

Головкина Мария Вилевна, Обухович Татьяна Евгеньевна

УСИЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В КОМПОЗИТНЫХ СТРУКТУРАХ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

В работе исследованы спектральные характеристики нанокomпозитной структуры, содержащей включения сферической формы с металлической оболочкой. Рассмотрена возможность управления положением плазмонного резонанса путем изменения радиуса ядра и толщины оболочки наночастицы. Изучены свойства наночастиц, работающих в режиме усиления. Проведено сравнение с электродинамическими параметрами сферических частиц с наноболочкой, работающих в режиме спазера. Полученные результаты могут использоваться для создания ультрабыстрых переключателей и процессоров.

Адрес статьи: www.gramota.net/materials/1/2014/5-6/13.html

Статья опубликована в авторской редакции и отражает точку зрения автора(ов) по рассматриваемому вопросу.

Источник

Альманах современной науки и образования

Тамбов: Грамота, 2014. № 5-6 (84). С. 53-55. ISSN 1993-5552.

Адрес журнала: www.gramota.net/editions/1.html

Содержание данного номера журнала: www.gramota.net/materials/1/2014/5-6/

© Издательство "Грамота"

Информация о возможности публикации статей в журнале размещена на Интернет сайте издательства: www.gramota.net

Вопросы, связанные с публикациями научных материалов, редакция просит направлять на адрес: almanac@gramota.net

Заклучение

Таким образом, в работе исследована частотная зависимость сечения экстинкции для сферических диэлектрических наночастиц с металлической оболочкой. В результате проведенных расчетов показано, что положение максимума плазмонного резонанса существенным образом зависит от радиусов ядра и оболочки наночастицы. Продемонстрировано, что большое влияние на спектральные характеристики оказывает изменение толщины металлической оболочки. Полученные в работе результаты могут быть использованы для создания на основе наночастиц с оболочкой биологических сенсоров, обладающих резонансом на любой заранее заданной частоте.

Список литературы

1. **Гузатов Д. В., Ораевский А. А., Ораевский А. Н.** Плазмонный резонанс в эллипсоидальных наночастицах с оболочкой // Квантовая электроника. 2003. Т. 33. № 9. С. 817-822.
2. **Arnold M., Blaber M., Ford M.** Local Plasmon Resonances of Metal-in-Metal Core-Shells // Optics Express. 2014. Vol. 22. № 3. P. 3186-3198.
3. **Arruda T. J., Pinheiro F. A., Martinez A. S.** Electromagnetic Energy within Coated Spheres Containing Dispersive Metamaterials // Journal of Optics. 2012. Vol. 14. № 6. P. 065101-065134.
4. **Bohren C. F., Huffman D. R.** Absorption and Scattering of Light by Small Particles. New York: Wiley, 1998. 560 p.
5. **Gordon J. A., Ziolkowski R. W.** The Design and Simulated Performance of a Coated Nano-Particle Laser // Optics Express. 2007. Vol. 15. № 5. P. 2622-2653.
6. **Kachan S. M., Ponyavina A. N.** Resonance Absorption Spectra of Composites Containing Metal-Coated Nanoparticles // Journal of Molecular Structure. 2001. Vol. 563-564. № 1-3. P. 267-272.
7. **King N. S., Li Y., Ayala-Orozco C., Brannan T., Nordlander P., Halas N. J.** Angle- and Spectral-Dependent Light Scattering from Plasmonic Nanocups // ACS Nano. 2011. Vol. 5. № 9. P. 7254-7262.
8. **Quirantes A., Delgado A. V.** The Scattering of Light by a Suspension of Coated Spherical Particles: Effects of Polydispersity on Cross Sections // Journal of Physics D: Applied Physics. 1997. Vol. 30. № 15. P. 2123-2131.

ELECTRODYNAMIC PARAMETERS OF HYBRID NANOPARTICLES

Golovkina Mariya Vilevna, Ph. D. in Physical-Mathematical Sciences

Kamalieva Aisyly Nasykhovna

*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
nauka77@yandex.ru*

The article investigates the spectral characteristics of dielectric nanoparticles with metal shell. The calculation of scattering and absorption cross-sections is carried out within Mie theory framework with the use of Aden-Kerker solution. The conducted calculations of extinction cross-section for nanoparticles of silicon dioxide with silver shell indicate the possibility of changing plasmon resonance position in nanoparticle through changing its geometrical dimensions. Change in the thickness of nanoparticle metal shell has the greatest influence on spectral characteristics.

Key words and phrases: nanoparticle; shell; plasmon resonance; scattering cross-section; absorption cross-section; Mie theory.

УДК 535.341.08

Физико-математические науки

В работе исследованы спектральные характеристики наноконструктивной структуры, содержащей включения сферической формы с металлической оболочкой. Рассмотрена возможность управления положением плазмонного резонанса путем изменения радиуса ядра и толщины оболочки наночастицы. Изучены свойства наночастиц, работающих в режиме усиления. Проведено сравнение с электродинамическими параметрами сферических частиц с наноболочкой, работающих в режиме спазера. Полученные результаты могут использоваться для создания ультрабыстрых переключателей и процессоров.

Ключевые слова и фразы: наночастица с оболочкой; плазмонный резонанс; усиление; спазер; наноконструктивная структура.

Головкина Мария Вилевна, к. ф.-м. н.

Обухович Татьяна Евгеньевна

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
nauka77@yandex.ru*

УСИЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В КОМПОЗИТНЫХ СТРУКТУРАХ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ[©]

В настоящее время прогресс, достигнутый в технологии изготовления наноструктур, позволяет создавать наноконструктивные структуры с включениями сложной формы, состоящими из ядра и нескольких слоев оболочек. Комбинация различных материалов для изготовления сложных наночастиц, изменение толщины

оболочки и ядра позволяют менять в широком диапазоне спектральные характеристики полученных на их основе композитов [1]. Особое внимание привлекают наночастицы из металла или с металлической оболочкой, способные возбуждать поверхностные плазмоны. Частота плазмонного резонанса лежит в области ультрафиолетовых волн и может существенно меняться в зависимости от формы и размеров частиц. Данная работа посвящена исследованию параметров композитных структур, которые содержат включения в виде наночастиц с металлической оболочкой. Изучается случай, когда в ядре наночастицы создается инверсия населенностей за счет внешней накачки, приводящая к усилению электромагнитной волны.

Рассмотрим наночастицу сферической формы, находящуюся в среде с диэлектрической проницаемостью ϵ_h . Сечения поглощения и рассеяния рассматриваемой наночастицы с оболочкой описываются следующими выражениями [2; 3]:

$$\sigma_a = \frac{8\pi r_s^3 \sqrt{\epsilon_h}}{\lambda} \text{Im}(\delta), \quad (1)$$

$$\sigma_s = \frac{128\pi^5 \epsilon_h^2 r_s^6 \sqrt{\epsilon_h}}{3\lambda^4} |\delta|^2, \quad (2)$$

$$\delta = \frac{\epsilon_s \epsilon_a - \epsilon_h \epsilon_b}{\epsilon_s \epsilon_a + 2\epsilon_h \epsilon_b}, \quad (3)$$

$$\epsilon_a = \epsilon_c (3 - 2P) + 2\epsilon_s P, \quad (4)$$

$$\epsilon_b = \epsilon_c + \epsilon_c (3 - P), \quad (5)$$

$$P = 1 - \left(\frac{r_c}{r_s}\right)^3, \quad (6)$$

где ϵ_h – диэлектрическая проницаемость среды, ϵ_c – диэлектрическая проницаемость ядра, ϵ_s – диэлектрическая проницаемость оболочки, r_c – радиус ядра, r_s – радиус оболочки, λ – длина волны излучения.

Диэлектрическая проницаемость металлической наночастицы в модели свободных электронов описывается формулой Друде [4]

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - i\gamma\omega}, \quad (7)$$

где ω_p – плазменная частота, γ – столкновительная частота, ϵ_∞ – решеточная часть диэлектрической проницаемости.

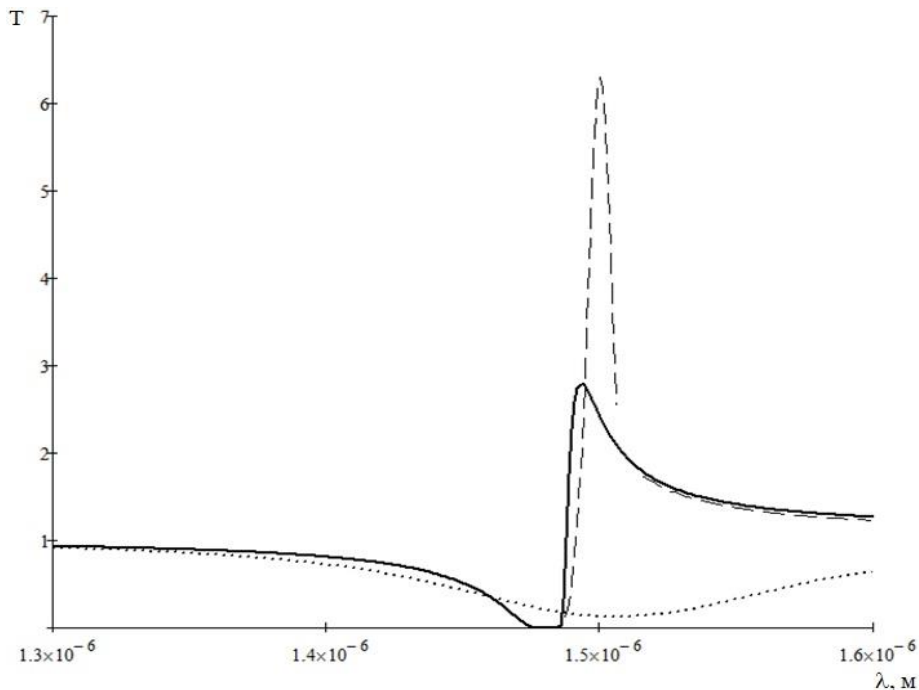


Рис. 1. График зависимости коэффициента прохождения нанокompозитной структуры от длины волны.

Точечная линия: поглощающее ядро, коэффициент усиления $k=0,01$. Сплошная линия: режим усиления в ядре, коэффициент усиления $k=-0,45$. Пунктирная линия: режим работы спазера. Параметры: $r_c=22$ нм, $r_s=27$ нм, толщина структуры $d=100$ нм, концентрация включений $n=10^{13}$ м⁻³

На основе расчетов сечений поглощения и рассеяния отдельных наночастиц был проведен расчет коэффициента прохождения для композитной среды. Композитная среда состояла из стеклянной матрицы, содержащей

включения в виде сферических наночастиц с оболочкой из серебра. Исследовалась возможность усиления в ядре наночастицы за счет внешней накачки. Результаты расчета коэффициента прохождения T представлены на Рисунке 1. Использовались следующие значения параметров: $r_c=22$ нм, $r_s=27$ нм, толщина слоя $d=100$ мкм, концентрация включений $n=10^{13}$ м⁻³. На Рисунке 1 точечная кривая соответствует случаю наночастиц с поглощающим ядром (коэффициент поглощения $k=0,01$). Видно, что коэффициент прохождения T уменьшается на длине волны, равной длине волны поверхностного плазмона. Сплошная кривая на Рисунке 1 соответствует случаю усиления в ядре наночастиц (коэффициент поглощения $k=-0,45$). Видно, что вблизи длины волны, соответствующей плазмонному резонансу, наблюдается усиление, и коэффициент прохождения T превышает единицу.

Для сравнения рассматривалась композитная среда, содержащая сферические частицы с нанооболочкой, которые могут работать в режиме спазера [6]. Теоретическая возможность создания на основе наночастиц с оболочкой устройства для генерации поверхностных плазмонов и усиления электромагнитной волны в оптическом диапазоне была показана в 2003 г. [5]. Отсутствие резонатора у спазера позволяет сильно уменьшить его размеры по сравнению с размерами обычного лазера. Расчет ширины линии излучения для наночастицы в режиме спазера проводился по формуле [7]

$$\Gamma_s = (\gamma_n^{-2} + \gamma_s^{-2})^{-1/2}, \quad (8)$$

где γ_n – скорость релаксации моды поверхностного плазмона, γ_s – ширина линии спайзинга, зависящая от скорости затухания для квантовомеханического перехода из возбужденного состояния в основное и количества плазмонов, приходящихся на одну моду [8]. Оценка ширины линии излучения проводилась в линейном приближении. При оценке использовались следующие параметры: диэлектрическая проницаемость сердцевинки спазера 2, диэлектрическая проницаемость окружающей активной среды также равна 2, диэлектрическая проницаемость матрицы 1,45, число плазмонов на одну моду 80, ширина линии спайзинга γ_s принимала значения от $3 \cdot 10^{12}$ с⁻¹ до $8 \cdot 10^{12}$ с⁻¹. Результаты расчета коэффициента прохождения для композитной среды с нановключениями, работающими в режиме спазера, показаны на Рисунке 1 пунктирной линией. Хорошо видно, что в режиме работы спазера ширина линии излучения уменьшается, а коэффициент усиления на частоте плазмонного резонанса увеличивается.

Заключение

В работе рассмотрена композитная среда, содержащая нановключения сферической формы с металлической оболочкой. В рамках теории Ми рассчитаны сечения поглощения отдельных нановключений, проведен расчет коэффициента прохождения электромагнитной волны через композитную среду. Изучены случаи включений с усиливающим ядром и случаи включений с оболочкой, работающих в режиме спазера. Показано, что использование включений с металлической нанооболочкой толщиной менее 5 нм позволяет уменьшить ширину линии плазмонного резонанса. Результаты, полученные в работе, могут использоваться для создания ультрабыстрых усилителей и переключателей для оптического диапазона.

Список литературы

1. Климов В. В. Наноплазмоника // Успехи физических наук. 2009. Т. 178. № 8. С. 875-880.
2. Сидоров А. И. Инверсия поглощения и рассеяния при плазмонном резонансе в наночастицах с металлической оболочкой // Журнал технической физики. 2006. Т. 76. Вып. 10. С. 136-139.
3. Сидоров А. И. Механизм низкопорогового ограничения излучения в компенсированном арсениде галлия // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 1. С. 7-13.
4. Сидоров А. И., Виноградова О. П., Бандюк О. В. Особенности нелинейно-оптического отклика композитных сред на основе наноструктур с поглощающим ядром и металлической оболочкой вблизи плазмонного резонанса // Журнал технической физики. 2008. Т. 78. Вып. 6. С. 70-75.
5. Bergman D. J., Stockman M. I. Surface Plasmon Amplification by Stimulated Emission of Radiation: Quantum Generation of Coherent Surface Plasmons in Nanosystems // Physical Review Letters. 2003. Vol. 90. P. 027402-1-027402-4.
6. Parfenyev M., Vergeles S. S. Intensity-Dependent Frequency Shift in Surface Plasmon Amplification by Stimulated Emission of Radiation // Physical Review A. 2012. Vol. 86. P. 043824-1-043824-10.
7. Stockman M. I. Spaser as Nanoscale Quantum Generator and Ultrafast Amplifier // Journal of Optics. 2010. Vol. 12. P. 024004-1-024004-13.
8. Stockman M. I. Spasers Explained // Nature Photonics. 2008. Vol. 2. P. 327-329.

ELECTROMAGNETIC WAVE AMPLIFICATION IN COMPOSITE STRUCTURES WITH COMPLEX SHAPE INCLUSIONS

Golovkina Mariya Vilevna, Ph. D. in Physical-Mathematical Sciences

Obukhovich Tat'yana Evgen'evna

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
nauka77@yandex.ru

The paper investigates the spectral characteristics of nanocomposite structure comprising spherical shape inclusions with metal shell. The possibility of controlling plasmon resonance position through changing the radius of nucleus and nanoparticle shell thickness is considered. The features of nanoparticles working in amplification mode are studied. The comparison with the electrodynamic parameters of spherical particles with nanoshell working in SPASER (Surface Plasmon Amplification by Stimulated Emission of Radiation) mode is carried out. The obtained results can be used for creating ultra-fast switches and processors.

Key words and phrases: nanoparticle with shell; plasmon resonance; amplification; SPASER (Surface Plasmon Amplification by Stimulated Emission of Radiation); nanocomposite structure.