

Секция 1

Физические науки

1.1 Оптика

Научная статья

УДК 535.3

ББК 22.343

ГРНТИ 29.31.21

ВАК 1.3.6.

RACS 42.25.Bs

OCIS 310.6628

MSC 00A79

Анализ подходов к вычислению эффективного показателя преломления нанокompозитной плёнки по энергетическому коэффициенту пропускания оптического излучения

К. К. Алтунин ¹

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

Поступила в редакцию 1 февраля 2024 года

После переработки 2 февраля 2024 года

Опубликована 12 марта 2024 года

Аннотация. Выполнены численные расчёты, позволяющие осуществить расчёт эффективного показателя преломления нанокompозитной плёнки посредством интерполяции экспериментальных данных для оптического пропускания нанокompозитного покрытия на примере покрытия с весовым содержанием наночастиц серебра 5 % и средним радиусом наночастиц 2.5 нм. Вычислено значение эффективного показателя преломления для металл-полимерного нанокompозитного покрытия в диапазоне длин волн от 400 нм до 1200 нм.

Ключевые слова: нанокompозит, нанокompозитная плёнка, нанокompозитное покрытие, наночастица, наночастица серебра, оптическое излучение, показатель преломления, показатель поглощения, коэффициент отражения, коэффициент пропускания

¹E-mail: kostya_altunin@mail.ru

Введение

Нанокompозитные материалы являются одним из наиболее перспективных направлений в области нанотехнологий. Наноматериалы представляют собой нанокompозиты, состоящие из наночастиц, распределённых в непрерывной матрице. Благодаря своим уникальным свойствам, нанокompозиты находят широкое применение в различных отраслях: от нанoeлектроники, нанoфотоники до биомедицины. Одним из ключевых параметров, характеризующих оптические свойства нанокompозитов, является эффективный комплексный показатель преломления нанокompозитной среды. Таким образом, исследование зависимости эффективного комплексного показателя преломления нанокompозитных плёнок от длины волны внешнего оптического излучения на основе экспериментальных данных по оптическому отражению и пропусканию является актуальной задачей в оптике наноструктур.

Целью исследования является разработка метода вычисления эффективного показателя преломления нанокompозитных плёнок на основе измерения энергетических коэффициентов пропускания и отражения оптического излучения от поверхности нанокompозитной плёнки.

Задачи исследования:

1. написание обзора существующих методов определения показателя преломления материалов и их применимость к нанокompозитам,
2. разработка теоретической модели, описывающей зависимость эффективного показателя преломления от энергетических коэффициентов пропускания и отражения, длины волны излучения, толщины плёнки для нанокompозитных плёнок,
3. проведение численных расчётов для проверки адекватности разработанной теоретической модели для определения эффективного показателя преломления нанокompозитных плёнок с металлическими наночастицами.

Объектом исследования является нанокompозитная плёнка. Предметом исследования является комплекс оптических параметров нанокompозитных плёнок, определяемых с использованием энергетических коэффициентов пропускания и отражения нанокompозитных плёнок.

В качестве методов исследования используются теоретические и численные методы современной оптики наноструктур. В качестве материалов исследования используются нанокompозитные материалы. Научная новизна исследования состоит в том, что разработанный метод определения эффективного показателя преломления нанокompозитных плёнок на основе энергетических коэффициентов пропускания и отражения оптического излучения позволит расширить возможности исследования оптических свойств нанокompозитных плёнок, в частности, исследовать их оптические параметры в зависимости от размера, формы и состава металлических наночастиц.

Гипотеза исследования состоит в том, что если использовать предлагаемую модель, то на основе экспериментальных данных для зависимостей энергетических коэффициентов пропускания и отражения нанокompозитных плёнок от длины волны можно вычислить зависимость эффективного показателя преломления нанокompозитных плёнок с учётом взаимодействия света с металлическими наночастицами.

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что результаты исследования могут быть использованы для развития теории взаимодействия света с нанокompозитными материалами, а также для создания новых методов определения эффективных показателей преломления и поглощения в области оптических длин волн. Практическая значимость исследования состоит в том, что разработанный метод можно использовать для контроля качества нанокompозитных покрытий и нанокompозитных плёнок, а также в разработке новых оптических наноматериалов с заданными физическими свойствами.

Обзор

Металлополимерные наноккомпозиты представляют собой материалы, в которых наночастицы металлов сочетаются с полимерами для улучшения их физических свойств. Металлополимерные наноккомпозиты представляют собой гибридные материалы, сочетающие в себе превосходные плазмонные, электрические и термические свойства металлов с хорошей эластичностью и технологичностью полимеров. Это делает металлополимерные наноккомпозиты перспективными кандидатами для применения в качестве проводящих наполнителей и покрытий, где механические свойства оптотермически связаны. В статье [1] изучается взаимодействие наноструктуры, термоплазмоники и упруго-механических свойств наноккомпозитов серебро-полистирол с помощью просвечивающей электронной микроскопии, малоуглового рассеяния рентгеновских лучей, рассеяния света Бриллюэна и других дополнительных методов. В статье [1] используется хорошо известная архитектура частиц-щеток, чтобы обеспечить однородное и изотропное распределение наночастиц по всему гибриднему материалу. В статье [1] установлено, что эффективный продольный модуль свежеприготовленных образцов снижается с 5.7 ГПа до 4.8 ГПа с увеличением содержания серебра от 0 до 4.4 об.%. Измерения температурно-зависимого бриллюэновского рассеяния света показывают уникальный вклад локального термоплазмонного нагрева, который зависит от состава наночастиц серебра. Этот термоплазмонный эффект приводит к более низкой кажущейся температуре стеклования и более сильной зависимости скорости звука от мощности лазера. Превышение умеренных температур термического отжига больше 150°C приводит к сильной структурной перестройке внутри однородного наноккомпозитного материала со своеобразным эффектом кластеризации-редисперсии, что также приводит к изменению механических свойств. Агрегация наночастиц серебра, вызванная отжигом, приводит к ещё более сильному термоплазмонному эффекту. В статье [1] подтверждаются экспериментальные результаты с помощью дополнительных термографических измерений и моделирования методом конечных элементов. В целом, работа [1] демонстрирует совместное влияние состава и (обратимой) агрегации на механические и термоплазмонные свойства металлополимерных наноккомпозитов. Это не только углубляет понимание взаимодействия между светом, температурой и механическими свойствами в металлополимерных наноккомпозитах, но также даёт руководство по настройке наноккомпозитов серебро-полистирол для потенциальных применений.

Рентгеновская корреляционная спектроскопия фотонов использовалась в сочетании с малоугловым рассеянием рентгеновских лучей скользящего падения с резонансным усилением для исследования динамики и кинетики медленных частиц в тонких пленках наноккомпозитов золото/полистирол. Такое усиленное когерентное рассеяние позволяет впервые измерить динамику частиц при волновых векторах до одного нанометра (или нескольких нанометров в пространстве) в неупорядоченной системе, то есть в режиме, когда перепутывание, удержание и взаимодействие частиц доминируют в динамике и кинетике. В статье [2] проведены измерения промежуточного структурного фактора, указывающие на то, что динамика частиц отличается от броуновского движения Стокса-Эйнштейна и объясняется с точки зрения вязкоупругих эффектов и межчастичных взаимодействий.

В статье [3] описаны результаты исследования многослойной структуры из наноккомпозита на основе полимера с включениями золота, которую подвергали отжигу, чтобы вызвать диффузию частиц золота, которую контролировали с помощью спектрометрии обратного резерфордского рассеяния. Также были проведены эксперименты по движению маркеров для независимого исследования подвижности частиц и полимеров. В статье [3] показано, что подвижность частиц уменьшилась на 2-3 порядка по сравнению с предсказаниями теории Стокса-Эйнштейна. Диффузия молекул полимера через

слой частиц золота снижается в гораздо меньшей степени. Эти результаты объясняются образованием мостиков между частицами, возникающими в результате кинетики медленного обмена сегментов полимера на границе раздела полимер/металл.

В статье [4] рассматривается использование металлополимерных нанокомпозитов как перспективного подхода к созданию антибактериальных материалов. В статье [4] исследуются методы синтеза, механизмы действия и применение этих нанокомпозитов. В статье [4] разработан новый подход к разработке антибактериальных препаратов с целью повышения антибактериального потенциала. Наночастицы прикрепляются к поверхности других металлов или оксидов металлов и полимеров для получения нанокомпозитов. В статье [4] продемонстрированы значительные антибактериальные свойства по сравнению с наночастицами. В статье [4] исследуется антибактериальный потенциал нанокомпозитов на основе металлов и металл-полимер, различные методы, которые используются в синтезе металл-полимер, нанокомпозиты, механизмы действия, а также их преимущества, недостатки и области применения.

В статье [5] обсуждается получение полимерно-металлических нанокомпозитов с использованием ультразвука в качестве источника инициирования и восстановления. Полимерно-металлические нанокомпозиты вызывают растущий интерес для широкого спектра применений; однако получение этих нанокомпозитов часто требует добавления внешних инициаторов и восстановителей для синтеза полимерных и металлических наночастиц соответственно. В статье [5] продемонстрировано получение полимерно-металлических нанокомпозитов для улучшения каталитических характеристик путём использования ультразвука в качестве источника инициирования и восстановления.

В статье [6] рассматривается получение металлополимерных нанокомпозитов путём химического восстановления ионов металлов в полимерных матрицах, уделяя особое внимание их функциям в качестве стабилизирующих агентов, шаблонов и восстановителей. В статье [6] обобщены последние достижения в области получения металлополимерных нанокомпозитов путём химического восстановления ионов металлов в полимерных матрицах, которые по функциям классифицируются как стабилизаторы, шаблоны и восстановители. Особое внимание уделено различным факторам, влияющим на размер и морфологию частиц, состав и структуру металлополимерных нанокомпозитов. Рассмотрены проблемы и перспективы создания металлополимерных нанокомпозитов, полученных химическим восстановлением ионов металлов.

Проведённый анализ литературы показал актуальность задачи вычисления эффективного показателя преломления нанокомпозитной плёнки по энергетическим коэффициентам пропускания и отражения оптического излучения.

Результаты

Коэффициент Френеля для отражения оптической волны от поверхности нанокомпозитной плёнки равен

$$R = r + \frac{r(1-r)^2\tau^2}{1-r^2\tau^2}. \quad (1)$$

Коэффициент Френеля для пропускания оптической волны через поверхность нанокомпозитной плёнки равен

$$T = \frac{(1-r)^2\tau}{1-r^2\tau^2}. \quad (2)$$

Амплитудный коэффициент Френеля для отражения от одной границы раздела равен

$$r = |\rho_1|^2 = \frac{(n_1 - 1)^2 + \kappa_1^2}{(n_1 + 1)^2 + \kappa_1^2}. \quad (3)$$

Амплитудный коэффициент Френеля для пропускания одной границей раздела равен

$$\tau = \exp\left(-\frac{4\pi\kappa_1}{\lambda}d_1\right), \quad (4)$$

где d_1 – толщина нанокompозитной плёнки, λ – длина волны излучения.

Тогда получается квадратное уравнение

$$T\tau^2 + ((R - 1)^2 - T^2)\tau - T = 0. \quad (5)$$

Решение квадратного уравнения (5) имеет вид:

$$\tau = \frac{-((R - 1)^2 - T^2) \pm \sqrt{\Delta}}{2T}, \quad (6)$$

где $\Delta = ((R - 1)^2 - T^2)^2 + 4T^2$.

Мнимая часть комплексного показателя преломления плёнки определяется выражением:

$$\kappa_1 = -\frac{\lambda}{4\pi d_1} \ln \tau. \quad (7)$$

Амплитудный коэффициент Френеля для отражения от одной границы раздела найдём по формуле:

$$r = \frac{2R}{1 + \tau^2 \pm \sqrt{(1 + \tau^2)^2 - 4\tau^2 R(2 - R)}}. \quad (8)$$

Тогда показатель преломления нанокompозитной среды может быть найден по формуле:

$$n_1 = \frac{1 + r}{1 - r} \pm \sqrt{\frac{4r}{(1 - r)^2} - \kappa_1^2}. \quad (9)$$

В случае прозрачной среды выполняется закон сохранения

$$R + T = 1. \quad (10)$$

В случае поглощающей среды выполняется закон сохранения

$$R + T + A = 1. \quad (11)$$

Энергетический коэффициент поглощения среды находится по формуле:

$$A = \frac{(1 - r)(1 - \tau)}{1 - r\tau}. \quad (12)$$

Из соотношений Крамерса-Кронига получаем

$$\angle \rho_1(\omega) = \frac{\pi}{\omega} \int_0^{+\infty} \frac{\ln r(\bar{\omega})}{\bar{\omega}^2 - \omega^2} d\bar{\omega}. \quad (13)$$

Тогда можно записать приближённые соотношения для действительной и мнимой части комплексного показателя преломления среды нанокompозитной плёнки в следующем виде:

$$n_1 \cong \frac{1 - r}{(1 + r) - 2\sqrt{r} \cos(\angle \rho_1)}, \quad (14)$$

$$\kappa_1 \cong \frac{2\sqrt{r} \sin(\angle \rho_1)}{(1 + r) - 2\sqrt{r} \cos(\angle \rho_1)}. \quad (15)$$

Рассмотрим интерполяцию зависимости энергетического коэффициента пропускания металл-полимерной нанокompозитной плёнки от длины волны излучения. Оптические свойства нанокompозитных плёнок из полиметилметакрилата с наночастицами серебра описаны в работах [7–14]. После интерполяции данных значений строится график зависимости коэффициента пропускания нанокompозитной плёнки из полиметилметакрилата с весовым содержанием наночастиц серебра 5% от длины волны излучения (рис. 1) для шести случаев: 1 – чистая стеклянная подложка, 2 – образец с полимерной плёнкой толщиной 17 мкм, 3-6 – образцы с нанокompозитными плёнками толщиной 17 мкм с разными типами пневматического нанесения. Весовое содержание наночастиц серебра равно 5%, средний радиус наночастиц серебра составляет 2.5 нм.

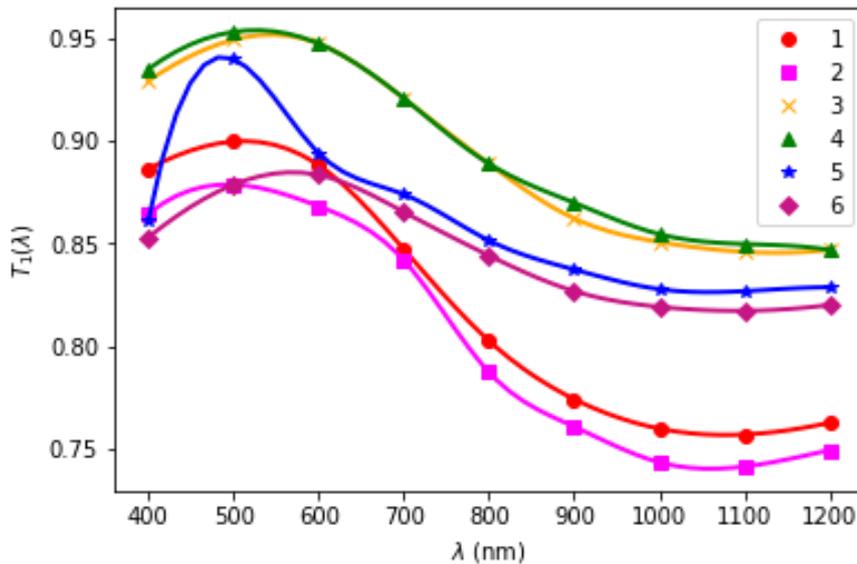


Рис. 1. Графики зависимости энергетического коэффициента пропускания металл-полимерной нанокompозитной плёнки с весовым содержанием наночастиц серебра 5% и средним радиусом наночастиц 2.5 нм от длины волны оптического излучения для шести случаев: 1 – чистая стеклянная подложка, 2 – образец с полимерной плёнкой толщиной 17 мкм, 3-6 – образцы с нанокompозитными плёнками толщиной 17 мкм с разными типами пневматического нанесения.

График зависимости энергетического коэффициента пропускания металл-полимерной нанокompозитной плёнки от длины волны оптического излучения, представленный на рис. 1, показывает увеличение оптического пропускания просветляющих нанокompозитных покрытий, содержащих металлические наночастицы с весовым содержанием наночастиц серебра 5% и средним радиусом наночастиц 2.5 нм. Известно, что можно приблизительно измерить показатель преломления по двум соседним максимумам оптического пропускания, но этот не является точным и имеет существенные ограничения для анизотропных материалов.

Расчёт эффективного показателя преломления металл-полимерной нанокompозитной плёнки можно осуществить с помощью приближённой формулы:

$$n_1 \approx \left(\frac{1+R}{1-R} \right) + \sqrt{\frac{4R}{(1-R)^2} - \left(\frac{1}{2k_0 d_1} \ln \left(\frac{1-R}{T} \right) \right)^2}, \quad (16)$$

где k_0 – волновое число излучения в вакууме, d_1 – толщина нанокompозитной плёнки, R – энергетический коэффициент отражения от поверхности нанокompозитной плёнки, T – энергетический коэффициент пропускания нанокompозитной плёнки.

Эффективный комплексный показатель преломления играет важную роль в определении оптических свойств нанокompозитных материалов. Эффективный показатель преломления позволяет оценить эффективность взаимодействия излучения с нанокompозитными структурами, что в свою очередь определяет их применение в оптике, фотонике, оптоэлектронике и других областях.

Более детальный расчёт эффективного показателя преломления металл-полимерной нанокompозитной плёнки даёт приближённую формулу:

$$n_1 \approx \left(\frac{1+R}{1-R} \right) + \sqrt{\frac{4R}{(1-R)^2} - \left(\frac{1}{2k_0d_1} \ln \left(\frac{(1-R)^2}{2T} + \sqrt{\frac{(1-R)^4}{4T^2} + R^2} \right) \right)}. \quad (17)$$

Пользуясь значениями графика, представленного на рис. 1, и формулами отражения и пропускания среды можно вычислить значение эффективного показателя преломления для металл-полимерного нанокompозитного покрытия и построить график зависимости показателя преломления n от длины волны λ для данных шести случаев: 1 – чистая стеклянная подложка, 2 – образец с полимерной плёнкой толщиной 17 мкм, 3-6 – образцы с нанокompозитной плёнкой толщиной 17 мкм с разными типами пневматического нанесения. Весовое содержание наночастиц серебра в нанокompозитной плёнке составляет 5 %, средний радиус наночастиц равен 2.5 нм.

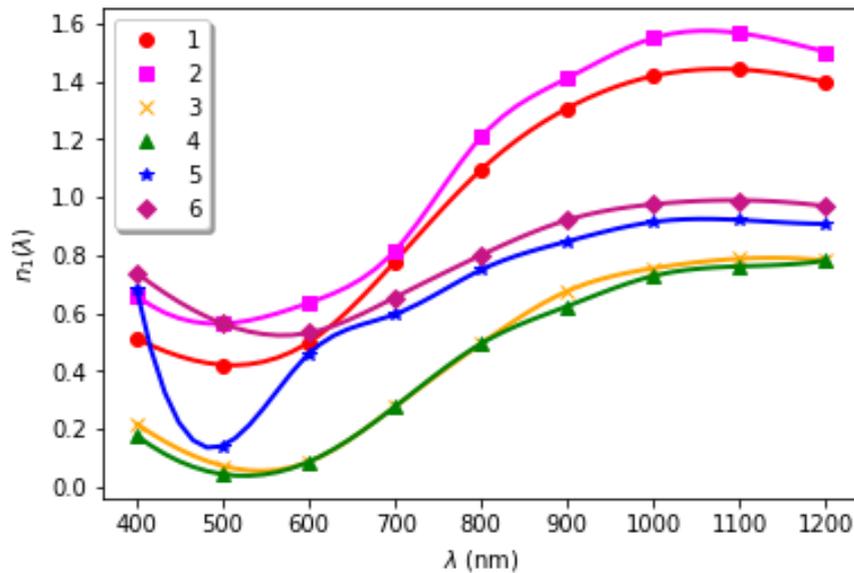


Рис. 2. Графики зависимости эффективного показателя преломления для металл-полимерной нанокompозитной плёнки с весовым содержанием наночастиц серебра 5 % и средним радиусом наночастиц 2.5 нм от длины волны излучения для шести случаев: 1 – чистая стеклянная подложка, 2 – образец с полимерной плёнкой толщиной 17 мкм, 3-6 – образцы с нанокompозитной плёнкой толщиной 17 мкм с разными типами пневматического нанесения.

На рис. 2 показаны графики зависимости эффективного показателя преломления для просветляющего нанокompозитного покрытия, состоящего из полимерной матрицы полиметилметакрилата и системы включений из сферических наночастиц серебра, от длины волны внешнего оптического излучения.

Заключение

Выполнены численные расчёты, позволяющие осуществить расчёт эффективного показателя преломления нанокompозитной плёнки посредством интерполяции экспериментальных данных для оптического пропускания нанокompозитного покрытия на примере покрытия с весовым содержанием наночастиц серебра 5% и средним радиусом наночастиц 2.5 нм. Вычислено значение эффективного показателя преломления для металл-полимерного нанокompозитного покрытия в диапазоне длин волн от 400 нм до 1200 нм. Показано, что эффективный комплексный показатель преломления нанокompозитной плёнки можно вычислить по энергетическим коэффициентам пропускания и отражения оптического излучения, используя разработанный метод. Это позволяет расширить возможности исследования оптических свойств нанокompозитных материалов и создавать новые методы определения показателей преломления и поглощения в оптическом диапазоне длин волн внешнего излучения.

Гипотеза исследования, состоящая в том, что если использовать предлагаемую модель, то на основе экспериментальных данных для зависимостей энергетических коэффициентов пропускания и отражения нанокompозитных плёнок от длины волны можно вычислить зависимость эффективного показателя преломления нанокompозитных плёнок с учётом взаимодействия света с металлическими наночастицами, подтверждена полностью.

По итогам работы можно сделать вывод, что выполненные численные расчёты позволяют посредством интерполяции экспериментальных данных для оптического пропускания нанокompозитного покрытия на примере покрытия с весовым содержанием наночастиц серебра 5% и средним радиусом наночастиц 2.5 нм вычислить значение эффективного показателя преломления для металл-полимерного нанокompозитного покрытия.

Список использованных источников

1. Well-defined metal-polymer nanocomposites: The interplay of structure, thermoplasmonics, and elastic mechanical properties / David Saleta Reig [et al.] // *Physical Review Materials*. — 2018. — dec. — Vol. 2, no. 12. — P. 123605. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.2.123605>.
2. Particle dynamics in polymer-metal nanocomposite thin films on nanometer-length scales / Suresh Narayanan [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2007. — may. — Vol. 98, no. 18. — P. 185506. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.185506>.
3. Metal-polymer interactions in a polymer/metal nanocomposite / Douglas H. Cole [et al.] // *Physical Review Letters*. — 1997. — jun. — Vol. 78, no. 26. — P. 5006–5009. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.5006>.
4. Ghazzy Asma, Naik Rajashri R., Shakya Ashok K. Metal-polymer nanocomposites: a promising approach to antibacterial materials // *Polymers*. — 2023. — may. — Vol. 15, no. 9. — P. 2167. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/polym15092167>.
5. Wan Jing, Fan Bo, Thang San H. Sonochemical preparation of polymer-metal nanocomposites with catalytic and plasmonic properties // *Nanoscale Advances*. — 2021. — Vol. 3, no. 11. — P. 3306–3315. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/D1NA00120E>.
6. Dzhardimalieva Gulzhian I., Uflyand Igor E. Preparation of metal-polymer nanocomposites by chemical reduction of metal ions: functions of polymer matrices // *Journal of Polymer Research*. — 2018. — nov. — Vol. 25, no. 12. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/S10965-018-1646-8>.

7. 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>.
8. 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>.
9. 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: <http://dx.doi.org/10.1134/S0021364009160061>.
10. High-efficiency antireflection nanostructural optical coatings for solar cells / O. N. Gadomskii [et al.] // Technical Physics. — 2010. — jul. — Vol. 55, no. 7. — P. 996–1002. — URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S1063784210070133>.
11. Алтунин К. К. Особенности оптического пропускания в наноразмерных металл-полимерных структурах с показателями преломления и поглощения, близкими к нулю // Наноматериалы и наноструктуры - XXI век. — 2014. — Т. 5, № 3. — С. 3–8. — URL: <https://elibrary.ru/tjxqnj>.
12. Алтунин К. К. Оптические свойства металл-полимерных пленочных наноструктур с сферическими наночастицами // Наноматериалы и наноструктуры - XXI век. — 2017. — Т. 8, № 4. — С. 8–12. — URL: <https://elibrary.ru/ynrthy>.
13. Алтунин К. К. Усиленное оптическое пропускание нанокompозитных пленок с наночастицами серебра на различных подложках. Часть 1. Вопросы теории и модель // Наноматериалы и наноструктуры - XXI век. — 2015. — Т. 6, № 2. — С. 4–14. — URL: <https://elibrary.ru/uawayx>.
14. Алтунин К. К. Исследование оптического пропускания двухслойных и трехслойных просветляющих нанокompозитных покрытий с оптимальными параметрами // Наноматериалы и наноструктуры - XXI век. — 2018. — Т. 9, № 4. — С. 3–11. — URL: <https://elibrary.ru/yujvql>.

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

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

IstinaResearcherID  66185348

Original article
PACS 42.25.Bs
OCIS 310.6628
MSC 00A79

Analysis of approaches to calculating the effective refractive index of a nanocomposite film from the energy transmittance of optical radiation

K. K. Altunin 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted February 1, 2024
Resubmitted February 2, 2024
Published March 12, 2024

Abstract. Numerical calculations have been performed that make it possible to calculate the effective refractive index of a nanocomposite film by interpolating experimental data for the optical transmission of a nanocomposite coating using the example of a coating with a weight content of silver nanoparticles of 5% and an average nanoparticle radius of 2.5 nm. The value of the effective refractive index for a metal-polymer nanocomposite coating in the wavelength range from 400 nm to 1200 nm has been calculated.

Keywords: nanocomposite, nanocomposite film, nanocomposite coating, nanoparticle, silver nanoparticle, optical radiation, refractive index, absorption index, reflectance, transmittance

@auxrussian@auxenglish

References

1. Well-defined metal-polymer nanocomposites: The interplay of structure, thermoplasmonics, and elastic mechanical properties / David Saleta Reig [et al.] // *Physical Review Materials*. — 2018. — dec. — Vol. 2, no. 12. — P. 123605. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.2.123605>.
2. Particle dynamics in polymer-metal nanocomposite thin films on nanometer-length scales / Suresh Narayanan [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2007. — may. — Vol. 98, no. 18. — P. 185506. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.185506>.
3. Metal-polymer interactions in a polymer/metal nanocomposite / Douglas H. Cole [et al.] // *Physical Review Letters*. — 1997. — jun. — Vol. 78, no. 26. — P. 5006–5009. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.5006>.
4. Ghazzy Asma, Naik Rajashri R., Shakya Ashok K. Metal-polymer nanocomposites: a promising approach to antibacterial materials // *Polymers*. — 2023. — may. — Vol. 15, no. 9. — P. 2167. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/polym15092167>.
5. Wan Jing, Fan Bo, Thang San H. Sonochemical preparation of polymer-metal nanocomposites with catalytic and plasmonic properties // *Nanoscale Advances*. — 2021. — Vol. 3, no. 11. — P. 3306–3315. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/D1NA00120E>.

6. Dzhardimalieva Gulzhian I., Uflyand Igor E. Preparation of metal-polymer nanocomposites by chemical reduction of metal ions: functions of polymer matrices // *Journal of Polymer Research*. — 2018. — nov. — Vol. 25, no. 12. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/S10965-018-1646-8>.
7. 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>.
8. 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>.
9. 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: <http://dx.doi.org/10.1134/S0021364009160061>.
10. High-efficiency antireflection nanostructural optical coatings for solar cells / O. N. Gadomskii [et al.] // *Technical Physics*. — 2010. — jul. — Vol. 55, no. 7. — P. 996–1002. — URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S1063784210070133>.
11. Altunin K. K. Features of optical transmission in nanosized metal-polymer structures with refractive and absorption indices close to zero // *Nanomaterials and nanostructures - XXI century*. — 2014. — Vol. 5, no. 3. — P. 3–8. — URL: <https://elibrary.ru/tjxqnj>.
12. Altunin K. K. Optical properties of metal-polymer film nanostructures with spherical nanoparticles // *Nanomaterials and nanostructures - XXI century*. — 2017. — Vol. 8, no. 4. — P. 8–12. — URL: <https://elibrary.ru/ynrthy>.
13. Altunin K. K. Enhanced optical transmission of nanocomposite films with silver nanoparticles on various substrates. Part 1. Theory issues and model // *Nanomaterials and nanostructures - XXI century*. — 2015. — Vol. 6, no. 2. — P. 4–14. — URL: <https://elibrary.ru/uawayx>.
14. Altunin K. K. Study of optical transmission of two-layer and three-layer antireflective nanocomposite coatings with optimal parameters // *Nanomaterials and nanostructures - XXI century*. — 2018. — Vol. 9, no. 4. — P. 3–11. — URL: <https://elibrary.ru/yujvql>.

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

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

IstinaResearcherID  66185348