

Отзыв официального оппонента на диссертационную работу Бикбаева Р. Г. «ТАММОВСКИЕ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНЫ В РЕЗОНАНСНЫХ ФОТОННОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.05 (оптика) и 01.04.07 (физика конденсированного состояния)

В последнее время большой научный и практический интерес вызывают пространственно-периодические структуры, диэлектрическая проницаемость которых промодулирована с периодом, сравнимым с длиной волны электромагнитного излучения, получившие название фотонных кристаллов (ФК). Это связано с возможностью использования их для различных научно-технических областей, таких как квантовая электроника, нанофотоника и оптоэлектроника. Теория распространения различного типа электромагнитных волн в таких структурах привлекательна своей аналогией с квантовой теорией электронов в кристаллах. В частности, наличие фотонных запрещенных зон в спектрах прохождения таких структур создает возможность эффективного управления как локальной интенсивностью волнового поля, так и прошедшим либо отраженным излучением.

Наряду с изучением объемных (не локализованных) волн, распространяющихся в ФК, интерес вызывают поверхностные (локализованные на границах раздела) электромагнитные волны. Особым типом таких волн является оптическое таммовское состояние, в котором поле экспоненциально затухает по обе стороны от границы раздела и вдоль оси, перпендикулярной границе, прекращаясь перенос энергии. В физике кристаллов существует аналог оптического таммовского состояния, в котором электронная плотность локализуется на границе периодического потенциала. В случае реализации такого возбуждения на границе ФК и среды с отрицательной диэлектрической проницаемостью его также называют таммовским плазмон-поляритоном (ТПП), поскольку поле излучения связывается с поверхностным плазмонным возбуждением. В последние годы активно проводятся экспериментальные и теоретические исследования подобных локализованных состояний. Исследуются различные структуры и материалы с нетривиальными дисперсионными свойствами с целью оптимизации оптических характеристик ТПП и создания условий их экспериментальной реализации.

Диссертационная работа Бикбаева Р.Г. посвящена исследованию особенностей формирования ТПП на границе ФК и материала с сильно выраженной частотной резонансной (и не только) дисперсией. В качестве

таких материалов автором рассматриваются изотропные и анизотропные металл-диэлектрические нанокомпозиты, металлические, пористые и гироидальные плазмонные пленки. Исследуется возможность эффективного управления оптическими свойствами ТПП за счет варьирования параметрами контактирующих с ФК резонансных сред. Проведенные в работе исследования расширяют представления не только о ТПП, но и о возможности использования резонансных материалов для их формирования, что делает тему диссертации актуальной.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографии и двух приложений. Общий объем диссертации 156 страницы, из них 135 страниц текста, включая 69 рисунков. Библиография включает 193 наименования на 21 странице.

Во **введении** приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертационного исследования, определены цели и задачи работы, аргументирована научная новизна, показана практическая значимость и достоверность полученных результатов, сформулированы защищаемые положения, показана апробация результатов работы.

В **первой главе** продемонстрирована аналогия между таммовским электронным состоянием и ТПП. Показано, что подобное сравнение возможно благодаря тому, что теория фотонных кристаллов описывает физические явления, основываясь на классических идеях квантовой механики и физики твердого тела. Также приведен литературный обзор по ТПП, экспериментальным и теоретическим методам их наблюдения и устройствам на их основе. Обсуждаются ключевые работы, посвященные металл-диэлектрическим нанокомпозитам, основным методам их получения, оптическим свойствам и применениям.

Во **второй главе** исследован ТПП, локализованный на границе фотонного кристалла и изотропного нанокомпозита, который состоит из диспергированных в прозрачной матрице металлических наноразмерных включений сферической формы и характеризуется эффективной резонансной диэлектрической проницаемостью. Решена задача расчета спектров пропускания, отражения и поглощения волн продольной и поперечной поляризаций в подобных структурах при нормальном падении света. Установлена существенная зависимость характеристик состояний, локализованных на краю фотонного кристалла, от объемной концентрации металлических частиц в пленке нанокомпозита и от ее толщины. Исследованы моды, образованные двумя связанными ТПП, локализованными на границах фотонного кристалла, сопряженного с двумя слоями нанокомпозита. Изучены особенности спектров ТПП, связанные с наличием

отрицательных и близких к нулю значений вещественной части эффективной диэлектрической проницаемости для частот видимой области спектра.

В **третьей главе** исследован ТПП, локализованный на краю фотонного кристалла, ограниченного с одной или с обеих сторон анизотропным нанокомпозитом, в котором металлические наноразмерные включения сфероидальной формы упорядочено ориентированы и имеют одинаковое для всех отношение «полуосей». Изучены спектральные особенности ТПП, обусловленные степенью вытянутости сфероидальных наночастиц и ориентацией электрического волнового поля относительно оптической оси нанокомпозита. Для случая расположения нанокомпозита с обеих сторон ФК выявлено расщепление частоты поляритона из-за снятия вырождения двух ТПП, локализованных на границах фотонного кристалла и нанокомпозита. Расщепление зависит от объемной доли сфероидов в нанокомпозите и отношения полярной и экваториальной полуосей сфероида. Установлено, что каждой из двух ортогональных поляризаций падающей волны отвечает свой характер зависимости расщепления от концентрации наночастиц, что делает спектры пропускания поляризационно чувствительными.

В **четвертой главе** теоретически и экспериментально исследованы спектральные свойства широкополосного ТПП, локализованного на границе брэгговского зеркала и тонкого металлического слоя. С помощью теории связанных мод предсказана возможность формирования локализованного состояния, найдены условия для осуществления максимальной связи падающего излучения с ТПП, получены выражения для энергетических коэффициентов прохождения и отражения на длине волны ТПП. Наряду с этим, для изготовленных ФК-структур с нанесенными на их поверхность пленками хрома различной толщины экспериментально получены спектры отражения и пропускания. Их анализ показал, что внутри запрещенной зоны брэгговского зеркала наблюдается интервал длин волн с близким к единице коэффициентом поглощения. Выявлена зависимость от толщины пленки хрома ширины запрещенной зоны и частоты ТПП, которая различна для ФК с низким и высоким показателем преломления первого (контактного) слоя.

В **пятой главе** исследованы ТПП, локализованные на границе фотонного кристалла и пористых плазмонных материалов. В частности, исследованы спектры пропускания и отражения ФК, ограниченного пленкой нанопористого серебра. Продемонстрирована возможность реализации двух ТПП в подобных структурах. Показано, что каждому локализованному состоянию соответствует свой интервал частот с отрицательной действительной частью эффективной диэлектрической проницаемости. Изучены особенности спектрального проявления ТПП в зависимости от концентрации пор в металлической матрице и от толщины пленки пористого

серебра. Также в главе исследованы свойства ТПП, локализованных на краю фотонного кристалла, ограниченного плазмонным слоем нанокompозита, представляющего собой металлическую пенообразную 3D структуру с диэлектрическим наполнителем (гироидальную среду). Изучены особенности локализации поля на частотах ТПП. Показано, что их спектральные свойства чувствительны к изменению показателя преломления наполнителя и угла падения света на структуру.

В **заключительной части** диссертации автором сформулированы полученные им основные научные результаты работы, в приложения вынесены теоретические вопросы решения граничных задач методами трансфер-матриц и временной теории связанных мод.

Диссертация написана ясным и технически грамотным языком. Оформление диссертации хорошее. Основные результаты диссертации отражены в 6 статьях, опубликованных в рецензируемых журналах из списка ВАК с достаточно высоким рейтингом, а также были представлены на нескольких международных и Российских конференциях и Школах для молодых ученых по оптике и фотонике.

Аннотация достаточно полно отражает содержание диссертации. Личный вклад автора и его высокая квалификация не вызывают сомнения. Тематика исследований соответствует специальностям 01.04.05 - «Оптика» и 01.04.07 - «Физика конденсированного состояния».

В целом диссертационная работа **Бикбаева Р. Г.** является законченным научным исследованием, она выполнена на достаточно высоком научном уровне, в ней получен ряд значимых теоретических и практических результатов. Вместе с тем по работе имеется ряд замечаний:

1. Формула (1.4) для волновой функции внутри потенциальной стенки записана без координаты, что не указывает на ее убывание и вообще теряет смысл.
2. На стр. 19 плохо сформулирована фраза: «... плазмоны имеют волновой вектор, превышающий скорость света в вакууме, и ...».
3. В общих выражениях (2.2) и (5.1) для диэлектрической проницаемости нанокompозита и пористого серебра отсутствует мнимая единица.
4. Использование приближения Максвелла-Гарнетта в работе проводилось без учета размера наночастиц и нанопор, от которого должна сильно зависеть мнимая часть эффективной диэлектрической проницаемости и резонансная частота нанокompозита (в обзорной главе об этом упоминалось).
5. В выражениях (2.3) для характерных частот и далее по тексту используется величина ε_0 , которая нигде не вводится и не поясняется. Похоже, что это

величина ε_∞ , введенная в соотношении (1.24) для вклада решетки в диэлектрическую проницаемость серебра.

6. В формуле (5.2) присутствует величина $\varepsilon_m(\omega)$, которая не расшифровывается (видимо, по причине очевидности), но и далее при численном анализе эта величина не определена количественно.

7. Выражение (5.6) не является эффективной плазменной частотой giroида, как заявлено в тексте, т.к. имеет размерность длины.

8. На стр. 155 фраза «Падающее излучение с частотой ω будет затухать по закону $\exp(-i\omega t) \dots$ » некорректна при вещественной частоте.

Все указанные замечания являются скорее недочетами, чем недостатками, они не носят принципиального характера и не затрагивают основных научных результатов, полученных в работе. Поэтому считаю, что диссертационная работа «Таммовские плазмон-поляритоны в резонансных фотоннокристаллических структурах» по объему и научному уровню полученных в ней результатов полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям и соответствует «Положению ВАК о порядке присуждения ученых степеней», утвержденному постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, а ее автор, **Бикбаев Рашид Гельмединович**, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.05 – оптика и 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент: д.ф.-м.н. (01.04.07 - физика конденсированного состояния), профессор, профессор кафедры радиофизики и электроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный университет»

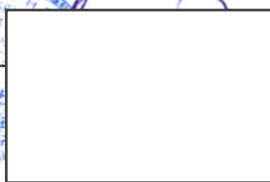
Семенцов Дмитрий Игоревич



Россия, 422017, г. Ульяновск, улица Льва Толстого, дом 42

Подпись Семенцова Д.И. заверяю

Ученый секретарь УлГУ



СПИСОК

избранных публикаций официального оппонента, д.ф.-м.н. Д.И. Семенцова за 2014 – 2018 гг. по теме диссертации Р.Г. Бикбаева «Таммовские плазмон-поляритоны в резонансных фотоннокристаллических структурах»

1. Eliseeva, S. V, Nasedkina, Y. F., & Sementsov, D. I. (2014). Optical spectra of nanocomposite medium and film with metal inclusions. *Optics and Spectroscopy (English Translation of Optika i Spektroskopiya)*, 117(6), 887–895. <https://doi.org/10.1134/S0030400X14120078>
2. Sannikov, D. G., Sementsov, D. I., & Filatov, L. D. (2014). Surface polaritons in a dielectric-anisotropic nanocomposite system. *Quantum Electronics*, 44(11), 1033–1038. <https://doi.org/10.1070/QE2014v044n11ABEH015371>
3. Evseev, D. A., Sannikov, D. G., & Sementsov, D. I. (2015). Surface plasmon polaritons at the interface between dielectric and anisotropic nanocomposite. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 60(2), 158–165. <https://doi.org/10.1134/S1064226915020047>
4. Filatov, L. D., Eliseeva, S. V, & Sementsov, D. I. (2015). Surface polaritons on the interface between an enhanced dielectric and a nanocomposite media. *Applied Surface Science*, 351, 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.05.103>
5. Dadoenkova, Y. S., Dadoenkova, N. N., Korobko, D. A., Zolotovskii, I. O., Sementsov, D. I., & Lyubchanskii, I. L. (2015). Tunnelling of frequency-modulated wavepackets in photonic crystals with amplification. *Journal of Optics (United Kingdom)*, 18(1). <https://doi.org/10.1088/2040-8978/18/1/015102>
6. Evseev, D. A., & Sementsov, D. I. (2015). Plasmon polaritons at the boundary between a dielectric and a nanocomposite with metallic inclusions. *Physics of Metals and Metallography*, 116(8), 745–752. <https://doi.org/10.1134/S0031918X15080037>
7. Eliseeva, S. V, Nasedkina, Y. F., & Sementsov, D. I. (2016). Giant faraday rotation in one-dimensional photonic crystal with magnetic defect. *Progress In Electromagnetics Research M*, 51, 131–138. <https://doi.org/10.2528/PIERM16080403>
8. Eliseeva, S. V, Fedorova, I. V, & Sementsov, D. I. (2017). Modification of the transmission spectrum of the “semiconductor-dielectric” photonic crystal in an external magnetic field. *Advanced Electromagnetics*, 6(4), 83–89. <https://doi.org/10.7716/AEM.V6I4.511>

9. Fedorova, I. V, Eliseeva, S. V, & Sementsov, D. I. (2018). Photonic spectra of a Bragg microresonator with a ferroelectric resonator layer. Superlattices and Microstructures, 117, 488–494. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2018.03.030>

10. Evseev, D. A., & Sementsov, D. I. (2018). Waveguide Modes in a Planar Graphene–Dielectric Thin-Layer Structure. Optics and Spectroscopy (English Translation of Optika i Spektroskopiya), 124(2), 230–236. <https://doi.org/10.1134/S0030400X18020030>

11. Shutyi, A. M., & Sementsov, D. I. (2018). Response of a magnetic nanoparticle lattice to a magnetic field pulse near the stability boundary. Physics of the Solid State, 60(1), 94–102. <https://doi.org/10.1134/S1063783418010237>

Официальный оппонент

Д.ф.-м.н. (01.04.07 — физика конденсированного состояния), профессор, профессор кафедры радиофизики и электроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный университет»

Семенцов Дмитрий Игоревич



Россия, 422017, г. Ульяновск, улица Льва Толстого, дом 42

Подпись Семенцова Д.И. заверяю



Ученый секретарь УлГУ



D. A. Semetsov