

Многослойные одномерно-периодические поглощающие структуры оптического диапазона

А.М. Лерер, Е.В. Головачева, П.В. Махно, В.В. Махно, А.Б. Клещенок

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: Описаны тенденции развития поглощающих материалов. Приведены результаты расчета диаграмм рассеяния и отражения многослойных структур. Рассчитаны оптимальные параметры структур для наблюдения наибольшего эффекта поглощения. А также анализ полученных теоретических расчетов.

Ключевые слова: резонансное поглощение, метаматериалы, плазмоны, нанофотоника, наноструктуры, коэффициент отражения.

Поглотители электромагнитных волн (ЭМ) представляют собой устройства, в которых падающее излучение на рабочих длинах волн может эффективно поглощаться, а затем трансформироваться в тепловую или другие виды энергии. Электромагнитные поглотители в последнее время получили широкое распространение во многих областях. Серия плазмонных и метаматериальных структур может работать в качестве эффективных узкополосных поглотителей за счет возбуждения плазмонных или фотонных резонансов, обеспечивая большой потенциал применения при проектировании селективных тепловых излучателей и т.д. В других приложениях, таких как преобразование солнечной энергии и фотонное обнаружение, требуется, чтобы полоса пропускания света была достаточно широкой. Для выполнения этого условия были предложены различные механизмы широкополосного поглощения, таких как соединение нескольких резонансов вместе, замедление света анизотропными метаматериалами, использование материалов с высокими потерями и так далее.

Массивы металлических элементов с периодичностью порядка длины волны при освещении источником белого света на оптических частотах в спектрах отражения обладают резонансными свойствами [1]. Они поглощают свет в основном за счет возбуждения поверхностных плазмонов поляритонов (ППП), которые представляют собой коллективные колебания

свободных электронов, поддерживаемых на границе раздела между металлом и диэлектриком [2]. В связи с возбуждением ППП, падающая энергия может быть плотно локализована в ближней зоне так, что падающий свет может быть полностью поглощен на определенных длинах волн металло-диэлектрических структур со специально разработанной геометрией. Существуют различные типы конфигураций, используемые в качестве ЭМ-поглотителей, такие как пластинчатые решетки [3], выпуклые канавки [4], сферические пустоты [5], массивы эллипсов [6]. Эти поглотители сделаны из золота и серебра, реже меди, и связаны с плазмоникой тем что содержат интересные физические явления, обусловленные плоскими или локализованными ППП [7].

Метаматериалы - искусственные сборки структурированных элементов субволновых размеров (т.е. гораздо меньше, чем длина волны падающих волн) [8]. Эффективная диэлектрическая и магнитная проницаемость которых может изменяться в широких пределах, и в результате могут быть достигнуты различные уникальные свойства, которые не доступны в природе. Устройства на метаматериалах обладают потерями поглощения за счет мнимой части оптических показателей, ухудшая производительность в большинстве приложений, таких как супер-разрешение изображения, зондирование и т.д. Но потери поглощения становятся выгодными для ЭМ - поглотителей, и высокий уровень поглощения может быть получен с помощью изменения и расчета геометрии структурированных элементов [9]. В 2008 году идеальный поглотитель ЭМ на основе метаматериалов впервые был представлен в [10]. Таким образом, поглотители получили дальнейшее развитие в меньшем масштабе и коэффициентом поглощения близком к единице [11]. В оптическом диапазоне метаматериалы, образованные из металлических субволновых структур, иногда называют плазмонными метаматериалами, когда

возбуждение локализованных мод ППП имеет важное значение в процессе поглощения света [12]. С развитием современных технологий возможно создание метаматериалов меньших размеров и большим коэффициентом поглощения для повышения эффективности существующих устройств.

Перед применением метаматериалов необходимо предварительное исследование их свойств в зависимости от металлов и диэлектриков, входящих в их состав, от конфигурации и геометрических размеров. Проведение таких расчетов – сложная электродинамическая задача, трудоёмкость которой состоит не только в расчете сложной геометрии, но и в исследуемой области частот, в которой размеры элементов структуры соизмеримы с длиной волны [13]. Поэтому применение приближенных асимптотических методов затруднено и актуальным является расчет структур методом интегральных уравнений [7, 13, 14].

Цель работы – исследование многослойных одномерно-периодических поглощающих структур в оптическом диапазоне.

В [7] описан метод исследования двумерно-периодических наноплазмонных планарных структур: методом Галеркина получено строгое решение векторного интегро-дифференциального уравнения для металлодиэлектрических структур. Эффект полного поглощения в оптических решетках, содержащих тонкие металлические пленки, исследован в [15].

На примере 4-х слойной структуры были проанализированы различные конфигурации и установлено, что эффект резонансного поглощения наиболее ярко проявляется при некоторых оптимальных для данной структуры параметрах.

В результате расчётов определено, что соотношение 4:3 между периодом и шириной зуба ZnO решетки демонстрирует наивысший уровень потерь в резонансе (рассмотрены периоды от 100 до 500 нм). Высота

согласующих элементов, на которой наблюдаются максимальные потери в резонансе, в пределах 200-300 нм (расчеты производились для высот от 50 до 500 нм).

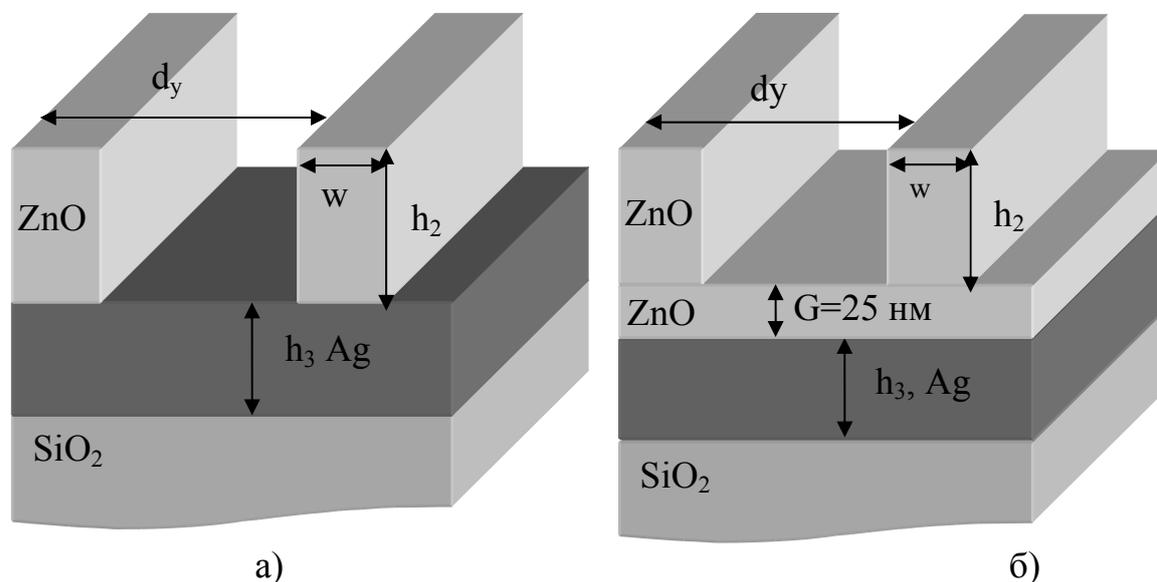


Рис.1. Дифракционная решетка из нанополосок а) 4-х слойная структура; б) 5-ти слойная структура

Толщина металлической пленки в пределах 20-30 нм также является оптимальной (рассмотрены толщины от 5 до 200 нм). В качестве металла рассмотрены несколько материалов (медь, серебро, золото), максимальный эффект в диапазоне длин волн от 600 до 1200 нм наблюдается для серебра. Следует подчеркнуть, что эффект наблюдается только для р-поляризованной волны, что свидетельствует о плазмонной природе эффекта (s-поляризованная волна не возбуждает поверхностных плазмонов).

На рис. 2 представлены расчеты для одной из оптимальных конфигураций (период 400 нм, ширина зуба 300 нм, высота зуба 200 нм, толщина серебряной пленки 20 нм).

На следующем рисунке (рис.3) представлены результаты для оптимального соотношения ширины согласующих элементов к периоду при различных толщинах серебряной плёнки. Толщина в 30 нм соответствует наибольшему эффекту.

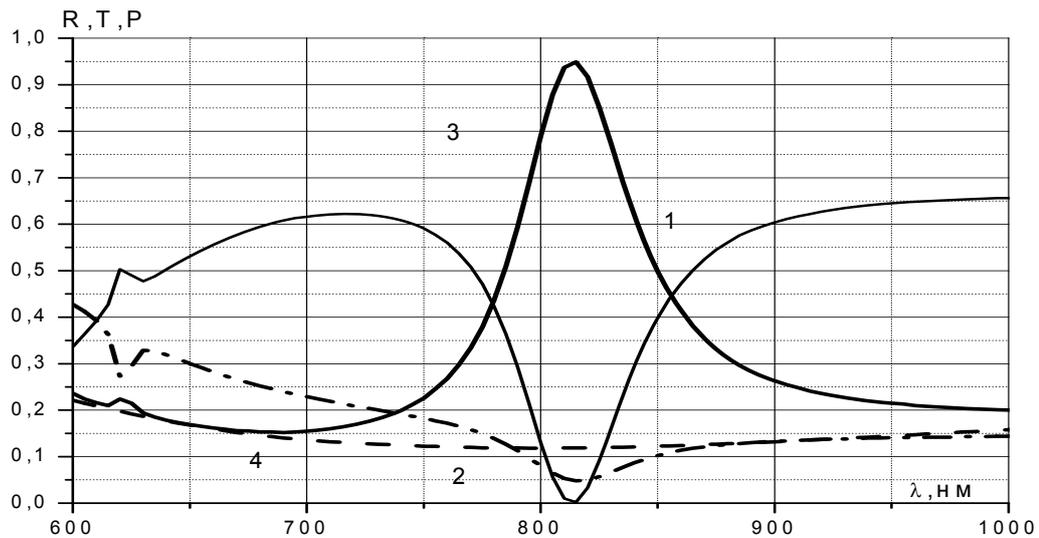


Рис. 2. Характеристики 1d решётки период $d_y=400$ нм, ширина зубцов $w=300$ нм, высота зубцов $h_2=200$ нм, толщина серебряной плёнки $h_3=20$ нм, подложка из SiO_2 . Кривые: 1,2,3- коэффициенты отражения R, прохождения T и поглощения P для р-поляризованной волны, кривая 4 – коэффициент P для s-поляризованной волны.

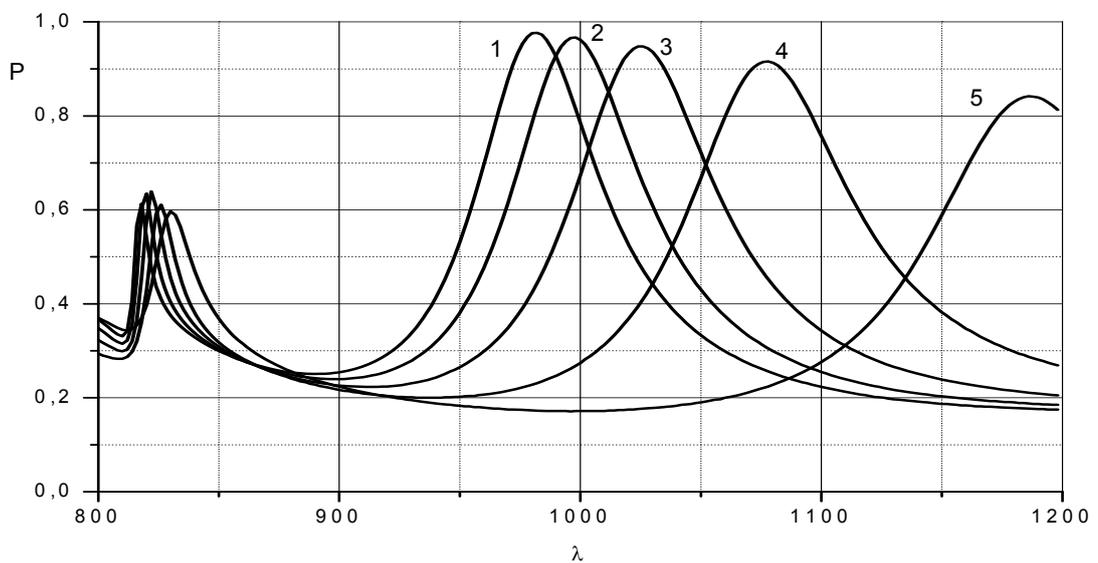


Рис. 3. Коэффициент поглощения для 4-х слойной структуры, период 540 нм, ширина согласующих элементов 405 нм, высота 300 нм, толщина серебряной подложки кривые 1 – 30 нм, 2 – 25 нм, 3 – 20 нм, 4 – 15 нм, 5 – 10 нм.

На рисунке (рис.4) рассмотрены результаты расчета 5-ти слойной структуры, которая изображена на рис. 1б. По сравнению с предыдущим вариантом добавлен слой ZnO между согласующими элементами из ZnO и серебряной плёнкой. Смысл рассмотрения дополнительного слоя заключается в том, что технологически изготовить такую решётку проще.

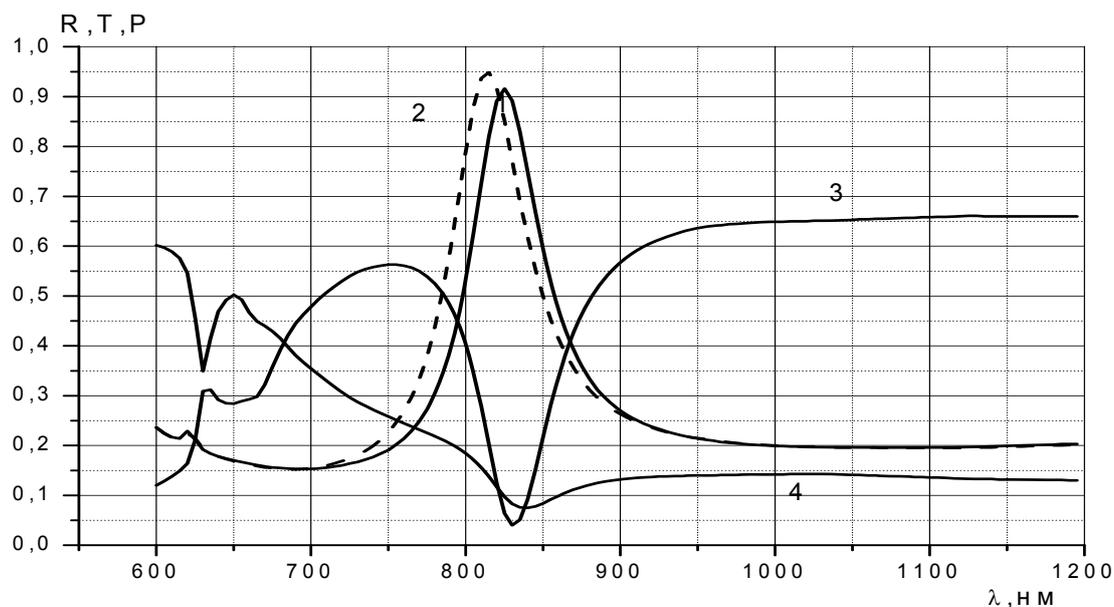


Рис. 4. Характеристики 1d решётки период $d_y=400$ нм, ширина зубцов $w=300$ нм, высота зубцов $h_2=175$ нм, толщина дополнительного слоя $G=25$ нм, толщина серебряной плёнки $h_3=20$ нм, подложка из SiO_2 . Кривые 1,2 – коэффициент поглощения для 5-ти и 4-х слойной структур, соответственно. Кривые 3,4 – коэффициенты отражения R и прохождения T для 5-ти слойной структуры.

Установлено, что величина резонансного эффекта обратно пропорциональна толщине дополнительного слоя, поэтому оптимальным балансом между экспериментальной технологией и резонансными свойствами следует выбрать толщину дополнительного слоя равной 25-30 нм. Из сравнения кривых 1 и 2 на рис. 4 видно, что падение уровня поглощения при введении дополнительного слоя ZnO толщиной 25 нм составляет не более 5%.

Выводы

Максимальный эффект поглощения в диапазоне длин волн от 600 до 1200 нм наблюдается для серебра. Эффект наблюдается только для р-поляризованной волны, что свидетельствует о плазмонной природе эффекта (s-поляризованная волна не возбуждает поверхностных плазмонов). Обнаружено оптимальное соотношение между шириной согласующих элементов в решётке и её периодом для достижения максимального эффекта резонансного поглощения, рассмотрено влияние на эффект толщины дополнительного слоя ZnO, показано, что при небольшой её величине эффект резонансного поглощения остаётся значительным.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектной части внутренних грантов ЮФУ 2014 – 2016 г.г., № 213.01.-07.2014/08ПЧВГ.

Литература

1. M.B. Sobnack, W.C. Tan, N.P. Wanstall, T.W. Preist, and J.R. Sambles, “Stationary Surface Plasmons on a Zero-Order Metal Grating” *Phys. Rev. Lett.* 80, 1998. pp. 5667–5670.

2. J.A. Schuller, E.S. Barnard, W. Cai, Y.C. Jun, J.S. White, and M.I. Brongersma, “Plasmonics for extreme light concentration and manipulation” *Nature Mater.* 9, 2010. pp. 193–204.

3. T. López-Ríos, D. Mendoza, F.J. García-Vidal, J. Sánchez-Dehesa, and B. Pannetier, “Surface Shape Resonances in Lamellar Metallic Gratings” *Phys. Rev. Lett.* 81, 1998. p. 665.

4. T. Søndergaard, S. M. Novikov, T. Holmgaard, R. L. Eriksen, J. Beermann, Z. Han, K. Pedersen, and S. I. Bozhevolnyi, “Plasmonic black gold by adiabatic nanofocusing and absorption of light in ultra-sharp convex grooves” *Nature Commun.* 3, 2012. p. 969.

5. M. Wang, C. Hu, M. Pu, C. Huang, Z. Zhao, Q. Feng, and X. Luo, “Conversion of broadband energy to narrowband emission through double-sided

metamaterials” Opt. Exp. 19, 2011. pp. 20642–20649.

6. C. Hu, L. Liu, Z. Zhao, X. Chen, and X. Luo, “Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound” Opt. Exp. 17, 2009. pp. 16745–16749.

7. Лерер А.М. Теоретическое исследование двумерно периодических наноплазмонных структур. // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. №11. С.1160-1169.

8. Фиговский О. Л., Нанотехнологии для новых материалов// Инженерный вестник Дона, 2012, №3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/1048.

9. C. M. Watts, X. Liu, and W. J. Padilla, “Metamaterial Electromagnetic Wave Absorbers” Adv. Mater. 24, 2012. OP98–OP120.

10. N.I. Landy, S. Sajuyigbe, J.J. Mock, D.R. Smith, and W.J. Padilla, “Perfect metamaterial absorber” Phys. Rev. Lett. 100, 2008. p. 207402.

11. J.Yang, X.Hu, X.Li, Z.Liu, X.Jiang, and J.Zi, “Cancellation of reflection and transmission at metamaterial surfaces” Opt. Lett. 35, 2010. pp. 16–18.

12. J. Hao, J. Wang, X. Liu, W.J. Padilla, L. Zhou, and M. Qiu, “High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial” Appl. Phys. Lett. 96, 2010. p. 251104.

13. Е.В. Головачева, А.М. Лерер, П.В. Махно, Г.П. Синявский. Дифракция электромагнитных волн оптического диапазона на нановибраторе, расположенном на границе раздела диэлектриков // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т. 16. №5. с. 9–14.

14. А.М. Лерер, Головачева Е.В., Е.И. Грибникова, И.Н. Иванова, А.Б. Клещенков. Неотражающие оптические решетки на новых плазмонных материалах // Инженерный вестник Дона, 2016, №2 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3608.

15. Лерер А.М., Цветянский Е.А. Теоретическое исследование резонансно поглощающих дифракционных решеток. // Письма в журнал технической физики. 2012. Т.38. вып.21. С.77-81.

References

1. M. B. Sobnack, W. C. Tan, N. P. Wanstall, T. W. Preist, and J. R. Sambles, *Phys. Rev. Lett.* 80, 1998. pp. 5667–5670.
 2. J. A. Schuller, E. S. Barnard, W. Cai, Y. C. Jun, J. S. White, and M. I. Brongersma, *Nature Mater.* 9, 2010. pp. 193–204.
 3. T. López-Ríos, D. Mendoza, F. J. García-Vidal, J. Sánchez-Dehesa, and B. Pannetier, *Phys. Rev. Lett.* 81, 1998. pp. 665.
 4. T. Søndergaard, S. M. Novikov, T. Holmgaard, R. L. Eriksen, J. Beermann, Z. Han, K. Pedersen, and S. I. Bozhevolnyi, *Nature Commun.* 3, 2012. pp. 969.
 5. M. Wang, C. Hu, M. Pu, C. Huang, Z. Zhao, Q. Feng, and X. Luo, *Opt. Exp.* 19, 2011. pp. 20642–20649.
 6. C. Hu, L. Liu, Z. Zhao, X. Chen, and X. Luo, *Opt. Exp.* 17, 2009. pp. 16745–16749.
 7. A.M. Lehrer, *Radiotekhnika i jelektronika [Technology and Electronics]*. 2012. V. 57. №11. p. 1160-1169.
 8. O.L. Figovskij. *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*, 2012, №3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/1048.
 9. C. M. Watts, X. Liu, and W. J. Padilla, *Adv. Mater.* 24, 2012. OP98–OP120.
 10. N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, and W. J. Padilla, *Phys. Rev. Lett.* 100, 2008. pp. 207402.
 11. J. Yang, X. Hu, X. Li, Z. Liu, X. Jiang, and J. Zi, *Opt. Lett.* 35, 2010. pp. 16–18.
 12. J. Hao, J. Wang, X. Liu, W. J. Padilla, L. Zhou, and M. Qiu, *Appl. Phys. Lett.* 96, 2010. pp. 251104.
-



13. E.V. Golovacheva, A.M. Lehrer, P.V. Makhno, G.P. Sinyavsky. Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy. 2011. V. 16. №5. p. 9-14.

14. A.M. Lehrer, E.V. Golovacheva, E.I. Gribnikova, I.N. Ivanova, A.B. Kleshchenkov. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №2 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3608.

15. A.M. Lerer, E.A. Tsvetyansky. Pis'ma v zhurnal tehničeskoj fiziki. 2012. V.38. №21. p. 77-81.