

Секция 2

Физические науки

2.1 Оптика

Научная статья
УДК 535.31
ББК 22.343
ГРНТИ 29.31.21
ВАК 1.3.6.
PACS 42.25.Bs
OCIS 260.2110
MSC 78A10

Исследование оптического отражения и пропускания нанокомпозитных плёнок с углеродными нанотрубками и нанокластерами углерода

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 9 января 2025 года
После переработки 10 января 2025 года
Опубликована 31 марта 2025 года

Аннотация. Рассматриваются физические процессы оптического пропускания и отражения от нанокомпозитных плёнок с углеродными нанотрубками и нанокластерами углерода. Рассчитаны зависимости энергетических коэффициентов оптического отражения и пропускания нанокомпозитной плёнки с углеродными нанотрубками и нанокластерами углерода от длины волны внешнего оптического излучения.

Ключевые слова: оптическое отражение, оптическое пропускание, нанокомпозитная плёнка, нанотрубка, углеродная нанотрубка, нанокластер, нанокластер углерода, наноэлемент, наноразмерная оптоэлектроника

¹E-mail: kostya_altunin@mail.ru

Введение

Работа посвящена теоретическому исследованию оптических процессов в нанокompозитных структурах с углеродными нанотрубками. Тема исследования является актуальной в связи с широким спектром применений наноматериалов с углеродными нанотрубками в качестве основы для создания нанoeлементов современной оптоэлектроники.

Целью работы является исследование оптических свойств нанокompозитных структур с системой углеродных нанотрубок, находящихся во внешнем поле оптического излучения. Задачи исследования включают в себя построение теоретической модели, позволяющей адекватно описывать процессы оптического пропускания и отражения от нанокompозитных структур с углеродными наноструктурами и нанокластерами углерода, создание компьютерной программы для расчёта физических характеристик системы углеродных нанотрубок и нанокластеров углерода в нанокompозитных структурах, проведение численных расчётов оптических характеристик оптического пропускания и отражения от нанокompозитных структур с системой углеродных нанотрубок и нанокластеров углерода.

Объектом исследования является нанокompозитная плёнка с системой углеродных нанотрубок и нанокластеров углерода. Предметом исследования является совокупность оптических свойств нанокompозитных плёнок с углеродными нанотрубками и нанокластерами углерода, находящихся в поле оптического излучения.

Методами исследования являются теоретические и численные методы классической, нелинейной и квантовой нанооптики, численные методы для решения задач нанооптики, методы программирования для задач теоретической нанооптики. В качестве материалов исследования выбраны нанокompозитные структуры с углеродными наноструктурами.

Научная новизна исследования заключается в том, что впервые проводится численное моделирование оптических характеристик углеродных нанотрубок в нанокompозитных средах.

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

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что раскрыт новый аспект вопроса о численном расчёте энергетических коэффициентов отражения и пропускания наноструктур с углеродными нанотрубками и нанокластерами на основе модифицированных формул Френеля. Практическая значимость исследования состоит в том, что проведённое описание оптических процессов в наносистемах с углеродными нанотрубками и нанокластерами может быть использовано для создания новых излучательных приборов и устройств наноразмерной оптоэлектроники.

Обзор

Нанofотонные системы играют решающую роль в компактировании и совершенствовании оптических систем для мобильных приложений, предлагая решения, недоступимые с помощью рефракционной оптики из-за их модульности и совместимости с планарными технологиями [1]. В статье [1] представлена электрически перестраиваемая метаповерхность на основе щелевого плазмонного резонанса, которая может работать со случайными углами поляризации падающего оптического сигнала, достигая коэффициента затухания 15 дБ на телекоммуникационной длине волны (то есть

1550 нм). Нанопотонные системы включают в себя широкий спектр устройств, в том числе электрически перестраиваемые метаповерхности на основе целевого плазмонного резонанса для поляризационно-нечувствительной оптической модуляции с низким энергопотреблением [2], модуляторы электропоглощения, использующие структуры метаоксид-полупроводник для высоких коэффициентов экстинкции и совместимости с комплементарными металлооксидными полупроводниками [3] и исследования множественных взаимодействий в сильно рассеивающих нанопотонных системах, изучение перехода от эффективной среды к сложным режимам посредством создания материалов с экстремальными свойствами и изучения динамики переноса света в сложных средах [4]. Нанопотоника компактна, легка и улучшает оптические системы для мобильных приложений [3]. Нанопотоника предлагает решения, недоступные рефракционной оптике, модульные, совместимые с планарными технологиями [3]. В статье [4] исследуется область множественных взаимодействий в сильно рассеивающих нанопотонных системах при переходе от эффективной среды к сложному режиму, и представляют новые эффективные диэлектрические резонаторы, полученные из суперкристаллов микрометрового размера, синтезированных с использованием гибридов наночастиц золота и ДНК. Также рассматриваются фундаментальные вопросы квантовой электродинамики нанопотонных систем с упором на теорию естественных колебательных систем, четырёхмерную природу волн материи и законы сохранения в этих системах [5]. В работе [5] представлена четырёхмерная пространственно-временная структура фермионного волнового пакета совместно с оценкой действия соответствующих вынужденных собственных мод бозонных виртуальных фотонов. Нанопотоника обеспечивает сверхбыструю обработку световых волн в конденсированных системах. Наноматериалы улучшают оптические характеристики, удерживая фотоны на наномасштабе. Нанопотоника, также известная как нанооптика, представляет собой отрасль нанотехнологий, которая изучает характеристики света наноразмерных размеров и взаимосвязи наноматериалов со светом, как обсуждается в работе [6].

Нанокластеры в нанокompозитных средах играют решающую роль в улучшении свойств материалов в различных практических приложениях оптоэлектроники. В статье [7] синтезирована серия нанокompозитных образцов с различным составом путём совместного осаждения 2000-атомных Ni-кластеров и потока Cu-атомов с использованием новой системы кластерного ионного луча. Нанокластеры в нанокompозитной среде состоят из суперпарамагнитных Ni-кластеров, внедрённых в Cu-матрицу, демонстрирующую индивидуальные магнитные свойства на основе концентрации Ni [7]. Например, нанорешётки медь-нанокластер-полимер демонстрируют исключительные механические характеристики, превосходя традиционные материалы по прочности и ударной вязкости благодаря своей уникальной топологии решетки и наличию сверхмалых нанокластеров Cu_{15} в качестве сшивающих соединений [8]. В статье [8] показано, что нанорешётки медь-нанокластер-полимер демонстрируют высокую прочность, жёсткость, деформируемость, упругость и устойчивость к повреждениям, превосходя лучшие текущие показатели при низких плотностях. Композиты медь-нанокластер-полимер используют сверхмалые нанокластеры Cu_{15} в качестве сшивающих соединений, улучшая механические характеристики за счёт нелинейной упругости и эффектов топологии решетки [8]. Кроме того, нанокластеры могут быть объединены с наночастицами для создания иерархических структур, демонстрирующих улучшенные физико-химические свойства, полезные в таких областях, как биосенсорика и фотовольтаика [9]. В работе [9] обсуждаются совместные сборки нанокластеров с наночастицами благородных металлов, производящие точные нанокompозиты, которые в некоторых случаях демонстрируют новые физико-химические свойства. Нанокластеры служат монодисперсными строительными блоками в нанокompозитах, улучшая физико-химические свойства

посредством богатых химических взаимодействий с наночастицами благородных металлов в иерархических структурах [9]. Кроме того, синтез нанокластеров азобензола показал себя многообещающим в электронных приложениях, сохраняя фотопереключаемые свойства и демонстрируя при этом различные электрические поведения при интеграции с оксидом графена [10]. В статье [10] подход снизу вверх был использован для синтеза нанокластера азобензола из молекул азобенена с помощью подхода снизу вверх, который показал красивую зелёную флуоресценцию и хорошую диспергированность в водной среде. Нанокластер азобензола иммобилизован в нанокompозитах оксида графена и восстановленного оксида графена, что улучшает электрические свойства и сохраняет фотопереключаемое поведение для потенциальных электронных приложений [10]. Эти достижения подчеркивают универсальность нанокластеров в адаптации функциональных возможностей нанокompозитов [7, 11]. В статье [11] доказывалось, что антимикробная фотодинамическая терапия на основе наноматериалов является перспективным подходом к искоренению лекарственно-устойчивых бактериальных биоплёнок. Золотые нанокластеры в нанокompозитных средах усиливают антимикробную фотодинамическую терапию, эффективно воздействуя на лекарственно-устойчивые бактериальные биоплёнки и уничтожая их благодаря своим уникальным оптическим и электронным свойствам. В статье [12] показано, что может быть достигнуто усиленное клеточное поглощение нанокompозита, опосредованное внешним магнитным полем, что обеспечивает значительное повышение эффективности локального фототермического уничтожения раковых клеток при раздражении в ближнем инфракрасном диапазоне. Нанокластер в нанокompозитной среде состоит из суперпарамагнитных наночастиц оксида железа, объединённых для повышения чувствительности магнитно-резонансной томографии и эффективности фототермической терапии [12]. В статье [13] исследованы физические и химические свойства сверхмалых золотых нанокластеров и обнаружили, что их слабая интенсивность флуоресценции и другие недостатки ограничивают их применение в приложениях компьютерного зрения. Сверхмалые золотые нанокластеры в нанокompозитных средах улучшают оптические и каталитические свойства, устраняя такие ограничения, как слабая интенсивность флуоресценции, чтобы расширить потенциал их применения [13]. В работе [14] обсуждается рост кристаллов, гелей и ограниченных твёрдых тел различных золотых, серебряных и медных нанокластеров, а также обсуждаются различные твердотельные свойства и связанные с ними применения таких наноматериалов. В работе [14] обсуждается сборка нанокластеров в ограниченных твёрдых телах, подчеркиваются их структурные свойства и применения. В статье [15] нанокластеры на основе диоксида кремния были синтезированы и использованы в качестве наполнителей для приготовления УФ-отверждаемых стоматологических композитов, и результаты показали значительное улучшение физических и механических свойств композитов, содержащих нанокластеры. Нанокластеры на основе диоксида кремния в нанокompозитных средах улучшают механические свойства, уменьшают полимеризационную усадку и улучшают водопоглощение и растворимость по сравнению с традиционными наночастицами диоксида кремния [15].

Результаты

Оптические поля в нанокompозитных материалах с углеродными нанотрубками могут быть рассчитаны на основе формул Френеля для амплитуд отражённой волны и прошедшей волны через границу раздела с нанокompозитной средой [16–18]. Амплитуду оптической волны, отражённой от нанокompозитной плёнки с наноразмерными включениями в виде углеродных нанотроек, находящейся на поверхности среды подложки

вычислим по формуле [19]:

$$r_1 = \frac{r_{12} + r_{23} \exp(i2k_0 d_2 n_2 \cos \theta_2)}{1 + r_{12} r_{23} \exp(i2k_0 d_2 n_2 \cos \theta_2)}. \quad (1)$$

Амплитуду волны, прошедшей через нанокompозитную плёнку с углеродными нанотрубками и нанокластерами углерода в подстилающую среду 3, определим как

$$t_1 = \frac{t_{12} t_{23} \exp(ik_0 d_2 n_2 \cos \theta_2)}{1 + r_{12} r_{23} \exp(i2k_0 d_2 n_2 \cos \theta_2)}, \quad (2)$$

$k_0 = 2\pi/\lambda$ – волновое число оптической волны в вакууме, λ – длина волны падающего оптического излучения, d_2 – толщина нанокompозитной плёнки с углеродными нанотрубками и нанокластерами углерода, θ_1 – угол падения внешней оптической волны, θ_2 – угол преломления в среде 2, θ_3 – угол преломления в среде 3. Далее определим коэффициенты Френеля. Пусть r_{12} и r_{23} являются коэффициентами Френеля для отражения на границах раздела 1-2 и 2-3 соответственно, t_{12} и t_{23} являются коэффициентами Френеля для пропускания оптического излучения на границах раздела 1-2 и 2-3 соответственно,

$$r_{ik}^s = \frac{n_i \cos \theta_i - n_k \cos \theta_k}{n_i \cos \theta_i + n_k \cos \theta_k}, \quad (3)$$

$$t_{ik}^s = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_k \cos \theta_k}, \quad (4)$$

$$r_{ik}^p = \frac{n_k \cos \theta_i - n_i \cos \theta_k}{n_k \cos \theta_i + n_i \cos \theta_k}, \quad (5)$$

$$t_{ik}^p = \frac{2n_k \cos \theta_i}{n_k \cos \theta_i + n_i \cos \theta_k}, \quad (6)$$

i, k – индексы, нумерующие среду, s, p – индексы, указывающие поляризацию оптической волны. Связь между углами θ_1 и θ_2 определим из обобщённого закона преломления $n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1$.

Энергетический коэффициент отражения от границы раздела с нанокompозитной плёнки с углеродными нанотрубками и нанокластерами углерода равен

$$R_1 = |r_1|^2. \quad (7)$$

Энергетический коэффициент пропускания нанокompозитной плёнки с углеродными нанотрубками и нанокластерами углерода равен

$$T_1 = \frac{q_3}{q_1} |t_1|^2, \quad (8)$$

$$q_1^s = n_1 \cos \theta_1, \quad q_3^s = n_3 \cos \theta_3, \quad q_1^p = n_1 / \cos \theta_1, \quad q_3^p = n_3 / \cos \theta_3.$$

На рис. 1-3 изображена зависимость энергетических коэффициентов оптического отражения и оптического пропускания нанокompозитной плёнки с углеродными нанотрубками в полимерной матрице от длины волны неполяризованного излучения, полученная в результате численных расчётов с помощью разработанной программы на языке программирования Python. Фактор заполнения углеродными трубками для сплошной линии равен 3%, для пунктирной линии равен 5%, для штрихпунктирной линии равен 7%. Часть атомов углерода из углеродных нанотрубок в нанокompозитной плёнке с полимерной матрицей могут объединяться в нанокластеры углерода.

Полученные зависимости показывают, что нанокompозитные плёнки с углеродными нанотрубками обладают низким значением оптического отражения, поэтому могут быть использованы в качестве высокоэффективных антиотражающих покрытий для солнечных панелей.

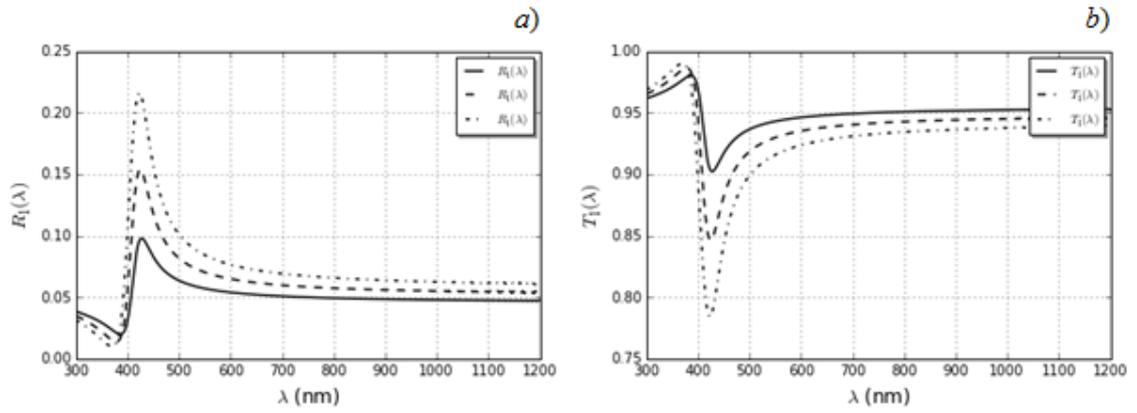


Рис. 1. Зависимость энергетических коэффициентов (а) оптического отражения и (б) оптического пропускания нанокompозитной плёнки с углеродными нанотрубками толщиной 50 мкм от длины волны неполяризованного излучения. Угол падения излучения равен 5° .

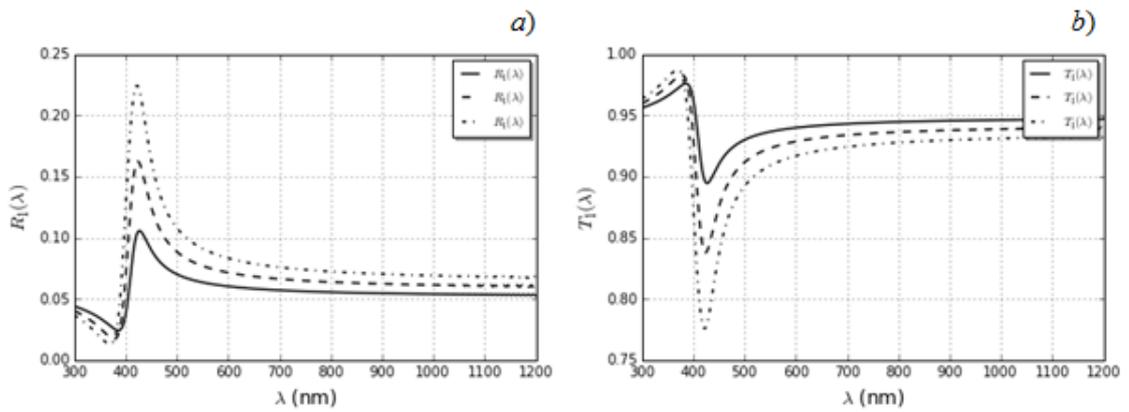


Рис. 2. Зависимость энергетических коэффициентов (а) оптического отражения и (б) оптического пропускания нанокompозитной плёнки с углеродными нанотрубками толщиной 50 мкм от длины волны неполяризованного излучения. Угол падения излучения равен 40° .

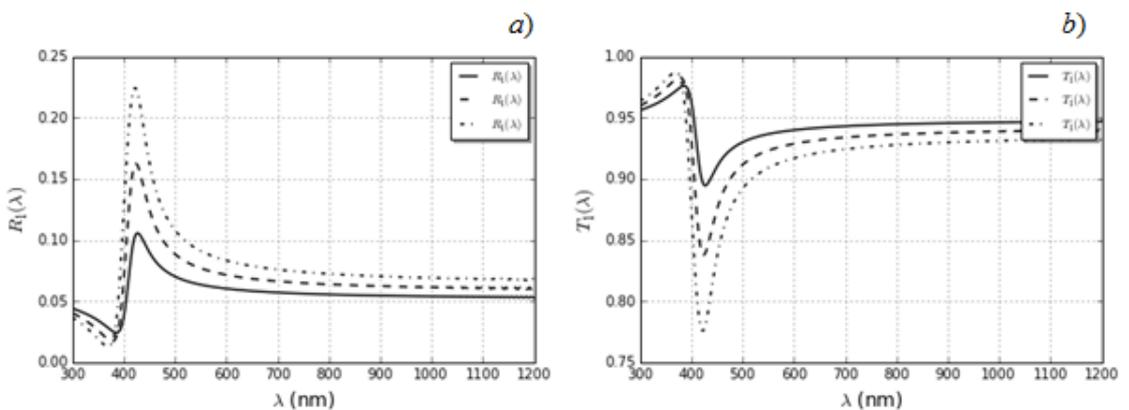


Рис. 3. Зависимость энергетических коэффициентов (а) оптического отражения и (б) оптического пропускания нанокompозитной плёнки с углеродными нанотрубками толщиной 5 мкм от длины волны неполяризованного излучения. Угол падения излучения равен 40° .

Заключение

Проведено исследование оптических свойств нанокompозитных плёнок с углеродными нанотрубками, находящихся во внешнем поле оптического излучения. Построенная теоретическая модель позволяет адекватно описывать процессы оптического пропускания и отражения от нанокompозитных плёнок с углеродными нанотрубками и нанокластерами углерода. Созданная компьютерная программа позволяет рассчитывать коэффициенты оптического пропускания и отражения от нанокompозитных плёнок с углеродными нанотрубками и нанокластерами углерода. Проведённые численные расчёты оптического пропускания и отражения от нанокompозитных плёнок с углеродными нанотрубками и нанокластерами углерода показали высокое оптическое пропускание исследуемых нанокompозитных плёнок.

Гипотеза исследования, заключающаяся в том, что если провести численные расчёты характеристик оптического пропускания и отражения от наноструктур с углеродными нанотрубками, то можно прогнозировать поведение нанокompозитных структур с углеродными нанотрубками в составе более сложных наноструктур в наноразмерных оптоэлектронных приборах, подтверждена полностью.

Теоретическая значимость исследования реализована в виде новых теоретических знаний о физических характеристиках нанокompозитной плёнки с углеродными нанотрубками и нанокластерами углерода, которые могут пополнить теоретическую базу курсов по физической нанoeлектронике. Степень подтверждения теоретической значимости исследования оценивается как высокая, так как результаты исследования позволили получить новые знания об оптических характеристиках нанокompозитной плёнки с углеродными нанотрубками и нанокластерами углерода.

Практическая значимость исследования реализована в виде новых методов исследования оптических свойств нанокompозитной плёнки с углеродными нанотрубками и нанокластерами углерода. Результаты исследования могут быть использованы для разработки новых наноматериалов с углеродными нанотрубками и нанокластерами углерода. Степень подтверждения практической значимости исследования оценивается как высокая, так как результаты исследования могут быть использованы для разработки новых методов исследования оптических свойств нанокompозитной плёнки с углеродными нанотрубками и нанокластерами углерода.

Список использованных источников

1. Tunable metasurface based polarization-insensitive electro-optic amplitude modulator for nanophotonic systems / Tanmay Bhowmik [et al.] // 2023 IEEE Guwahati subsection conference (GCON). — IEEE, 2023. — jun. — P. 1–5. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/gcon58516.2023.10183590>.
2. Epsilon-near-zero material based C-band electro-absorption modulator for integrated nanophotonic systems / Dibaskar Biswas [et al.] // 2023 IEEE Guwahati Subsection Conference (GCON). — IEEE, 2023. — jun. — P. 1–4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/gcon58516.2023.10183536>.
3. La nanophotonique: des solutions pour des systemes de visualisation ameliores et compactes / Beatrice Dagens [et al.] // Photoniques. — 2022. — aug. — no. 115. — P. 34–40. — URL: <http://dx.doi.org/10.1051/phon/202211534>.
4. Extreme light scattering and extraordinary nonlinearities in complex nanophotonic systems / Otto L. Muskens [et al.] // Active photonic platforms (APP) 2022 / Ed. by Ganapathi S. Subramania, Stavroula Foteinopoulou. — SPIE, 2022. — oct. — P. 63. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2634022>.

5. On the second quantization of virtual photons in nanophotonic systems / Alexander Gritsunov [et al.] // 2022 IEEE 16th international conference on advanced trends in radio-electronics, telecommunications and computer engineering (TCSET). — IEEE, 2022. — feb. — P. 14–19. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/tcset55632.2022.9766889>.
6. Jayaprakash Athira, Nigel Joshua, Sharma Ishu. A review on the materials and applications of nanophotonics // Photonic materials: recent advances and emerging applications. — Bentham Science Publishers, 2023. — jan. — P. 116–140. — ISBN: 9789815049756. — URL: <http://dx.doi.org/10.2174/9789815049756123010010>.
7. A new class of cluster-matrix nanocomposite made of fully miscible components / Gleb Iankevich [et al.] // Advanced materials. — 2023. — jan. — Vol. 35, no. 9. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/adma.202208774>.
8. Mechanical performance of Copper-nanocluster-polymer nanolattices / Jin Tang [et al.] // Advanced Materials. — 2024. — apr. — Vol. 36, no. 26. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/adma.202400080>.
9. Chakraborty Amrita, Pradeep Thalappil. Nanocluster-nanoparticle coassemblies // Atomically precise metal nanoclusters. — Elsevier, 2023. — P. 111–128. — ISBN: 9780323908795. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-323-90879-5.00019-6>.
10. Deka Manash Jyoti, Sahoo Subham Kumar, Chowdhury Devasish. P-type and n-type azobenzene nanocluster immobilized graphene oxide nanocomposite // Journal of photochemistry and photobiology a: chemistry. — 2019. — mar. — Vol. 372. — P. 131–139. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/J.JPHOTOCHEM.2018.12.006>.
11. Gold nanocluster based nanocomposites for combinatorial antibacterial therapy for eradicating biofilm forming pathogens / Yuvasri Genji Srinivasulu [et al.] // Materials chemistry frontiers. — 2022. — Vol. 6, no. 6. — P. 689–706. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/d1qm00936b>.
12. Nanocluster of superparamagnetic iron oxide nanoparticles coated with poly (dopamine) for magnetic field-targeting, highly sensitive MRI and photothermal cancer therapy / Ming Wu [et al.] // Nanotechnology. — 2015. — feb. — Vol. 26, no. 11. — P. 115102. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-4484/26/11/115102>.
13. Gold nanocluster composites: preparation strategies, optical and catalytic properties, and applications / Fang-Nan Wu [et al.] // Journal of Materials Chemistry C. — 2022. — Vol. 10, no. 40. — P. 14812–14833. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/d2tc02095e>.
14. Jana Arijit, Pradeep Thalappil. Nanocluster assembled solids // Atomically precise metal nanoclusters. — Elsevier, 2023. — P. 49–82. — ISBN: 9780323908795. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-323-90879-5.00007-x>.
15. Hategekimana Faustin, Kiraz Nadir. Preparation and characterization of silica based nanoclusters as reinforcement for dental applications // Polymer Composites. — 2022. — jul. — Vol. 43, no. 10. — P. 7564–7574. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/pc.26857>.
16. Алтунин К. К. Исследование оптических эффектов в анизотропных наноматериалах с квазиулевой диэлектрической проницаемостью // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. — 2016. — Т. 16, № 1. — С. 75–80.

17. Алтунин К. К. Усиленное оптическое пропускание в нанокomпозитных плёнках с квазиулевым показателем преломления // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. — 2016. — Т. 16, № 1. — С. 81–86.
18. Алтунин К. К. Экстраординарное оптическое пропускание композитных наноструктурных плёнок с монослоем наночастиц серебра // *Наноматериалы и наноструктуры - XXI век*. — 2011. — Т. 2, № 4. — С. 3–14.
19. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. *Электродинамика сплошных сред*. — Москва : Физматгиз, 2001. — 656 с.

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 260.2110
MSC 78A10

Investigation of optical reflection and transmission of nanocomposite films with carbon nanotubes and carbon nanoclusters

K. K. Altunin 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted January 9, 2025
Resubmitted January 10, 2025
Published March 31, 2025

Abstract. The physical processes of optical transmission and reflection from nanocomposite films with carbon nanotubes and carbon nanoclusters are considered. The dependences of the energy coefficients of optical reflection and transmission of a nanocomposite film with carbon nanotubes and carbon nanoclusters on the wavelength of external optical radiation are calculated.

Keywords: optical reflection, optical transmission, nanocomposite film, nanotube, carbon nanotube, nanocluster, carbon nanocluster, nanoelement, nanoscale optoelectronics

References

1. Tunable metasurface based polarization-insensitive electro-optic amplitude modulator for nanophotonic systems / Tanmay Bhowmik [et al.] // 2023 IEEE Guwahati subsection conference (GCON). — IEEE, 2023. — jun. — P. 1–5. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/gcon58516.2023.10183590>.
2. Epsilon-near-zero material based C-band electro-absorption modulator for integrated nanophotonic systems / Dibaskar Biswas [et al.] // 2023 IEEE Guwahati Subsection Conference (GCON). — IEEE, 2023. — jun. — P. 1–4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/gcon58516.2023.10183536>.
3. La nanophotonique: des solutions pour des systemes de visualisation ameliores et compactes / Beatrice Dagens [et al.] // Photoniques. — 2022. — aug. — no. 115. — P. 34–40. — URL: <http://dx.doi.org/10.1051/photon/202211534>.
4. Extreme light scattering and extraordinary nonlinearities in complex nanophotonic systems / Otto L. Muskens [et al.] // Active photonic platforms (APP) 2022 / Ed. by Ganapathi S. Subramania, Stavroula Foteinopoulou. — SPIE, 2022. — oct. — P. 63. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2634022>.
5. On the second quantization of virtual photons in nanophotonic systems / Alexander Gritsunov [et al.] // 2022 IEEE 16th international conference on advanced trends in radioelectronics, telecommunications and computer engineering (TCSET). — IEEE, 2022. — feb. — P. 14–19. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/tcset55632.2022.9766889>.

6. Jayaprakash Athira, Nigel Joshua, Sharma Ishu. A review on the materials and applications of nanophotonics // Photonic materials: recent advances and emerging applications. — Bentham Science Publishers, 2023. — jan. — P. 116–140. — ISBN: 9789815049756. — URL: <http://dx.doi.org/10.2174/9789815049756123010010>.
7. A new class of cluster-matrix nanocomposite made of fully miscible components / Gleb Iankevich [et al.] // Advanced materials. — 2023. — jan. — Vol. 35, no. 9. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/adma.202208774>.
8. Mechanical performance of Copper-nanocluster-polymer nanolattices / Jin Tang [et al.] // Advanced Materials. — 2024. — apr. — Vol. 36, no. 26. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/adma.202400080>.
9. Chakraborty Amrita, Pradeep Thalappil. Nanocluster-nanoparticle coassemblies // Atomically precise metal nanoclusters. — Elsevier, 2023. — P. 111–128. — ISBN: 9780323908795. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-323-90879-5.00019-6>.
10. Deka Manash Jyoti, Sahoo Subham Kumar, Chowdhury Devasish. P-type and n-type azobenzene nanocluster immobilized graphene oxide nanocomposite // Journal of photochemistry and photobiology a: chemistry. — 2019. — mar. — Vol. 372. — P. 131–139. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/J.JPHOTOCHEM.2018.12.006>.
11. Gold nanocluster based nanocomposites for combinatorial antibacterial therapy for eradicating biofilm forming pathogens / Yuvasri Genji Srinivasulu [et al.] // Materials chemistry frontiers. — 2022. — Vol. 6, no. 6. — P. 689–706. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/d1qm00936b>.
12. Nanocluster of superparamagnetic iron oxide nanoparticles coated with poly (dopamine) for magnetic field-targeting, highly sensitive MRI and photothermal cancer therapy / Ming Wu [et al.] // Nanotechnology. — 2015. — feb. — Vol. 26, no. 11. — P. 115102. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-4484/26/11/115102>.
13. Gold nanocluster composites: preparation strategies, optical and catalytic properties, and applications / Fang-Nan Wu [et al.] // Journal of Materials Chemistry C. — 2022. — Vol. 10, no. 40. — P. 14812–14833. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/d2tc02095e>.
14. Jana Arijit, Pradeep Thalappil. Nanocluster assembled solids // Atomically precise metal nanoclusters. — Elsevier, 2023. — P. 49–82. — ISBN: 9780323908795. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-323-90879-5.00007-x>.
15. Hategekimana Faustin, Kiraz Nadir. Preparation and characterization of silica based nanoclusters as reinforcement for dental applications // Polymer Composites. — 2022. — jul. — Vol. 43, no. 10. — P. 7564–7574. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/pc.26857>.
16. Altunin K. K. Study of optical effects in anisotropic nanomaterials with quasi-zero permittivity // Fundamental problems of radioelectronic instrumentation. — 2016. — Vol. 16, no. 1. — P. 75–80.
17. Altunin K. K. Enhanced optical transmission in nanocomposite films with quasi-zero refractive index // Fundamental problems of radioelectronic instrumentation. — 2016. — Vol. 16, no. 1. — P. 81–86.

18. Altunin K. K. Extraordinary optical transmission of composite nanostructured films with a monolayer of silver nanoparticles // *Nanomaterials and nanostructures - XXI century*. — 2011. — Vol. 2, no. 4. — P. 3–14.
19. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Electrodynamics of continuous media*. — Moscow : Fizmatgiz, 2001. — 656 p.

Information about authors:

Konstantin Konstantinovich Altunin — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics and Technical Disciplines of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: kostya.altunin@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

IstinaResearcherID  66185348