

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Сибирский федеральный университет»

На правах рукописи



Панкин Павел Сергеевич

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ  
ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Научно-квалификационная работа  
(диссертация)

Научный руководитель:  
д. ф.-м. н., проф. Ветров С.Я.

Красноярск 2018 г.

**Панкин Павел Сергеевич**

## **АННОТАЦИЯ**

**научно-квалификационной работы (диссертации)**

### **«СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ»**

**03.06.01 «Физика и астрономия»**

**01.04.05 «Оптика»**

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность**

Работа посвящена теоретическому исследованию распространения света в одномерных фотонных кристаллах (ФК) – многослойных диэлектрических структурах, в которых распределение показателя преломления (ПП) имеет периодическую модуляцию. Рассмотренные ФК содержат в качестве структурных элементов металлические, нанокompозитные (НК) или анизотропные жидкокристаллические (ЖК) слои.

Одно из главных свойств ФК – это наличие запрещенных зон (ЗЗ), или полос отражения [1]. В отличие от металлических зеркал, ФК может обеспечивать отражение с низкими потерями на поглощение, что широко используется при создании зеркал резонаторов в лазерах и в других оптоэлектронных устройствах. В связи с этим, актуальна проблема управления положением и глубиной ЗЗ. Одно из направлений исследований в данной области, активно развивающееся в настоящее время – это формирование квазипериодических фотонных кристаллов (КПФК) [2]. При нарушении строго периодического чередования слоев, такие структуры все еще могут иметь ЗЗ, однако их положение теперь можно варьировать путем введения определенного правила чередования слоев, составляющих структуру.

Особое внимание в исследовании оптики ФК привлекают локализованные моды, которые играют важную роль при построении оптоэлектронных устройств. Одна из таких локализованных мод реализуется, когда свет запирается между металлическим и ФК-зеркалом [3]. Такая мода называется таммовским плазмон-поляритоном (ТПП), из-за возникновения коллективных колебаний поля и свободных электронов в металлической пленке. Существенная особенность ТПП – это условие его возбуждения, которое не требует использования призм или решеток, как в случае поверхностного плазмон-поляритона (ППП).

На основе ТПП предложены источник одиночных фотонов, сенсоры, оптические переключатели и многоканальные фильтры. Требуется дополнительное исследование проблемы эффективного возбуждения ТПП [4], когда вся падающая энергия связывается в локализованном состоянии. Это играет ключевую роль для поглотителей, лазеров, тепловых эмиттеров, усиления нелинейных эффектов и люминесценции, предложенных на основе ТПП.

ТПП мода может гибридизоваться с другими типами мод, при их одновременном возбуждении в структуре. На основе гибридных ТПП и ППП [5] были предложены сенсоры, усиление электрического поля, флуоресценция на резонансных ТПП-ППП длинах волн. Гибридные ТПП-экситонные моды позволяют обеспечивать сильное взаимодействие поля и вещества. На основе ТПП и микрорезонаторных (МР) гибридных мод недавно были предложены поглотители для солнечных ячеек, белые светоизлучающие диоды, усиление поля в микрорезонаторе, уменьшение поглощения во внедренных в структуру металлических слоях. Становится актуальной проблема управления спектральным положением гибридных мод, для создания перестраиваемых устройств на их основе. Один из материалов, широко используемых для управления спектральными свойствами фотонных структур - это нематический жидкий кристалл (НЖК, нематик), ПП которого может настраиваться путем приложения внешних полей.

Ограничения, накладываемые на диэлектрическую проницаемость (ДП) природных материалов, сегодня успешно преодолеваются использованием вместо них метаматериалов. Один из таких материалов – НК, содержащий металлические наночастицы в диэлектрической матрице. Вариация параметров наночастиц позволяет управлять оптическими и поляризационными характеристиками НК, которые могут превышать соответствующие характеристики составляющих его материалов. Актуальной видится задача распространения света в ФК, содержащих НК в качестве структурных элементов, что открывает дополнительные возможности для управления светом [6, 7].

### **Цели и задачи диссертационной работы.**

**Целью** диссертационной работы является теоретическое изучение распространения света в наноструктурированных фотонных кристаллах, исследование спектральных и поляризационных свойств таких структур.

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

1) исследовать распространение света в КПФК, ПП которого изменяется в пространстве по закону  $n(z) = n_0 + \Delta n \cdot \text{sgn}(a_1 \sin G_1 z + a_2 \sin G_2 z)$ , где  $G_1$  и  $G_2$  – пространственные частоты. Изучить возможность независимой настройки положения 33

структуры при вариации пространственных частот. Рассчитать спектры пропускания КПФК и сравнить их с экспериментально полученными;

2) получить дисперсионное уравнение ТПП, учитывающее толщину первого слоя ФК, примыкающего к металлу. С точки зрения временной теории связанных мод провести анализ добротности ТПП в условиях его критической связи с падающим ИК-излучением. Рассмотреть две схемы возбуждения ТПП, когда непрозрачно одно из зеркал (ФК, либо слой металла), а возбуждение происходит через второе зеркало. Выяснить, какая из схем дает б'ольшую добротность. Сравнить качественные выводы с данными численных и экспериментальных спектров;

3) исследовать распространение света в ФК, покрытом слоем металла и включающем слой НЖК в качестве дефекта. Изучить гибридные моды, образованные ТПП и МР-модой. Исследовать влияние электрического поля, приложенного к нематику, и его нагревания на положение гибридных мод в спектре пропускания структуры;

4) исследовать распространение света в ФК, сопряженных со слоем НК или содержащих его в качестве дефектного слоя. Изучить спектральные и поляризационные особенности таких структур, при включении в НК анизотропных металлических частиц или частиц с диэлектрическим ядром и металлической оболочкой. Исследовать изменение спектральных и поляризационных свойств при изменении параметров НК.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в следующем:

1) впервые предложен метод суперпозиции модуляции показателя преломления для структурирования КПФК;

2) найдена оптимальная схема возбуждения ТПП, в условиях его критической связи с падающим излучением ИК-диапазона;

3) впервые предложен метод управления гибридными ТПП-МР-модами через воздействие на дефектный НЖК-слой электрического поля или через его нагревание;

4) исследованы спектральные свойства ФК с дефектным слоем НК, который состоит из ориентационно упорядоченных диспергированных в прозрачной матрице металлических наночастиц сфероидальной формы. Показана существенная зависимость спектрального положения МР-мод от параметров НК.

**Положения, выносимые на защиту:**

1) метод суперпозиции модуляции показателя преломления позволяет осуществлять независимую настройку положения и глубины нескольких запрещенных зон квазипериодического фотонного кристалла;

2) схема возбуждения таммовского плазмон-поляритона через полупрозрачный фотонный кристалл, сопряженный с непрозрачным металлическим зеркалом, имеет

принципиальное преимущество по сравнению со схемой возбуждения через полупрозрачный металлический слой, сопряженный с непрозрачным фотонным кристаллом. А именно, в условиях критической связи падающего излучения с таммовским плазмон-поляритоном, в первой схеме таммовский плазмон-поляритон имеет бóльшую добротность;

3) способ управления спектральным положением гибридных таммовских-микрорезонаторных мод в фотонном кристалле с дефектным слоем нематика при помощи внешних полей. Управление осуществляется через электрическое поле, приложенное к нематику или через его нагревание. Гибридные моды испытывают спектральный скачок в точке фазового перехода нематик-изотропная жидкость, величина скачка зависит от поляризации падающего света;

4) положение микрорезонаторных мод фотонного кристалла с анизотропным нанокompозитным дефектом чувствительно к изменению формы наночастиц, фактора заполнения, поляризации и угла падения света.

**Теоретическая и практическая значимость.** Метод суперпозиции модуляции показателя преломления, предложенный для структурирования КПФК позволяет создавать зеркала и фильтры с заранее заданным положением нескольких ЗЗ. Разработано программное обеспечение для моделирования светопропускания в таких структурах, позволяющее осуществлять настройку их параметров. Переход к возбуждению ТПП через полупрозрачный ФК позволяет создать тепловые эмиттеры с увеличенной добротностью. Предложенный метод управления ТПП через НЖК-слой, внедренный в структуру, может найти применение в таких приложениях, как сенсоры, фильтры, органические диоды и поглотители на основе ТПП. ФК, включающие НК-слои в качестве структурных элементов, могут быть использованы для создания фильтров и поляризаторов.

**Методология и методы исследования.** Основу диссертации составляют качественные, аналитические, полуаналитические и численные методы: временная теория связанных мод для описания добротности резонансов; метод трансфер-матрицы для расчета спектральных коэффициентов и распределения поля в неоднородных средах; метод Берремана для расчета анизотропных сред; преобразование Фурье для анализа спектральных свойств квазипериодических фотонных кристаллов; метод вариации свободной энергии жидкого кристалла для моделирования его управления внешним электрическим полем.

**Личный вклад автора.** Все представленные в диссертации оригинальные результаты получены автором, либо при его непосредственном участии. Автором осуществлялась разработка теоретических и численных подходов, проектирование и оптимизация параметров образцов перед их созданием, анализ и обсуждение результатов экспериментов, подготовка результатов исследований к публикации. Основная часть численных расчётов, а

также разработка и тестирование программ, выполнены лично автором. Выбор направлений и объектов исследований осуществлялся совместно с научным руководителем С.Я. Ветровым. Алгоритм расчета слоистых сред, временная теория связанных мод, метод вариации свободной энергии жидкого кристалла реализованы совместно с научным руководителем И.В. Тимофеевым, алгоритм преобразования Фурье для квазипериодических структур и метод суперпозиции модуляции показателя преломления реализован совместно с А.М. Вьюнышевым.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В ходе выполнения работы:

1) описан новый метод суперпозиции модуляции показателя преломления для структурирования квазипериодических фотонных кристаллов на основе неупорядоченных дисперсных систем из пористого кремния. Спектральное положение и глубина нескольких запрещенных зон могут быть независимо настроены путем подбора пространственных частот и амплитуд гармоник, участвующих в формировании показателя преломления структуры. Рассчитанные спектры согласуются с экспериментальными;

2) получено дисперсионное уравнение таммовского плазмон-поляритона, учитывающее толщину первого слоя фотонного кристалла, примыкающего к металлу. Рассмотрены две различные схемы возбуждения таммовского плазмон-поляритона. В каждой из двух схем предполагается непрозрачным одно из зеркал (фотонный кристалл, либо слой металла), а возбуждение происходит через второе зеркало. С точки зрения временной теории связанных мод обосновывается преимущество одной схемы перед другой. А именно, в условиях критической связи падающего излучения с таммовским плазмон-поляритоном, бóльшая добротность получается для схемы возбуждения через фотонный кристалл. Численный расчет, а также экспериментальные спектральные линии излучения тепловых эмиттеров на основе таммовского плазмон-поляритона подтверждают качественные выводы;

3) выполнен расчет спектров пропускания фотонного кристалла, покрытого тонким серебряным слоем, и содержащего слой нематика в качестве дефекта. Продемонстрирована возможность температурной настройки спектрального положения гибридных таммовских-микрорезонаторных мод, посредством нагревания нематика. Показано существование скачка гибридных мод в точке фазового перехода нематик–изотропная жидкость. Показана поляризационная чувствительность спектров. Построена математическая модель,

позволяющая прогнозировать изменение оптических свойств структуры в зависимости от приложенного к нематрику электрического поля;

4) выполнены исследования спектральных свойств фотонного кристалла с дефектным слоем нанокompозита, состоящего из ориентационно упорядоченных серебряных наночастиц сферической формы, взвешенных в прозрачном оптическом стекле. Показана зависимость положения микрорезонаторных мод в спектре от поляризации и угла падения излучения, формы наночастиц и фактора заполнения.

### **ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Vyunishev A. M., Pankin P. S., Svyakhovskiy S. E. et al. Quasiperiodic one-dimensional photonic crystals with adjustable multiple photonic bandgaps // *Opt. Lett.* 2017. Vol. 42, no. 18. P. 3602–3605.

2. Yang Z. Y., Ishii S., Yokoyama T. et al. Narrowband Wavelength Selective Thermal Emitters by Confined Tamm Plasmon Polaritons // *ACS Photonics*. 2017. Vol. 4, no. 9. P. 2212–2219. ПЗ. Pankin P. S., Vetrov S. Y., Timofeev I. V. Tunable hybrid Tamm-microcavity states // *JOSA B*. 2017. Vol. 34, no. 12. P. 2633–2639.

4. Ветров С. Я., Панкин П. С., Тимофеев И. В. Особенности спектральных свойств одно- мерного фотонного кристалла с анизотропным дефектным слоем нанокompозита, имеющего резонансную дисперсию // *Квантовая электроника*. 2014. Т. 44, № 9. С. 881–884.

5. Vetrov S. Y., Pankin P. S., Timofeev I. V. The optical Tamm states at the interface between a photonic crystal and a nanocomposite containing core-shell particles // *J. Opt.* 2016. Vol. 18, no. 6. P. 65106.

6. Ветров С. Я., Панкин П. С., Тимофеев И. В. Особенности спектральных свойств фотон- ного кристалла с дефектом из нанокompозита с учетом размерных эффектов // *Оптика и спектроскопия*. 2015. Т. 119, № 1. С. 69–72.

7. Vetrov S. Y., Pankin P. S., Timofeev I. V. Spectral Properties of One-Dimensional Photonic Crystal with Anisotropic Defect Layer of Nanocomposite // *Phys. Wave Phenom.* 2015. Vol. 23, no. 1. P. 35–38.

8. Vetrov S. Y., Pankin P. S., Timofeev I. V. Coupled Optical Tamm States at Edges of a Photonic Crystal Enclosed by a Composite of Core-Shell Nanoparticles // *Phys. Wave Phenom.* 2017. Vol. 25, no. 3. P. 170–174.

9. Pankin P. S., Vetrov S. Y., Timofeev I. V. Hybrid states formed by the optical Tamm and defect modes in a one-dimensional photonic crystal // *Prog. Electromagn. Res. Symp.* No. August. IEEE, 2016. P. 4571–4574.

## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Vardeny Z. V., Nahata A., Agrawal A. Optics of photonic quasicrystals // Nat. Photonics. 2013. Vol. 7, no. 3. P. 177.
3. Kaliteevski M., Iorsh I., Brand S. et al. Tamm plasmon-polaritons: Possible electromagnetic states at the interface of a metal and a dielectric Bragg mirror // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 76, no. 16. P. 165415.
4. Augui'e B., Bruchhausen A., Fainstein A. Critical coupling to Tamm plasmons // J. Opt. 2015. Vol. 17, no. 3. P. 35003. 1411.0608.
5. Afinogenov B. I., Bessonov V. O., Nikulin A. A., Fedyanin A. A. Observation of hybrid state of Tamm and surface plasmon-polaritons in one-dimensional photonic crystals // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 103, no. 6. P. 61112.
6. Моисеев С. Г., Остаточников В. А., Семенцов Д. И. Влияние размерных эффектов на оптические характеристики одномерного фотонного кристалла с нанокompозитным дефектом // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 100, № 6. С. 413–417.
7. Dadoenkova Y., Glukhov I., Moiseev S. et al. Optical generation in an amplifying photonic crystal with an embedded nanocomposite polarizer // Opt. Commun. 2017. Vol. 389. P. 1–4.

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования

«Сибирский федеральный университет»

На правах рукописи

*Панкин*

Содержание .....

1. Современное состояние исследований ..... 12

1.1. Фотонные кристаллы ..... 12

1.2. Квазипериодические фотонные кристаллы ..... 16

1.3. Таммовский эффект ..... 19

1.4. Гибридные структуры ..... 22

2. Квазипериодические фотонные кристаллы ..... 23

2.1. Метод суммирования ..... 28

2.2. Экспериментальная проверка метода ..... 32

2.3. Микрорезонаторные моды в квазипериодических фотонных кристаллах ..... 36

Выводы ..... 39

3. Качественное описание добротности резонанса таммовского плазмон-поляритона в рамках временной теории связанных мод ..... 40

3.1. Временная теория связанных мод ..... 41

3.2. Дисперсионное уравнение для таммовского плазмон-поляритона ..... 42

3.2.1. Модель ..... 43

3.2.2. Граничные условия ..... 44

3.2.3. Решение системы ..... 47

Панкин Павел Сергеевич

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ  
ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Научно-квалификационная работа  
(диссертация)

Научный руководитель:

д. ф.-м. н., проф. Ветров С.Я.

Красноярск 2018 г.