

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Трешина Ильи Валерьевича «Оптические свойства нанодоверстий в металлической плёнке и их влияние на излучение элементарной квантовой системы», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 — «Лазерная физика».

Диссертационная работа Трешина Ильи Валерьевича посвящена исследованию эффекта экстраординарного пропускания света и модификации спонтанной эмиссии в системах, содержащих металлическую плёнку с нанодоверстиями. Также исследуется оптическая асимметрия одномерного фотонного кристалла, покрытого металлической плёнкой с периодической решёткой из нанодоверстий, и изменение скорости спонтанного излучения молекулы возле нанодоверстия в идеально проводящей и металлической плёнке.

Исследования в области нанофотоники переживают расцвет, что связано с совершенствованием и повышением доступности для научного сообщества технологий нанофабрикации. В видимом и ближнем ИК диапазоне металлы обладают отрицательной диэлектрической проницаемостью, что позволяет их использовать для создания искусственных материалов с оптическими свойствами, не встречающимися в природе (метаматериалов), а также для создания интегральных нанофотонных устройств субволновых размеров. Такие устройства в будущем могут дополнить электронную компонентную базу микропроцессоров либо использоваться для полностью оптической обработки информации, а также в качестве сенсоров.

Одним из важных явлений в области нанофотоники, имеющим высокую практическую значимость, является эффект экстраординарного пропускания света, открытый в 1998 году Томасом Эбессеном (Thomas Ebbesen) для решётки из нанодоверстий в металлической плёнке. Было показано, что эффект связан с резонансным возбуждением поверхностных

плазмон-поляритонов. Автором данной диссертации была впервые теоретически рассмотрена оптическая система, состоящая из одномерного фотонного кристалла, покрытого металлической плёнкой с решёткой из наноотверстий. В такой системе также можно наблюдать эффект экстраординарного пропускания света, при этом механизм его возникновения существенно отличается от такового в работе Т. Эбессена. Работа по решению задач, связанных с оптическими свойствами устройств, содержащих металлические наноструктуры, выполненная И.В. Трешиним, является важной и актуальной.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объём работы составляет 137 страниц. Список цитируемой литературы насчитывает 123 наименования.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, определены цель и задачи диссертационной работы, сформулированы научная новизна и защищаемые положения, обозначена ценность работы, а также приведены публикации по теме работы.

Глава 1 содержит литературный обзор по теме диссертации, включающий историческую ретроспективу решения задачи о дифракции света на наноотверстии в тонком идеально проводящем экране и плёнке идеального проводника конечной толщины, обзор эффекта экстраординарного пропускания света и работ по асимметричным оптическим системам, как взаимным, так и не взаимным по лемме Лоренца.

Глава 2 посвящена исследованию оптических свойств периодической решётки из наноотверстий в толстой металлической плёнке, нанесённой на поверхность планарного фотонного кристалла. Показано, что внутри запрещённой зоны фотонного кристалла имеется максимум пропускания, связанный с резонансным возбуждением оптического таммовского состояния и вызванным этим усилением поля. При добавлении отверстий спектр пропускания начинает зависеть от направления падения света, т.е. таммовское состояние возбуждается при падении со стороны фотонного кристалла, но не возбуждается светом, прошедшим именно через

наноотверстия со стороны металлической плёнки. Получено, что максимальное значение коэффициента оптической асимметрии достигается на длине волны, соответствующей таммовскому состоянию. При этом и абсолютные значения коэффициента пропускания оказываются относительно велики, что показывает перспективность использования изучаемой структуры в качестве оптически ассиметричной системы при оптической обработке информации.

В Главе 3 рассмотрено влияние наноотверстия в металлической плёнке на спонтанное излучение одиночной молекулы. Сначала рассмотрена модельная задача, в которой плёнка полагается бесконечно тонкой и идеально проводящей. Описаны аналитические подходы к решению без учёта и с учётом эффекта запаздывания. Далее проведено численное моделирование методом конечных элементов, результаты которого проверены с помощью приведённых аналитических решений. После этого была рассмотрена система с металлической плёнкой с конечными значениями толщины и диэлектрической проницаемости. Получен ряд интересных результатов, в частности, что приближение идеально проводящего экрана, вообще говоря, плохо описывает излучение в оптическом диапазоне, что, несмотря на возможность значительного снижения времени жизни возбуждённого состояния, большая часть новых каналов распада относится к диссипативным модам, а наблюдаемая интенсивность излучения может даже понизиться. Тем не менее, в случае использования альтернативных металлам материалов с малой мнимой частью диэлектрической проницаемости и подложки с высоким показателем преломления возможно значительное (до 30 раз) увеличение скорости излучения молекулы в подложку. Данные результаты имеют высокую научную и практическую ценность для конструирования ярких наноразмерных источников излучения, в том числе и однофотонных.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе результатов обеспечивается надёжностью использованных современных апробированных инструментов численного решения задач

электродинамики, а также согласием результатов численного моделирования с экспериментально измеренными данными и аналитическими решениями. Численное моделирование в Главах 2 и 3 выполнено путём решения уравнений Максвелла методом конечных элементов. В Главе 2 показано согласие полученных результатов с экспериментом, а в Главе 3 проведено сравнение результатов численного моделирования с аналитическими решениями в предельных случаях.

Новизна представленных в диссертации результатов не вызывает сомнений. Можно отметить некоторые, наиболее значимые, на мой взгляд, новые научные результаты:

1. Показано, что эффект экстраординарного пропускания света в решётке из нанотверстий в металлической плёнке, расположенной на поверхности брэгговского зеркала, связан с возбуждением оптического таммовского состояния.
2. Теоретически предсказан и объяснён эффект большой оптической асимметрии системы, состоящей из металлической плёнки с решёткой из нанотверстий, которая расположена на поверхности фотонного кристалла.
3. С помощью методов численного моделирования установлено сильное влияние нанотверстия в металлической плёнке на скорость спонтанной эмиссии двухуровневой системы.

По диссертации имеются следующие замечания и пожелания:

1. В Главе 2 на стр. 26 утверждается, что толщина скин-слоя для золота равна приблизительно 80 нм внутри диапазона длин волн от 575 нм до 875 нм. Это утверждение ошибочно, глубина проникновения электромагнитного поля (по энергии) в золото составляет от 12 нм до 16 нм в указанном диапазоне.

2. В Главе 2 на стр. 34 утверждается, что колебания в рассчитанном спектре пропускания вызваны использованием периодических граничных условий при расчётах, в то время как в эксперименте эффективно было задействовано только одно отверстие. Проведение расчётов при различных значениях периода или использование идеально согласованных слоёв позволило бы улучшить согласие с экспериментальными результатами.
3. В Главе 2 на стр. 46 указано, что максимальное значение коэффициента асимметрии достигается около длины волны 800 нм. В то же время, из Рисунка 2.12 можно сделать вывод, что максимальная асимметрия достигается при длине волны 725 нм. При этом коэффициент асимметрии составляет около 1/100, т.е. отличие в коэффициентах прохождения в различных направлениях является 100-кратным, что значительно превышает 11,6-кратное при 796 нм. Исследование данного эффекта тоже представляет интерес.

Сделанные замечания не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы и не снижают значимости полученных в диссертационной работе результатов.

Характеризуя диссертацию в целом, можно сказать, что в ней проведены научные исследования в актуальной области современной нанофотоники, представляющие значительный интерес, как с фундаментальной, так и практической точки зрения. Диссертация хорошо оформлена, и основные результаты приведены в виде наглядных графиков.

Автореферат и опубликованные работы правильно отражают содержание диссертации. Основные результаты опубликованы в 3 статьях в рецензируемом научном журнале, индексируемом в базе данных Web of Science, и представлены автором на профильных российских и международных конференциях. Диссертационная работа Трешина Ильи Валерьевича «Оптические свойства наноотверстий в металлической плёнке и

Список основных научных публикаций в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет кандидата физико-математических наук Вишневого Андрея Александровича по теме диссертации Трещина Ильи Валерьевича «Оптические свойства наноотверстий в металлической плёнке и их влияние на излучение элементарной квантовой системы», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 — «Лазерная физика».

1. Vyshnevyy, A.A. Spontaneous emission and fundamental limitations on the signal-to-noise ratio in deep-subwavelength plasmonic waveguide structures with gain / A.A. Vyshnevyy, D.Yu. Fedyanin // *Phys. Rev. Applied.* — 2016. — Т. 6, № 6. — С. 064024.
2. Vyshnevyy, A.A. Self-heating and cooling of active plasmonic waveguides / A.A. Vyshnevyy, D.Yu. Fedyanin // *ACS Photonics.* — 2016. — Т. 3, № 1. — С. 51 – 57.
3. Vyshnevyy, A.A. Postselective measurement of the electronic entanglement in the system of two Mach-Zehnder interferometers with Coulomb interaction / A.A. Vishnevyy, G.B. Lesovik // *JETP Lett.* — 2013. — Т. 98, № 8. — С. 507 – 513.
4. Vyshnevyy, A.A. Setup of three Mach-Zehnder interferometers for production and observation of Greenberger-Horne-Zeilinger entanglement of electrons / A.A. Vyshnevyy, G.B. Lesovik, T. Jonckheere, T. Martin // *Phys. Rev. B.* — 2013. — Т. 87, № 16. — С. 165417.
5. Vyshnevyy, A.A. Two-particle entanglement in capacitively coupled Mach-Zehnder interferometers / A.A. Vyshnevyy, A.V. Lebedev, G.B. Lesovik, G. Blatter // *Phys. Rev. B.* — 2013. — Т. 87, № 16. — С. 165302.