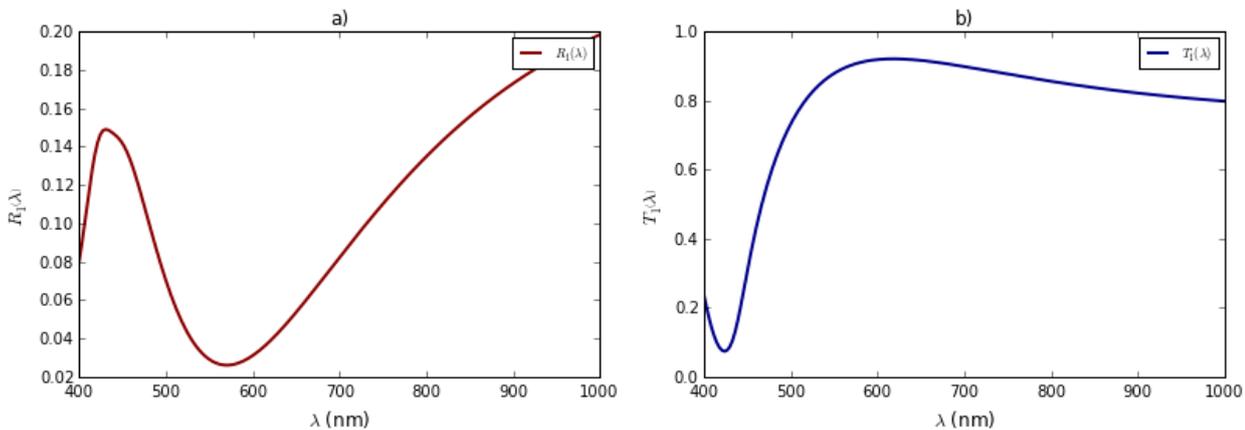


Рис. 7. Зависимость энергетических коэффициентов оптического отражения (а) и оптического пропускания (b) нанокompозитной плёнки (PHEMA+Ag), находящейся на подложке из аморфного кремния, от длины волны оптического излучения. Угол падения внешнего оптического излучения  $\theta_0 = 0^\circ$ . Толщина нанокompозитной плёнки равна  $d_1 = 85$  мкм. Радиус наночастиц серебра  $a_1 = 4.5$  нм, фактор заполнения  $f_1 = 5\%$ .

На рис. 7 изображена зависимость энергетических коэффициентов оптического отражения (а) и оптического пропускания (b) нанокompозитной плёнки (PHEMA+Ag), находящейся на подложке из аморфного кремния, от длины волны оптического излучения. Угол падения внешнего оптического излучения  $\theta_0 = 0^\circ$ . Толщина нанокompозитной плёнки равна  $d_1 = 85$  мкм. Радиус наночастиц серебра  $a_1 = 4.5$  нм, фактор заполнения  $f_1 = 5\%$ .

На рис. 8 изображена зависимость энергетических коэффициентов оптического отражения (а) и оптического пропускания (b) нанокompозитной плёнки (PHEMA+Ag), находящейся на подложке из аморфного кремния, от длины волны оптического излучения. Угол падения внешнего оптического излучения  $\theta_0 = 20^\circ$ . Толщина нанокompозитной плёнки равна  $d_1 = 85$  мкм. Радиус наночастиц серебра  $a_1 = 4.5$  нм, фактор заполнения  $f_1 = 5\%$ .

На рис. 9 изображена зависимость энергетических коэффициентов оптического от-

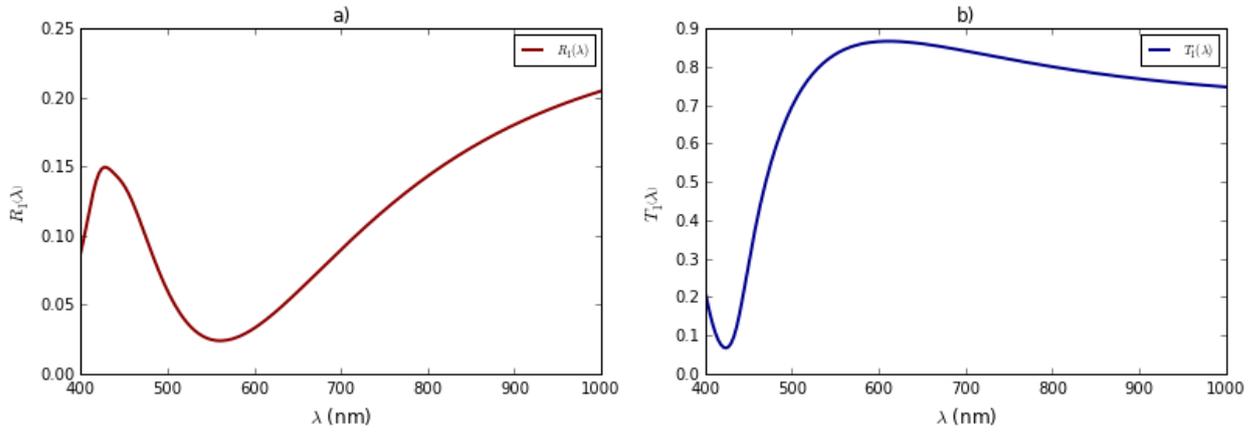


Рис. 8. Зависимость энергетических коэффициентов оптического отражения (а) и оптического пропускания (b) нанокompозитной плёнки (PNEMA+Ag), находящейся на подложке из аморфного кремния, от длины волны оптического излучения. Угол падения внешнего оптического излучения  $\theta_0 = 20^\circ$ . Толщина нанокompозитной плёнки равна  $d_1 = 85$  мкм. Радиус наночастиц серебра  $a_1 = 4.5$  нм, фактор заполнения  $f_1 = 5\%$ .

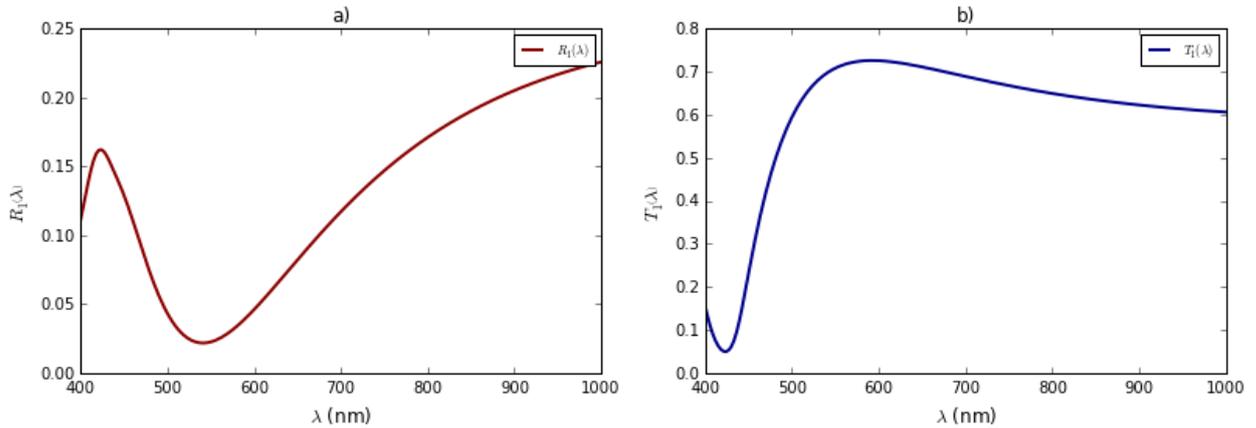


Рис. 9. Зависимость энергетических коэффициентов оптического отражения (а) и оптического пропускания (b) нанокompозитной плёнки (PNEMA+Ag), находящейся на подложке из аморфного кремния, от длины волны оптического излучения. Угол падения внешнего оптического излучения  $\theta_0 = 40^\circ$ . Толщина нанокompозитной плёнки равна  $d_1 = 85$  мкм. Радиус наночастиц серебра  $a_1 = 4.5$  нм, фактор заполнения  $f_1 = 5\%$ .

ражения (а) и оптического пропускания (b) нанокompозитной плёнки (PNEMA+Ag), находящейся на подложке из аморфного кремния, от длины волны оптического излучения. Угол падения внешнего оптического излучения  $\theta_0 = 40^\circ$ . Толщина нанокompозитной плёнки равна  $d_1 = 85$  мкм. Радиус наночастиц серебра  $a_1 = 4.5$  нм, фактор заполнения  $f_1 = 5\%$ .

На рис. 10 изображена зависимость энергетических коэффициентов оптического отражения (а) и оптического пропускания (b) нанокompозитной плёнки (PNEMA+Ag), находящейся на подложке из аморфного кремния, от длины волны оптического излучения. Угол падения внешнего оптического излучения  $\theta_0 = 60^\circ$ . Толщина нанокompозитной плёнки равна  $d_1 = 85$  мкм. Радиус наночастиц серебра  $a_1 = 4.5$  нм, фактор заполнения  $f_1 = 5\%$ . Видно, что нанокompозитная структура обладает высоким уровнем пропускания оптического излучения. Зависимость поглощения от угла падения излучения существует, но является достаточно слабой.

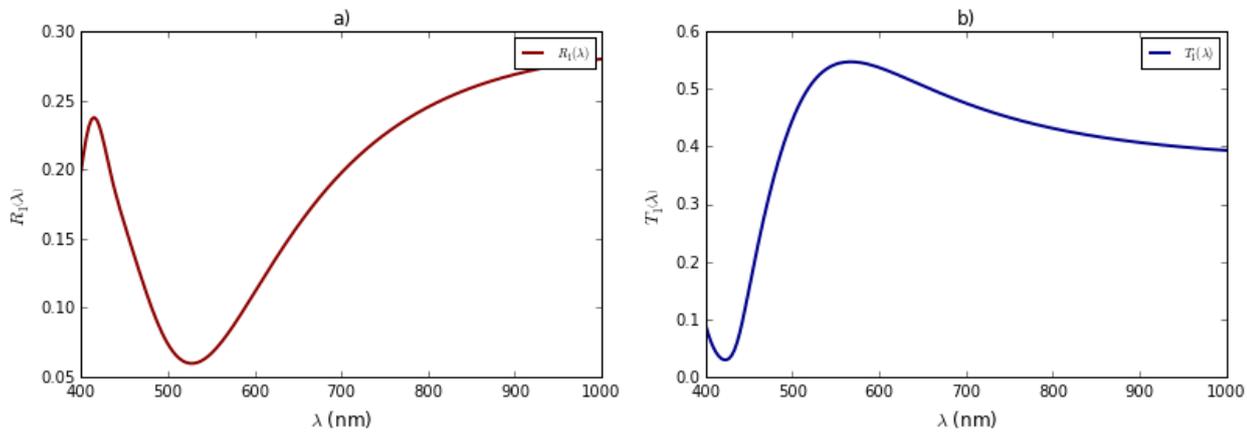


Рис. 10. Зависимость энергетических коэффициентов оптического отражения (а) и оптического пропускания (б) нанокompозитной плёнки (PHEMA+Ag), находящейся на подложке из аморфного кремния, от длины волны оптического излучения. Угол падения внешнего оптического излучения  $\theta_0 = 60^\circ$ . Толщина нанокompозитной плёнки равна  $d_1 = 85$  мкм. Радиус наночастиц серебра  $a_1 = 4.5$  нм, фактор заполнения  $f_1 = 5\%$ .

## Заключение

В работе проведено исследование оптических свойств нанокompозитных материалов, содержащих сферические наночастицы серебра. Проведено исследование теоретической модели, используемой для описания оптических свойств металл-полимерных нанокompозитных плёнок с металлическими наночастицами. Построена теоретическая модель, пригодная для адекватного описания оптических свойств нанокompозитной плёнки с наночастицами серебра, расположенной на подложке из аморфного кремния. Проведено численное исследование энергетических коэффициентов оптического отражения и оптического пропускания от нанокompозитной плёнки. В работе проведены численные вычисления оптического пропускания и отражения металл-полимерных нанокompозитов. Проведено рассмотрение оптического отражения и пропускания от нанокompозитной плёнки с наночастицами серебра, расположенной на подложке из аморфного кремния. Выявлен ряд теоретических и численных приёмов вычислений, перспективных с точки зрения направленного исследования физических свойств металл-полимерных нанокompозитов с металлическими наночастицами из благородных металлов. Составлена компьютерная программа на языке программирования Python для вычисления коэффициентов оптического отражения и пропускания металл-полимерной нанокompозитной плёнки с наночастицами серебра, расположенной на подложке из аморфного кремния. Построенные зависимости энергетических коэффициентов оптического пропускания и оптического отражения металл-полимерной нанокompозитной плёнки с наночастицами серебра, расположенной на подложке из аморфного кремния, демонстрируют высокое оптическое пропускание металл-полимерной нанокompозитной плёнки с наночастицами серебра, расположенной на подложке из аморфного кремния, при изменении весового содержания и геометрических размеров наночастиц серебра. Нанокompозитные среды являются той базой, на которой создаются новые материалы с заданными структурными, электронными и оптическими свойствами, которые определяются размером, формой и упорядоченностью составляющих их металлических наночастиц, а также факторами заполнения металлическими наночастицами.

Итак, в работе решена граничная задача взаимодействия оптической волны с металл-полимерными нанокompозитами. Построена теоретическая модель для описания оптических процессов оптического отражения и пропускания металл-полимерного нано-

композита, находящейся во внешнем поле оптического излучения. При помощи теоретических и численных методов последовательно исследованы оптические свойства металл-полимерных нанокомпозитов с металлическими наночастицами. Обнаруженное физическое явление усиленного прохождения оптического излучения заданной длины волны через металл-полимерный нанокомпозит с наночастицами серебра может быть использовано для разработки и конструирования новых оптоэлектронных приборов и устройств на основе металл-полимерных нанокомпозитных материалов с наночастицами серебра. Результаты данного исследования могут быть полезны для разработки наноматериалов с усиленным оптическим пропусканием.

Нанокомпозитные материалы из полимерной матрицы с наноразмерными металлическими включениями, содержащими наночастицы из благородных металлов, играют особую роль в быстро развивающихся отраслях современной оптики, оптоэлектроники и оптической техники, специализирующихся на изучении нанообъектов. Для современных сверхбыстродействующих устройств наноэлектроники и наноразмерной оптоэлектроники принципиально важно наличие наноразмерных структурных блоков и элементов. Использование нанокомпозитных покрытий обеспечивает высокоэффективное просветление, регулируемое во время роста плёнки, и не требует какого-либо структурного рисунка впоследствии. Это также облегчает интеграцию идеальных поглотителей в масштабе микросхемы с другими компонентами устройства. Широкополосное высокоэффективное просветление ослабляет условие единственной длины волны в предыдущих исследованиях идеального просветления и, таким образом, подходит для многих практических применений устройств, включая датчики, фотоприёмники и устройства сбора энергии.

#### Список использованных источников

1. Veselago Viktor 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>.
2. Alekseyev Leonid V., Narimanov Evgenii. Slow light and 3D imaging with non-magnetic negative index systems // *Optics Express.* — 2006. — Vol. 14, no. 23. — P. 11184. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.14.011184>.
3. Pendry J. B. Negative Refraction Makes a Perfect Lens // *Physical Review Letters.* — 2000. — Vol. 85, no. 18. — P. 3966–3969. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.85.3966>.
4. 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>.
5. 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>.
6. Preparation and structure analysis of titanium oxide nanotubes / G. H. Du [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* — 2001. — Vol. 79, no. 22. — P. 3702. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1423403>.
7. Suzuki Naoaki, Tomita Yasuo, Kojima Takashi. Holographic recording in TiO<sub>2</sub> nanoparticle-dispersed methacrylate photopolymer films // *Appl. Phys. Lett.* — 2002. — Vol. 81, no. 22. — P. 4121. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1525391>.

8. New high-refractive-index organic/inorganic hybrid materials from sol-gel processing / B. Wang [et al.] // *Macromolecules*. — 1991. — may. — Vol. 24, no. 11. — P. 3449–3450. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/ma00011a063>.
9. Zhang J., Luo S., Gui L. Poly(methyl methacrylate)-titania hybrid materials by sol-gel processing // *Journal of Materials Science*. — 1997. — Vol. 32, no. 6. — P. 1469–1472. — URL: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1018553901058>.
10. Synthesis and characterization of trialkoxysilane-capped poly(methyl methacrylate)-titania hybrid optical thin films / Wen-Chang Chen [et al.] // *Journal of Materials Chemistry*. — 1999. — Vol. 9, no. 12. — P. 2999–3003. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/A906157F>.
11. New observations on the optical properties of PPV/TiO<sub>2</sub> nanocomposites / Jing Zhang [et al.] // *Polymer*. — 2001. — apr. — Vol. 42, no. 8. — P. 3697–3702. — URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0032-3861\(00\)00703-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00703-5).
12. Lee Long-Hua, Chen Wen-Chang. High-refractive-index thin films prepared from trialkoxysilane-capped poly(methyl methacrylate)-titania materials // *Chemistry of Materials*. — 2001. — mar. — Vol. 13, no. 3. — P. 1137–1142. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/cm000937z>.
13. Vinogradov A. P., Dorofeenko A. V., Zouhdi S. On the problem of the effective parameters of metamaterials // *Physics-Uspekhi*. — 2008. — may. — Vol. 51, no. 5. — P. 485–492. — URL: <http://dx.doi.org/10.1070/PU2008v051n05ABEH006533>.
14. Xi J.-Q., Kim Jong Kyu, Schubert E. F. Silica Nanorod-Array Films with Very Low Refractive Indices // *Nano Letters*. — 2005. — jul. — Vol. 5, no. 7. — P. 1385–1387. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/nl050698k>.
15. Суздалев И. П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. — Москва : КомКнига, 2006. — 592 с.
16. Кособудский И. Д., Ушаков Н. М., Юрков Ю. Г. Введение в химию и физику наноразмерных объектов. — Саратов : СГТУ, Изд. ООО “Вертикаль”, 2007. — 182 с.
17. Физическая химия наноразмерных объектов: композиционные материалы / И. Д. Кособудский [и др.]. — Саратов : СГТУ, Издательство ООО “Рата”, 2009. — 230 с.
18. Gadomsky O. N., Kadochkin A. S. Boundary-value problems in near-field optical microscopy and optical size resonances // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. — 2003. — sep. — Vol. 97, no. 3. — P. 466–478. — URL: <http://dx.doi.org/10.1134/1.1618333>.
19. Гадомский О. Н., Алтунин К. К., Зубков Е. Г. Радиационная теория металлического кластера // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки*. — 2012. — № 3. — С. 144–152.
20. Уменьшение естественной ширины атомных уровней в наноструктурных системах / О. Н. Гадомский [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки*. — 2012. — № 3. — С. 153–163.

21. Усиленное оптическое пропускание композитных наноструктурных толстых плёнок с квазиулевым показателем преломления (I. Экспериментальные данные) / О. Н. Гадомский [и др.] // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. — 2012. — № 4. — С. 227–236.
22. Усиленное оптическое пропускание композитных наноструктурных толстых плёнок с квазиулевым показателем преломления (II. Теория) / О. Н. Гадомский [и др.] // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. — 2013. — № 1. — С. 122–134.
23. Алтунин К. К. Высокоэффективные просветляющие оптические покрытия из нанокомпозитных материалов с квазиулевыми показателями преломления и поглощения // Радиоэлектронная техника. — 2013. — № 1. — С. 168–177.
24. Алтунин К. К. Сверхпрозрачные композитные наноматериалы с квазиулевыми значениями показателя преломления для солнечной энергетики // Радиоэлектронная техника. — 2013. — № 1. — С. 178–189.
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. 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>.
27. Epsilon-near-zero metamaterials and electromagnetic sources: Tailoring the radiation phase pattern / Andrea Alù [et al.] // Physical Review B. — 2007. — apr. — Vol. 75, no. 15. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.75.155410>.
28. Ziolkowski Richard W. Propagation in and scattering from a matched metamaterial having a zero index of refraction // Physical Review E. — 2004. — oct. — Vol. 70, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.70.046608>.
29. Davoyan Arthur R., Mahmoud Ahmed M., Engheta Nader. Optical isolation with epsilon-near-zero metamaterials // Optics Express. — 2013. — feb. — Vol. 21, no. 3. — P. 3279. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.21.003279>.
30. Silveirinha Mário, Engheta Nader. Tunneling of Electromagnetic Energy through Subwavelength Channels and Bends using-Near-Zero Materials // Physical Review Letters. — 2006. — oct. — Vol. 97, no. 15. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.97.157403>.
31. Alam M. Z., Leon I. De, Boyd R. W. Large optical nonlinearity of indium tin oxide in its epsilon-near-zero region // Science. — 2016. — apr. — Vol. 352, no. 6287. — P. 795–797. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.aae0330>.
32. Alù Andrea, Engheta Nader. Dielectric sensing in-near-zero narrow waveguide channels // Physical Review B. — 2008. — jul. — Vol. 78, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.78.045102>.
33. Nonlinear control of tunneling through an epsilon-near-zero channel / David A. Powell [et al.] // Physical Review B. — 2009. — jun. — Vol. 79, no. 24. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.79.245135>.

34. Broadband Epsilon-Near-Zero Perfect Absorption in the Near-Infrared / Junho Yoon [et al.] // *Scientific Reports*. — 2015. — aug. — Vol. 5, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1038/srep12788>.
35. Excitation of epsilon-near-zero resonance in ultra-thin indium tin oxide shell embedded nanostructured optical fiber / Khant Minn [et al.] // *Scientific Reports*. — 2018. — feb. — Vol. 8, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19633-2>.
36. Directional perfect absorption using deep subwavelength low-permittivity films / Ting S. Luk [et al.] // *Physical Review B*. — 2014. — aug. — Vol. 90, no. 8. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.90.085411>.
37. General Strategy for Broadband Coherent Perfect Absorption and Multi-wavelength All-optical Switching Based on Epsilon-Near-Zero Multilayer Films / Tae Young Kim [et al.] // *Scientific Reports*. — 2016. — mar. — Vol. 6, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1038/srep22941>.
38. Campione Salvatore, Brener Igal, Marquier Francois. Theory of epsilon-near-zero modes in ultrathin films // *Physical Review B*. — 2015. — mar. — Vol. 91, no. 12. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.91.121408>.
39. Feng Simin, Halterman Klaus. Coherent perfect absorption in epsilon-near-zero metamaterials // *Physical Review B*. — 2012. — oct. — Vol. 86, no. 16. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.86.165103>.
40. Near-Infrared Strong Coupling between Metamaterials and Epsilon-near-Zero Modes in Degenerately Doped Semiconductor Nanolayers / Salvatore Campione [et al.] // *ACS Photonics*. — 2016. — jan. — Vol. 3, no. 2. — P. 293–297. — URL: <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.5b00663>.
41. Experimental verification of epsilon-near-zero plasmon polariton modes in degenerately doped semiconductor nanolayers / Salvatore Campione [et al.] // *Optics Express*. — 2016. — aug. — Vol. 24, no. 16. — P. 18782. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.24.018782>.
42. Comparative Study of Second-Harmonic Generation from Epsilon-Near-Zero Indium Tin Oxide and Titanium Nitride Nanolayers Excited in the Near-Infrared Spectral Range / Antonio Capretti [et al.] // *ACS Photonics*. — 2015. — oct. — Vol. 2, no. 11. — P. 1584–1591. — URL: <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.5b00355>.
43. Enhanced Nonlinear Refractive Index in Near-Zero Materials / L. Caspani [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2016. — jun. — Vol. 116, no. 23. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.116.233901>.
44. Epsilon-near-zero Al-doped ZnO for ultrafast switching at telecom wavelengths / N. Kinsey [et al.] // *Optica*. — 2015. — jul. — Vol. 2, no. 7. — P. 616. — URL: <https://doi.org/10.1364/optica.2.000616>.
45. Femtosecond optical polarization switching using a cadmium oxide-based perfect absorber / Yuanmu Yang [et al.] // *Nature Photonics*. — 2017. — may. — Vol. 11, no. 6. — P. 390–395. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2017.64>.
46. Electrically Tunable Epsilon-Near-Zero (ENZ) Metafilm Absorbers / Junghyun Park [et al.] // *Scientific Reports*. — 2015. — nov. — Vol. 5, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1038/srep15754>.

47. Gate-Tunable Conducting Oxide Metasurfaces / Yao-Wei Huang [et al.] // Nano Letters. — 2016. — sep. — Vol. 16, no. 9. — P. 5319–5325. — URL: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b00555>.
48. Nanoscale Conducting Oxide PlasMOSstor / Ho W. Lee [et al.] // Nano Letters. — 2014. — oct. — Vol. 14, no. 11. — P. 6463–6468. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl502998z>.
49. Born Max, Wolf Emil. 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 Алексеевна Гришанина** — магистрант факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: [grishanina1998@list.ru](mailto:grishanina1998@list.ru)

ORCID iD  0000-0003-4857-417X

Web of Science ResearcherID  ABH-1726-2020

# Investigation of optical transmission and reflection of the interface with a nanocomposite film on an amorphous silicon substrate

K. K. Altunin , E. A. Grishanina 

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

Submitted November 14, 2020

Resubmitted December 1, 2020

Published December 12, 2020

---

**Abstract.** The optical properties of the interface between air and a film of a metal-polymer nanocomposite material located on an amorphous silicon substrate are investigated. The matrix of the nanocomposite medium is polyhydroxyethyl methacrylate. The system of nanosized inclusions consists of spherical silver nanoparticles. The dependences of the energy transmission and reflection coefficients on the wavelength of optical radiation at various angles of incidence of external optical radiation on a film of a metal-polymer nanocomposite material located on an amorphous silicon substrate are calculated. It is shown that the interface between air and a semi-infinite medium made of a metal-polymer nanocomposite material has a sufficiently high optical transmission and low optical reflection in a wide range of optical wavelengths.

**Keywords:** nanocomposite, nanocomposite medium, nanoparticle, optical transmission, optical reflection, optical radiation, interface

PACS: 42.25.Bs

---

## References

1. Veselago Viktor 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>.
2. Pendry J. B. Negative Refraction Makes a Perfect Lens // *Physical Review Letters.* — 2000. — 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 // *Optics Express.* — 2006. — Vol. 14, no. 23. — P. 11184. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.14.011184>.
4. 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>.
5. 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>.
6. Preparation and structure analysis of titanium oxide nanotubes / G. H. Du [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* — 2001. — Vol. 79, no. 22. — P. 3702. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1423403>.

7. Suzuki Naoaki, Tomita Yasuo, Kojima Takashi. Holographic recording in TiO<sub>2</sub> nanoparticle-dispersed methacrylate photopolymer films // *Appl. Phys. Lett.* — 2002. — Vol. 81, no. 22. — P. 4121. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1525391>.
8. New high-refractive-index organic/inorganic hybrid materials from sol-gel processing / B. Wang [et al.] // *Macromolecules.* — 1991. — may. — Vol. 24, no. 11. — P. 3449–3450. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/ma00011a063>.
9. Zhang J., Luo S., Gui L. Poly(methyl methacrylate)-titania hybrid materials by sol-gel processing // *Journal of Materials Science.* — 1997. — Vol. 32, no. 6. — P. 1469–1472. — URL: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1018553901058>.
10. Synthesis and characterization of trialkoxysilane-capped poly(methyl methacrylate)-titania hybrid optical thin films / Wen-Chang Chen [et al.] // *Journal of Materials Chemistry.* — 1999. — Vol. 9, no. 12. — P. 2999–3003. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/A906157F>.
11. New observations on the optical properties of PPV/TiO<sub>2</sub> nanocomposites / Jing Zhang [et al.] // *Polymer.* — 2001. — apr. — Vol. 42, no. 8. — P. 3697–3702. — URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0032-3861\(00\)00703-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00703-5).
12. Lee Long-Hua, Chen Wen-Chang. High-refractive-index thin films prepared from trialkoxysilane-capped poly(methyl methacrylate)-titania materials // *Chemistry of Materials.* — 2001. — mar. — Vol. 13, no. 3. — P. 1137–1142. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/cm000937z>.
13. Vinogradov A. P., Dorofeenko A. V., Zouhdi S. On the problem of the effective parameters of metamaterials // *Physics-Uspekhi.* — 2008. — may. — Vol. 51, no. 5. — P. 485–492. — URL: <http://dx.doi.org/10.1070/PU2008v051n05ABEH006533>.
14. Xi J.-Q., Kim Jong Kyu, Schubert E. F. Silica Nanorod-Array Films with Very Low Refractive Indices // *Nano Letters.* — 2005. — jul. — Vol. 5, no. 7. — P. 1385–1387. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/nl1050698k>.
15. Suzdalev I. P. Nanotechnology: physicochemistry of nanoclusters, nanostructures and nanomaterials. — Moscow : ComBook, 2006. — 592 p.
16. Kosobudskiy I. D., Ushakov N. M., Yurkov Yu. G. Introduction to the chemistry and physics of nanoscale objects. — Saratov : SSTU, Ed. LLC “Vertical”, 2007. — 182 p.
17. Physical chemistry of nanoscale objects: composite materials / I. D. Kosobudskiy [et al.]. — Saratov : SSTU, Rata LLC Publishing House, 2009. — 230 p.
18. Gadomsky O. N., Kadochkin A. S. Boundary-value problems in near-field optical microscopy and optical size resonances // *Journal of Experimental and Theoretical Physics.* — 2003. — sep. — Vol. 97, no. 3. — P. 466–478. — URL: <http://dx.doi.org/10.1134/1.1618333>.
19. Gadomsky O. N., Altunin K. K., Zubkov E. G. Radiation theory of a metal cluster // *News of higher educational institutions. Volga region. Physical and mathematical sciences.* — 2012. — no. 3. — P. 144–152.
20. Reducing the natural width of atomic levels in nanostructured systems / O. N. Gadomsky [et al.] // *News of higher educational institutions. Volga region. Physical and mathematical sciences.* — 2012. — no. 3. — P. 153–163.

21. Enhanced optical transmission of composite nanostructured thick films with quasi-zero refractive index (I. Experimental data) / O. N. Gadomsky [et al.] // News of higher educational institutions. Volga region. Physical and mathematical sciences. — 2012. — no. 4. — P. 227–236.
22. Enhanced optical transmission of composite nanostructured thick films with quasi-zero refractive index (II. Theory) / O. N. Gadomsky [et al.] // News of higher educational institutions. Volga region. Physical and mathematical sciences. — 2013. — no. 1. — P. 122–134.
23. Altunin K. K. High-performance antireflection optical coatings made of nanocomposite materials with quasi-zero refractive and absorption indices // Electronic equipment. — 2013. — no. 1. — P. 168–177.
24. Altunin K. K. Ultra-transparent composite nanomaterials with quasi-zero refractive index values for solar energy // Electronic equipment. — 2013. — no. 1. — P. 178–189.
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. 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>.
27. Epsilon-near-zero metamaterials and electromagnetic sources: Tailoring the radiation phase pattern / Andrea Alù [et al.] // Physical Review B. — 2007. — apr. — Vol. 75, no. 15. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.75.155410>.
28. Ziolkowski Richard W. Propagation in and scattering from a matched metamaterial having a zero index of refraction // Physical Review E. — 2004. — oct. — Vol. 70, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.70.046608>.
29. Davoyan Arthur R., Mahmoud Ahmed M., Engheta Nader. Optical isolation with epsilon-near-zero metamaterials // Optics Express. — 2013. — feb. — Vol. 21, no. 3. — P. 3279. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.21.003279>.
30. Silveirinha Mário, Engheta Nader. Tunneling of Electromagnetic Energy through Subwavelength Channels and Bends using-Near-Zero Materials // Physical Review Letters. — 2006. — oct. — Vol. 97, no. 15. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.97.157403>.
31. Alam M. Z., Leon I. De, Boyd R. W. Large optical nonlinearity of indium tin oxide in its epsilon-near-zero region // Science. — 2016. — apr. — Vol. 352, no. 6287. — P. 795–797. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.aae0330>.
32. Alù Andrea, Engheta Nader. Dielectric sensing in-near-zero narrow waveguide channels // Physical Review B. — 2008. — jul. — Vol. 78, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.78.045102>.
33. Nonlinear control of tunneling through an epsilon-near-zero channel / David A. Powell [et al.] // Physical Review B. — 2009. — jun. — Vol. 79, no. 24. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.79.245135>.

34. Broadband Epsilon-Near-Zero Perfect Absorption in the Near-Infrared / Junho Yoon [et al.] // *Scientific Reports*. — 2015. — aug. — Vol. 5, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1038/srep12788>.
35. Excitation of epsilon-near-zero resonance in ultra-thin indium tin oxide shell embedded nanostructured optical fiber / Khant Minn [et al.] // *Scientific Reports*. — 2018. — feb. — Vol. 8, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19633-2>.
36. Directional perfect absorption using deep subwavelength low-permittivity films / Ting S. Luk [et al.] // *Physical Review B*. — 2014. — aug. — Vol. 90, no. 8. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.90.085411>.
37. General Strategy for Broadband Coherent Perfect Absorption and Multi-wavelength All-optical Switching Based on Epsilon-Near-Zero Multilayer Films / Tae Young Kim [et al.] // *Scientific Reports*. — 2016. — mar. — Vol. 6, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1038/srep22941>.
38. Campione Salvatore, Brener Igal, Marquier Francois. Theory of epsilon-near-zero modes in ultrathin films // *Physical Review B*. — 2015. — mar. — Vol. 91, no. 12. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.91.121408>.
39. Feng Simin, Halterman Klaus. Coherent perfect absorption in epsilon-near-zero metamaterials // *Physical Review B*. — 2012. — oct. — Vol. 86, no. 16. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.86.165103>.
40. Near-Infrared Strong Coupling between Metamaterials and Epsilon-near-Zero Modes in Degenerately Doped Semiconductor Nanolayers / Salvatore Campione [et al.] // *ACS Photonics*. — 2016. — jan. — Vol. 3, no. 2. — P. 293–297. — URL: <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.5b00663>.
41. Experimental verification of epsilon-near-zero plasmon polariton modes in degenerately doped semiconductor nanolayers / Salvatore Campione [et al.] // *Optics Express*. — 2016. — aug. — Vol. 24, no. 16. — P. 18782. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.24.018782>.
42. Comparative Study of Second-Harmonic Generation from Epsilon-Near-Zero Indium Tin Oxide and Titanium Nitride Nanolayers Excited in the Near-Infrared Spectral Range / Antonio Capretti [et al.] // *ACS Photonics*. — 2015. — oct. — Vol. 2, no. 11. — P. 1584–1591. — URL: <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.5b00355>.
43. Enhanced Nonlinear Refractive Index in Near-Zero Materials / L. Caspani [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2016. — jun. — Vol. 116, no. 23. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.116.233901>.
44. Epsilon-near-zero Al-doped ZnO for ultrafast switching at telecom wavelengths / N. Kinsey [et al.] // *Optica*. — 2015. — jul. — Vol. 2, no. 7. — P. 616. — URL: <https://doi.org/10.1364/optica.2.000616>.
45. Femtosecond optical polarization switching using a cadmium oxide-based perfect absorber / Yuanmu Yang [et al.] // *Nature Photonics*. — 2017. — may. — Vol. 11, no. 6. — P. 390–395. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2017.64>.
46. Electrically Tunable Epsilon-Near-Zero (ENZ) Metafilm Absorbers / Junghyun Park [et al.] // *Scientific Reports*. — 2015. — nov. — Vol. 5, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1038/srep15754>.

47. Gate-Tunable Conducting Oxide Metasurfaces / Yao-Wei Huang [et al.] // Nano Letters. — 2016. — sep. — Vol. 16, no. 9. — P. 5319–5325. — URL: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b00555>.
48. Nanoscale Conducting Oxide PlasMOSstor / Ho W. Lee [et al.] // Nano Letters. — 2014. — oct. — Vol. 14, no. 11. — P. 6463–6468. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl502998z>.
49. Born Max, Wolf Emil. 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 Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “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 Alekseevna Grishanina** — Master’s student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: [grishanina1998@list.ru](mailto:grishanina1998@list.ru)

ORCID iD  0000-0003-4857-417X

Web of Science ResearcherID  ABH-1726-2020