

## ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертацию Павлова Андрея Александровича “**Оптические свойства наноструктурированных плазмонных пленок и их использование для управления излучением атомов и молекул и биодетектирования**” представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 — лазерная физика.

Диссертационная работа А.А. Павлова посвящена оптическим свойствам наноструктур и метаматериалов на их основе --- бурно развивающемуся направлению современной оптики. Усилия исследователей направлены как на решение фундаментальных вопросов о взаимодействии света с веществом в наноструктурированных средах, и так и на создание конкретных оптических устройств, таких как компактные лазеры и сенсоры, использующих новые физические эффекты и технологические возможности. В диссертации Андрея Александровича Павлова решен ряд взаимно связанных теоретических задач, посвященных оптимизации параметров наноструктур для достижения требуемых оптических свойств – высокого квантового выхода излучения, эффективного оптического детектирования, низких порогов лазерной генерации. Это обуславливает несомненную **актуальность** темы диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 127 страниц, в ней представлены 48 рисунков. В первой главе диссертации приведен обзор литературы. Вторая глава посвящена исследованию фактора Парселла и различных каналов радиационного затухания вблизи плоского зеркала. В третьей главе разработан сенсор показателя преломления или различных биологических молекул на основе структурированной золотой пленки на подложке, покрытой слоистой структурой. Четвертая глава диссертации посвящена оптимизации порога излучения плазмонного лазера на основе двумерного фотонного кристалла.

Перечислю наиболее интересные на мой взгляд результаты, полученные в диссертации, и определяющие ее безусловную **научную новизну**:

1. Проведен детальный анализ различных каналов радиационного затухания квантового излучателя вблизи планарного зеркала. Предсказано усиление фактора Парселла для зеркала, образованного металлическим слоем на



высокоиндексной диэлектрической подложке при оптимальном значении проницаемости подложки, когда плазмон в слое становится вытекающим.

2. Предсказано, что в спектре прохождения слоистого диэлектрического фотонного кристалла, покрытого металлической пленкой, возникают узкие резонансы Фано, обусловленные гибридизацией таммовского состояния с волноводной модой. Резонансы чувствительны к показателю преломления среды, и тем самым перспективны для приложений в детектировании.

3. Предсказано, что порог генерации плазмонного лазера на основе металлического слоя с протравленной решеткой отверстий будет ниже, чем для однородного слоя. Дано качественное объяснение эффекта за счет увеличения глубины проникновения поля в диэлектрик, обусловленного брэгговской дифракцией. Порог генерации рассчитывался для высокодобротных мод плазмонной структуры (т.н. связанных состояний континуума). Существование предсказанных в диссертации высокодобротных мод в плазмонных наноструктурах подтверждено в экспериментах по спектроскопии пропускания, выполненных в оптической лаборатории ВНИИА им. Н.Л. Духова.

В ходе изучения диссертации А. А. Павлова возникли следующие **замечания**

1. В главе 2 диссертации многократно используется термин «скорость радиационного распада в верхнее полупространство». Считаю, что этот термин является не до конца удачным, т.к. из него может создаться ложное впечатление, что наблюдаемая кинетика спонтанного излучения зависит от направления детектирования. Кинетика детектируемого излучения дается выражением вида  $I(r,t) = I(r,0) \exp(-\gamma t)$ , где  $\gamma$ —полная скорость спонтанного излучения,  $r$  – положение наблюдателя,  $t$  – время, и множитель  $I(r,0)$  описывает диаграмму направленности. Скорость затухания излучения  $I(t)$  не зависит от направления детектирования. В диссертации можно было бы отдельно отметить, что рассчитанная «скорость радиационного распада в верхнее полупространство» определяет именно диаграмму направленности, т.е. мощность излучения вверх, а не собственно скорость затухания сигнала фотолюминесценции, которая также детально проанализирована.

2. Задача о скорости спонтанного излучения вблизи идеального зеркала, рассмотренная в первой главе, хорошо известна в литературе. Так, в работах В.Л. Любошиц, ЖЭТФ 26, 937 (1968); Н. Morawitz, Phys. Rev. 187, 1792 (1969) приведено аналитическое выражение для фактора Парселла в зависимости от расстояния до зеркала, полученное в рамках метода изображений, максимум которого достигает двух, в согласии с



одним из результатов диссертации (рис. 2 в статье Morawitz). Анализ различных каналов затухания вблизи поверхности слоистого гиперболического метаматериала проводился, например, в работе Kim et al, Improving the radiative decay rate for dye molecules with hyperbolic metamaterials, Opt. Express **20**, 8100-8116 (2012). Оригинальность результатов диссертации не вызывает сомнений, однако их представление могло бы быть усилено сопоставлением с литературой.

3. Работа могла бы быть украшена приведением результатов симметричного анализа собственных мод плазмонного кристалла, соответствующих связанным состояниям континуума и возбуждаемых только при наклонном падении. Так, из текста диссертации остается неясным, в чем состоит разница распределения полей двух мод на рис. 4.4, и почему они возбуждаются лишь в  $p$  поляризации. На рис. 4.4 не приведено значение азимутального угла падения света. Верно ли, что если волновой вектор падающего света не лежит в плоскости зеркальной симметрии структуры, то связанные состояния континуума будут проявляться и в  $s$  и в  $p$  поляризации падающей волны?

4. Диссертация оформлена на высоком уровне, написана подробно и ясным языком, но в тексте имеются отдельные мелкие опечатки. Например, на стр. 28 вместо кальки с английского «детекции» по-видимому следует писать «детектирования».

Эти замечания не имеют принципиального характера, и не влияют на общее положительное впечатление о диссертационной работе и ее высокую оценку.

Результаты работы апробированы: они опубликованы в ведущих рецензируемых физических журналах, доложены на научных конференциях по оптике наноструктур. **Достоверность и надежность результатов** определяются сочетанием детального анализа численных расчетов, полуаналитических методов (приближением почти свободных фотонов, анализом мод Фабри-Перо, различными методами поиска собственных мод), сопоставлением с литературными данными, а также результатами экспериментов. Научные положения, выносимые на защиту, и выводы диссертации являются **надежно обоснованными**. Результаты могут найти непосредственное **применение** в исследованиях, выполняемых в МГУ, ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ИФТТ РАН (г. Черноголовка), СПб НИУ ИТМО, ИРЭ РАН (г. Москва), ИФМ РАН (г. Нижний Новгород).

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация является законченным исследованием и содержит принципиально новые важные результаты. Диссертационная работа





**Список основных публикаций А.Н. Поддубного**  
в рецензируемых научных изданиях по теме диссертации за последние 5 лет.

1. B.Jusserand, A. N. Poddubny, A.V. Poshakinskiy, A. Fainstein, A. Lemaitre, Polariton resonances for ultra-strong coupling cavity optomechanics in GaAs/AlAs multiple quantum wells, *Phys. Rev. Lett* **115**, 267402 (2015).
2. S.S. Kruk, A.N. Poddubny, D.A. Powell, C.Helgert, M.Decker, T.Pertsch, D.N. Neshev, and Yu. S. Kivshar, Polarization properties of optical metasurfaces of different symmetries, *Phys. Rev. B* **91**, 195401 (2015).
3. A.V. Chebykin, A. A. Orlov, A. S. Shalin, A. N. Poddubny, and P. A. Belov, Strong Purcell effect in anisotropic  $\epsilon$ -near-zero metamaterials, *Phys. Rev. B* **91**, 205126 (2015).
4. A. N. Poddubny, Collective Förster energy transfer modified by a planar metallic mirror, *Phys. Rev. B* **92**, 155418 (2015).
5. A. N. Poddubny, Local field corrections to the spontaneous emission in arrays of Si nanocrystals, *J. Opt.* **17**, 035102 (5pp) (2015).
6. B. Hopkins, A.N. Poddubny, A. E. Miroshnichenko, and Yu. S. Kivshar, Circular dichroism induced by Fano resonances in planar chiral oligomers, *Laser Photonics Rev.* **10**, 137 (2016).
7. A.N. Poddubny and A.V. Rodina, Nonradiative and Radiative Förster Energy Transfer Between Quantum Dots, *ЖЭТФ* **149**, 614 (2016).
8. A. N. Poddubny, Ivan V. Iorsh, and Andrey A. Sukhorukov, Generation of photon-plasmon quantum states in nonlinear hyperbolic metamaterials, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 123901 (2016).
9. F. Spitzer, A. N. Poddubny, I. A. Akimov, V. F. Sapega, L. Klompmaker, L. E. Kreilkamp, L. V. Litvin, R. Jede, G. Karczewski, M. Wiater, T. Wojtowicz, D. R. Yakovlev and M. Bayer, Routing the emission of a near-surface light source by a magnetic field, *Nature Physics* **14**, 1043 (2018).
10. A. V. Poshakinskiy and A. N. Poddubny, Optomechanical Kerker Effect, *Phys. Rev. X* **9**, 011008 (2019).

