

Авдеева Анастасия Юрьевна

АННОТАЦИЯ

Научно-квалификационной работы (диссертации)

«ОПТИЧЕСКИЕ ЛОКАЛИЗОВАННЫЕ МОДЫ В РЕЗОНАНСНЫХ ФОТОННОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ»

01.04.05 «Оптика»

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа посвящена теоретическому исследованию спектральных и поляризационных свойств одномерных фотоннокристаллических структур, содержащих включения с сильным резонансным откликом в оптическом диапазоне частот, изучению особенностей распространения и локализации света в таких средах. Рассматривается возможность эффективного управления характеристиками локализованных мод посредством варьирования структурными и геометрическими параметрами системы.

Актуальность.

Явление резонанса (франц. Resonance – от лат. Resono – звучу в ответ, откликаюсь) впервые было описано в 1602 г. в трудах Галилео Галилея, посвященных работе маятника [1]. Сегодня явление резонанса лежит в основе работы музыкальных инструментов, измерительных приборов, томографах, микропроцессорах. В оптическом диапазоне, самым простым оптическим резонатором, является интерферометр Фабри-Перо. В отличие от металлических зеркал, используемых в резонаторе Фабри-Перо, фотонные кристаллы (ФК) – искусственные структуры с периодически меняющейся в пространстве диэлектрической проницаемостью (ДП), могут обеспечивать отражение без потерь на поглощение, за счет конструктивной интерференции. Подобные структуры изучались задолго до введения

концепции ФК [2-3]. Собственный энергетический спектр ФК имеет фотонную запрещённую зону (ФЗЗ) [4], что позволяет использовать кристаллы в качестве «оптических полупроводников» для создания принципиально новых сред передачи и обработки информации, в которых, в отличие от полупроводниковой электроники, носителем информации является фотон, а не электрон. В связи с этим, управление положением ФЗЗ и областей аномального возрастания плотности фотонных состояний, является актуальной задачей современной фотоники [5].

На основе ФК материалов созданы новые типы волноводов [6], предложены способы увеличения эффективности нелинейно-оптических процессов [7-9], обсуждаются идеи по развитию элементной базы оптоэлектронной техники и информационных технологий [10].

Новые возможности появляются, если в качестве структурных элементов использовать среды с сильным резонансным откликом. В качестве резонансных материалов могут выступать металл-диэлектрические наноконпозиты (НК), представляющие собой диэлектрическую матрицу с равномерно распределёнными по ее объёму металлическими наночастицами [11-12]. Положение плазмонного резонанса, а также интервал частот, в пределах которого наноконпозит подобен металлу, определяются эффективной ДП, которая зависит от оптических свойств исходных материалов, концентрации, формы, ориентации и размера нановключений. Металл-диэлектрические наноконпозиты могут выступать и в качестве материалов с близкой к нулю эффективной ДП. В последнее время такие материалы вызывают значительный интерес [13].

Также в качестве материала с сильным оптическим откликом могут выступать - атомные или молекулярные газы [14-15]. В практических приложениях такие структуры могут быть использованы для создания узкополосных фильтров с перестраиваемыми характеристиками.

Важным свойством ФК является высокая степень локализации электромагнитных волн на дефектах решетки [16-17]. В этом случае в ФЗЗ

ФК возникают дефектные уровни энергии. На основе ФК с дефектными модами созданы новые типы нанорезонаторов с высокой добротностью [18-19], низкопороговые лазеры [20-21].

Наряду с исследованием объемных возбуждений ФК, активно изучаются поверхностные электромагнитные волны (ПЭВ). В последние годы в фотонике сформировалось новое направление, посвященное исследованию оптических таммовских состояний (ОТС), иначе, таммовских плазмон поляритонов (ТПП) - оптическим аналогам эффекта локализации электронной плотности на границе периодического потенциала [22], впервые предсказанных И.Е. Таммом. ТПП проявляются в виде локализации электромагнитного поля на границе ФК - среда с отрицательной диэлектрической проницаемостью [23] либо между двумя различными ФК, имеющими перекрывающиеся запрещенные зоны без использования призм и решеток. Экспериментально ТПП проявляется в виде узкого резонанса в оптическом спектре пропускания или отражения образца на длинах волн внутри ФЗЗ [24].

Пристальное внимание уделяется гибридным модам, образованным при взаимодействии локализованных оптических мод различной природы. В работах [25-26] была исследована теоретически и экспериментально продемонстрирована возможность образования гибридных ТПП-экситонных мод. Подобные гибридные моды легли в основу источников одиночных фотонов, экспериментально реализованных в [27]. Новые возможности формирования гибридных мод и управления спектральными свойствами ФК появляются если использовать металл-диэлектрический нанокompозит (НК) [28-31].

Таким образом, исследования оптических свойств фотоннокристаллических структур на основе материалов с сильным резонансным откликом, предсказание новых эффективных способов управления спектральными и поляризационными свойствами таких материалов – актуальная и своевременная задача, обусловленная

необходимостью поиска современных материалов с новыми перспективными свойствами для создания устройств оптоэлектроники и фотоники.

Цели и задачи диссертационной работы.

Целью настоящей работы является изучение локализованных мод в одномерных фотоннокристаллических структурах, содержащих слои с сильным оптическим откликом, предсказание новых эффективных способов управления оптическими и спектральными свойствами таких сред.

Для достижения поставленной **цели** предлагалось решить следующие **задачи**:

1. Изучить спектральные свойства одномерного фотонного кристалла с дефектным слоем нанокompозита, который состоит из серебряных наночастиц, взвешенных в прозрачной матрице, и характеризуется эффективной ДП. Получить расщепление дефектной моды на частоте резонанса нанокompозита и установить зависимость величины расщепления от концентрации наночастиц в дефекте, толщины дефектного слоя. Исследовать перестройку спектра пропускания, когда резонансная частота нанокompозита оказывается, в зависимости от угла падения, вблизи края запрещенной зоны, либо попадает в область сплошного спектра.
2. Установить особенности спектральных проявлений расщепления дефектной моды для волн s- и p-поляризации в зависимости от угла падения и концентрации наночастиц. Изучить особенности спектров пропускания, отражения и поглощения при угле падения равном углу Брюстера затравочного фотонного кристалла.
3. Продемонстрировать существование гибридных оптических мод, обусловленных связью между микрорезонаторными модами ФК с нанокompозитным дефектом и ТПП на границе кристалла и металлической

пленки. Показать возможности управления спектральным положением гибридных мод.

4. Исследовать спектр пропускания одномерного ФК, представляющего собой слоистую среду, состоящую из чередующихся изотропного слоя и слоя резонансно-поглощающего газа. Определить влияние параметров резонансного газа на спектральные свойства для волн s- и p-поляризации.

Научная новизна

диссертационной работы состоит в следующем:

1) *Впервые* продемонстрирован эффект расщепления дефектной моды ФК при совпадении ее частоты с резонансной частотой нанокompозита. Установлена существенная зависимость величины расщепления от объемной доли наночастиц в матрице нанокompозита.

2) *Показано*, что, когда резонансная частота оказывается, в зависимости от угла падения, вблизи края запрещенной зоны, либо попадает в область сплошного спектра, в спектре пропускания, соответственно, появляются дополнительные полосы пропускания, либо запрещенные частотные области.

3) *Впервые* продемонстрировано существование гибридных оптических мод, обусловленных связью между микрорезонаторными модами брэгговского отражателя с нанокompозитным дефектом и ТПП, возбуждаемым на границе ФК и тонкой металлической пленки.

4) *Установлена* высокая чувствительность спектральных свойств одномерного РФК наполненного резонансно-поглощающим газом, от угла падения света на слоистую среду для волн p- и s-поляризации. Показано появление дополнительных узких полос пропускания в ЗЗ и дополнительных запрещенных областей в спектре РФК.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) Эффект расщепления дефектной моды ФК при совпадении ее с резонансной частотой нанокompозита. Величина расщепления зависит от концентрации наночастиц в дефектном слое.
- 2) Перестройка зонной структуры спектра пропускания ФК обусловленная смешиванием резонансной моды нанокompозита с фотонными модами сплошного спектра.
- 3) Гибридные оптические моды, обусловленные связью микрорезонаторных мод брэгговского отражателя с нанокompозитным дефектом и ТПП, возбужденным на границе ФК и тонкой металлической пленки, существуют, и проявляются в спектре пропускания в виде расталкивающихся резонансов.
- 4) В одномерном ФК наполненном резонансно-поглощающим газом, в спектре пропускания реализуются, в зависимости от положения резонансной частоты, узкие полосы пропускания в ЗЗ, либо дополнительные запрещенные области частот в сплошном спектре. Управление спектром пропускания возможно за счет вариации угла падения света на слоистую среду, а также за счет изменения плотности резонансного газа.

Теоретическая и практическая значимость исследований.

Теоретическая значимость исследования заключается в углублении понимания резонансных эффектов в одномерных фотоннокристаллических структурах на основе материалов с сильным оптическим откликом. В ходе диссертационных исследований разработано программное обеспечение для

моделирования и предсказания оптических свойств ФК на основе материалов с резонансным характером ДП.

Практическая значимость исследования заключается в расширении возможностей управления спектральным положением микрорезонаторных и гибридных мод. В частности, предложена схематическая модель структуры ФК с дефектным слоем нанокompозита, в которой частота плазмонного резонанса совмещена с частотой резонанса брэгговского отражателя. Показано, что величиной расщепления можно эффективно управлять варьируя параметры ФК и параметры нанокompозита. При ограничении такой фотоннокристаллической структуры тонкой пленкой серебра, возможна последовательная гибридизация расщепившихся микрорезонаторных мод и ТПП образованным на границе ФК-пленка. Данное взаимодействие проявляется наличием в спектре пропускания структуры квазипересечения пиков пропускания. Предложена модель ФК с изотропным слоем прилегающего к металлу в форме клина, при этом положением ТПП в запрещенной зоне можно эффективно управлять, сдвигая пучок падающего света вдоль клина и тем самым варьируя толщину первого слоя ФК.

Спектральные свойства ФК можно дополнительно существенно изменять, помещая внутрь периодической структуры резонансно-поглощающий газ. При частоте падающего света равной резонансной частоте газа интенсивность проходящего света падает до нуля. В силу этого имеются возможности для дополнительного управления поляризацией и пропусканием света. Такие РФК могут быть использованы в качестве узкополосных фильтров и ультрарефрактивных спектральных призм с управляемыми характеристиками.

Таким образом, результаты, полученные в настоящей работе могут быть использованы для создания оптоэлектронных устройств с улучшенными спектральными характеристиками.

Публикации автора по теме диссертации

1. С.Я. Ветров, А.Ю. Авдеева, И.В. Тимофеев. “Спектральные свойства одномерного резонансного фотонного кристалла,” Оптика и спектроскопия. том 206, №5 с.840-844 (2009)
2. С.Я. Ветров, А.Ю. Авдеева, И.В. Тимофеев. “Управление спектром пропускания резонансного одномерного фотонного кристалла,” Оптика и спектроскопия. том 109, №1, с.1179-1184 (2010)
3. С.Я. Ветров, А.Ю. Авдеева, И.В. Тимофеев. “Особенности спектральных свойств одномерного фотонного кристалла с резонансным дефектным слоем нанокompозита” Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики (ЖЭТФ). Т. 140, вып.11 (2011)
4. С.Я. Ветров, Р.Г. Бикбаев, А.Ю. Авдеева, И.В. Тимофеев. “Прохождение света через одномерный фотонный кристалл с дефектным слоем с резонансной дисперсией,” Оптика и спектроскопия. том 113, №5, с.1-5 (2012)
5. Метаматериалы и структурно организованные среды для оптоэлектроники, СВЧ-техники и нанофотоники. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2013. - 367 с. : ил. - (Интеграционные проекты СО РАН : серия основана в 2003 г. / гл. ред. академик В.М. Фомин ; вып. 44). - Библиогр.: с. 348-365. - ISBN 978-5-7692-1310-6
6. S.Ya. Vetrov, A.Yu. Avdeeva, M.V. Pyatnov, I.V. Timofeev Hybrid tamm-cavity modes in photonic crystal with resonant nanocomposite defect layer. 2019

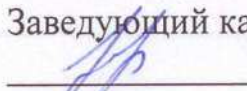
СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Le Opere di Galileo Galilei. Firenze: G. Barbero Editore, 1929-1939
2. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58, no. 20. P. 2059
3. Белотелов В. И., Звездин А. К. Фотонные кристаллы и другие метаматериалы. Москва: Бюро Квантум, 2006. Т. 94. С. 144. ISBN: 5-85843-059-0
4. Joannopoulos J. D., Johnson S. G., Winn J. N., Meade R. D. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light (Second Edition). Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2008. P. 304. ISBN: 0691124566
5. Шабанов В.Ф., Зырянов В.Я. (ред.). Фотонные кристаллы и нанокompозиты: структурообразование, оптические и диэлектрические свойства. Монография, Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2009г., 257
6. Желтиков А.М. УФН. 2000. Т. 170 № 11. С. 1203
7. Painter O., Zec R., Yariv A. et al. Science. 1999. Т. 264. P
8. Мартемьянов М.Г., Долгова Т.В., Федянин А.А. ЖЭТФ. 2004. Т. 125, вып.3. С. 527–542
9. Wong F., Zhu S.N., Li K.F. et al. Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. P. 071102
10. Busch K., Lölkes S., Wehrspohn R. B. and Föll H. Photonic Crystals: Advances in Design, Fabrication and Characterization. Weinheim: Wiley-VCH, 2004. 354
11. Oraevsky A. N., Protsenko I. E. Optical properties of heterogeneous media. Quantum Electronics. 2001. Vol. 31, no. 3. P. 252-256
12. Moiseev S. G., Ostatochnikov V. A., Sementsov D. I. Defect mode suppression in a photonic crystal structure with a resonance nanocomposite layer. Quantum Electronics. 2012. Vol. 42, no. 6. P. 557{560
13. Javani M. H., Stockman M. I. Real and Imaginary Properties of Epsilon-Near-Zero Materials. Physical Review Letters. 2016. Vol. 117, no. 10. P. 1-6

14. Желтиков А.М., Наумов А.Н., Баркер П., Майлс Р.Б. Оптика и спектр. 2000. Т. 89, № 2. С. 309–313
15. John S., Phys.Rev. Lett., 58, 2486 (1987). D.R. Smith, R. Dalichaouch, N.Kroll et.al., J.Opt.Soc.Am.B, 10, 314 (1993)
16. Желтиков А.М., Магницкий С.А., Тарасишин А.В., ЖЭТФ, 117, 691 (2000)
17. Artoni M. Rossa G. La, Bassani F. // Phys. Rev. E. 2005. V. 72. P. 046604
18. Han P., Wong H., Optics Zett. 29, 192 (2004)
19. Vuckovic J., Loncar M., Mabuchi H., et.al., Phys.Rev. E 65, 016608 (2001)
20. Akahane Y., Asono T., Song B-S, et.al. Science 284, 1819 (1999)
21. Painter O., Lee R. K, Yariv A. et al. Science 284, 1819 (1999)
22. Vinogradov A.P., Dorofeenko A.V., Merzlikin A.M., Lisyansky A.A. Surface states in photonic crystals. Physics-Uspekhi. 2010. Vol. 53, no. 3. P. 243-256
23. Kaliteevski M.A., Iorsh I., Brand S. et al. Tamm plasmon-polaritons: Possible electromagnetic states at the interface of a metal and a dielectric Bragg mirror. Physical Review B. 2007. Vol. 76, no. 16. P. 165415
24. Sasin M.E., Seisyan R.P., Kaliteevski M.A. et al. Tamm plasmon polaritons: Slow and spatially compact light. Applied Physics Letters. 2008. Vol. 92, no. 25. P. 251112
25. Kavokin A., Shelykh I., Malpuech G. Optical Tamm states for the fabrication of polariton lasers. Appl. Phys. Lett. 2005. Vol. 87, no. 26. P. 261105
26. Symonds C., Lemaître A., Homeyer E. et al. Emission of Tamm plasmon / exciton polaritons. Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 95, no. 15. P. 151114
27. Braun T., Baumann V., I O. et al. Enhanced single photon emission from positioned InP/GaInP quantum dots coupled to a confined Tamm-plasmon mode. Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 106, no. 4. P. 41113
28. Atwater H. A., Polman A. Plasmonics for improved photovoltaic devices. Nature Materials. 2010. Vol. 9, no. 3. P. 205

29. Markel V. A. Introduction to the Maxwell Garnett approximation: tutorial. *Journal of the Optical Society of America A*. —2016. Vol. 33, no. 7. P. 1244
30. Husaini S., Deych L., & Menon V. M. (2011). Plasmon-resonance-induced enhancement of the reflection band in a one-dimensional metal nanocomposite photonic crystal. *Optics letters*, 36(8), 1368-1370
31. Ветров С.Я., Авдеева А.Ю., Тимофеев И.В. *ЖЭТФ*. 2011. Т. 140. 4(10), 1-8

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт инженерной физики и радиоэлектроники
Базовая кафедра фотоники и лазерных технологий

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
 А.Н. Втюрин
« 02 » июля 2019 г.

1 Содержание содержания исследования 15
1.1 Фотонные кристаллы 15
1.2 Локализированные моды. Оптические тьюнковые структуры, гибридные
моды 18
1.3 Фотонно-кристаллические среды с сложным оптическим откликом 25

НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (ДИССЕРТАЦИЯ)

**Оптические локализованные моды
в резонансных фотоннокристаллических структурах**

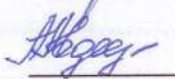
2 Описание 28
2.1 Матрица 28
2.2 Зависимость частоты локализованной моды ЭК от фактора заполнения и
положения резонансной частоты диэлектрических 31
Выводы 34

Научный руководитель




д.ф.-м.н., проф. С. Я. Ветров

Выпускник



А.Ю. Авдеева


2.07.2019 г.

Красноярск 2019