

УДК 537.6, 535.58, 538.958

ИЗВЛЕЧЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМОННОГО
МУЛЬТИСЛОЯ ИЗ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ И ПРОХОЖДЕНИЯА.А. Орлов^а, Е.А. Янковская^а, С.В. Жуковский^б, П.А. Белов^а^а Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, Alexey.orlov@phoi.ifmo.ru^б Технический университет Дании, Конгенс Люнбю, Дания, sezh@fotonik.dtu.dk

Получены и исследованы диэлектрическая и магнитная проницаемости конечного образца многослойной металлodielectricкой наноструктуры – плазмонного мультислоя, относящегося к классу электромагнитных метаматериалов. Метаматериалы представляют собой искусственно созданные структуры, как правило, периодические, размеры элементарной ячейки которых много меньше длины волны, обладающие необычными электромагнитными свойствами, не наблюдаемыми в природе. Так, метаматериалы открывают путь к созданию оптических материалов с магнитной проницаемостью, существенно отличной от единицы, что долгое время казалось трудновыполнимой задачей. Для извлечения из коэффициентов отражения и прохождения материальных параметров, описывающих электромагнитное поведение плазмонного мультислоя, был применен классический метод Николсона–Росса–Веира. В рассматриваемом слое метаматериала наблюдается сильный магнетизм резонансного типа в оптическом диапазоне частот. Положение резонанса соответствует точке предельно малых значений диэлектрической проницаемости. Показана возможность перестройки резонансной частоты путем изменения соотношения толщины слоев в элементарной ячейке, образующей плазмонный мультислой. Наблюдаемая магнитная активность входит в установившийся режим, начиная с толщины мультислоя, составляющей порядка нескольких десятков слоев. Предложено использование таких многослойных наноструктур как простого и эффективного материала, способного демонстрировать магнитную активность во всем оптическом диапазоне.

Ключевые слова: метаматериалы, плазмоны, магнетизм, многослойные структуры.EXTRACTION OF MATERIAL PARAMETERS FOR PLASMON MULTILAYER
FROM REFLECTION AND TRANSMISSION COEFFICIENTSA. Orlov^c, E. Yankovskaya^c, S. Zhukovsky^d, P. Belov^c^c Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia, Alexey.orlov@phoi.ifmo.ru^d Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, Denmark, sezh@fotonik.dtu.dk

The paper deals with acquisition and analysis of permittivity and permeability for a finite sample made of multi-layered metal-dielectric nanostructure – plasmon multilayer referred to a class of electromagnetic metamaterials. Metamaterials are artificial structures, periodical as a rule, with characteristic unit cell sizes much smaller than the wavelength in vacuum, having unusual properties not met in nature. For example, metamaterials open the way to fabrication of optical materials with permeability substantially differing from unity - the task considered as unrealizable for a long time. The classical Nicolson-Ross-Weir method has been applied for extraction of material parameters describing an electromagnetic behavior of the plasmon multilayer from reflection and transmission coefficients. Strong resonance-type magnetic activity in the optical frequency domain is observed in the metamaterial under consideration. Magnetism appears due to strong spatial dispersion inherent to the plasmon multilayers. Position of the permeability resonance is located exactly in the epsilon-near-zero region. It is shown how the resonance can be repositioned by means of the filling factor changing. Observed magnetic activity reaches the steady state with multilayer thickness equal to a few dozens of layers. Plasmon multilayers are suggested as robust and effective optical materials with a strong magnetic response in the whole optical domain.

Keywords: metamaterials, plasmons, magnetism, multilayered structures.

Введение

Многослойные структуры в оптике являются предметом рассмотрения уже достаточно длительное время [1–3]. Однако периодические многослойные структуры, включающие в себя слои металла, стали рассматриваться значительно позже. Неожиданно оказалось, что металлodielectricкие многослойные наноструктуры демонстрируют высокий коэффициент прохождения в оптическом диапазоне длин волн даже в режиме фотонного кристалла, где характерный размер периода структуры D составляет около четверти длины волны в вакууме λ [4, 5]. Данное явление, именуемое эффектом прозрачности металла, возникает вследствие того, что в периодических металлodielectricких многослойных наноструктурах на границах между слоями могут возбуждаться поверхностные плазмон-поляритоны (ППП), обеспечивая механизм туннелирования оптического излучения через такую структуру [6–8]. Вследствие присутствия ППП на границах между слоями данные структуры будут именоваться в дальнейшем плазмонными мультислоями.

Извлечение ϵ и μ

В настоящей работе рассматриваются плазмонные мультислои, образованные периодически повторяющейся элементарной ячейкой, состоящей из диэлектрика толщиной d_1 и металла толщиной d_2 . Диэлектрическая проницаемость диэлектрика ϵ_1 принимается постоянной и равной 4,6. Для металла диэлектрическая проницаемость задается моделью Друде:

$$\epsilon_2 = 1 - \omega_p / \omega (\omega + i\Gamma),$$

где плазменная частота $\omega_p = 2\pi c / \lambda_p$, $\lambda_p = 250$ нм (c – скорость света в вакууме), коэффициент затухания $\Gamma = 1,734 \text{ c}^{-1}$, что соответствует серебру с учетом омических потерь. Параметры взяты из работы [9].

Насколько нам известно, магнитная активность плазмонных мультислоев, составленных из немагнитных материалов, не была исследована до настоящего времени. Далее нами будут изучены диэлектрическая и магнитная проницаемости конечного образца мультислоя, составленного из N элементарных ячеек, освещаемого ТМ-поляризованным излучением нормально к слоям. Падение по нормали выбрано с целью извлечения продольной компоненты тензора ϵ диэлектрической проницаемости плазмонного мультислоя ввиду того, что в данном случае электромагнитное излучение нечувствительно к имеющимся в ϵ недиагональным компонентам [10, 11].

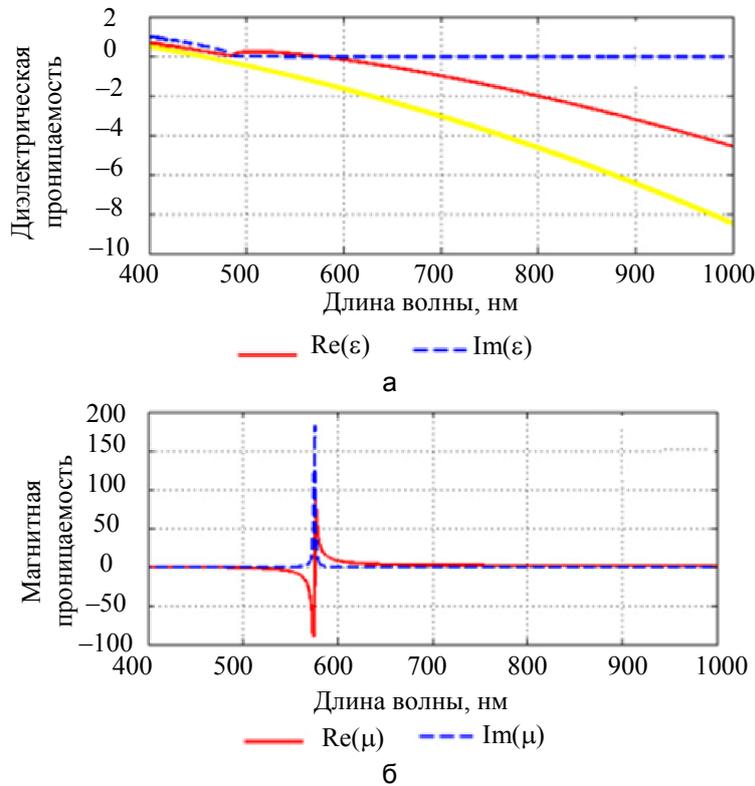


Рис. 1. Эффективная диэлектрическая (а) и магнитная (б) проницаемости (вещественные – Re и мнимые – Im части) образца плазмонной многослойной структуры, состоящей из $N = 200$ периодов, образованных слоем диэлектрика и металла с толщинами 30 и 60 нм соответственно. Желтой линией показана аналитически рассчитанная диэлектрическая проницаемость для бесконечного мультислоя

Для получения эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей из конечного образца плазмонного мультислоя был применен метод экстракции материальных параметров из рассчитанных при помощи матриц передачи коэффициентов отражения R и прохождения T конечного образца мультислоя согласно процедуре Николсона–Росса–Веира [12, 13]:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \pm \sqrt{\frac{(1 + R)^2 - T^2}{(1 - R)^2 - T^2}} = \sqrt{\epsilon\mu} = \pm \frac{\arccos \left[\frac{1}{2T} (1 - R^2 + T^2) \right] + 2\pi m}{k_0 D N},$$

где $D = d_1 + d_2$, N – число периодов в конечном мультислое. Правильный выбор целого числа m был подробно обсужден в [14, 15]. Рассчитав характеристический импеданс Z , а также показатель преломления n , нетрудно установить материальные параметры ϵ и μ образца. Полученные диэлектрическая и магнитная проницаемости для мультислоя из 200 элементарных ячеек диэлектрика и металла с толщинами $d_1 = 30$ нм, $d_2 = 60$ нм соответственно представлены на рис. 1. Число периодов выбрано большим с целью создания объемной структуры во избежание проблем плохой сходимости ϵ и μ при малом числе элементарных ячеек, составляющих наноструктуру. Как видно из рис. 1, плазмонный мультислой в такой конфи-

гурации демонстрирует сильную магнитную активность в оптическом диапазоне длин волн в точке около нулевого ϵ . Обычно такое поведение обуславливается сильной пространственной дисперсией плазмонного мультислоя [16–18]. Полученная магнитная активность является устойчивой к изменению числа периодов и сходится к стабильным значениям уже при около 50 периодах, что видно из рис. 2. Также сходимость магнитной проницаемости, очевидно, зависит от толщины периода D : чем больше толщина, тем быстрее будет наблюдаться сходимость.

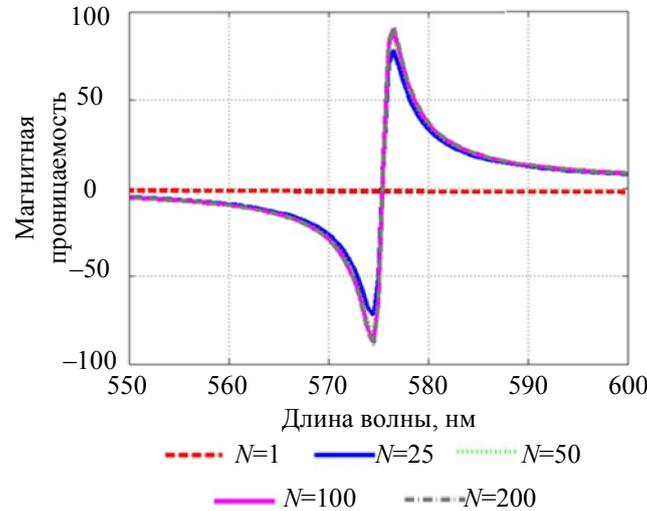


Рис. 2. Сходимость магнитной проницаемости конечного плазмонного мультислоя при увеличении числа N составляющих его элементарных ячеек

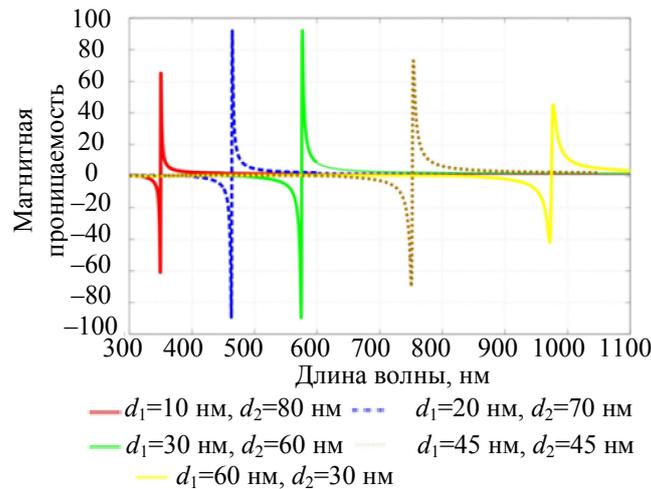


Рис. 3. Изменение положения резонанса магнитной проницаемости при изменении соотношения толщин слоев d_1/d_2 . Толщина периода фиксирована. Для всех кривых количество периодов равно 200

Положение резонансной частоты μ зависит от соотношения толщин металла и диэлектрика d_1/d_2 (рис. 3). При определенном соотношении толщин слоев наблюдается максимум раскачки резонанса. В этом максимуме толщина металла в 2–3 раза больше, чем толщина диэлектрика (точное значение зависит от толщины периода). Более сильное утолщение слоя металла приводит к уменьшению раскачки резонанса.

Заключение

Была продемонстрирована сильная магнитная активность плазмонного мультислоя во всем видимом диапазоне длин волн. Резонанс извлеченной магнитной проницаемости соответствует частотам предельно малых значений диэлектрической проницаемости. Положение резонанса зависит от соотношения толщин в периоде, обеспечивая перестраиваемость метаматериала [19], и сходится к устойчивым значениям уже от нескольких десятков слоев. В настоящее время предложенный способ получения магнитной активности в видимом диапазоне длин волн является самым простым и доступным для изготовления. К примеру, по сравнению с двумерными массивами последовательно расположенных пар наночастиц [20], где магнитный отклик наблюдается вплоть до голубой линии спектра, плазмонные мультислои не требуют применения глубокой ультрафиолетовой интерференционной литографии и являются объемным материалом, а не всего лишь тонким слоем упорядоченных наночастиц.

References

1. Rytov S.M. Elektromagnitnye svoistva melkosloistoi sredy [Electromagnetic properties of small-layered environment]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1955, vol. 29, no. 5, pp. 605–616.
2. Brekhovskikh L. *Waves in Layered Media*. NY, Academic Press, 1960, 574 p.
3. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*. 4th ed. Pergamon Press, 1970, 808 p. (Russ. ed.: Born M., Vol'f E. *Osnovy optiki*. Moscow, Nauka Publ., 1973, 721 p.)
4. Scalora M., Bloemer M.J., Manka A.S., Pethel S.D., Dowling J.P., Bowden C.M. Transparent, metallo-dielectric one dimensional photonic band gap structures. *Journal of Applied Physics*, 1998, vol. 83, no.4, pp. 2377–2383.
5. de Ceglia D., Vincenti M.A., Cappeddu M.G., Centini M., Akozbek N., D'Orazio A., Haus J.W., Bloemer M.J., Scalora M. Tailoring metallodielectric structures for superresolution and superguiding applications in the visible and near-IR ranges. *Phys. Rev. A*, 2008, vol. 77, no. 3, pp. 033848-1–033848-12. doi: 10.1103/PhysRevA.77.033848
6. Tomita S., Yokoyama T., Yanagi H., Wood B., Pendry J.B., Fujii M., Hayashi S. Resonant photon tunneling via surface plasmon polaritons through one-dimensional metal-dielectric metamaterials. *Optics Express*, 2008, vol. 16, no. 13, pp. 9942–9950.
7. Allen T.W., DeCorby R.G. Assessing the maximum transmittance of periodic metal-dielectric multilayers. *Journal of the Optical Society of America B*, 2011, vol. 28, no. 10, pp. 2529–2536.
8. Feng S., Elson J.M., Overfelt P.L. Optical properties of multilayer metal-dielectric nanofilms with all-evanescent modes. *Optics Express*, 2005, vol. 13, no. 11, pp. 4113–4124.
9. Zhang J., Jiang H., Gralak B., Enoch S., Tayeb G., Lequime M. Towards-1 effective index with one-dimensional metal-dielectric metamaterial: a quantitative analysis of the role of absorption losses. *Optics Express*, 2007, vol. 15, no. 12, pp. 7720–7729.
10. Chebykin A.V., Orlov A.A., Vozianova A.V., Maslovski S.I., Kivshar Y.S., Belov P.A. Nonlocal effective medium model for multilayered metal-dielectric metamaterials. *Phys. Rev. B*, 2011, vol. 84, no. 11, pp. 115438-1–115438-11. doi: 10.1103/PhysRevB.84.115438
11. Chebykin A.V., Orlov A.A., Simovski C.R., Kivshar Y.S., Belov P.A. Nonlocal effective parameters of multilayered metal-dielectric metamaterials. *Phys. Rev. B*, 2012, vol. 86, no. 11, pp. 115420-1–115420-8. doi: 10.1103/PhysRevB.86.115420
12. Nicolson A.M., Ross G.F. Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1970, vol. 19, no. 4, pp. 377–382.
13. Weir W.B. Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies. *Proc. of IEEE*, 1974, vol. 62, no. 1, pp. 33–36.
14. Simovski C.R. Material parameters of metamaterials (a Review). *Optics and Spectroscopy*, 2009, vol. 107, no.5, pp. 726-753. doi: 10.1134/S0030400X09110101
15. Chen X., Grzegorzczak T.M., Wu B.I., Pacheco J., Jr, Kong J.A. Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials. *Phys.Rev. E*, 2004, vol. 70, no. 1, pp. 016608-1–016608-7. doi: 10.1103/PhysRevE.70.016608
16. Orlov A.A., Voroshilov P.M., Belov P.A., Kivshar Y.S. Engineered optical nonlocality in nanostructured metamaterials. *Phys. Rev. B*, 2011, vol. 84, no. 4, pp. 045424-1–045424-24. doi: 10.1103/PhysRevB.84.045424
17. Elser J., Podolskiy V.A., Salakhutdinov I., Avrutsky I. Nonlocal effects in effective-medium response of nanolayered metamaterials. *Applied Physics Letters*, 2007, vol. 90, no. 19, pp. 191109-1–191109-3. doi: 10.1063/1.2737935
18. Pollard R.J., Murphy A., Hendren W.R., Evans P.R., Atkinson R., Wurtz G.A., Zayats A.V., Podolskiy V.A. Optical nonlocalities and additional waves in epsilon-near-zero metamaterial. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, vol. 102, no. 12, pp. 127405-1–127405-4. doi: 10.1103/PhysRevLett.102.127405
19. Kivshar Yu.S., Orlov A.A. Perestraivaemye i nelineinye metamaterialy [Reconfigurable and nonlinear metamaterials]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 3 (79), pp. 1–10.
20. Jeyaram Y., Jha S.K., Agio M., Löffler J.F., Ekinici Y. Magnetic metamaterials in the blue range using aluminum nanostructures. *Optics Letters*, 2010, vol. 35, no. 10, pp. 1656–1658.

Орлов Алексей Анатольевич

– младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, Alexey.orlov@phoi.ifmo.ru

Янковская Елизавета Алексеевна

– аспирант, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, adfors@gmail.com

Жуковский Сергей

– старший научный сотрудник, факультет фотонной техники, Технический университет Дании, Конгенс Люнбю, Дания, sez@fotonik.dtu.dk

Белов Павел Александрович

– доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, belov@phoi.ifmo.ru

- Alexei Orlov* – junior research scientist, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia, Alexey.orlov@phoi.ifmo.ru
- Elizaveta Yankovskaya* – postgraduate, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia, adfors@gmail.com
- Sergei Zhukovsky* – senior research scientist, Department of Photonics Engineering, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, Denmark, sezh@fotonik.dtu.dk
- Pavel Belov* – D.Sc., principal research fellow, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia, belov@phoi.ifmo.ru

УДК 535.012, 530.182

ПЛАЗМОННЫЕ СОЛИТОНЫ, КИНКИ И ВОЛНЫ ФАРАДЕЯ В ДВУМЕРНОЙ РЕШЕТКЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ

Р.Е. Носков^a, Д.А. Смирнова^b, Н.С. Лапшина^a

^a Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, nanometa@gmail.com

^b Центр нелинейной физики, Австралийский национальный университет, Канберра, Австралия, namaste89@mail.ru

Рассматриваются нелинейные дискретные моды в двумерной решетке металлических наночастиц, возбуждаемой оптическим излучением на частоте, близкой к частоте поверхностного плазмонного резонанса уединенной частицы. Предполагается, что размер частиц много меньше оптической длины волны, а межчастичное расстояние достаточно велико, чтобы отклик частиц можно было рассматривать в рамках дипольного приближения. Мы также считаем, что наночастицы сделаны из серебра и обладают нелинейным откликом керровского типа.

В силу того, что каждая частица представляет собой резонансно возбуждаемый нелинейный осциллятор с относительно медленным инерционным откликом по сравнению с периодом колебаний света, динамический отклик системы описывается в терминах медленных амплитуд поляризации каждого шарика. Стандартная процедура линеаризации дает возможность получить зоны модуляционной неустойчивости и бистабильности однородного стационарного решения соответствующих динамических уравнений на плоскости параметров внешнего поля «интенсивность–частота». Используя эти данные, мы представляем и анализируем примеры генерации плазмонного аналога волн Фарадея, устойчивых двумерных солитонов, осциллонов и кинков (волн переключения), фронт которых представляет собой переход при изменении номера частицы от одного однородного распределения поляризации частиц к другому при однородном внешнем возбуждении. Также обсуждается реалистичная длительность лазерного импульса, которая должна быть достаточно большой для формирования рассмотренных нелинейных дискретных мод, но в то же время достаточно малой для предотвращения теплового разрушения наночастиц.

Ключевые слова: плазмоника, нанофотоника, металлическая наночастица, кубическая восприимчивость серебряной наночастицы, поверхностный плазмонный резонанс, дискретная локализованная мода, модуляционная неустойчивость, волны Фарадея, солитон, осциллонов, кинк.

PLASMON SOLITONS, KINKS AND FARADAY WAVES IN TWO-DIMENSIONAL LATTICE OF METAL NANOPARTICLES

R.E. Noskov^c, D.A. Smirnova^d, N. S. Lapshina^c

^c Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia, nanometa@gmail.com

^d Nonlinear Physics Center, Australian National University, Canberra, Australia, namaste89@mail.ru

We consider nonlinear discrete modes in a two-dimensional lattice of metallic nanoparticles driven by optical radiation at a frequency close to the frequency of the surface plasmon resonance of an individual nanoparticle. We suppose that the particles are small enough and the interparticle distance is large enough to treat nanoparticle within point-dipole approximation. We also assume that nanoparticles are made of silver and possess an intrinsic nonlinear Kerr-type response.

Since each particle acts as a resonantly excited oscillator with slow (in comparison with the light period) inertial response, we employ a slowly varying amplitude approach to describe dynamical behavior of particle polarizations. Following a standard linear stability analysis, we obtain areas of bistability and modulation instability for the homogeneous stationary solution of the corresponding dynamical system in the plane ‘intensity-frequency’. Based on these data, we present and analyze examples of generation of plasmonic Faraday waves, stable two-dimensional solitons, oscillons, and kinks (switching waves), which separate two different homogeneous states of particle polarizations. We also discuss realistic duration of the laser pulse which should be large enough to cause the formation of the considered nonlinear modes and small enough to prevent particle ablation.

Keywords: plasmonics, nanophotonics, metal nanoparticle, cubic susceptibility of silver nanoparticle, surface plasmon resonance, discrete localized mode, modulation instability, Faraday waves, soliton, oscillon, kink.

Введение

Растущий интерес к исследованию нелинейных свойств плазмонных наноструктур, таких как массивы серебряных и золотых наночастиц, объясняется их большим потенциалом для разнообразных нано-