08

Полное поглощение световой волны двумерным массивом металлических наночастиц на поверхности металла

© И.А. Глухов[1,2], С.Г. Моисеев[1,2]

[1] Ульяновский государственный университет,
Ульяновск, Россия
[2] Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Ульяновск, Россия

E-mail: glukhov91@yandex.ru

Поступила в Редакцию 30 апреля 2024 г.
В окончательной редакции 28 октября 2024 г.
Принята к публикации 30 октября 2024 г.

Предложен дизайн композитной пленки, обеспечивающей в узком спектральном диапазоне видимой области спектра существенное снижение отражения от поверхности металла (металлической пленки) за счет эффективного поглощения энергии падающего излучения. Композитный слой выполнен в виде диэлектрической пленки субволновой толщины, в объеме которой размещен двумерный массив металлических частиц нанометрового размера. Спектральная область высокого поглощения определяется частотой локализованного поверхностного плазмонного резонанса наночастиц. Показана возможность полного поглощения падающего излучения вблизи частоты плазмонного резонанса наночастиц при согласовании параметров диэлектрической пленки, массива наночастиц и его местоположения в пленке.

Ключевые слова: нанокомпозитное покрытие, локализованный плазмонный резонанс, поглощающее покрытие.

DOI: 10.61011/FTT.2024.12.59573.6406PA

1. Введение

Благодаря развитию технологий синтеза наночастиц, в последнее десятилетие получила бурное развитие наноплазмоника [1,2]. Объемные композитные материалы, двумерные структуры и кластеры на базе металлических наночастиц (НЧ), имеющих сфероидальные или более сложные формы, применяются в биосенсорике, нанозондировании, нанофотонике, оптически термоиндуцированном катализе и др. [3–5]. Широкому применению плазмонных наноструктур способствует возможность подстройки их оптических характеристик за счет вариации структурных и электродинамических параметров — размера, формы и расстояния между металлическими НЧ, а также диэлектрических свойств как НЧ, так и вмещающей среды [6–8].

Нанокомпозитные материалы с плазмонным резонансом проявляют электродинамические характеристики, которые отличаются от характеристик природных материалов [9]. На их основе предложены различные оптические структуры, которые позволяют эффективно контролировать частотные и поляризационные характеристики электромагнитных волн, локализовывать, захватывать и переносить энергию электромагнитного излучения [10–12]. Также предложен дизайн поляризаторов и просветляющих слоев, выполненных с использованием двумерных массивов НЧ [13,14]. В настоящей работе показана возможность полного подавления отражения (за счет полного поглощения) световой волны от металлической поверхности (металлической пленки с толщиной больше глубины проникновения излучения) диэлектрической пленкой с одним двумерным массивом металлических НЧ умеренной поверхностной концентрации (расстояние между соседними НЧ превышает их размер в несколько раз).

2. Дизайн нанокомпозитного покрытия. Спектры поглощения

Дизайн рассматриваемой структуры показан на рис. 1. На поверхности металлической пленки (подложки) размещено нанокомпозитное покрытие, представляющее собой диэлектрическую непоглощающую пленку с двумерным массивом металлических НЧ. Слоистая структура помещена в среду с показателем преломления, равным 1 (воздух). Оптическое излучение падает по

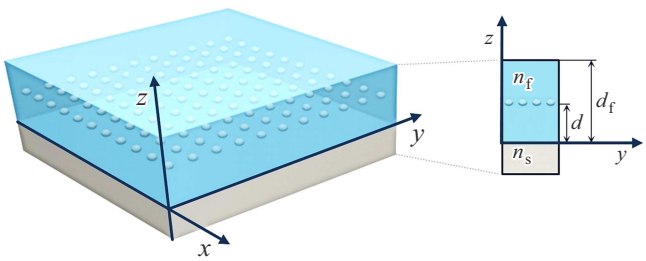


Рис. 1. Нанокомпозитное покрытие с двумерным массивом НЧ на поверхности металлической пленки.

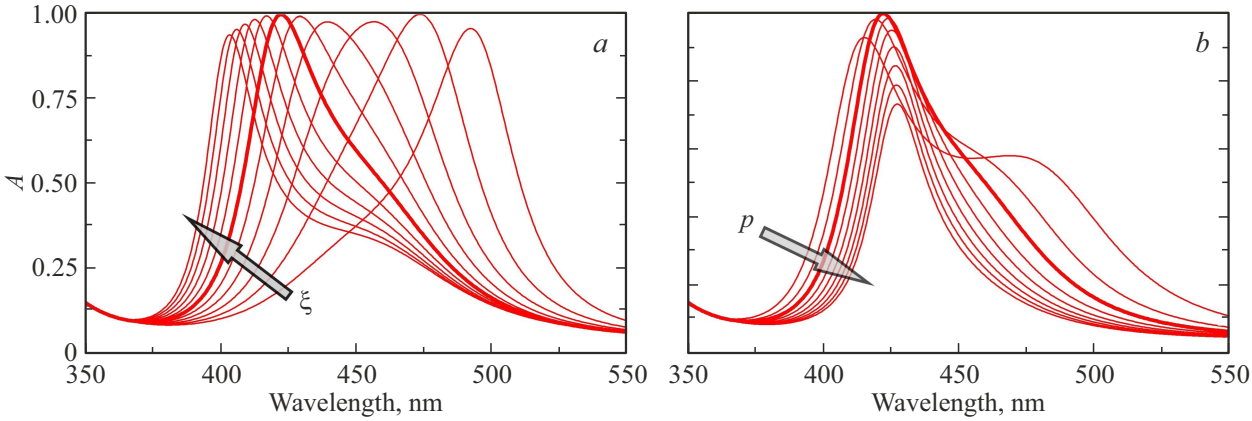


Рис. 2. Зависимость спектров поглощения слоистой структуры с массивом НЧ от a) формы НЧ (аспектное отношение НЧ ξ — в диапазоне от 0.5 до 1.5 с шагом 0.1, межчастичное расстояние $p = 60$ nm) и b) расстояния между НЧ (межчастичное расстояние p — в диапазоне от 40 до 120 nm с шагом 10 nm, аспектное отношение НЧ $\xi = 1$). Параметры структуры: толщина диэлектрической пленки $d_f = 350$ nm, расстояние между массивом НЧ и металлической пленкой $d = 210$ nm. Жирная линия на графиках соответствует случаю массива сферических НЧ ($\xi = 1$) с межчастичным расстоянием $p = 60$ nm.

нормали со стороны нанокомпозитного покрытия. Материал диэлектрической пленки характеризуется действительным показателем преломления n_f. Металлическая пленка выполнена из материала с комплексным показателем преломления $\tilde{n}_s = n_s + i\kappa_s$, где n_s и κ_s — показатели преломления и поглощения соответственно. Толщина металлической пленки значительно превышает толщину скин-слоя, что делает её непрозрачной для электромагнитной волны. Следует отметить, что такая металлическая пленка отражает падающую световую волну идентично полубесконечной металлической среде, поэтому полученные результаты применимы и к случаю полубесконечной подстилающей среды.

Металлические НЧ имеют форму эллипсоидов вращения (сфероидов) и одинаковый размер. Модель сфероидальных НЧ позволяет использовать известные аналитические выражения для расчета спектральных характеристик двумерных массивов НЧ [15]. Форма НЧ определяется аспектным отношением $\xi = a/b$ длин полярной a и экваториальной b полуосей: $\xi < 1$ соответствует сплюснутому сфероиду („диск“), $\xi > 1$ — вытянутому сфероиду („игла“), $\xi = 1$ — шару. Размер НЧ много меньше длины волны в диэлектрической пленке: $2a$, $2b \ll \lambda_0/n_f$, где λ_0 — длина волны в вакууме. Для упрощения рассматривается случай, когда полярная ось НЧ направлена перпендикулярно поверхности металлической пленки. НЧ образуют двумерный массив с квадратной ячейкой, который удален от металлической пленки на расстояние d, $a < d < d_f - a$, где d_f — толщина диэлектрической пленки.

Для расчета спектральных характеристик слоистой структуры применяется метод матриц переноса, в рамках которого каждому структурному элементу сопоставляется матрица, определяющая взаимосвязь полей на двух его интерфейсах [16]. Для границ раздела между непрерывными средами матрица переноса определена с помощью френелевских коэффициентов отражения и пропускания. Массив НЧ рассматривается как интерфейс (слой квазинулевой толщины) с нефренелевскими коэффициентами пропускания и отражения, которому сопоставляется специфическая матрица переноса [17]. Результирующая матрица переноса всей структуры получается посредством последовательного перемножения матриц переноса для однородных слоев и двумерного массива НЧ в соответствии с порядком их следования в направлении распространения падающей электромагнитной волны. Пропускная, отражательная и поглощательная (A) способности всей структуры определяются через элементы результирующей матрицы переноса.

В настоящей работе численные расчеты проведены для случая, когда металлическая пленка и частицы выполнены из серебра (Ag), диэлектрическая пленка — из стекла (SiO_2) с соответствующими комплексными показателями преломления [18,19]. Для упрощения анализа следующие параметры структуры имеют фиксированные значения: длина полярной полуоси НЧ составляет $a = 10$ nm, толщина металлической пленки равна 200 nm.

Из представленных на рис. 2 зависимостей видно, что поглощательная способность структуры с двумерным массивом серебряных НЧ в некотором спектральном диапазоне принимает значения, близкие к 1. Диссипативные потери в системе „композитная пленка с массивом НЧ — металлическая пленка“ максимальны вблизи частоты локализованного поверхностного плазмонного резонанса НЧ. Как следствие смещения частоты плазмонного резонанса при изменении формы частицы, с увеличением аспектного отношения ξ (при переходе от сплюснутой к вытянутой форме НЧ) максимум кривой поглощения смещается в коротковолновую область спектра, и наоборот (рис. 2, a). Изменение межчастичного расстояния приводит, главным образом, к изменению

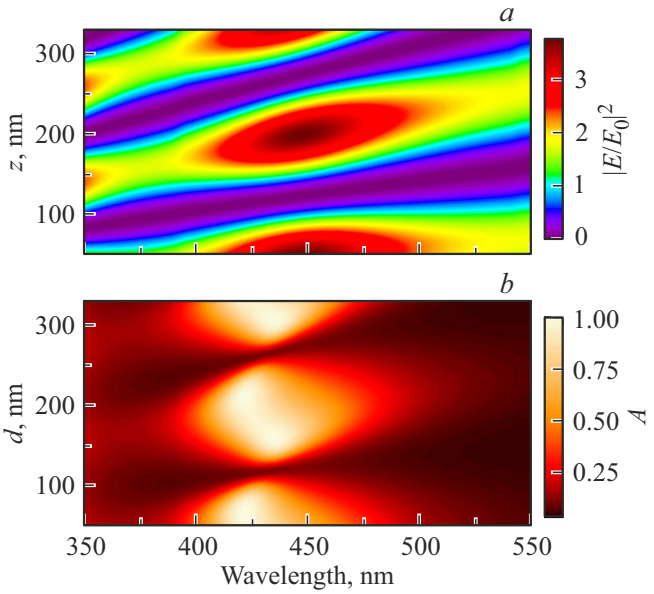


Рис. 3. *a*) Распределение электрического поля внутри диэлектрической пленки без НЧ в зависимости от длины волны падающей световой волны. *b*) Спектры поглощения при размещении массива НЧ на разном удалении d от металлической пленки, параметры массива НЧ: аспектное отношение НЧ $\xi = 1$, межчастичное расстояние $p = 60$ nm, расстояние d — в диапазоне от 50 до 330 nm. Остальные параметры те же, что и на рис. 2.

максимального значения поглощательной способности (рис. 2, *b*). Исключение составляет случай относительно плотного массива НЧ, когда его спектральные характеристики начинают определяться не только характеристиками отдельных НЧ, но и эффектами коллективного электродинамического взаимодействия в массиве НЧ, приводящих к перестройке его резонансов (см. кривые на рис. 2, *b* для $p < 70$ nm).

Как было показано в работах [13,20], в слоистой композитной структуре эффективность взаимодействия массива НЧ с электромагнитной волной выше при размещении НЧ в области локальных максимумов напряженности электрического поля волны. В рассматриваемой задаче это условие тоже играет важную роль. На рис. 3 показано распределение поля внутри диэлектрической пленки (вдоль координатной оси Oz) в зависимости от длины волны падающего излучения, а также представлены спектры поглощения при различном местоположении массива НЧ внутри диэлектрической пленки (различном расстоянии d между НЧ и металлической пленкой). Из сопоставления этих зависимостей видно, что поглощение выше, когда массив НЧ размещен в областях локализации световой волны, возникающих в результате интерференции падающей и отражённой волн в диэлектрической пленке. Поглощение наблюдается вблизи плазмонного резонанса массива НЧ, и его максимум приходится на диапазон длин волн от 415 до 445 nm (максимум поглощения смещается при изменении дистанции d между НЧ и металлической пленкой).

3. Заключение

Показано, что с помощью единичного слоя металлических НЧ умеренной поверхностной концентрации (около 250 НЧ на площади $1\,\mu m^2$), размещенного в диэлектрической пленке субволновой толщины, можно существенно снизить интенсивность отраженной волны от металлической поверхности (вплоть до полного подавления отражения) в спектральной полосе шириной в несколько десятков нанометров. Подавление отражения происходит за счет эффективного поглощения энергии падающей световой волны проводящими (металлическими) компонентами структуры. Вне спектральной области плазмонного резонанса массив НЧ практически не влияет на отражение от металлической поверхности. Описываемый эффект имеет резонансный характер, и для его реализации требуется согласование спектральных и структурных параметров, в том числе толщины диэлектрической пленки, формы и поверхностной концентрации НЧ двумерного массива, а также его местоположения в диэлектрической пленке. В композитных структурах на основе материалов, отличающихся от рассматриваемых в настоящей работе (полупроводниковые пленки, квантовые точки, графеновые частицы, углеродные нанотрубки, наночастицы золота и других металлов), эффект резонансного поглощения может быть реализован для других частот, в том числе за границами видимой области спектра электромагнитного излучения.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда: моделирование спектральных характеристик и локальных полей в двумерном слое наночастиц выполнено в рамках проекта № 23-19-00880, исследование спектральных характеристик комплексной структуры (композитная пленка на поверхности металла) — проекта № 23-79-30017.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] U. Guler, A.V. Kildishev, A. Boltasseva, V.M. Shalaev. Faraday Discuss. **178**, 71 (2015). https://doi.org/10.1039/C4FD00208C
[2] G. Barbillon. Mater. **12**, *9*, 1502 (2019). https://doi.org/10.3390/ma12091502
[3] K.M. Mayer, J.H. Hafner. Chem. Rev. **111**, *6*, 3828 (2011). https://doi.org/10.1021/cr100313v

[4] J.N. Anker, W.P. Hall, O. Lyandres, N.C. Shah, J. Zhao, R.P. Van Duyne. Nature Mater. **7**, *6*, 442 (2008). https://doi.org/10.1038/nmat2162
[5] M.I. Stockman. Phys. Today **64**, *2*, 39 (2011). https://doi.org/10.1063/1.3554315
[6] А. Ораевский, И. Проценко. Квантовая электроника **31**, *3*, 252 (2001). [A.N. Oraevsky, I.E. Protsenko. Quantum Electronics **31**, *3*, 252 (2001). https://doi.org/10.1070/QE2001v031n03ABEH001927]
[7] С.Г. Моисеев. Изв. вузов. Физика **52**, *11*, 7 (2009). [S.G. Moiseev, Russ. Phys. J. **52**, *11*, 1121 (2009). https://doi.org/10.1007/s11182-010-9349-6]
[8] I.E. Protsenko, O.A. Zaimidoroga, V.N. Samoilov. J. Opt. A: Pure Appl. Opt. **9**, *4*, 363 (2007). https://doi.org/10.1088/1464-4258/9/4/009
[9] С.Г. Моисеев, Е.А. Пашинина, С.В. Сухов. Квантовая электроника **37**, *5*, 446 (2007). [S.G. Moiseev, E.A. Pashinina, S.V. Sukhov. Quantum Electron. **37**, *5*, 446 (2007). https://doi.org/10.1070/QE2007v037n05ABEH013294]
[10] С.Г. Моисеев. Оптика и спектроскопия **111**, *2*, 264 (2011). [S.G. Moiseev. Optics. Spectroscopy **111**, *2*, 233 (2011).] https://doi.org/10.1134/S0030400X11080212
[11] H.A. Elsayed, T.A. Taha, S.A. Algarni, A.M. Ahmed, A. Mehaney. Optical. Quantum Electronics **54**, *5*, 312 (2022). https://doi.org/10.1007/s11082-022-03715-7
[12] Y. Dadoenkova, I. Glukhov, S. Moiseev, V. Svetukhin, A. Zhukov, I. Zolotovskii, Opt. Commun. **389**, 1 (2017). https://doi.org/10.1016/j.optcom.2016.12.017
[13] S.G. Moiseev, I.A. Glukhov, Y.S. Dadoenkova, F.F.L. Bentivegna, J. Opt. Soc. Am. B **36**, *6*, 1645 (2019). https://doi.org/10.1364/JOSAB.36.001645
[14] С.Г. Моисеев, И.А. Глухов, В.А. Остаточников, А.П. Анзулевич, С.Н. Анзулевич. Журнал прикладной спектроскопии **85**, *3*, 506 (2018). [S.G. Moiseev, I.A. Glukhov, V.A. Ostatochnikov, A.P. Anzulevich, S.N. Anzulevich. J. Appl. Spectrosc. **85**, *3*, 511 (2018). https://doi.org/10.1007/s10812-018-0681-x]
[15] C.L. Holloway, M.A. Mohamed, E.F. Kuester, A. Dienstfrey, IEEE Trans. Electromagn. Compat. **47**, *4*, 853 (2005). https://doi.org/10.1109/TEMC.2005.853719
[16] М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. Наука, М. (1970). [M. Born, E. Wolf. Principles of Optics. Pergamon Press Ltd, London (1959).]
[17] C.C. Katsidis, D.I. Siapkas. Appl. Opt. **41**, *19*, 3978 (2002). https://doi.org/10.1364/AO.41.003978
[18] U. Kreibig, M. Vollmer. Optical Properties of Metal Clusters. Springer, Berlin (1995).
[19] L.V. Rodríguez-de Marcos, J.I. Larruquert, J.A. Méndez, J.A. Aznárez. Opt. Mater. Express **6**, *11*, 3622 (2016). https://doi.org/10.1364/OME.6.003622
[20] S. Moiseev, I. Glukhov. J. Appl. Phys. **135**, *8*, 083106 (2024). https://doi.org/10.1063/5.0190764

Редактор Е.В. Толстякова