

УДК 535.3
ББК 22.343
ГРНТИ 29.31.21
ВАК 01.04.05

Исследование оптического пропускания границы раздела композитной среды с включениями из микротрубчатого метаматериала

К. К. Алтунин^{id}, Е. А. Шлёнкина^{id}¹

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

Поступила в редакцию 12 ноября 2021 года
После переработки 2 декабря 2021 года
Опубликована 10 декабря 2021 года

Аннотация. Исследованы оптические свойства нанокompозитных сред, содержащих включения из микротрубчатых метаматериалов. Нанокompозитные среды, содержащие включения из микротрубчатых метаматериалов, являются базой для создания наноантенн и систем скрытной передачи информации. Численные исследования оптического пропускания границы раздела с нанокompозитной средой, содержащей включения из микротрубчатых метаматериалов показывают, что, изменяя параметры метаматериала, можно эффективно управлять оптическим пропусканием через границу раздела нанокompозитной средой с включениями из микротрубчатого метаматериала. Разработана теоретическая модель, позволяющая рассчитывать основные оптические параметры наноструктуры на основе микротрубчатого метаматериала. В результате численных расчётов найдены значения параметров наноструктуры на основе микротрубчатого метаматериала, позволяющие значительно увеличить оптическое пропускание наноструктуры на основе микротрубчатого метаматериала. В результате численных расчётов обнаружено увеличение оптического пропускания границы раздела с нанокompозитной средой с включениями из микротрубчатого метаматериала. Показано, что оптические и электродинамические свойства нанокompозита с микротрубчатыми метаматериалами определяются не столько структурной организацией, сколько оптическими и электродинамическими характеристиками образующих его компонент.

Ключевые слова: метаматериал, микротрубчатый метаматериал, нанокompозит, нанокompозитная среда, оптическое пропускание, оптическое излучение, ближние продольные поля, длина волны излучения, численные расчёты

PACS: 42.25.Bs

¹E-mail: zmejka123@mail.ru

Введение

В работе приводятся результаты теоретического исследования оптических свойств композитных сред, содержащих включения из микротрубочных метаматериалов. Исследование оптических свойств нанокompозитных сред, содержащих систему включений из микротрубочных метаматериалов, представляет собой актуальную задачу современной оптики твердотельных наноструктур. Актуальность данной темы обусловлена необходимостью создания новых оптоэлектронных приборов на основе наноструктур из микротрубочных метаматериалов с уникальными оптическими свойствами и повышенным быстродействием. В настоящее время активно развиваются технологии получения новых метаматериалов.

Целью работы является теоретическое исследование оптических и электродинамических свойств микротрубочных метаматериалов, находящихся во внешнем поле оптического излучения.

В задачи исследования входит написание обзора литературы по оптическим свойствам метаматериалов, построение теоретической модели оптических процессов в микротрубочных метаматериалах, проведение численных расчётов эффективного показателя преломления и энергетического коэффициента оптического пропускания микротрубочного метаматериала.

Объектом исследования является микротрубочный метаматериал.

Предметом исследования являются оптические характеристики наноструктурной среды с включениями из микротрубочных метаматериалов, находящейся в поле оптического излучения.

Гипотеза исследования состоит в том, что можно эффективно управлять величиной оптического пропускания нанокompозитов из микротрубочных метаматериалов в зависимости их от геометрической конструкции.

В качестве материалов исследования выбраны микротрубочные метаматериалы.

В качестве методов исследования используются теоретические и численные методы расчета оптических характеристик микротрубочных метаматериалов.

Обзор работ по физическим свойствам метаматериалов

На основе метаматериалов уже созданы или разрабатываются суперлинзы и гиперлинзы, сенсоры ближнего поля, идеальные детекторы фотонов и целый ряд других устройств [1–3].

В [4–7] разрабатываются метаматериалы, в которых показатель преломления достигает квази нулевых и нулевых значений лишь в очень узких диапазонах длин волн.

В статье [8] продемонстрирован метод, основанный на фемтосекундной лазерно-индуцированной прозрачности для высокопроизводительной и эффективной обработки периодических многослойных плазмонных метаматериалов.

Подавление отражения света от плоской поверхности было важной технологической проблемой в последние десятилетия. Методы подавления отражения основаны на различных элементах, таких как простые диэлектрические слои четвертьволнового диапазона, наноструктурированные поверхности для захвата света, слои с градиентным индексом и другие [9]. Различные преимущества плазмонных наноструктур были обнаружены недавно [10], и большинство из них связаны с возбуждением интенсивного локализованного поверхностного плазмонного резонанса в металлических наноструктурах и сильным подавлением отражения света в окрестности резонанса [11]. Несмотря на активные исследования по этим темам и большие перспективы применения, практическое использование плазмонных наночастиц всё ещё затруднено многими проблемами, например, необходимо уменьшить большие омические потери плазмонных материалов,

которые подавляют резонансы наночастиц, или преодолеть поверхностное окисление, который изменяет оптические свойства наноструктур [12]. Кроме того, локализованный поверхностный плазмонный резонанс зависит от формы конкретной наночастицы, а не от её размера и расстояния между частицами, что делает настройку оптических свойств проблематичной [13]. С недавнего времени полностью диэлектрическая фотоника была предложена в качестве эффективной альтернативы плазмонике [9, 14, 15]. Концепция основана на наноструктурах с высоким показателем преломления, которые наряду с электрическим обладают магнитным резонансом Ми и позволяют одновременно контролировать магнитные и электрические компоненты света на наноуровне [16]. Кремний рассматривается как перспективный материал для полностью диэлектрической фотоники, имеющий один из максимально возможных показателей преломления в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах длин волн и относительно небольшие оптические потери одновременно [17]. Спектр резонанса высокоиндексных структур определяется геометрическими параметрами наряду с оптическими свойствами и, следовательно, может быть эффективно настроен в процессе изготовления [18]. Кроме того, внимание исследователей в последнее время привлекают важные особенности наночастиц с высоким индексом: на определенной длине волны они обладают высокой направленностью диаграммы направленности [19, 20], что приводит к сильному рассеянию вперед и назад. Такое поведение было предсказано для частиц с одинаковыми магнитными и электрическими дипольными моментами Керкером и его коллегами [21], в то время как такие частицы часто называют элементом Гюйгенса [22–26]. Оптические метаповерхности были разработаны в качестве принципиально новой концепции для передовых технологий получения субволновых резонансных наноструктур. Однако потери на отражение и поглощение, а также низкая эффективность преобразования поляризации представляют собой фундаментальное препятствие для достижения высокой эффективности передачи, необходимой для практического применения. Помимо возможных применений в фотовольтаике, элементы Гюйгенса предлагаются в качестве основного элемента метаповерхностей и будущих плоских фотонных устройств для эффективных световых манипуляций на наноуровне [27]. В статье [27] продемонстрированы высокоэффективные полностью диэлектрические метаповерхности с использованием массивов кремниевых нанодисков в качестве метаатомов. Основные характеристики источников Гюйгенса состоят в спектрально перекрывающихся скрещенных электрических и магнитных дипольных резонансов одинаковой силы. Основываясь на полнофазном покрытии в сочетании с высокой эффективностью пропускания, все диэлектрические поверхности Гюйгенса могут стать новой парадигмой для плоских оптических устройств, включая управление лучом, формирование луча и фокусировку, а также голографию и управление дисперсией.

В работе [28] рассматриваются основные положения и последние достижения в области перестраиваемых диэлектрических метаповерхностей. В частности, обсуждаются механизмы настройки для метаповерхностей диэлектрика, изменение материала резонаторов и их окружения.

Проведенный анализ опубликованных за последнее время работ по исследованиям метаматериалов доказывает научную актуальность и огромную практическую значимость затронутых проблем в современной оптике и оптоэлектронике. Это объясняется, прежде всего, тем, что новые материалы и метаматериалы играют особую роль в быстро развивающихся отраслях науки и нанотехнологии, специализирующихся на изучении объектов (существующих в природе, а чаще искусственно приготовленных), для которых принципиально важно наличие наноразмерных структурных блоков. Выявлен ряд теоретических подходов, перспективных с точки зрения исследования и предсказания оптических свойств нанокompозитов на основе метаматериалов.

Теоретическая модель и результаты

Рассмотрим выражения для коэффициентов Френеля для отражения и пропускания оптической волны от границы раздела двух сред. Пусть на границу раздела сред 0 и 1 падает внешняя оптическая волна. Угол падения оптической волны обозначим θ_0 , а угол преломления обозначим θ_1 . Напряжённость электрического поля внешней электромагнитной волны имеет вид представим в виде плоской волны. Будем использовать комплексное представление для записи векторов напряжённостей внешней, отражённой и прошедшей через границу раздела сред волн:

$$\mathbf{E}_{in}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_{in}(0) \exp\{i(\omega t - \mathbf{k}_{in}\mathbf{r})\}, \quad (1)$$

$$\mathbf{E}_r(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_r(0) \exp\{i(\omega t - \mathbf{k}_r\mathbf{r})\}, \quad (2)$$

$$\mathbf{E}_t(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_t(0) \exp\{i(\omega t - \mathbf{k}_t\mathbf{r})\}, \quad (3)$$

где амплитуды напряжённостей электрического поля оптической волны для случая s -поляризации и p -поляризации определяются выражениями:

$$\mathbf{E}_r^s(0) = r^s \mathbf{E}_{in}^s(0), \quad (4)$$

$$\mathbf{E}_t^s(0) = t^s \mathbf{E}_{in}^s(0), \quad (5)$$

$$\mathbf{E}_r^p(0) = r^p \mathbf{E}_{in}^p(0), \quad (6)$$

$$\mathbf{E}_t^p(0) = t^p \mathbf{E}_{in}^p(0), \quad (7)$$

где r^s, t^s, r^p и t^p являются амплитудными коэффициентами Френеля для s - и p -компонент отражённой и прошедшей волн.

В случае прозрачных сред амплитудные коэффициенты Френеля принимают вид:

$$r_{01}^s = \frac{\operatorname{tg}(\theta_0 - \theta_1)}{\operatorname{tg}(\theta_0 + \theta_1)}, \quad (8)$$

$$t_{01}^s = \frac{2 \sin \theta_1 \cos \theta_0}{\sin(\theta_0 + \theta_1)}, \quad (9)$$

$$r_{01}^p = \frac{\operatorname{tg}(\theta_0 - \theta_1)}{\operatorname{tg}(\theta_0 + \theta_1)}, \quad (10)$$

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

Определим энергетические коэффициенты отражения и пропускания границы раздела с композитной средой

$$R_{0,1}^{s,p} = |r_{0,1}^{s,p}|^2, \quad (12)$$

$$T_{0,1}^{s,p} = \frac{n_1 \cos \theta_1}{n_0 \cos \theta_0} |t_{0,1}^{s,p}|^2. \quad (13)$$

Для энергетических коэффициентов выполняется закон сохранения

$$R_{0,1}^{s,p} + T_{0,1}^{s,p} = 1. \quad (14)$$

Рассмотрим модель микротрубчатого метаматериала в приближении эффективной среды. Отметим, что эффективная диэлектрическая проницаемость ε композитной среды даётся формулой Максвелл–Гарнетта:

$$\frac{\varepsilon_i - \varepsilon}{\varepsilon_i + \varepsilon} = f \frac{\varepsilon_m - \varepsilon}{\varepsilon_m + \varepsilon}, \quad (15)$$

где ε_m и ε_i – диэлектрическая проницаемость материала матрицы (полиметилметакрилата) и включения соответственно. Рассматриваем микротрубочную элементарную ячейку. Следовательно, заполняющая фракция f равна отношению площади поперечного сечения материала матрицы к элементарной ячейке. Предполагаем, что параметры гексагональной решётки $d = 200$ мкм и

$$f = 1 - \frac{2\pi (R_2^2 - R_1^2)}{\sqrt{3}d^2} \quad (16)$$

с радиусом каналов R_1 .

Конструкция исследуемого микротрубочного метаматериала изображена на рис. 1.

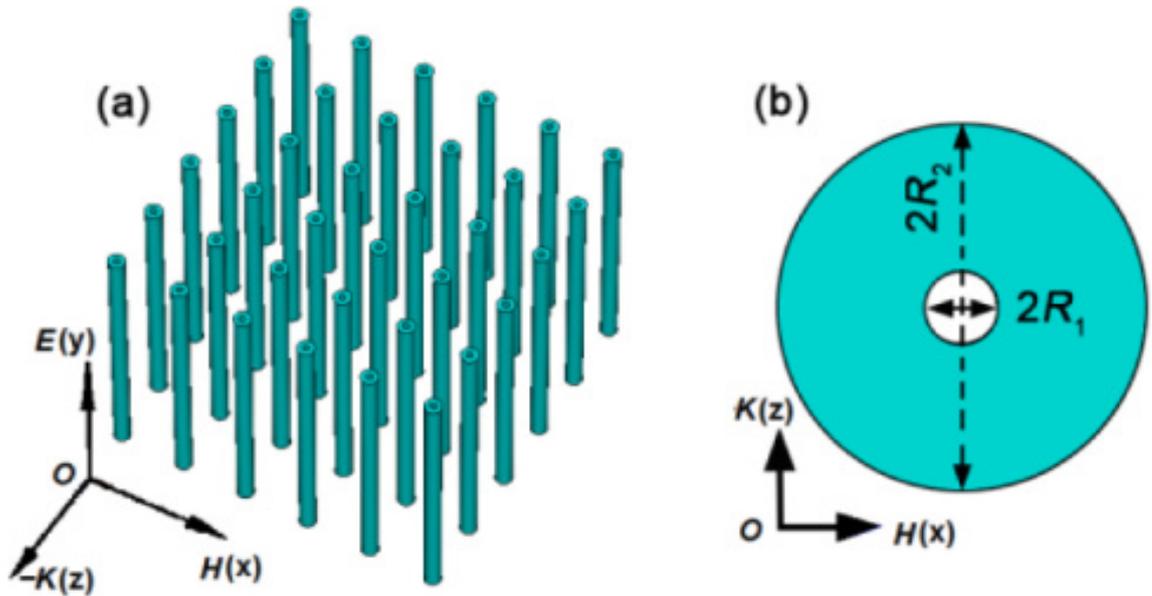


Рис. 1. Трёхмерный вид (а) и вид сверху элемента структуры (б) для иллюстрации бесконечно длинного диэлектрического микротрубочного метаматериала. Зонд использовался для контроля усиления локального поля в предполагаемом горячем месте для тороидального дипольного резонанса (то есть в центре микротрубки).

Диэлектрическая проницаемость метаматериала равна

$$\varepsilon_i(\omega) = 1 + \left(\frac{gC_0}{\ell^2} \right)^2 \frac{F}{\omega_{LC}^2 - \omega^2 - i\gamma\omega} . \quad (17)$$

Магнитная проницаемость метаматериала равна

$$\mu_i(\omega) = 1 + \frac{F\omega^2}{\omega_{LC}^2 - \omega^2 - i\gamma\omega} , \quad (18)$$

где $\gamma = R/L$. Квадрат показателя преломления метаматериала равен

$$n_i^2(\omega) = \varepsilon_i(\omega) \mu_i(\omega) . \quad (19)$$

Рассмотрим процесс оптического пропускания микротрубочного метаматериала. Наноструктуры из метаматериалов, структуры из чередующихся слоёв обычных материалов и метаматериалов вызывают необычайный интерес в связи с приложениями в оптических и оптоэлектронных приборах и системах. При попытках теоретического описания оптических свойств метаматериалов возникают значительные трудности,

обусловленные сложной формой составляющих их наночастиц, а также тем, что существенную роль на наномасштабах играют ближние продольные поля, описать которые аналитически в большинстве случаев не представляется возможным.

Будем рассчитывать оптическое пропускание границы раздела с тороидальным метаматериалом, находящемся во внешнем поле непрерывного оптического излучения. На рис. 2 изображена зависимость эффективного показателя преломления (а) и энергетического коэффициента оптического пропускания (б) метаматериала от длины волны излучения. Параметры метаматериала: $d = 200$ мкм, $R_1 = 5$ мкм, $R_2 = 25$ мкм. На рис. 3 изображена зависимость эффективного показателя преломления (а) и энергетического коэффициента оптического пропускания (б) метаматериала от длины волны излучения. Параметры метаматериала: $d = 200$ мкм, $R_1 = 15$ мкм, $R_2 = 40$ мкм.

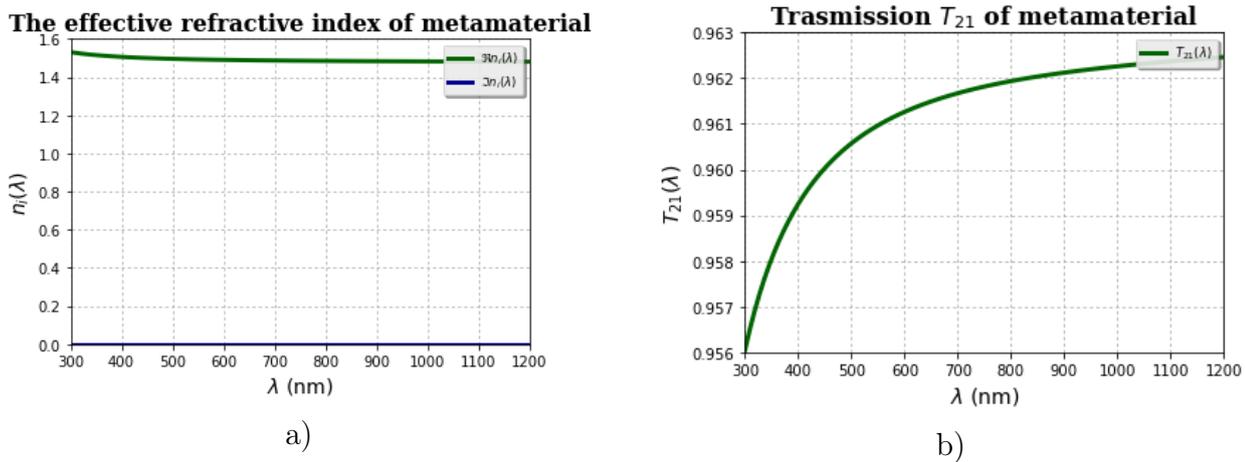


Рис. 2. Зависимость эффективного показателя преломления (а) и энергетического коэффициента оптического пропускания (б) метаматериала от длины волны излучения. Параметры метаматериала: $d = 200$ мкм, $R_1 = 5$ мкм, $R_2 = 25$ мкм.

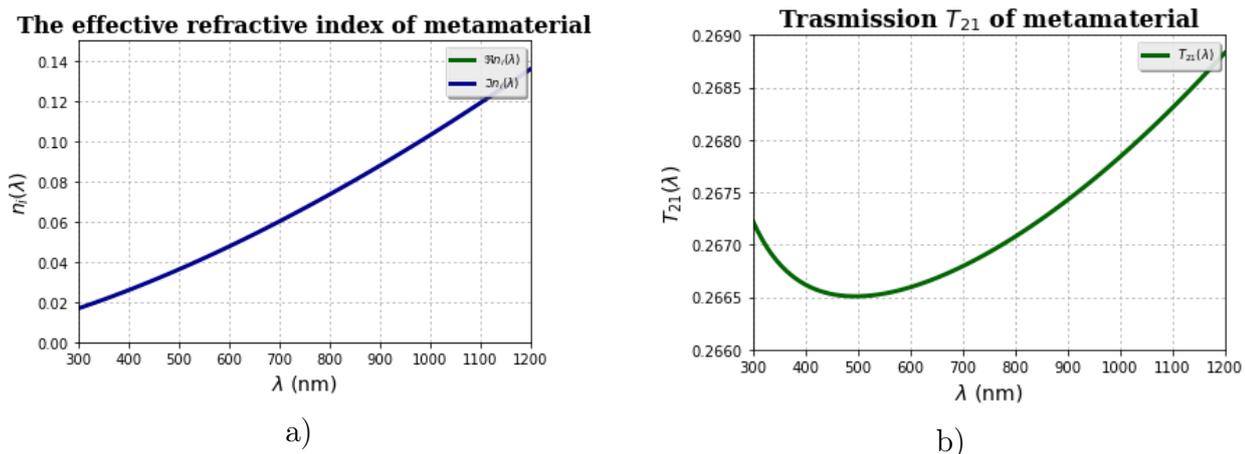


Рис. 3. Зависимость эффективного показателя преломления (а) и энергетического коэффициента оптического пропускания (б) метаматериала от длины волны излучения. Параметры метаматериала: $d = 200$ мкм, $R_1 = 15$ мкм, $R_2 = 40$ мкм.

Численные исследования оптического пропускания границы раздела с микротрубочным метаматериалом показывают, что, изменяя параметры метаматериала, можно эффективно управлять оптическим пропусканием через границу раздела с микротрубочным метаматериалом.

Заключение

В работе решена граничная задача взаимодействия оптической волны с границей раздела микротрубчатого метаматериала в рамках приближения эффективной среды. В работе проведено теоретическое исследование оптических свойств композитных сред, составленных из микротрубчатых метаматериалов. В ходе проведения исследования оптических свойств композитных сред, составленных из микротрубчатых метаматериалов, использованы теоретические методы современной оптики твёрдого тела. Нанокompозитные среды, составленные из микротрубчатых метаматериалов, являются той базой, на которой создаются новые наноэлектронные приборы и устройства из микротрубчатых метаматериалов с заданными структурными, электронными и оптическими свойствами, которые определяются размером, формой и упорядоченностью составляющих их наночастиц или других включений, а так же факторам заполнения наночастицами или другими структурными элементами составляющими включения. Оптические и электродинамические свойства искусственно созданного микротрубчатого метаматериала определяются не столько структурной организацией, сколько оптическими и электродинамическими характеристиками образующих его компонент включений. При этом его эффективные характеристики могут значительно отличаться как от характеристик включений, так и диэлектрика матрицы композита, принимая совершенно уникальные значения, которые не встречаются среди природных материалов. Примером таких экзотических характеристик можно назвать эффективные комплексные показатели преломления и поглощения, которые способны изменяться в широких пределах в оптическом диапазоне длин волн. Важное направление в изучении микротрубчатых метаматериалов связано с конструированием различных наноструктур из метаматериалов с разными эффективными диэлектрическими проницаемостями композитных сред.

По результатам работы можно сформулировать следующие выводы:

1. По результатам анализа работ по метаматериалам выбран оптимальный диапазон параметров для увеличения оптического пропускания наноструктуры на основе микротрубчатого метаматериала.
2. Разработана теоретическая модель, позволяющая рассчитывать основные оптические параметры наноструктуры на основе микротрубчатого метаматериала.
3. В результате численных расчётов найдены значения параметров наноструктуры на основе микротрубчатого метаматериала, позволяющие значительно увеличить оптическое пропускание. В результате численных расчётов обнаружено увеличение оптического пропускания границы раздела с микротрубчатым метаматериалом.

В работе проведено исследование композитов, содержащих включения из микротрубчатых метаматериалов, при помощи теоретических методов современной оптики наноструктур и численных методов, применяемых для вычисления коэффициентов оптического пропускания и отражения композитов, содержащих включения из микротрубчатых метаматериалов. В результате проведённых численных расчётов зависимости энергетического коэффициента оптического пропускания композита с включениями из микротрубчатых метаматериалов гипотеза исследования, состоящая в том, что можно эффективно управлять величиной оптического пропускания нанокompозитов из микротрубчатых метаматериалов в зависимости их от геометрической конструкции, подтверждена полностью.

Список использованных источников

1. Klimov V. V., Guzatov D. V., Ducloy M. Engineering of radiation of optically active molecules with chiral nano-meta-particles // EPL (Europhysics Letters). — 2012. —

- feb. — Vol. 97, no. 4. — P. 47004. — URL: <https://doi.org/10.1209/0295-5075/97/47004>.
2. Klimov V. V., Sun Sh., Guo G.-Yu. Coherent perfect nanoabsorbers based on negative refraction // *Optics Express*. — 2012. — may. — Vol. 20, no. 12. — P. 13071. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.20.013071>.
 3. Guzatov D. V., Klimov V. V. Focusing of dipole radiation by a negative index chiral layer. 2. A thin layer as compared with the wavelength // *Quantum Electronics*. — 2014. — dec. — Vol. 44, no. 12. — P. 1112–1118. — URL: <https://doi.org/10.1070/qe2014v044n12abeh015559>.
 4. Enhanced lens by ε and μ near-zero metamaterial boosted by extraordinary optical transmission / M. Navarro-Cía [et al.] // *Phys. Rev. B*. — 2011. — mar. — Vol. 83, no. 11. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.83.115112>.
 5. Tao B., Fu-Li L. Controlling thermal radiation by photonic quantum well structure with zero-averaged-refractive-index gap // *Journal of the Optical Society of America B*. — 2008. — dec. — Vol. 26, no. 1. — P. 96. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/JOSAB.26.000096>.
 6. Nguyen V. C., Chen L., Halterman K. Total transmission and total reflection by zero index metamaterials with defects // *Phys. Rev. Lett.* — 2010. — dec. — Vol. 105, no. 23. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.233908>.
 7. Kalachev A. A., Kocharovskaya O. A. Superradiance in media with a near-zero refractive index // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. — 2012. — mar. — Vol. 76, no. 3. — P. 252–255. — URL: <http://dx.doi.org/10.3103/S1062873812030136>.
 8. Fabrication of multilayer metamaterials by femtosecond laser-induced forward-transfer technique / M. L. Tseng [et al.] // *Laser & Photonics Reviews*. — 2012. — jul. — Vol. 6, no. 5. — P. 702–707. — URL: <https://doi.org/10.1002/lpor.201200029>.
 9. Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review / Hemant Kumar Raut [et al.] // *Energy & Environmental Science*. — 2011. — Vol. 4, no. 10. — P. 3779. — URL: <https://doi.org/10.1039/c1ee01297e>.
 10. Catchpole K. R., Polman A. Plasmonic solar cells // *Optics Express*. — 2008. — dec. — Vol. 16, no. 26. — P. 21793. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.16.021793>.
 11. Atwater Harry A., Polman Albert. Plasmonics for improved photovoltaic devices // *Nature Materials*. — 2010. — feb. — Vol. 9, no. 3. — P. 205–213. — URL: <https://doi.org/10.1038/nmat2629>.
 12. Rapid tarnishing of silver nanoparticles in ambient laboratory air / M. D. McMahon [et al.] // *Applied Physics B*. — 2005. — apr. — Vol. 80, no. 7. — P. 915–921. — URL: <https://doi.org/10.1007/s00340-005-1793-6>.
 13. The Optical Properties of Metal Nanoparticles: The Influence of Size, Shape, and Dielectric Environment / K. Lance Kelly [et al.] // *The Journal of Physical Chemistry B*. — 2003. — jan. — Vol. 107, no. 3. — P. 668–677. — URL: <https://doi.org/10.1021/jp026731y>.

14. Brongersma Mark L., Cui Yi, Fan Shanhui. Light management for photovoltaics using high-index nanostructures // *Nature Materials*. — 2014. — apr. — Vol. 13, no. 5. — P. 451–460. — URL: <https://doi.org/10.1038/nmat3921>.
15. Spinelli Pierpaolo, Polman Albert. Light Trapping in Thin Crystalline Si Solar Cells Using Surface Mie Scatterers // *IEEE Journal of Photovoltaics*. — 2014. — mar. — Vol. 4, no. 2. — P. 554–559. — URL: <https://doi.org/10.1109/jphotov.2013.2292744>.
16. All-dielectric optical nanoantennas / Alexander E. Krasnok [et al.] // *Optics Express*. — 2012. — aug. — Vol. 20, no. 18. — P. 20599. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.20.020599>.
17. Aspnes D. E., Studna A. A. Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV // *Physical Review B*. — 1983. — jan. — Vol. 27, no. 2. — P. 985–1009. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.27.985>.
18. Dobson P J. Absorption and Scattering of Light by Small Particles // *Physics Bulletin*. — 1984. — mar. — Vol. 35, no. 3. — P. 104–104. — URL: <https://doi.org/10.1088/0031-9112/35/3/025>.
19. Demonstration of Zero Optical Backscattering from Single Nanoparticles / Steven Person [et al.] // *Nano Letters*. — 2013. — mar. — Vol. 13, no. 4. — P. 1806–1809. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl4005018>.
20. Directional visible light scattering by silicon nanoparticles / Yuan Hsing Fu [et al.] // *Nature Communications*. — 2013. — feb. — Vol. 4, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1038/ncomms2538>.
21. Kerker M., Wang D.-S., Giles C. L. Electromagnetic scattering by magnetic spheres // *Journal of the Optical Society of America*. — 1983. — jun. — Vol. 73, no. 6. — P. 765. — URL: <https://doi.org/10.1364/josa.73.000765>.
22. Pakizeh Tavakol, Kall Mikael. Unidirectional Ultracompact Optical Nanoantennas // *Nano Letters*. — 2009. — jun. — Vol. 9, no. 6. — P. 2343–2349. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl900786u>.
23. Gu Guiru, Vaillancourt Jarrod, Lu Xuejun. Analysis of near-field components of a plasmonic optical antenna and their contribution to quantum dot infrared photodetector enhancement // *Optics Express*. — 2014. — oct. — Vol. 22, no. 21. — P. 24970. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.22.024970>.
24. Kalra Yogita, Goyal Parul, Shankhwar Nishant. Design and analysis of a hollow bowtie nanoantenna // *Plasmonics: Design, Materials, Fabrication, Characterization, and Applications XVI* / Ed. by Takuo Tanaka, Din Ping Tsai. — SPIE, 2018. — sep. — URL: <https://doi.org/10.1117/12.2320917>.
25. Optical spectroscopy of single Si nanocylinders with magnetic and electric resonances / Andrey B. Evlyukhin [et al.] // *Scientific Reports*. — 2014. — feb. — Vol. 4, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1038/srep04126>.
26. Optimum Forward Light Scattering by Spherical and Spheroidal Dielectric Nanoparticles with High Refractive Index / Boris S. Luk'yanchuk [et al.] // *ACS Photonics*. — 2015. — jun. — Vol. 2, no. 7. — P. 993–999. — URL: <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.5b00261>.

27. High-Efficiency Dielectric Huygens' Surfaces / Manuel Decker [et al.] // Advanced Optical Materials. — 2015. — feb. — Vol. 3, no. 6. — P. 813–820. — URL: <https://doi.org/10.1002/adom.201400584>.
28. Zou Chengjun, Staude Isabelle, Neshev Dragomir N. Tunable metasurfaces and metadevices // Dielectric Metamaterials. — Elsevier, 2020. — P. 195–222. — URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102403-4.00012-8>.

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

Елена Алексеевна Шлёнкина — магистрант факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: zmejka123@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-7402-4916

Web of Science ResearcherID  АВН-1508-2020

Investigation of the optical transmission of the interface of a composite medium with inclusions from a microtubular metamaterial

K. K. Altunin , E. A. Shlyonkina 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted November 12, 2021

Resubmitted December 2, 2021

Published December 10, 2021

Abstract. The optical properties of nanocomposite media containing inclusions from microtubular metamaterials have been studied. Nanocomposite media containing inclusions from microtubular metamaterials are the basis for creating nanoantennas and covert information transmission systems. Numerical studies of the optical transmission of the interface with a nanocomposite medium containing inclusions from microtubular metamaterials show that, by changing the parameters of the metamaterial, one can effectively control the optical transmission through the interface of a nanocomposite medium with inclusions from microtubular metamaterials. A theoretical model has been developed that makes it possible to calculate the main optical parameters of a nanostructure based on a microtubular metamaterial. As a result of numerical calculations, the values of the parameters of a nanostructure based on a microtubular metamaterial were found, which make it possible to significantly increase the optical transmission of a nanostructure based on a microtubular metamaterial. As a result of numerical calculations, an increase in the optical transmission of the interface with a nanocomposite medium with inclusions from a microtubular metamaterial was found. It is shown that the optical and electrodynamic properties of a nanocomposite with microtubular metamaterials are determined not so much by the structural organization as by the optical and electrodynamic characteristics of its constituent components.

Keywords: metamaterial, microtubular metamaterial, nanocomposite, nanocomposite medium, optical transmission, optical radiation, near longitudinal fields, radiation wavelength, numerical calculations

PACS: 42.25.Bs

References

1. Klimov V. V., Guzatov D. V., Ducloy M. Engineering of radiation of optically active molecules with chiral nano-meta-particles // *EPL (Europhysics Letters)*. — 2012. — feb. — Vol. 97, no. 4. — P. 47004. — URL: <https://doi.org/10.1209/0295-5075/97/47004>.
2. Klimov V. V., Sun Sh., Guo G.-Yu. Coherent perfect nanoabsorbers based on negative refraction // *Optics Express*. — 2012. — may. — Vol. 20, no. 12. — P. 13071. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.20.013071>.
3. Guzatov D. V., Klimov V. V. Focusing of dipole radiation by a negative index chiral layer. 2. A thin layer as compared with the wavelength // *Quantum Electronics*. — 2014. — dec. — Vol. 44, no. 12. — P. 1112–1118. — URL: <https://doi.org/10.1070/qe2014v044n12abeh015559>.

4. Enhanced lens by ε and μ near-zero metamaterial boosted by extraordinary optical transmission / M. Navarro-Cía [et al.] // *Phys. Rev. B.* — 2011. — mar. — Vol. 83, no. 11. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.83.115112>.
5. Tao B., Fu-Li L. Controlling thermal radiation by photonic quantum well structure with zero-averaged-refractive-index gap // *Journal of the Optical Society of America B.* — 2008. — dec. — Vol. 26, no. 1. — P. 96. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/JOSAB.26.000096>.
6. Nguyen V. C., Chen L., Halterman K. Total transmission and total reflection by zero index metamaterials with defects // *Phys. Rev. Lett.* — 2010. — dec. — Vol. 105, no. 23. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.233908>.
7. Kalachev A. A., Kocharovskaya O. A. Superradiance in media with a near-zero refractive index // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* — 2012. — mar. — Vol. 76, no. 3. — P. 252–255. — URL: <http://dx.doi.org/10.3103/S1062873812030136>.
8. Fabrication of multilayer metamaterials by femtosecond laser-induced forward-transfer technique / M. L. Tseng [et al.] // *Laser & Photonics Reviews.* — 2012. — jul. — Vol. 6, no. 5. — P. 702–707. — URL: <https://doi.org/10.1002/lpor.201200029>.
9. Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review / Hemant Kumar Raut [et al.] // *Energy & Environmental Science.* — 2011. — Vol. 4, no. 10. — P. 3779. — URL: <https://doi.org/10.1039/c1ee01297e>.
10. Catchpole K. R., Polman A. Plasmonic solar cells // *Optics Express.* — 2008. — dec. — Vol. 16, no. 26. — P. 21793. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.16.021793>.
11. Atwater Harry A., Polman Albert. Plasmonics for improved photovoltaic devices // *Nature Materials.* — 2010. — feb. — Vol. 9, no. 3. — P. 205–213. — URL: <https://doi.org/10.1038/nmat2629>.
12. Rapid tarnishing of silver nanoparticles in ambient laboratory air / M. D. McMahon [et al.] // *Applied Physics B.* — 2005. — apr. — Vol. 80, no. 7. — P. 915–921. — URL: <https://doi.org/10.1007/s00340-005-1793-6>.
13. The Optical Properties of Metal Nanoparticles: The Influence of Size, Shape, and Dielectric Environment / K. Lance Kelly [et al.] // *The Journal of Physical Chemistry B.* — 2003. — jan. — Vol. 107, no. 3. — P. 668–677. — URL: <https://doi.org/10.1021/jp026731y>.
14. Brongersma Mark L., Cui Yi, Fan Shanhui. Light management for photovoltaics using high-index nanostructures // *Nature Materials.* — 2014. — apr. — Vol. 13, no. 5. — P. 451–460. — URL: <https://doi.org/10.1038/nmat3921>.
15. Spinelli Pierpaolo, Polman Albert. Light Trapping in Thin Crystalline Si Solar Cells Using Surface Mie Scatterers // *IEEE Journal of Photovoltaics.* — 2014. — mar. — Vol. 4, no. 2. — P. 554–559. — URL: <https://doi.org/10.1109/jphotov.2013.2292744>.
16. All-dielectric optical nanoantennas / Alexander E. Krasnok [et al.] // *Optics Express.* — 2012. — aug. — Vol. 20, no. 18. — P. 20599. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.20.020599>.

17. Aspnes D. E., Studna A. A. Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV // *Physical Review B*. — 1983. — jan. — Vol. 27, no. 2. — P. 985–1009. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.27.985>.
18. Dobson P J. Absorption and Scattering of Light by Small Particles // *Physics Bulletin*. — 1984. — mar. — Vol. 35, no. 3. — P. 104–104. — URL: <https://doi.org/10.1088/0031-9112/35/3/025>.
19. Demonstration of Zero Optical Backscattering from Single Nanoparticles / Steven Person [et al.] // *Nano Letters*. — 2013. — mar. — Vol. 13, no. 4. — P. 1806–1809. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl4005018>.
20. Directional visible light scattering by silicon nanoparticles / Yuan Hsing Fu [et al.] // *Nature Communications*. — 2013. — feb. — Vol. 4, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1038/ncomms2538>.
21. Kerker M., Wang D.-S., Giles C. L. Electromagnetic scattering by magnetic spheres // *Journal of the Optical Society of America*. — 1983. — jun. — Vol. 73, no. 6. — P. 765. — URL: <https://doi.org/10.1364/josa.73.000765>.
22. Pakizeh Tavakol, Kall Mikael. Unidirectional Ultracompact Optical Nanoantennas // *Nano Letters*. — 2009. — jun. — Vol. 9, no. 6. — P. 2343–2349. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl900786u>.
23. Gu Guiru, Vaillancourt Jarrod, Lu Xuejun. Analysis of near-field components of a plasmonic optical antenna and their contribution to quantum dot infrared photodetector enhancement // *Optics Express*. — 2014. — oct. — Vol. 22, no. 21. — P. 24970. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.22.024970>.
24. Kalra Yogita, Goyal Parul, Shankhwar Nishant. Design and analysis of a hollow bowtie nanoantenna // *Plasmonics: Design, Materials, Fabrication, Characterization, and Applications XVI* / Ed. by Takuo Tanaka, Din Ping Tsai. — SPIE, 2018. — sep. — URL: <https://doi.org/10.1117/12.2320917>.
25. Optical spectroscopy of single Si nanocylinders with magnetic and electric resonances / Andrey B. Evlyukhin [et al.] // *Scientific Reports*. — 2014. — feb. — Vol. 4, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1038/srep04126>.
26. Optimum Forward Light Scattering by Spherical and Spheroidal Dielectric Nanoparticles with High Refractive Index / Boris S. Luk'yanchuk [et al.] // *ACS Photonics*. — 2015. — jun. — Vol. 2, no. 7. — P. 993–999. — URL: <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.5b00261>.
27. High-Efficiency Dielectric Huygens' Surfaces / Manuel Decker [et al.] // *Advanced Optical Materials*. — 2015. — feb. — Vol. 3, no. 6. — P. 813–820. — URL: <https://doi.org/10.1002/adom.201400584>.
28. Zou Chengjun, Staude Isabelle, Neshev Dragomir N. Tunable metasurfaces and metadevices // *Dielectric Metamaterials*. — Elsevier, 2020. — P. 195–222. — URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102403-4.00012-8>.

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

Elena Alekseevna Shlyonkina — 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: zmejka123@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-7402-4916

Web of Science ResearcherID  ABH-1508-2020