

Метод матрицы рассеяния и оптические свойства фотонно-кристаллических слоев и метаматериалов

Н.А. Гиппиус, С.Г. Тиходеев
Отдел колебаний ИОФ РАН

В последние десятилетия существенный интерес исследователей привлекают оптические свойства фотонных кристаллов и метаматериалов. Поэтому весьма важно иметь надежные теоретические методы их исследования. Одним из самых мощных методов решения уравнений Максвелла для сложных многокомпонентных структур является матрица рассеяния.

Цикл работ посвящен развитию и применению метода матрицы рассеяния для теоретического исследования оптических свойств фотонно-кристаллических слоев и метаматериалов. Цикл состоит из 14 работ, опубликованных в 2004-2009 годах в ведущих рецензируемых журналах (ФТТ, УФН, Известия РАН, Phys. Rev. Lett., Phys. Rev. B, Appl. Phys. Lett., Nano Lett.). На основе этих работ было сделано несколько докладов на семинаре ИОФ РАН (13.1.2003, 26.01.2004, 15.05.2006, 14.03.2007, 28.04.2008, поставлен доклад на 05.10.2009), более 10 (20) приглашенных (устных) докладов на Российских и Международных конференциях, а также два доклада на Сессии ОФН РАН «Наноплазмоника и метаматериалы» 27.04.2009.

Статьи [1,2] посвящены теоретическому развитию метода матрицы рассеяния.

На основе свойств унитарности и обратимости матрицы рассеяния, проанализирована симметрия оптических свойств фотонно-кристаллических структур со сложной элементарной ячейкой, не имеющей зеркальной симметрии. Проанализированы резонансные свойства оптического отклика и развито весьма эффективное резонансное приближение для матрицы рассеяния. Теоретически, в формализме матрицы рассеяния, проанализированы причины возникновения явления аномального полного резонансного отражения света от фотонно-кристаллических слоев с произвольно сложной элементарной ячейкой [1].

В работе [2] решена проблема улучшения сходимости метода матрицы рассеяния для металл-диэлектрических структур, посредством использования правил факторизации, адаптивного пространственного разрешения и выбора специальных криволинейных систем координат.

В работах [3-10] исследованы наноструктурированные металл-диэлектрические структуры: теоретически предсказано и затем обнаружено экспериментально (совместно с экспериментальным коллективом из Германии) образование плазмон-волноводных поляритонов в наноструктурированных металл-диэлектрических системах.

Теоретически исследованы свойства новых квазичастиц в фотонно-кристаллических слоях, содержащих металлические наноструктуры - волноводно-плазмонных поляритонов. Рассчитаны законы дисперсии, времена жизни и локальные распределения электромагнитных полей. Результаты расчетов подтверждены экспериментально [3].

Теоретически исследовано распределение электромагнитного поля в ближневолновой области резонансных фотонных мод в квазидвумерных волноводных фотонно-кристаллических слоях с наноструктурированными металлами. В частности, показано, что

при образовании волноводно-плазмонного поляритона максимумы потерь (как за счет поглощения в металле, так и радиационных) обусловлены резонансной раскачкой электромагнитного поля, в области металлической наноструктуры отвечающего локализованному плазмону, а в области волновода – стоячей волне, образованной Брэгговскими волноводными модами, с пучностями на наноструктурах [4].

Теоретически, в рамках метода матрицы рассеяния, исследованы сверхрешетки, получающиеся из одномерных металло-диэлектрических фотонно-кристаллических слоев (состоящих из металлических нанонитей на диэлектрическом волноводе) путем введения в них периодически повторяющихся дефектов смещения нанонитей. Показано, что резонансные частоты возникающих квазиволноводных мод определяются обратными векторами сверхрешетки, а их интенсивность в оптических спектрах определяется структурным фактором сверхпериода (с дефектами). При поляризации падающей волны перпендикулярно металлическим нанонитям благодаря этому возникает возможность управлять взаимодействием Брэгговских резонансов квазиволноводных мод с локализованными в нанонитях плазмонами и перестраивать оптические спектры в широких пределах. Результаты расчетов подтверждены экспериментами [5].

Теоретически, в рамках метода матрицы рассеяния, исследованы эффекты взаимодействия между локализованными и делокализованными плазмонами в многослойном металло-диэлектрическом фотонно-кристаллическом слое, содержащем решетку из металлических (золотых) нанонитей, слой диэлектрика и металлический (серебряный) нанослой. В результате взаимодействия возникают гибридные плазмоны, модифицируются оптические спектры системы. Проанализированы свойства гибридных плазмонов, показано, что среди возникающих резонансов есть магнитные. Таким образом, система демонстрирует магнито-активность, и эффективная магнитная восприимчивость становится отлична от единицы, $\mu \neq 1$. Результаты расчетов подтверждены экспериментами, проведенными в институте им. Макса Планка, г. Штуттгарт, университете г. Штуттгарта, Германия и в Швейцарском технологическом институте, Лозанна, Швейцария [6].

Проанализировано влияние ближне-полевого связывания на образование коллективных плазмонных мод в многослойных решетках металлических нанонитей. Показано, что в результате такого взаимодействия оптически активные и неактивные собственные плазмонные моды интерферируют и возникающие изменения спектра можно контролировать изменением расстояния и сдвига между подрешетками нанонитей. Обнаружено, что при определенных положениях подрешеток спектральные положения оптически активной и неактивной мод меняются местами. Результаты расчетов методом матрицы рассеяния находятся в согласии с проведенными экспериментами [7].

При помощи метода матрицы рассеяния исследовано влияние асимметричности плазмонного метаматериала, изготовленного из золотых нанонитей. Обнаружено, что оптически не активные (темные) локализованные плазмоны в нитях начинают связываться с излучением, если в систему вводится нарушенная симметрия. Такие локализованные плазмоны обычно являются резонансами более высокого порядка и связаны с излучением слабо. Обычно такие моды имеют большее время жизни и небольшие потери на поглощение. Их свойства определяются ближне-полевыми эффектами. Результаты расчетов подтверждены экспериментами, проведенными в институте им. Макса Планка, г. Штуттгарт, и университете г. Штуттгарта, Германия и Лаборатории метрологии и нанофотоники, Эколь Политехник Федераль, Лозанна, Швейцария [8].

Предложена и оптимизирована схема плазмонного инфракрасного детектора на основе структуры металл-полупроводник-металл, с решеткой металлических

взаимопроникающих электродов и одиночной GaInNAs квантовой ямой в качестве детектора. Возбуждаемые падающим ИК излучением плазмоны в решетке электродов приводят к усилению действующего поля в области квантовой ямы, в результате возрастает чувствительность детектора и уменьшается его время отклика. Например, при периоде решетки электродов 820 нм и ширине каждого электрода 460 нм, коэффициент поглощения квантовой ямой возрастает в 16 раз, по сравнению со случаем без резонансного усиления поля [9].

Теоретически рассчитан и экспериментально реализован оптический (для ближнего ИК) переключатель/ограничитель на основе жидко-кристаллического волновода с Cr дифракционной решеткой на поверхности. При облучении непрерывным лазером с интенсивностью выше критической, коэффициент пропускания устройства резко уменьшался вследствие резонансного перегрева жидкого кристалла. В итоге резонансная частота фотонного кристалла сдвигалась, и коэффициент пропускания резко уменьшался [10].

В работах [11-13] исследован эффективный электромагнитный отклик тонких слоев метаматериалов, включая хиральные. Наконец, в работе [14], выполненной недавно совместно с экспериментальной группой из Японии, обнаружен новый интересный эффект овозникновения поперечного фото-напряжения в метаматериале под действием циркулярно-поляризованного света.

При помощи метода матрицы рассеяния проанализированы оптические свойства слоев метаматериалов. Обсуждаются свойства эффективных ϵ , μ , и параметра бианизотропии ξ , восстанавливаемых из коэффициентов пропускания и отражения слоев метаматериалов конечной толщины при помощи обращенных формул Френеля. Показано, что оптический отклик наноструктурированных металл-диэлектрических метаматериалов является сильно нелокальным и диссипативным [11,12]. В частности, получающиеся таким образом эффективные ϵ , μ , и параметр бианизотропии ξ зависят не только от самого слоя, но и диэлектрического окружения. Например, параметр бианизотропии зануляется при симметричном диэлектрическом окружении слоя.

В работе [13] предложен весьма эффективный способ вычисления собственных распадных мод фотонно-кристаллических слоев и метаматериалов.

Наконец, в недавно опубликованной работе [14] обнаружен новый интересный эффект образования поперечного фото-напряжения в тонком слое наноструктурированного металл-диэлектрического метаматериала под действием циркулярно-поляризованного света.

В целом, в данном цикле работ развит мощный теоретический метод матрицы рассеяния и применен для описания линейных и нелинейных оптических процессов в наноструктурированных фотонных кристаллах и метаматериалах.

Список представленных на конкурс работ

1. **N. A. Gippius, S. G. Tikhodeev**, and Teruya Ishihara, «Optical properties of photonic crystal slabs with an asymmetrical unit cell», **Phys. Rev. B** **72**, 045138 (2005).
2. T. Weiss, G. Granet, **N. A. Gippius, S. G. Tikhodeev**, and H. Giessen, «Matched coordinates and adaptive spatial resolution in the Fourier modal method», **Opt. Express** **17** (10), 8051-8061 (2009).
3. **Н.А. Гиппиус, С.Г. Тиходеев**, А. Крист, Й. Куль и Х. Гиссен, «Плазмонно-волноводные поляритоны в металло-диэлектрических фотонно-кристаллических слоях», **ФТТ** **47**, 139–143 (2005)
4. A. Christ, T. Zentgraf, J. Kuhl, **N. A. Gippius, S. G. Tikhodeev**, and H. Giessen, «Optical properties of planar metallic photonic crystal structures: Experiment and theory», **Phys. Rev. B** **70**, 125113, pp. 1-15 (2004).
5. T. Zentgraf, A. Christ, J. Kuhl, **N. A. Gippius, S. G. Tikhodeev**, D. Nau, and H. Giessen “Metallodielectric photonic crystal superlattices: Influence of periodic defects on transmission properties”, **Phys. Rev. B**, **73**, 115103 (2006).
6. A. Christ, T. Zentgraf, **S. G. Tikhodeev, N. A. Gippius**, J. Kuhl, and H. Giessen, “Controlling the interaction between localized and delocalized surface plasmon modes: Experiment and numerical calculation”, **Phys. Rev. B**, **74**, 155435 (2006).
7. A. Christ, Y. Ekinici, H. H. Solak, **N. A. Gippius, S. G. Tikhodeev**, and O.J.F. Martin, “Controlling the Fano interference in a plasmonic lattice”, **Phys. Rev. B (Rapid Comm.)** **76**, 201405(R) (2007).
8. A. Christ, O. J. F. Martin, Y. Ekinici, **N. A. Gippius, and S. G. Tikhodeev**, "Symmetry breaking in a plasmonic metamaterial at optical wavelength", **Nano Letters** **8**, 2171-2175 (2008).
9. C. Kamaga, Y. Segawa, **S. Tikhodeev**, and T. Ishihara, “Optical fuse effect in a tunable liquid crystal waveguide with a Cr grating coupler”, **Appl. Phys. Lett.** **91**, 173119 (2007).
10. J. Hetterich, G. Bastian, **N. A. Gippius, S. G. Tikhodeev**, G. von Plessen, U. Lemmer, “Optimized Design of Plasmonic MSM Photodetector”, **IEEE Journal of Quantum Electronics** **43**, 855-859 (2007).
11. **С. Г. Тиходеев**, “Эффективный электромагнитный отклик наноструктурированных металло-диэлектрических метаматериалов”, **Известия РАН** **73**, 95-97 (2009).
12. **С. Г. Тиходеев, Н. А. Гиппиус**, “Плазмон-поляритонные эффекты в наноструктурированных металл-диэлектрических фотонных кристаллах и метаматериалах”, **УФН** **179**, 1003-1007 (2009).
13. **Н. А. Гиппиус, С. Г. Тиходеев**, “Применение метода матрицы рассеяния для расчета оптических свойств метаматериалов”, **УФН** **179**, 1027-1030 (2009).
14. T. Hatano, T. Ishihara, **S. G. Tikhodeev and N. A. Gippius**, “Transverse Photovoltage Induced by Circularly Polarized Light”, **Phys. Rev. Lett.** **103**, 103906 (2009).