

Секция 1

Физические науки

1.1 Оптика

Научная статья

УДК 535.3

ББК 22.343

ГРНТИ 29.31.27

ВАК 1.3.6.

PACS 42.25.Bs

OCIS 260.2065

MSC 78A10

Исследование оптических свойств коллоидных метаматериалов

О. Н. Захарова  ¹

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

Поступила в редакцию 14 ноября 2024 года

После переработки 16 ноября 2024 года

Опубликована 28 декабря 2024 года

Аннотация. Представлены результаты теоретического и численного исследования оптических свойств коллоидных метаматериалов. Обсуждается возможность применения коллоидных метаматериалов для управления усиленным пропусканием света. Методы исследования включают компьютерное моделирование физических характеристик метаматериалов с отрицательным показателем преломления. В результате компьютерных расчётов получены дисперсионные зависимости эффективной диэлектрической проницаемости и эффективного показателя преломления коллоидных метаматериалов. Результаты исследования могут быть использованы для разработки оптоэлектронных устройств, использующих оптические свойства коллоидных метаматериалов.

Ключевые слова: метаматериал, коллоидный метаматериал, оптические свойства, оптическое излучение, приближение эффективной среды, фотоника, метаповерхность

¹E-mail: zkhrvolly@gmail.com

Введение

Исследование оптических свойств коллоидных метаматериалов направлено на анализ физических характеристик оптических явлений в коллоидных метаматериалах, которые связаны с пропусканием и поглощением оптического излучения. Актуальность исследования обусловлена возрастающим интересом к использованию оптических систем на основе метаматериалов.

Цель исследования заключается в определении дисперсионной зависимости эффективной диэлектрической проницаемости коллоидных метаматериалов с металлическими наночастицами и наночастицами из метаматериалов. Задачи исследования включают определение и анализ дисперсионной зависимости эффективной диэлектрической проницаемости коллоидных метаматериалов с металлическими наночастицами и наночастицами из метаматериалов с помощью современных вычислительных средств. Объектом исследования является набор коллоидных метаматериалов. Предметом исследования является совокупность оптических свойств коллоидных метаматериалов. Методы исследования включают использование численных методов в оптике. Материалы исследования включают различные коллоидные растворы, содержащие металлические наночастицы и наночастицы из метаматериалов. Научная новизна исследования заключается в изучении оптических свойств коллоидных метаматериалов на основе новых математических моделей, а также в выявлении закономерностей между параметрами коллоидных метаматериалов, находящихся во внешнем поле оптического излучения.

Гипотеза исследования заключается в предположении о том, что оптические свойства коллоидных метаматериалов могут быть эффективно управляемыми путём изменения параметров включений и матрицы нанокompозитного материала, что открывает возможности для создания новых оптоэлектронных устройств и систем.

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии понимания процессов светорассеяния и опалесценции в коллоидных системах, а также в разработке математических моделей и уравнений, описывающих эти явления. Практическая значимость исследования связана с возможностью использования полученных результатов для разработки новых оптических материалов для сенсорных устройств.

Обзор физических свойств коллоидных метаматериалов

Коллоидные метаматериалы являются сконструированными материалами, состоящими из коллоидных частиц, которые проявляют уникальные оптические свойства, не встречающиеся в природных материалах. Коллоидные плазмонные метаповерхности представляют собой инновационные метаматериалы с точным контролем кристаллографии и поверхностной химии, предлагающие улучшенные нелинейные оптические процессы и молекулярную спектроскопию по сравнению с традиционными методами. Коллоидные плазмонные метаповерхности улучшают физические характеристики нелинейных оптических процессов и молекулярную спектроскопию, предлагая высокопроизводительные оптические полости и масштабируемость [1].

Недавние исследования подчеркивают их потенциал в манипулировании светом в наномасштабе, что позволяет применять их в фотонике и сенсорных технологиях. Например, обсуждается настраиваемость оптических откликов в коллоидных метаматериалах, подчеркивая их способность достигать отрицательных показателей преломления посредством структурного проектирования [1]. В статье [2] изучается роль взаимодействия частиц в улучшении свойств эффективной среды, что может привести к новым функциональным возможностям в манипулировании светом. В статье [2] обсуждается изготовление метаповерхностей, предотвращающих запотевание, с использованием коллоидного пути на водной основе, что позволяет эффективно преобразовывать солнечный

свет в тепло для предотвращения запотевания, сохраняя при этом прозрачность, демонстрируя свойства коллоидных метаматериалов. В статье [2] представлен эффективный протокол, позволяющий создавать метаповерхности, обеспечивающие синергию между оптическими и термическими свойствами, где золотые наночастицы располагаются между двумя прозрачными силикатными монослоями. В статье [3] демонстрируется изготовление коллоидных метаматериалов со специфическим резонансным поведением, демонстрируя их применение в создании передовых оптических устройств [3]. В статье [3] использован перенос кластеров ДНК с помощью магнитных бусин для создания дискретно запатченных наночастиц ДНК-кластеров для самосборки коллоидных метаматериалов. Коллоидные метаматериалы — это искусственные материалы, имитирующие молекулярные структуры, предлагающие уникальные функциональные возможности. В статье [3] представлен метод использования запатченных наночастиц ДНК для точной самосборки, что позволяет использовать их в различных приложениях в нанотехнологиях. Однако остаются проблемы с масштабируемостью и однородностью этих материалов для улучшения методов синтеза для использования их полного потенциала [4]. В статье [4] показано, что физико-химические свойства частиц влияют на свойства собранных структур, конфигурация частиц также является критическим компонентом самосборки метаматериалов, и конфигурация частиц. Коллоидная самосборка способствует созданию передовых метаматериалов путём организации частиц на основе физико-химических свойств, влияя на свойства собранных структур. В целом, коллоидные метаматериалы представляют собой перспективную область материаловедения, и текущие исследования направлены на преодоление существующих ограничений [5]. Коллоидные метаматериалы собираются из наночастиц благородных металлов, образуя искусственные структуры с настраиваемыми оптическими свойствами, плазмонными поляритонами и способностью манипулировать светом в субволновых масштабах [5]. Коллоидные наночастицы благородных металлов состоят из металлических ядер и органических или неорганических лигандных оболочек и поддерживают плазмонные резонансы, зависящие от размера и формы [5]. В статье [6] была изучена коллоидная метаматериальная система, в которой диэлектрические частицы субмикронного размера (SiO_2) диспергированы в нематическом жидком кристалле. Исследование изучает усиленный резонанс Ми в коллоидном метаматериале с низким показателем преломления с нематическим жидким кристаллом, указывая на новый подход к управлению взаимодействиями света и вещества в метаматериалах. Коллоидные метаматериалы используют самосборку для изготовления оптических метаматериалов, что позволяет использовать нанозазоры, трёхмерная сложность и экономически эффективную обработку, преодолевая проблемы литографии для достижения неестественных оптических преломлений [7]. Принцип проектирования коллоидно самосборных оптических метаматериалов, демонстрирующих неестественные преломления, практическая проблема соответствующих экспериментов и будущие возможности критически рассматриваются в статье [7]. В статье [8] представлен новый метод сборки асимметричных коллоидных молекул, приводящий к уникальным оптическим свойствам и демонстрирующий потенциал для создания коллоидных метаматериалов с регулируемыми фотонными реакциями. В статье [9] обсуждается высокочувствительный фотодетектор среднего инфракрасного диапазона, использующий спеченную гетероструктуру коллоидных квантовых точек PbSe/PbS в сочетании с металлическим метаповерхностным идеальным поглотителем для улучшения производительности. В статье [9] демонстрируются компактные и эффективные фотодетекторы, работающие при комнатной температуре в диапазоне длин волн от 2710 нм до 4250 нм с чувствительностью до 375 и 4 А/Вт. В статье [10] обсуждаются почти идеальные широкополосные метаматериальные поглотители, использующие коллоидную литографию для создания усеченных наноконусов, демонстрирующие

достижения в проектировании метаматериалов для улучшения поглощающих способностей. В статье [10] исследованы поглощающие характеристики усеченных наноконусов в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной спектральной области, а результаты моделирования временной области методом конечных разностей с использованием воздушной массы 1.5 показали, что усеченные наноконусы имеют среднюю поглощательную способность солнечного света 94.22% между 280 нм и 2500 нм. В работе [11] с помощью численного моделирования изучаются фотонные свойства композита коллоидных частиц расщепленного кольцевого резонатора, диспергированных в нематическом жидком кристалле, который был оптимизирован для обеспечения полной самосборки и направлен на разработку мягких и жидких метаматериалов, которые проявляют оптическую анизотропию в фотонном отклике как мощный механизм управления потоком света на длине волны и даже в субволновых масштабах. Коллоидные метаматериалы состоят из коллоидных частиц расщепленного кольцевого резонатора, диспергированных в нематическом жидком кристалле, демонстрирующих настраиваемые оптические свойства посредством двулучепреломления для управления потоком света на субволновых масштабах [11]. В работе [12] представлена концепция роста наночастиц на подложке и коллоидной самосборки наночастиц с помощью шаблона для достижения локальных и распространяющихся магнитных резонансов в сантиметровом масштабе. Методы коллоидной самосборки позволяют экономически эффективно изготавливать локальные и распространяющиеся магнитные резонансы в макроскопическом масштабе, предлагая жизнеспособный подход к созданию оптических метаматериалов [12]. В работе [13] показано, что коллоидные нанокристаллы различной формы могут быть организованы в архитектуры метаповерхностей с использованием надежных, масштабируемых методов сборки и демонстрируют экстремальную электромагнитную связь в плоскости, которая сильно зависит от размера, формы и расстояния между нанокристаллами. Коллоидные метаповерхности представляют собой сверхтонкие массивы нанокристаллов, которые демонстрируют экстремальное поглощение света, настраиваемое от видимых до средних инфракрасных длин волн, что обеспечивает уникальный контроль над электромагнитными откликами в инфракрасном спектре [13]. В статье [14] представлен отчет о ходе работы по прогнозированию оптических свойств отдельных коллоидных строительных блоков и их сборок, мокро-химического синтеза и направленной самосборки коллоидных частиц. Коллоидные метаповерхности — это новые сборки коллоидных частиц с индивидуальными эффектами связи, позволяющие производить недорогие функциональные устройства для различных приложений, таких как динамические модуляторы света и датчики.

Дифференциальные уравнения с дробными производными появились как мощный инструмент для моделирования аномальной диффузии мезоскопических частиц в коллоидных растворах, эффективно фиксируя сложную динамику, наблюдаемую в системах мезоскопических частиц в коллоидных растворах. Обобщенные уравнения диффузии, включающие дробные производные, такие как предложенные Капуто-Фабрицио и Атанганой-Балеану, позволяют описывать негауссовское поведение и предоставляют точные выражения для диффузионных свойств, раскрывая такие явления, как субдиффузия и супердиффузия через различные распределения времени ожидания [15, 16]. В статье [15] обсуждаются дробные уравнения диффузии с использованием операторов Капуто-Фабрицио и Атанганой-Балеану, которые эффективно описывают аномальную диффузию в сложных системах, приводя к негауссовым стационарным распределениям и кроссоверам между обычным, ограниченным и субдиффузионным поведением в мезоскопических частицах. В статье [15] предложено использовать обобщенные уравнения диффузии с производными дробного порядка для описания диффузии в сложных системах с преимуществом получения точных выражений для базовых диффузионных

свойств. В статье [16] обсуждаются производные дробного порядка по времени и пространству для дополнения классических уравнений диффузии, эффективно описывающие аномальную диффузию в гетерогенных материалах, включая мезоскопические частицы в коллоидных растворах, посредством трёхмерных фазовых кубов, представляющих супердиффузию, субдиффузию и квазигауссово поведение. В статье [16] показано, что производные дробного порядка по времени и пространству являются одним из способов дополнения классического уравнения диффузии, так что оно учитывает негауссовские процессы, часто наблюдаемые в гетерогенных материалах. Аналитические решения, полученные из дробных модифицированных телеграфных уравнений и уравнений Рэлея, дополнительно иллюстрируют влияние дробных производных на распространение частиц, демонстрируя решения бегущего импульса, которые зависят от дробного порядка [17]. Кроме того, интеграция ядер свёртки в кинетические уравнения улучшает моделирование процессов адсорбции и десорбции на коллоидных поверхностях, связывая эту динамику с аномальной диффузией [18]. В статье [18] используется обобщённое уравнение диффузии и кинетические уравнения для моделирования аномальной диффузии частиц вблизи коллоидной частицы, включая ядра свёртки для описания сложных реакционных процессов, которые могут быть представлены дробными производными уравнениями в мезоскопических контекстах. В статье [18] исследуется аномальная диффузия и немарковские реакции частиц вблизи адсорбирующей коллоидной частицы, с использованием обобщённого уравнения диффузии и кинетических уравнений для моделирования объёмной динамики и поверхностных реакций, выявляя различные аномальные поведения диффузии. В целом эти достижения подчёркивают универсальность и эффективность дробного исчисления в понимании сложного поведения частиц в коллоидных средах [19]. В статье [20] обсуждаются дробные аномальные уравнения диффузии, использующие производные Римана-Лиувилля и Капуто для моделирования субдиффузии и супердиффузии. Основное внимание уделяется асимптотическим решениям, важным для описания поведения мезоскопических частиц в коллоидных растворах. Используя преобразования Лапласа и Фурье, получены асимптотические оценки решений уравнений аномальной диффузии. В статье [21] исследуются три вида дробных дифференциальных моделей (модель распределённого порядка, модель переменного порядка и модель случайного порядка) для характеристики аномальной диффузии и выделяют характеристики, физические преимущества и потенциальные приложения каждой модели. В статье [21] обсуждаются дробные дифференциальные модели, в частности модели распределённого порядка, переменного порядка и случайного порядка, которые эффективно характеризуют аномальные процессы диффузии, включая процессы мезоскопических частиц в коллоидных растворах, с помощью их уникальных математических формулировок. В статье [22] рассматривается степень некорректности дробных обратных задач, включающих дробную производную Джрбашьяна-Капуто по времени или пространству. В статье [22] обсуждаются дробные дифференциальные уравнения, в частности, с использованием производных Джрбашьяна-Капуто, для моделирования аномальных процессов диффузии, подчёркивая их применение в описании мезоскопических движений частиц в коллоидных растворах и уникальные проблемы, возникающие при решении обратных задач в этом контексте. В статье [23] представлена нелокальная дробная перидинамическая модель, которая использует дробные производные уравнения для характеристики аномальных диффузионных процессов, в частности, в сложных средах, применяя метод дробного перидинамического дифференциального оператора для эффективных численных решений. В статье [23] предлагается нелокальная дробная перидинамическая модель для характеристики нелокальности физических процессов или систем на основе анализа с дробной производной моделью и перидинамической моделью. В статье [24] предложен

метод конечных разностей для решения одномерных (стационарных) дробных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами и двусторонними дробными производными. В статье [24] обсуждаются дробные дифференциальные уравнения для моделирования аномальной диффузии, подчеркивая их нелокальную природу. В статье [24] представлен метод конечных разностей для одномерных дробных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, подходящий для описания диффузионного поведения мезоскопических частиц в коллоидных растворах. В статье [25] представлено исследование аномальной диффузии с использованием описания Фоккера-Планка с дробными производными скорости, где функции распределения находятся с использованием численных средств для различной степени дробности устойчивого распределения Леви. В статье [25] вводится дробное уравнение Фоккера-Планка для описания аномальной диффузии, включающее дробные производные скорости для учёта нелокальных эффектов и длинных скачков, актуальных для мезоскопических частиц в коллоидных растворах, демонстрирующих негауссово поведение. В статье [26] исследуются решения обобщенного уравнения типа диффузии, рассматривая пространственную и временную дробную производную и наличие нелокальных членов, которые могут быть связаны с реакцией или процессами адсорбции-десорбции. В статье [26] исследуются обобщённые уравнения диффузии, включающие пространственные и временные дробные производные, обращаясь к аномальным процессам диффузии. Решения выводятся с использованием подхода функции Грина, подчёркивающего различные поведения, относящиеся к мезоскопическим частицам в коллоидных растворах и их диффузионным характеристикам.

Результаты

Новые оптические материалы с малыми положительными и отрицательными значениями эффективного комплексного показателя преломления n имеют непосредственное отношение к проблеме широкополосного оптического просветления поверхностей различных оптических сред при помощи коллоидных метаматериалов. Запишем формулу для амплитуды r_1 отражённой волны от слоя с толщиной d_1 и показателем преломления n_1 , находящегося на поверхности полубесконечной оптической среды с показателем преломления n_2 . Свет падает из среды 1 с показателем преломления n_0 . Рассмотрим для упрощения случай нормального падения внешнего излучения с длиной волны λ . Тогда эта формула принимает следующий вид:

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

где r_{01} , r_{12} – амплитудные коэффициенты Френеля для отражения оптической волны,

$$r_{01} = \frac{n_0 \cos \theta_0 - n_1 \cos \theta_1}{n_0 \cos \theta_0 + n_1 \cos \theta_1}, \quad (2)$$

$$r_{12} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}, \quad (3)$$

а изменение фазы в слое 1 определяется с помощью величины

$$\phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} d_1 n_1. \quad (4)$$

Рассмотрим коллоидную нанокompозитную среду с включениями двух типов и матрицей из глицерина. Показатель преломления матрицы из глицерина вычисляется по формуле [27]:

$$n = 1.45797 + \frac{0.00598}{\lambda^2} - \frac{0.00036}{\lambda^4}. \quad (5)$$

Диэлектрическая проницаемость наноразмерных включений первого типа в виде наночастиц серебра находится по формуле [28]:

$$\varepsilon_{i1} = \varepsilon_{\infty 1} - \frac{\omega_{p1}^2}{\omega(\omega + i\gamma_1)}, \quad (6)$$

где для наночастиц серебра $\hbar\omega_{p1} = 9.6$ эВ, $\hbar\gamma_0 = 0.0544$ эВ, $\varepsilon_{\infty 1} = 5.266$. Коэффициент затухания для наночастиц серебра находится по формуле

$$\gamma_1 = \gamma_0 + A_p(0.71f_1 + 0.31(1 - f_1))\frac{v_F}{a_1}, \quad (7)$$

в которой $A_p \approx 0.33$ для сферических наночастиц, скорость Ферми $v_F = 1.392 \cdot 10^6$ м/с.

Диэлектрическая проницаемость наноразмерных включений второго типа в виде наночастиц из метаматериала находится по формуле:

$$\varepsilon_{i2} = \varepsilon_{\infty 2} \left(1 - \frac{\omega_{p2}^2}{\omega(\omega + i\gamma_2)} \right), \quad (8)$$

где $\omega_{p2} = 1.36 \cdot 10^{16}$ с⁻¹, $\gamma_2 = 3.04 \cdot 10^{13}$ с⁻¹, $\varepsilon_{\infty 2} = -1.2$.

Для нахождения эффективной диэлектрической проницаемости системы наноразмерных включений используем формулу:

$$\varepsilon_i = f_1\varepsilon_{i1} + f_2\varepsilon_{i2}. \quad (9)$$

Для нахождения эффективной диэлектрической проницаемости нанокompозита с включениями коллоидного метаматериала используем формулу Максвелл-Гарнетта:

$$\varepsilon_{eff}^{MG} = \varepsilon_m \left(1 + 3f \frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_m)}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_m - f(\varepsilon_i - \varepsilon_m)} \right), \quad (10)$$

где фактор заполнения наноразмерными включениями двух типов определяется по формуле $f = f_1 + f_2$. Эффективный показатель преломления нанокompозита с включениями коллоидного метаматериала найдём по формуле:

$$n_1 = \sqrt{\varepsilon_1} = \varepsilon_{eff}^{MG}. \quad (11)$$

Приведём результаты численных расчётов дисперсионной зависимости эффективной диэлектрической проницаемости коллоидных метаматериалов.

На рис. 1 изображена зависимость действительной части и мнимой части эффективной диэлектрической проницаемости коллоидных метаматериалов от длины волны внешнего оптического излучения. Первая система наноразмерных включений обладает параметрами: средний размер наночастиц серебра равен $a_1 = 5.0$ нм, фактор заполнения наноразмерными включениями первого типа составляет $f_1 = 0.03$. Вторая система наноразмерных включений обладает параметрами: средний размер наночастиц из метаматериала равен $a_2 = 5.0$ нм, фактор заполнения наноразмерными включениями второго типа составляет $f_2 = 0.07$. Матрицей нанокompозитного слоя является глицерин.

На рис. 2 изображена зависимость модуля эффективной диэлектрической проницаемости коллоидных метаматериалов от длины волны внешнего оптического излучения.

На рис. 3 изображена зависимость действительной части и мнимой части эффективного комплексного показателя преломления коллоидных метаматериалов как функция длины волны внешнего оптического излучения.

На рис. 4 изображена зависимость модуля эффективного комплексного показателя преломления коллоидных метаматериалов как функция длины волны внешнего оптического излучения.

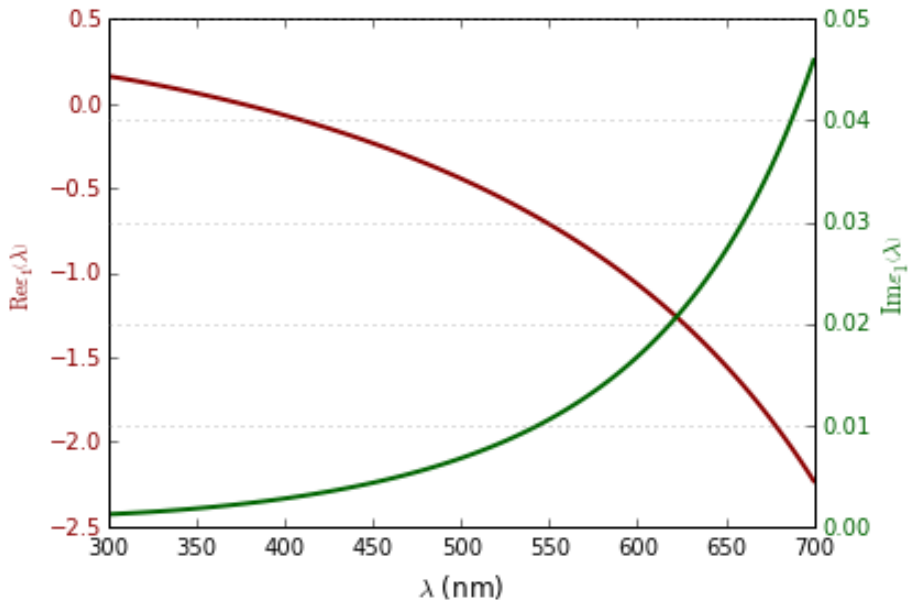


Рис. 1. Зависимость действительной части и мнимой части эффективной диэлектрической проницаемости коллоидных метаматериалов от длины волны внешнего оптического излучения. Первая система наноразмерных включений обладает параметрами: средний размер наночастиц серебра равен $a_1 = 5.0$ нм, фактор заполнения наноразмерными включениями первого типа составляет $f_1 = 0.03$. Вторая система наноразмерных включений обладает параметрами: средний размер наночастиц из метаматериала равен $a_2 = 5.0$ нм, фактор заполнения наноразмерными включениями второго типа составляет $f_2 = 0.07$. Матрицей нанокompозитного слоя является глицерин.

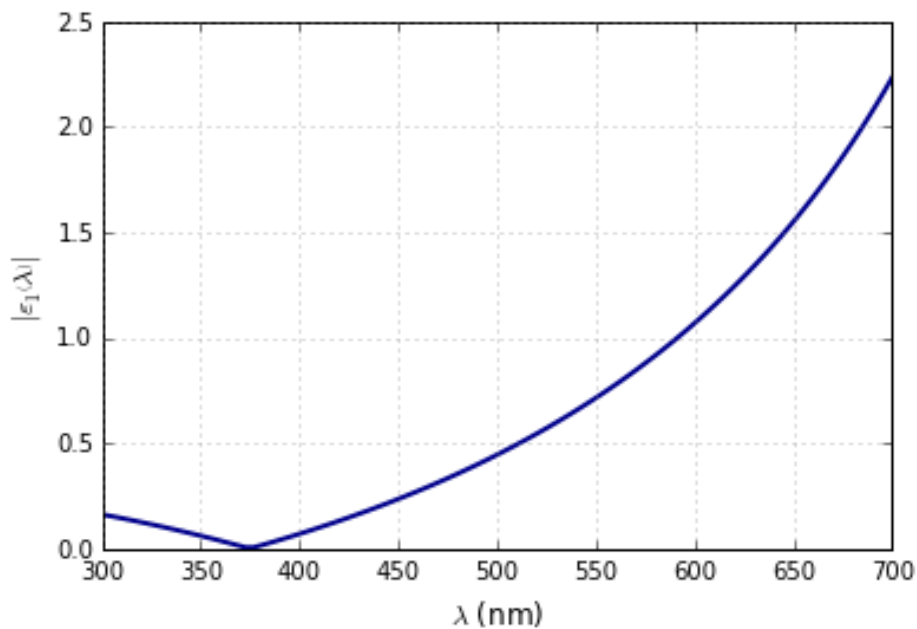


Рис. 2. Модуль эффективной диэлектрической проницаемости коллоидных метаматериалов как функция длины волны внешнего оптического излучения.

Просветляющее покрытие может быть определено как такое покрытие, которое обеспечивает минимальное отражение, когда отражательная способность достигает минимального значения. Если показатель преломления вещества слоя n_1 имеет значение,

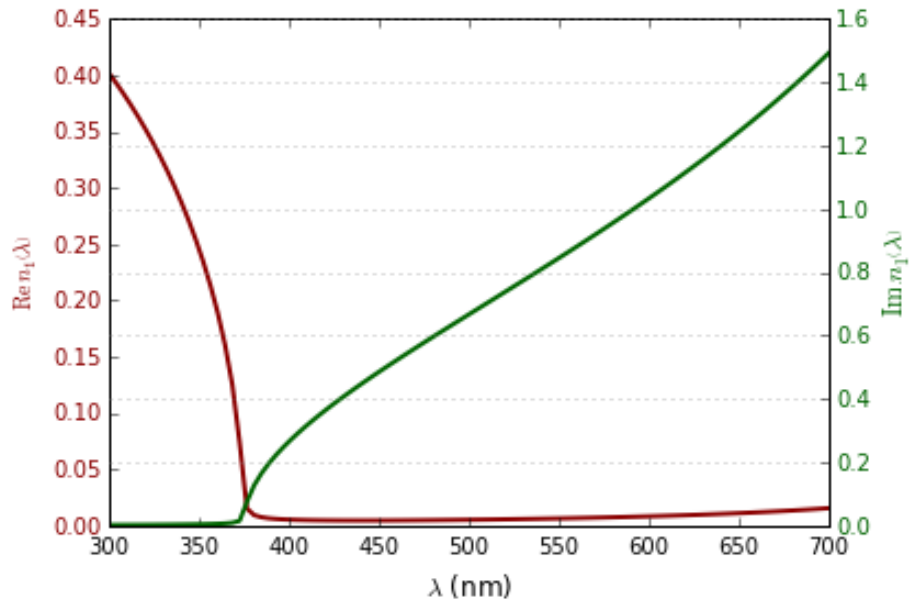


Рис. 3. Действительная часть и мнимая часть эффективного комплексного показателя преломления коллоидных метаматериалов как функция длины волны внешнего оптического излучения.

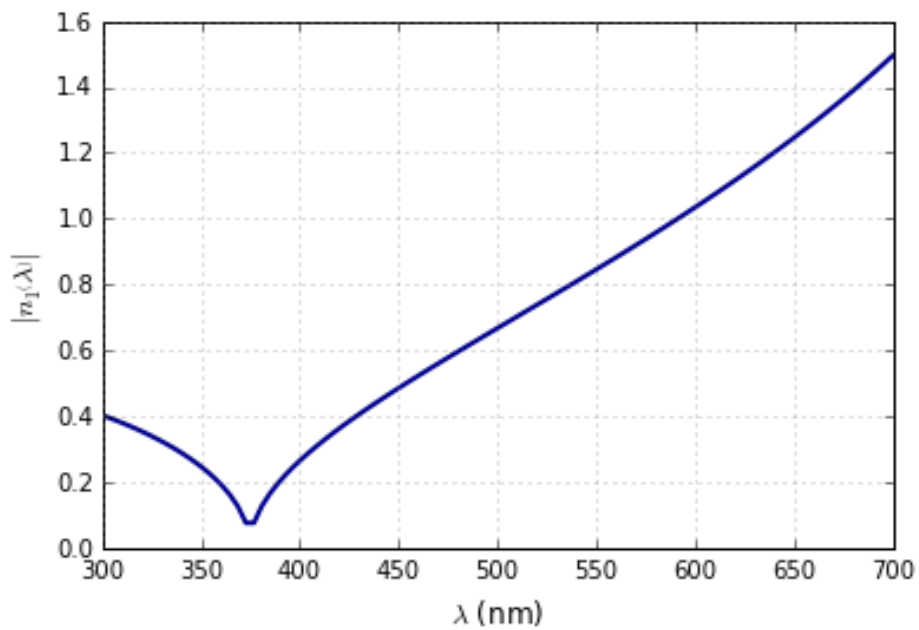


Рис. 4. Модуль эффективного комплексного показателя преломления коллоидных метаматериалов как функция длины волны внешнего оптического излучения.

промежуточное между значениями показателей преломления обрамляющих сред, то есть $n_0 < n_1 < n_2$, то при

$$\frac{2}{\lambda} n_1 d_1 = \frac{2m + 1}{2}, \quad (12)$$

где m – произвольное целое число, отражательная способность достигает минимума.

Если из коллоидного метаматериала изготовить слой, то этот слой будет идеальным просветляющим покрытием для поверхности полубесконечной подстилающей среды.

Заключение

Исследование позволило развить понимание физических процессов и разработать математические модели физических процессов оптического отражения и пропускания в коллоидных метаматериалах. Показано, что слой из коллоидного метаматериала может быть использован в качестве просветляющего покрытия для поверхности полубесконечной подстилающей среды. Показано, что на основе эффекта оптического просветления можно определить оптические свойства коллоидных метаматериалов.

Гипотеза исследования, заключающаяся в предположении о том, что оптические свойства коллоидных метаматериалов могут быть эффективно управляемыми путём изменения параметров включений и матрицы нанокompозитного материала, что открывает возможности для создания новых оптоэлектронных устройств и систем, была подтверждена результатами исследования.

Результаты исследования могут способствовать развитию новых технологий и приложений в области оптики и оптоэлектроники. Результаты исследования могут быть использованы для разработки новых оптических материалов для сенсорных устройств, работающих на основе принципов усиленного оптического пропускания.

Список использованных источников

1. Conti Ylli, Chiang Naihao, Scarabelli Leonardo. Colloidal plasmonic metasurfaces for the enhancement of nonlinear optical processes and molecular spectroscopies // *ChemNanoMat*. — 2024. — mar. — Vol. 10, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/cnma.202300566>.
2. Fabricating defogging metasurfaces via a water-based colloidal route / Olena Khoruzhenko [et al.] // *Materials Horizons*. — 2023. — Vol. 10, no. 9. — P. 3749–3760. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/d3mh00625e>.
3. DNA-patched nanoparticles for the self-assembly of colloidal metamaterials / Le Liang [et al.] // *JACS Au*. — 2023. — mar. — Vol. 3, no. 4. — P. 1176–1184. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/jacsau.3c00013>.
4. Lizano Andres, Tang Xun. Convolutional neural network-based colloidal self-assembly state classification // *Soft Matter*. — 2023. — Vol. 19, no. 19. — P. 3450–3457. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/d3sm00139c>.
5. Cai Yi-Yu, Choi Yun Chang, Kagan Cherie R. Chemical and physical properties of photonic Noble-metal nanomaterials // *Advanced materials*. — 2022. — feb. — Vol. 35, no. 34. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/adma.202108104>.
6. Enhanced Mie resonance in a low refractive index colloidal metamaterial aided by nematic liquid crystal / Amit Bhardwaj [et al.] // *Journal of Molecular Liquids*. — 2022. — jan. — Vol. 346. — P. 117116. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117116>.
7. Exploiting colloidal metamaterials for achieving unnatural optical refractions / Ji-Hyeok Huh [et al.] // *Advanced Materials*. — 2020. — oct. — Vol. 32, no. 51. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/adma.202001806>.
8. Theoretical investigation on the metamaterials based on the magnetic template-assisted self-assembly of magnetic-plasmonic nanoparticles for adjustable photonic responses / Jiajia Sun [et al.] // *The Journal of Physical Chemistry B*. — 2023. — oct. — Vol. 127, no. 40. — P. 8681–8689. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c04917>.


9. Highly responsive mid-infrared metamaterial enhanced heterostructure photodetector formed out of sintered PbSe/PbS colloidal quantum dots / Raphael Schwanninger [et al.] // *ACS Applied materials and interfaces*. — 2023. — feb. — Vol. 15, no. 8. — P. 10847–10857. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.2c23050>.
10. Near-perfect broadband metamaterial absorbers of truncated nanocones using colloidal lithography / Zhengjie Guo [et al.] // *Optical materials*. — 2021. — sep. — Vol. 119. — P. 111352. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/J.OPTMAT.2021.111352>.
11. Pusovnik Anja, Aplinc Jure, Ravnik Miha. Optical properties of metamaterial split ring nematic colloids // *Scientific Reports*. — 2019. — may. — Vol. 9, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/S41598-019-43470-6>.
12. Colloidal approach of local and propagating magnetic modes for optical metamaterials on the macroscopic area / Tobias A. F. König [et al.] // 2015 9th International congress on advanced electromagnetic materials in microwaves and optics (METAMATERIALS). — IEEE, 2015. — sep. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/METAMATERIALS.2015.7342555>.
13. Colloidal metasurfaces displaying near-ideal and tunable light absorbance in the infrared / Matthew J. Rozin [et al.] // *Nature communications*. — 2015. — jun. — Vol. 6, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/NCOMMS8325>.
14. Colloidal self-assembly concepts for plasmonic metasurfaces / Martin Mayer [et al.] // *Advanced optical materials*. — 2018. — sep. — Vol. 7, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/ADOM.201800564>.
15. Tateishi Angel A., Ribeiro Haroldo V., Lenzi Ervin K. The role of fractional time-derivative operators on anomalous diffusion // *Frontiers in physics*. — 2017. — oct. — Vol. 5. — URL: <http://dx.doi.org/10.3389/FPHY.2017.00052>.
16. Magin Richard L., Lenzi Ervin K. Slices of the anomalous phase cube depict regions of sub- and super-diffusion in the fractional diffusion equation // *Mathematics*. — 2021. — jun. — Vol. 9, no. 13. — P. 1481. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/MATH9131481>.
17. Analytical study of fractional equations describing anomalous diffusion of energetic particles / A. M. Tawfik [et al.] // *Journal of physics: conference series*. — 2017. — jun. — Vol. 869. — P. 012050. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/869/1/012050>.
18. Anomalous diffusion and non-Markovian reaction of particles near an adsorbing colloidal particle / Derik W. Gryczak [et al.] // *Fluids*. — 2024. — sep. — Vol. 9, no. 10. — P. 221. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/fluids9100221>.
19. Anomalous diffusion with Caputo-Fabrizio time derivative: an inverse problem / S. A. Seminara [et al.] // *Trends in computational and applied mathematics*. — 2022. — sep. — Vol. 23, no. 3. — P. 515–529. — URL: <http://dx.doi.org/10.5540/tcam.2022.023.03.00515>.
20. Ma Yutian, Zhang Fengrong, Li Changpin. The asymptotics of the solutions to the anomalous diffusion equations // *Computers and mathematics with applications*. — 2013. — sep. — Vol. 66, no. 5. — P. 682–692. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/J.CAMWA.2013.01.032>.

21. Fractional differential models for anomalous diffusion / HongGuang Sun [et al.] // *Physica A: statistical mechanics and its applications*. — 2010. — jul. — Vol. 389, no. 14. — P. 2719–2724. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/J.PHYSA.2010.02.030>.
22. Jin Bangti, Rundell William. A tutorial on inverse problems for anomalous diffusion processes // *Inverse problems*. — 2015. — feb. — Vol. 31, no. 3. — P. 035003. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0266-5611/31/3/035003>.
23. A nonlocal fractional peridynamic diffusion model / Yuanyuan Wang [et al.] // *Fractal and Fractional*. — 2021. — jul. — Vol. 5, no. 3. — P. 76. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/FRACTALFRACT5030076>.
24. A finite difference method for space fractional differential equations with variable diffusivity coefficient / K. A. Mustapha [et al.] // *Communications on applied mathematics and computation*. — 2020. — may. — Vol. 2, no. 4. — P. 671–688. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/S42967-020-00066-6>.
25. Anderson Johan, Kim Eun-jin, Moradi Sara. A fractional Fokker-Planck model for anomalous diffusion // *Physics of plasmas*. — 2014. — dec. — Vol. 21, no. 12. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4904201>.
26. A generalized diffusion equation: solutions and anomalous diffusion / Ervin K. Lenzi [et al.] // *Fluids*. — 2023. — jan. — Vol. 8, no. 2. — P. 34. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/fluids8020034>.
27. Rheims J., Köser J., Wriedt T. Refractive-index measurements in the near-IR using an Abbe refractometer // *Measurement science and technology*. — 1997. — jun. — Vol. 8, no. 6. — P. 601–605. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/8/6/003>.
28. Johnson P. B., Christy R. W. Optical constants of the Noble metals // *Physical Review B*. — 1972. — dec. — Vol. 6, no. 12. — P. 4370–4379. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.6.4370>.

Сведения об авторах:

Ольга Николаевна Захарова — студент магистратуры факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: zkhrvolly@gmail.com

ORCID iD  0000-0003-4052-3212

Web of Science ResearcherID  ABB-9746-2021

Original article
PACS 42.25.Bs
OCIS 260.2065
MSC 78A10

Investigation of the optical properties of colloidal metamaterials

O. N. Zakharova 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted November 14, 2024
Resubmitted November 16, 2024
Published December 28, 2024

Abstract. The results of theoretical and numerical study of optical properties of colloidal metamaterials are presented. The possibility of using colloidal metamaterials for controlling enhanced light transmission is discussed. The methods of study include computer modeling of physical characteristics of metamaterials with a negative refractive index. As a result of computer calculations, dispersion dependences of the effective permittivity and effective refractive index of colloidal metamaterials are obtained. The results of the study can be used to develop optoelectronic devices using the optical properties of colloidal metamaterials.

Keywords: metamaterial, colloidal metamaterial, optical properties, optical radiation, effective medium approximation, photonics, metasurface

References

1. Conti Ylli, Chiang Naihao, Scarabelli Leonardo. Colloidal plasmonic metasurfaces for the enhancement of nonlinear optical processes and molecular spectroscopies // *Chem-NanoMat.* — 2024. — mar. — Vol. 10, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/cnma.202300566>.
2. Fabricating defogging metasurfaces via a water-based colloidal route / Olena Kho-ruzhenko [et al.] // *Materials Horizons.* — 2023. — Vol. 10, no. 9. — P. 3749–3760. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/d3mh00625e>.
3. DNA-patched nanoparticles for the self-assembly of colloidal metamaterials / Le Liang [et al.] // *JACS Au.* — 2023. — mar. — Vol. 3, no. 4. — P. 1176–1184. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/jacsau.3c00013>.
4. Lizano Andres, Tang Xun. Convolutional neural network-based colloidal self-assembly state classification // *Soft Matter.* — 2023. — Vol. 19, no. 19. — P. 3450–3457. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/d3sm00139c>.
5. Cai Yi-Yu, Choi Yun Chang, Kagan Cherie R. Chemical and physical properties of photonic Noble-metal nanomaterials // *Advanced materials.* — 2022. — feb. — Vol. 35, no. 34. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/adma.202108104>.


6. Enhanced Mie resonance in a low refractive index colloidal metamaterial aided by nematic liquid crystal / Amit Bhardwaj [et al.] // *Journal of Molecular Liquids*. — 2022. — jan. — Vol. 346. — P. 117116. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117116>.
7. Exploiting colloidal metamaterials for achieving unnatural optical refractions / Ji-Hyeok Huh [et al.] // *Advanced Materials*. — 2020. — oct. — Vol. 32, no. 51. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/ADMA.202001806>.
8. Theoretical investigation on the metamaterials based on the magnetic template-assisted self-assembly of magnetic-plasmonic nanoparticles for adjustable photonic responses / Jiajia Sun [et al.] // *The Journal of Physical Chemistry B*. — 2023. — oct. — Vol. 127, no. 40. — P. 8681–8689. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.jpccb.3c04917>.
9. Highly responsive mid-infrared metamaterial enhanced heterostructure photodetector formed out of sintered PbSe/PbS colloidal quantum dots / Raphael Schwanninger [et al.] // *ACS Applied materials and interfaces*. — 2023. — feb. — Vol. 15, no. 8. — P. 10847–10857. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.2c23050>.
10. Near-perfect broadband metamaterial absorbers of truncated nanocones using colloidal lithography / Zhengjie Guo [et al.] // *Optical materials*. — 2021. — sep. — Vol. 119. — P. 111352. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/J.OPTMAT.2021.111352>.
11. Pusovnik Anja, Aplinc Jure, Ravnik Miha. Optical properties of metamaterial split ring nematic colloids // *Scientific Reports*. — 2019. — may. — Vol. 9, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/S41598-019-43470-6>.
12. Colloidal approach of local and propagating magnetic modes for optical metamaterials on the macroscopic area / Tobias A. F. König [et al.] // 2015 9th International congress on advanced electromagnetic materials in microwaves and optics (METAMATERIALS). — IEEE, 2015. — sep. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/METAMATERIALS.2015.7342555>.
13. Colloidal metasurfaces displaying near-ideal and tunable light absorbance in the infrared / Matthew J. Rozin [et al.] // *Nature communications*. — 2015. — jun. — Vol. 6, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/NCOMMS8325>.
14. Colloidal self-assembly concepts for plasmonic metasurfaces / Martin Mayer [et al.] // *Advanced optical materials*. — 2018. — sep. — Vol. 7, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/ADOM.201800564>.
15. Tateishi Angel A., Ribeiro Haroldo V., Lenzi Ervin K. The role of fractional time-derivative operators on anomalous diffusion // *Frontiers in physics*. — 2017. — oct. — Vol. 5. — URL: <http://dx.doi.org/10.3389/FPHY.2017.00052>.
16. Magin Richard L., Lenzi Ervin K. Slices of the anomalous phase cube depict regions of sub- and super-diffusion in the fractional diffusion equation // *Mathematics*. — 2021. — jun. — Vol. 9, no. 13. — P. 1481. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/MATH9131481>.
17. Analytical study of fractional equations describing anomalous diffusion of energetic particles / A. M. Tawfik [et al.] // *Journal of physics: conference series*. — 2017. — jun. — Vol. 869. — P. 012050. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/869/1/012050>.


18. Anomalous diffusion and non-Markovian reaction of particles near an adsorbing colloidal particle / Derik W. Gryczak [et al.] // *Fluids*. — 2024. — sep. — Vol. 9, no. 10. — P. 221. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/fluids9100221>.
19. Anomalous diffusion with Caputo-Fabrizio time derivative: an inverse problem / S. A. Seminara [et al.] // *Trends in computational and applied mathematics*. — 2022. — sep. — Vol. 23, no. 3. — P. 515–529. — URL: <http://dx.doi.org/10.5540/tcam.2022.023.03.00515>.
20. Ma Yutian, Zhang Fengrong, Li Changpin. The asymptotics of the solutions to the anomalous diffusion equations // *Computers and mathematics with applications*. — 2013. — sep. — Vol. 66, no. 5. — P. 682–692. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/J.CAMWA.2013.01.032>.
21. Fractional differential models for anomalous diffusion / HongGuang Sun [et al.] // *Physica A: statistical mechanics and its applications*. — 2010. — jul. — Vol. 389, no. 14. — P. 2719–2724. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/J.PHYSA.2010.02.030>.
22. Jin Bangti, Rundell William. A tutorial on inverse problems for anomalous diffusion processes // *Inverse problems*. — 2015. — feb. — Vol. 31, no. 3. — P. 035003. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0266-5611/31/3/035003>.
23. A nonlocal fractional peridynamic diffusion model / Yuanyuan Wang [et al.] // *Fractal and Fractional*. — 2021. — jul. — Vol. 5, no. 3. — P. 76. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/FRACTALFRACT5030076>.
24. A finite difference method for space fractional differential equations with variable diffusivity coefficient / K. A. Mustapha [et al.] // *Communications on applied mathematics and computation*. — 2020. — may. — Vol. 2, no. 4. — P. 671–688. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/S42967-020-00066-6>.
25. Anderson Johan, Kim Eun-jin, Moradi Sara. A fractional Fokker-Planck model for anomalous diffusion // *Physics of plasmas*. — 2014. — dec. — Vol. 21, no. 12. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4904201>.
26. A generalized diffusion equation: solutions and anomalous diffusion / Ervin K. Lenzi [et al.] // *Fluids*. — 2023. — jan. — Vol. 8, no. 2. — P. 34. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/fluids8020034>.
27. Rheims J., Köser J., Wriedt T. Refractive-index measurements in the near-IR using an Abbe refractometer // *Measurement science and technology*. — 1997. — jun. — Vol. 8, no. 6. — P. 601–605. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/8/6/003>.
28. Johnson P. B., Christy R. W. Optical constants of the Noble metals // *Physical Review B*. — 1972. — dec. — Vol. 6, no. 12. — P. 4370–4379. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.6.4370>.

Information about authors:

Olga Nikolaevna Zakharova — 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: zkhrvolly@gmail.com

ORCID iD  0000-0003-4052-3212

Web of Science ResearcherID  ABB-9746-2021