

На правах рукописи

Ефимов Илья Михайлович

УПРАВЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ ФОТОННЫХ  
КРИСТАЛЛОВ С ДЕФЕКТОМ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ  
СЕНСОРОВ КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА ЖИДКИХ И  
ГАЗООБРАЗНЫХ СРЕД

Специальность 1.3.19

Лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Владивосток

2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный федеральный университет»

**Научный руководитель:** **Голик Сергей Сергеевич**, кандидат физико-математических наук, доцент, профессор департамента общей и экспериментальной физики ДВФУ

**Официальные оппоненты:** **Криштоп Виктор Владимирович**  
доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник НИИ радиофотоники и оптоэлектроники Пермской научно-производственной приборостроительной компании

**Любчанский Игорь Леонидович**  
доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, отдел теории электронных и кинетических свойств нелинейных систем Донецкий физико-технический институт имени А.А. Галкина

**Ведущая организация:** Институт физики имени Л. В. Киренского  
Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится «\_\_» декабря 2025 г. в \_\_:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.027.02 при Институте автоматики и процессов управления ДВО РАН по адресу: 690041 г. Владивосток, ул. Радио, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института автоматики и процессов управления ДВО РАН и на сайте ИАПУ ДВО РАН по адресу <http://www.iacp.dvo.ru/russian/institute/dissertation/notice.html>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.027.02,

кандидат технических наук, доцент .

Гурбатов С.О.

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Сфера применения оптических сенсоров чрезвычайно широка. В медицине они используются для непрерывного мониторинга состояния тканей, измерения уровня глюкозы в крови, контроля других биохимических показателей [1]. В автомобильной промышленности оптические сенсоры применяются для контроля выхлопных газов и мониторинга технического состояния транспортных средств [2]. В производственной сфере эти устройства обеспечивают контроль качества продукции и безопасность технологических процессов. Биотехнологическая отрасль активно использует оптические сенсоры для анализа биологических образцов и контроля биотехнологических процессов [3]. Оптические сенсоры обладают рядом достоинств по сравнению с классическими аналитическими методами: они компактны, отличаются высокой чувствительностью, обеспечивают быстрый отклик и позволяют проводить измерения без прямого контакта. [4]. Известны различные типы современных оптических сенсоров, а именно: инфракрасные датчики, фотодиодные и фототранзисторные сенсоры, фотокамеры различного назначения и т. д.

Одним из наиболее перспективных направлений совершенствования оптических сенсоров является разработка устройств на основе фотонных кристаллов (ФК) [5-7]. Их уникальная особенность заключается в наличии фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ) — диапазона частот, в котором электромагнитные волны не могут распространяться внутри структуры. При попадании излучения на слой фотонного кристалла с длиной волны, соответствующей ФЗЗ, происходит практически полное отражение света. Одномерные ФК представляют собой периодические структуры, состоящие из чередующихся слоев материалов с различными коэффициентами преломления. Введение дефекта в периодическую структуру фотонного кристалла, например, слоя анализируемого вещества (аналита), приводит к нарушению периодичности и появлению так называемой дефектной моды — узкой полосы пропускания внутри ФЗЗ. Положение и форма этой моды зависят от параметров дефектного слоя, таких как его толщина и показатель преломления. При облучении структуры лазерным пучком с длиной волны, близкой к дефектной моде, сдвиг её положения регистрируется с высокой точностью, что и используется для детектирования. Именно это свойство легло в основу принципа действия сенсоров на основе ФК с дефектом, где дефектный слой является слоем аналита. В случае такого сенсора основным аспектом (физическим принципом)

является степень сдвига дефектной моды при изменении параметров дефектного слоя, поскольку это напрямую влияет на чувствительность устройства. Следовательно, ключевой задачей становится анализ причин этого сдвига и поиск способов увеличения степени сдвига, а значит и (увеличения) чувствительности сенсора по отношению к различным параметрам.

Однако существует ограничение использования такого типа сенсора, когда речь идет об определении концентрации компонентов в дефектном слое. В общем случае при изменении концентрации будет изменяться показатель преломления и по этому изменению можно определить количественный состав дефектного слоя, т.е. аналита. Однако это допустимо при рассмотрении бинарного дефектного слоя. Если же дефектный слой состоит из нескольких компонентов, то определение концентрации напрямую становится невозможным. Для решения этих проблем ведутся [14-15] активные исследования по модификации сенсоров и разработке гибридных систем, сочетающих различные принципы детектирования.

Таким образом, создание сенсора на основе ФК с дефектным слоем, который позволит проводить количественный анализ сложных смесей с высокой точностью, является актуальной задачей прикладной фотоники.

### **Цели и задачи исследования**

Целью настоящей работы является комплексное исследование численным методом трансфер-матрицы оптических свойств фотонных кристаллов с дефектом в структуре и моделирование высокочувствительного сенсора на основе фотонного кристалла с дефектом в структуре для многокомпонентного анализа.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка модели сенсора для определения показателя преломления дефектного слоя на основе фотонного кристалла с дефектом в структуре, а также анализ спектров пропускания и отражения для данной модели;
2. Оптимизация различных характеристик ФК с дефектом в структуре, включая симметрию ФК, и изучение их влияния на чувствительность сенсора;
3. Решение проблемы отсутствия селективности сенсора путем связи дисперсии показателя преломления с положением дефектных мод и развитие модели сенсора для возможности проведения количественного анализа.

### **Степень разработанности темы**

Как было сказано, на сегодняшний день исследования в области сенсоров на основе одномерных фотонных кристаллов с дефектом получили значительное развитие. В исследованиях [8-13] представлены модели сенсоров на основе ФК с дефектом, способных определять концентрацию веществ в дефектном слое, при этом

предполагается, что этот слой является бинарным и гомогенным, состоящим из матрицы и компонента, концентрацию которого требуется измерить. Исследователи в основном сосредотачиваются на анализе спектральных характеристик подобных структур, а также на влиянии параметров дефектного слоя на работу сенсоров, основанных на фотонных кристаллах с дефектом. Однако в данных работах [8-13], как и во многих других, внимание акцентируется лишь на повышенной чувствительности устройств и нет детального изучения зависимостей чувствительности от параметров дефектного слоя или параметров самого ФК. В работах [14-15] предлагаются модели универсального сенсора для определения ряда веществ, но не в составе одной общей смеси, т.е. эти модели имеют допущение, что дефектный слой в момент анализа состоит только из одного компонента.

Именно поэтому в настоящей работе рассматривается влияние изменения структуры и параметров составных слоев на чувствительность сенсора, а также ставится задача разработки модели сенсора на основе фотонного кристалла с дефектом, способного определять концентрации веществ многокомпонентной смеси внутри дефекта. Полученные результаты исследования открывают широкие перспективы для дальнейших разработок, направленных на создание моделей и сенсорных устройств на основе фотонного кристалла с дефектом в структуре, что и определяет актуальность настоящей работы.

### **Научная новизна результатов исследования**

В научной работе впервые получены следующие результаты:

- Впервые теоретически было исследовано влияние симметрии фотонного кристалла на чувствительность сенсора;
- Впервые теоретически было показано, что максимум чувствительности сенсора достигается при максимуме ширины ФЗЗ ФК, т. е. при выполнении четверть волнового критерия для бинарного ФК;
- Впервые предложена модель многомодового сенсора на основе ФК с дефектом в структуре, обладающая селективностью и способная определять концентрации каждого компонента в составе аналита в дефектном слое.

### **Научные положения, выносимые на защиту**

- Максимум нормированной чувствительности достигается при максимизации ширины ФЗЗ. Для бинарных ФК это происходит при выполнении четверть волнового критерия.
- Структура ФК с зеркальной симметрией, где дефектный слой находится между слоями с большим (из двух составных слоев ФК) показателем преломления, обладает наибольшей амплитудой дефектной моды и

наилучшей чувствительностью при условии, что дефектная мода находится в центре ФЗЗ.

- Одновременное смещение положения нескольких дефектных мод позволяет определить концентрацию нескольких компонентов смеси при условии, что известна дисперсия показателей преломления всех компонентов смеси.

### **Практическая значимость результатов**

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов для разработки сенсоров на основе ФК с дефектом в структуре, предназначенных для применения в промышленности и биомедицине. Показана эффективность применения такого типа оптических сенсоров для точного определения показателя преломления, а также продемонстрирован метод перехода от показателя преломления к концентрации компонентов небинарной смеси через связь дисперсии показателей преломления компонентов с положением всех дефектных мод, что расширяет функциональные возможности устройства.

В работе детально исследованы спектральные характеристики фотонных структур, выявлены их особенности и определены оптимальные параметры ФК, обеспечивающие достижение максимальной чувствительности сенсора. Эти результаты создают прочную основу для дальнейшего совершенствования сенсорных систем, повышения их точности и надежности в практических задачах.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов обусловлена применением строгого численного метода трансфер-матрицы, который является общепринятым и хорошо зарекомендовавшим себя инструментом для моделирования оптических свойств многослойных структур. Корректность разработанного программного кода была подтверждена путем тестирования на сходимость расчетных данных, а также сравнением полученных результатов с данными, представленными в научной литературе другими исследователями [16-17]. Выявленное согласие результатов свидетельствует о высокой точности и надежности используемого алгоритма. Воспроизводимость результатов обеспечивается четкостью математической базы метода и его детерминированным характером. Полученные результаты согласуются с результатами других авторов и не противоречат им. Достоверность и значимость результатов определяется также нашими публикациями в ведущих российских и зарубежных журналах.

**Результаты работы были использованы при выполнении следующих проектов:**

- Госзадание Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 0657–2020–0003 «Разработка методов лазерной спектроскопии, фотоники и оптоэлектроники для создания перспективных высокотехнологичных сенсоров персонализированной биомедицины и мониторинга природных и искусственных сред», исполнитель, 2020–2022 г.
- Проект фонда развития теоретической физики и математики «Базис» Грант “Leader” № 21–1–1–6–1 «Магнитно-индуцированная линейная невзаимная и управляемая прозрачность», исполнитель, 2021–2024 г.
- Проект РНФ, соглашение № 24–22–00283 «Конические лазеры и резонаторы белых лазеров на основе чирпированных и аподизированных фотонных кристаллов», исполнитель, 2024 - 2025 г.

### **Личный вклад автора**

Все представленные в диссертации теоретические результаты и модели получены автором лично. Соискатель непосредственно участвовал в обсуждении результатов, написании статей и обнародовании результатов исследования на научных мероприятиях. Постановка цели и задач диссертации проходила совместно с научным руководителем. Вошедшие в диссертацию результаты отражают итоги исследований, проведенных автором на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный федеральный университет» (ДВФУ), лаборатории аналитической лазерной спектроскопии.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 65 библиографических ссылок. Общий объем диссертационной работы составляет 96 страниц. Работа содержит 42 рисунка, 60 формул и 4 таблицы.

### **Содержание работы**

В I главе проведен анализ современных видов оптических сенсоров и их классификации [16-17]. Рассматриваются различные типы сенсоров, включая активные и пассивные, а также их принципы работы на основе поглощения, отражения, пропускания и люминесценции света. Особое внимание уделяется характеристикам различных датчиков (фоторезисторов, фотодиодов, фототранзисторов) и физическим законам, лежащим в основе их функционирования,

таким как законы Бугера-Ламберта-Бэра для поглощения света и принципы отражения света, проанализированы основные математические зависимости для приведенных механизмов. Описываются также особенности применения сенсоров в медицине, промышленности и биотехнологиях. Глава I состоит из одного параграфа: “Классификация оптических сенсоров”.

**Параграф 1.1 “Классификация оптических сенсоров”** посвящен детальному анализу современных видов оптических сенсоров и их классификации [16-17], охватывая как теоретические основы их работы, так и практическое применение. Рассматриваются специализированные типы сенсоров, такие как биосенсоры на основе спектроскопии плазмонного резонанса, эффекта Рамана и флуоресценции, а также их роль в современных исследованиях. Показано, что активные сенсоры характеризуются наличием чувствительного слоя с аналитическими реагентами, обеспечивающими специфическое взаимодействие с молекулами целевого вещества, тогда как пассивные сенсоры используют оптические свойства материалов без необходимости адсорбции или десорбции. Кроме того, в параграфе 1.1 затрагиваются вопросы чувствительности, селективности и воспроизводимости результатов, подчеркиваются преимущества и ограничения каждого типа сенсоров.

Во II главе представлена модель оптического сенсора на основе ФК с дефектом в структуре. Глава II состоит из четырех параграфов: “Фотонные кристаллы и фотонная запрещенная зона”, “Метод трансфер-матрицы”, “Принцип работы модели оптического сенсора”, “Сравнение абсолютной и нормированной чувствительности”.

**Параграф 2.1 “Фотонные кристаллы и фотонная запрещенная зона”** посвящен анализу ФК и их уникальных свойств, связанных с наличием ФЗЗ, а также их применению в сенсорных технологиях. Одномерные ФК представляют собой многослойные периодические (каузипериодические) структуры, обладающие ФЗЗ, в пределах которой электромагнитные волны не могут распространяться, что позволяет использовать такие кристаллы как оптические фильтры или зеркала. Введение дефектов в периодическую структуру ФК приводит к появлению локализованных мод внутри ФЗЗ, что открывает возможности для создания высокочувствительных сенсоров. Особое внимание уделяется влиянию контраста показателя преломления на ширину ФЗЗ и локализацию электромагнитного поля, что играет ключевую роль в разработке современных фотонных устройств.

В параграфе 2.2 рассматривался “Метод трансфер-матрицы”. Для изучения спектральных особенностей использован численный метод, метод трансфер-



матрицы [18]. Метод выведен для рассеяния плоской электромагнитной волны, падающей из вакуума, на однородном слое диэлектрика. Метод матрицы переноса основан на том факте, что, согласно уравнениям Максвелла, существуют простые условия непрерывности электрического поля через границы от одной среды к другой. Если поле известно в начале слоя, поле в конце слоя может быть получено с помощью простой операции с матрицей. Формула для единичного слоя имеет вид [18]:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos \beta_j & -\frac{i}{p_j} \sin \beta_j \\ -in_j \sin \beta_j & \cos \beta_j \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $\beta_j = \frac{2\pi h_j}{\lambda} n_j \cos \theta_j$ ,  $\theta_j$  – угол преломления в  $j$ -ом слое, который определяется из закона Снеллиуса как:  $\theta_j = \cos^{-1} \sqrt{1 - \frac{n_0^2 \sin^2 \theta_0}{n_j^2}}$ ,  $p_j = n_j \cos \theta_j$ ,  $n_0$  – коэффициент преломления внешней среды слева от ФК,  $\theta_0$  – угол падения.

Затем стопка слоев может быть представлена в виде системной матрицы, которая является произведением отдельных матриц для каждого слоя:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \prod M_j, \quad (2)$$

Заключительный этап метода включает в себя выражение коэффициентов отражения и пропускания через элементы трансфер-матрицы:

$$T = \frac{p_{right}}{p_{left}} |t|^2, \text{ где } t = \frac{2p_{left}}{(m_{11} + p_{right}m_{12})p_{left} + (m_{21} + p_{right}m_{22})}, \quad (3)$$

$$R = |r|^2, \text{ где } r = \frac{(m_{11} + p_{right}m_{12})p_{left} - (m_{21} + p_{right}m_{22})}{(m_{11} + p_{right}m_{12})p_{left} + (m_{21} + p_{right}m_{22})}, \quad (4)$$

где  $t, r$  – амплитудные комплексные коэффициенты пропускания и отражения, соответственно,  $T, R$  – энергетические коэффициенты пропускания и отражения, соответственно, индексы *right*, *left* – означают справа и слева от структуры, соответственно.

**В параграфе 2.3 рассматривался “Принцип работы модели оптического сенсора”. Представлена модель сенсора, показанная на рисунке 1, а также представлена схема работы сенсора на рисунке 2.**

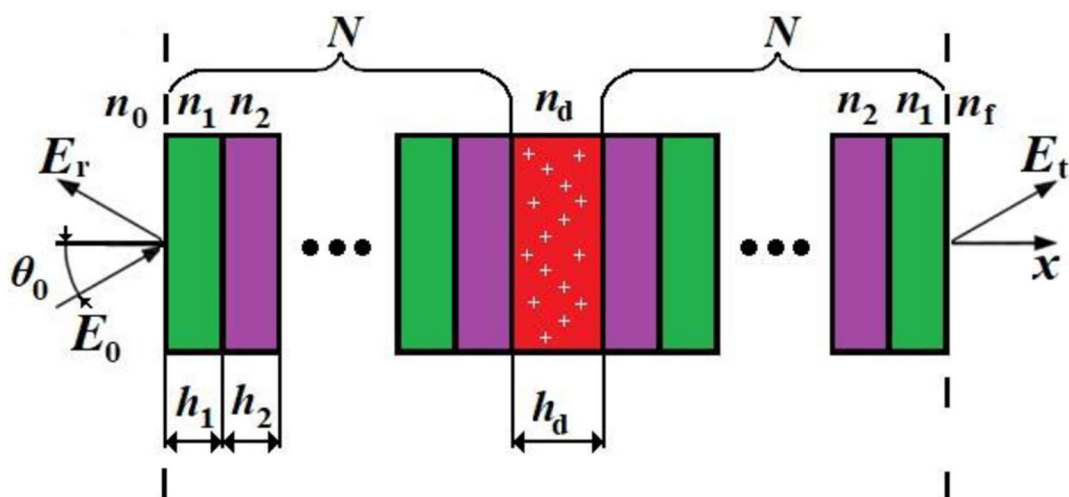


Рисунок 1. Схематическая диаграмма дефектного фотонного кристалла  
 $N$  – Кол-во элементарных ячеек,  $\theta_0$  – Угол падения света,  $E_r$  – Отраженная волна,  $E_0$  – Падающая волна,  $E_t$  – Прошедшая волна,  $n_0, n_f$  – показатели преломления внешней среды слева и справа от кристалла соответственно,  $n_1, n_2$  – показатели преломления первого и второго слоев ФК,  $h_1, h_2$  – толщины первого и второго слоев ФК,  $n_d, h_d$  – показатели преломления и толщина ДС

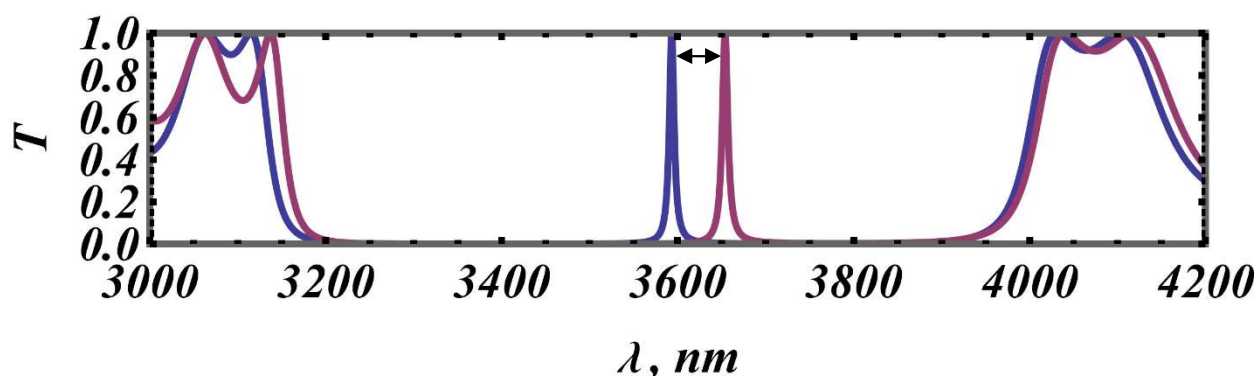


Рисунок 2. Спектры пропускания дефектного ФК с двумя принципиально различными показателями преломления ДС

Наша модель оптического сенсора состоит из двух идеальных фотонных кристаллов (ФК), между которыми расположен дефектный слой. Каждый ФК содержит  $N$  периодических ячеек, состоящих из пар слоев с разными показателями преломления и толщиной. Периодическая структура ФК формирует ФЗЗ, подавляющую прохождение света в определенном диапазоне частот. Введение дефектного слоя нарушает периодичность, создавая узкую полосу пропускания — дефектную моду, положение которой зависит от показателя преломления и толщины дефектного слоя. В частности, на рисунке 2 черной стрелкой показан сдвиг дефектной моды на  $d\lambda$  при изменении показателя преломления дефекта. По этому смещению можно определить показатель преломления дефекта. На рисунке 3

представлен возможный вариант определения показателя преломления смеси и концентрации компонентов для бинарной смеси от положения дефектного слоя.

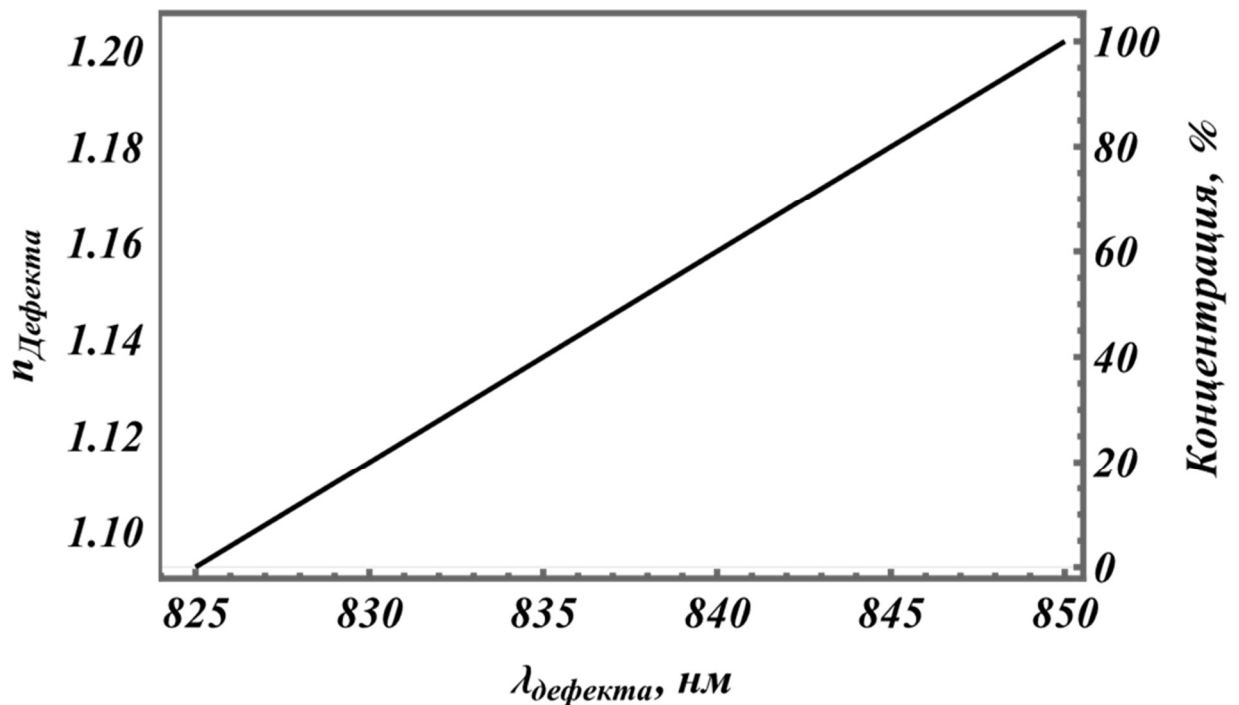


Рисунок 3. Зависимость показателя преломления смеси и концентрации компонента идеальной бинарной смеси от положения ДМ

Принцип работы сенсора основан на сдвиге дефектной моды при изменении показателя преломления дефекта, что можно наблюдать на спектрах пропускания. Для характеристики сенсора используется параметр чувствительности, который может быть выражен как абсолютная чувствительность  $S_a = \frac{d\lambda_d}{dn_d}$  или нормированная чувствительность  $S_r = \frac{1}{\lambda_d} \frac{d\lambda_d}{dn_d}$ , где  $dn_d$  — изменение показателя преломления дефектного слоя,  $d\lambda_d$  — сдвиг дефектной моды при таком изменении показателя преломления дефектного слоя, а  $\lambda_d$  — рабочая длина волны, длина волны ДМ.

**В параграфе 2.4 рассматривалось “Сравнение абсолютной и нормированной чувствительности”.**

Одна из ключевых идей работы заключается в демонстрации несостоятельности абсолютной чувствительности  $S_a$ , как параметра для корректной оценки характеристик сенсора, поскольку она зависит от рабочей длины волны и не всегда адекватно отражает свойства устройства. Для подтверждения этого был проведен численный эксперимент на основе модели одномерного ФК с заданными параметрами. Параметры модели следующие:  $n_1 = 1.5$ ,  $n_2 = 2.0$ ,  $N = 10$ ,  $h_1$  и  $h_2$

принимают значения  $h_1 = h_2 = 500 \cdot k$ ,  $h_d = 1050 \cdot k$ , где  $k$  это коэффициент пропорциональности структуры. Дисперсия показателя преломления не учитывалась для упрощения анализа, так как ее влияние могло бы исказить результаты.

Анализ спектров отражения и пропускания показал, что расположение первой ФЗЗ и ее ширина пропорциональны  $k$ . При этом сдвиг дефектной моды увеличивается с ростом  $k$ , что напрямую влияет на абсолютную чувствительность. При этом нормированная чувствительность  $S_r$  остается постоянной, что указывает на противоречие между двумя параметрами. Для решения этого противоречия в главе рассмотрена разрешающая способность приборов, и она выявила, что структуры с одинаковой нормированной чувствительностью, но разной абсолютной чувствительностью, обладают одинаковой способностью различать изменения показателя преломления  $\Delta n$  (ДС). Это подтверждает преимущество нормированной чувствительности, которая в случае сенсора на основе дефектного ФК корректно отображает свойства такого сенсора независимо от рабочего диапазона длин волн или частотного спектра. Таким образом, абсолютная чувствительность может ввести в заблуждение при анализе различных типов структур для сенсора на основе одномерного ФК с дефектом в структуре.

В III главе изложены результаты оптимизации сенсора на основе ФК с дефектом в структуре. В данной главе рассмотрены зависимости чувствительности от параметров ФК, таких как тип симметрии ФК, толщина дефекта, количество периодов и других. Предложены удобные параметры для описания структуры, такие как средний показатель преломления элементарной ячейки, нормированная ширина ФЗЗ. Используя данные параметры, удобно оптимизировать сенсор на разных рабочих длинах волн. В данной главе также рассмотрен способ перехода от показателя преломления к концентрации веществ для небинарной смеси в дефекте. Глава III состоит из четырех параграфов: "Поведение дефектной моды при изменении параметров дефектного ФК", "Оптимизация параметров структуры, типы симметрии ФК", "Оптимизация сенсора, ширина ФЗЗ и оптический контраст", "Оптимизация сенсора, решение проблемы селективности".

**Параграф 3.1. "Поведение ДМ при изменении параметров дефектного ФК".** В данном параграфе проводится детальный анализ поведения дефектной моды оптического сенсора, основанного на одномерном ФК, с акцентом на влияние различных параметров структуры. Исследуется зависимость характеристик дефектных мод от толщины дефектного слоя и концентрации компонентов бинарной смеси. В главе показано влияние показателя преломления с большой мнимой

составляющей на спектр пропускания и поведение дефектной моды внутри ФЗЗ. Установлено, что увеличение толщины дефекта приводит к сдвигу моды в длинноволновую область спектра. При этом интенсивность дефектной моды уменьшается из-за усиления поглощения внутри дефектного слоя. Оптимальная толщина дефекта определена как обеспечивающая максимальную интенсивность моды при сохранении стабильности положения моды. Также исследовано влияние мнимой составляющей показателя преломления дефектного слоя на амплитуду дефектной моды. Показано, что минимизация мнимой составляющей приводит к увеличению амплитуды моды, что повышает чувствительность сенсора.

Анализ спектров отражения и пропускания выявил, что чувствительность дефектной моды выше вблизи правой границы ФЗЗ по сравнению с левой. Коротковолновая область спектра обеспечивает более высокую чувствительность и добротность ( $Q$ -фактор) сенсора. Полученные результаты демонстрируют важность оптимизации параметров структуры для достижения максимальной чувствительности и стабильности работы сенсора.

**Параграф 3.2. "Оптимизация параметров структуры, типы симметрии ФК".** В данной параграфе исследуется влияние различных типов симметрии структуры ФК и толщины дефекта ( $h_d$ ) на его оптические свойства. Рассматриваются четыре типа симметрии, представленные на рисунке 4:

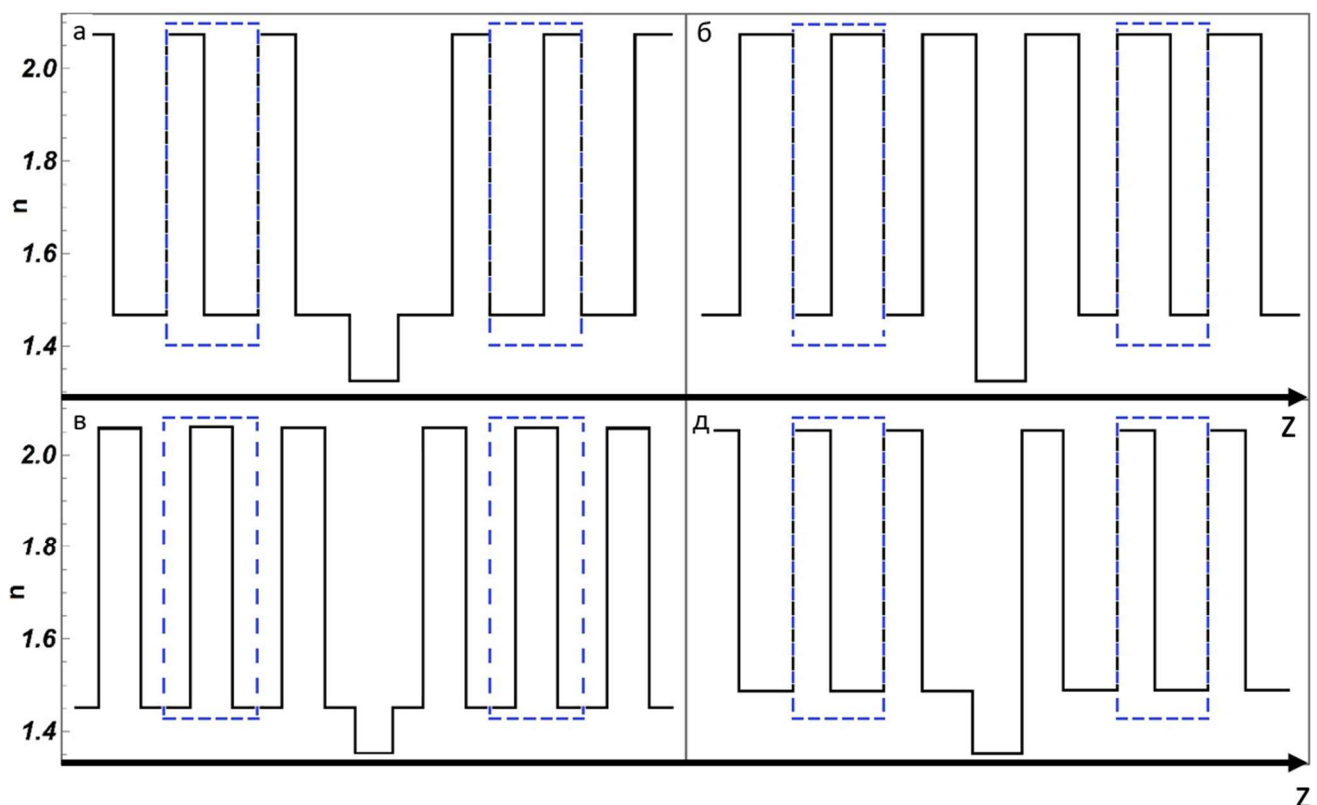


Рисунок 4. Типы размещения слоев внутри ФК. Синие пунктирные линии показывают элементарную ячейку каждого совершенного ФК слева и справа от дефектного слоя

Случай (а, б): зеркальная симметрия с дефектом между слоями с низким ( $n_1$ ) или высоким ( $n_2$ ) показателем преломления, случай (в): зеркально-симметричная ячейка и симметрия относительно дефекта и случай (д): отсутствие симметрии. Анализ спектров показал, что в структурах с зеркальной симметрией наблюдается "нулевой" режим дефектной моды, возникающий из-за дефекта, обусловленным нарушением периодичности структуры, поэтому мода возникает даже при отсутствии дефектного слоя. Однако амплитуда моды существенно зависит от типа симметрии, что подчеркивает важность анализа зависимости чувствительности сенсора от геометрической структуры дефектного ФК. Для этого были построены эволюционные графики зависимости нормированной чувствительности от толщины дефекта (рис. 5).

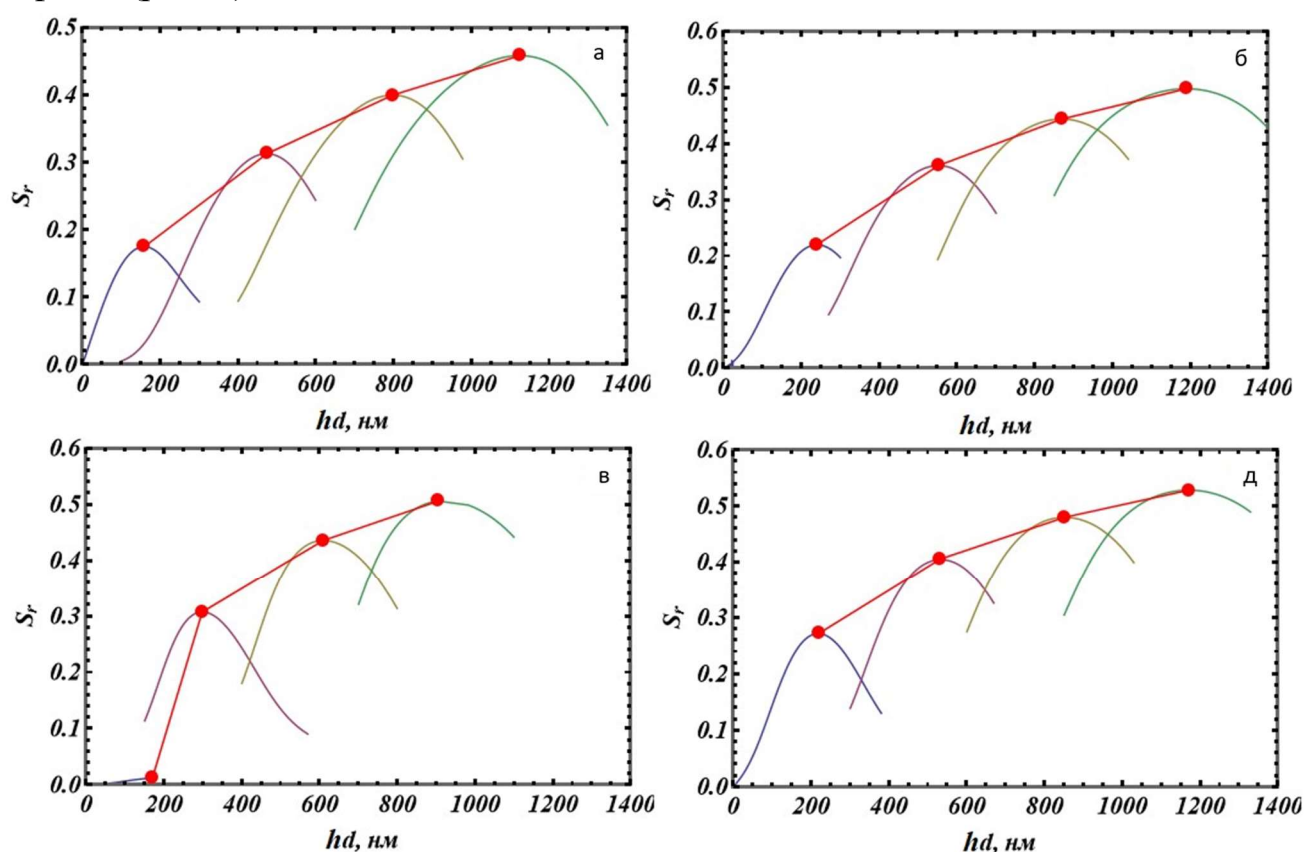


Рисунок 5. Зависимость нормированной чувствительности от толщины дефекта для структур на рис. 4. (Синий – нулевая дефектная мода, фиолетовый – первая

дефектная мода, желтый – вторая дефектная мода, зеленый – третья дефектная мода)

На рисунке 5 видно, что во всех структурах наблюдается увеличение чувствительности с увеличением толщины дефекта, с общей зависимостью, которая приблизительно описывается квадратным корнем, но в пределах каждой моды можно заметить, что зависимость чувствительности не является монотонной. Эти зависимости схожи для всех структур. Также можно заметить, что для всех структур максимум чувствительности достигается в центре ФЗЗ. В целом, вторая структура демонстрирует самую высокую чувствительность среди всех вариантов ( $S_a = 0.5$ , для 3 моды). Предполагается, что это связано с тем, что во второй структуре дефект расположен между двумя слоями с более высоким показателем преломления, что увеличивает отражение от границ дефектного слоя. Для этого также в главе рассмотрено распределение поля в таких структурах и получено, что максимум локализации поля **наблюдается** в центре кристалла, т.е. в дефекте, а также наибольшее значение интенсивности поля наблюдается у второго типа симметрии, что и объясняет максимум чувствительности у второй структуры. На рисунке 6 показана эволюция спектра  $I(z) = |E_{in}(z)|^2$  при изменении координаты  $z$  для структуры с типом симметрии “b” (рис 4b). Здесь  $E_{in}(z)$  – электрическое поле внутри структуры ФК.

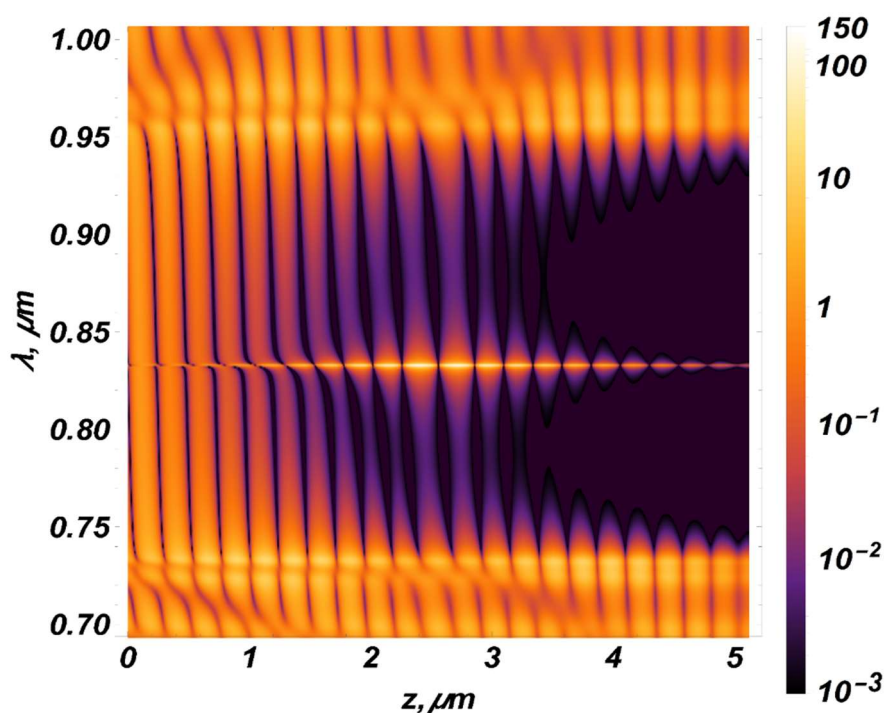




Рисунок 6. Эволюционный спектр  $I(z) = |E_{in}(z)|^2$  при изменении координаты  $z$  второй структуры со следующими параметрами:  $h_1 = 100$  нм,  $h_2 = 140$  нм,  $h_d = 320$  нм

### Параграф 3.3. "Оптимизация сенсора, ширина ФЗЗ и оптический контраст"

В данной главе исследуется влияние ширины ФЗЗ на чувствительность сенсора на основе ФК. Ширина ФЗЗ зависит от соотношения толщин слоев  $h_1$  к  $h_2$ , среднего показателя преломления ( $n_m$ ) и оптического контраста  $\Delta n = |n_1 - n_2|$ . На рисунке 7 показано, что чувствительность возрастает при увеличении отношения  $h_1$  к  $h_2$ , достигая максимума в точке выполнения четвертьволнового условия ( $n_1 h_1 = n_2 h_2 = \lambda_B / 4$ ), что соответствует максимуму ширины ФЗЗ.

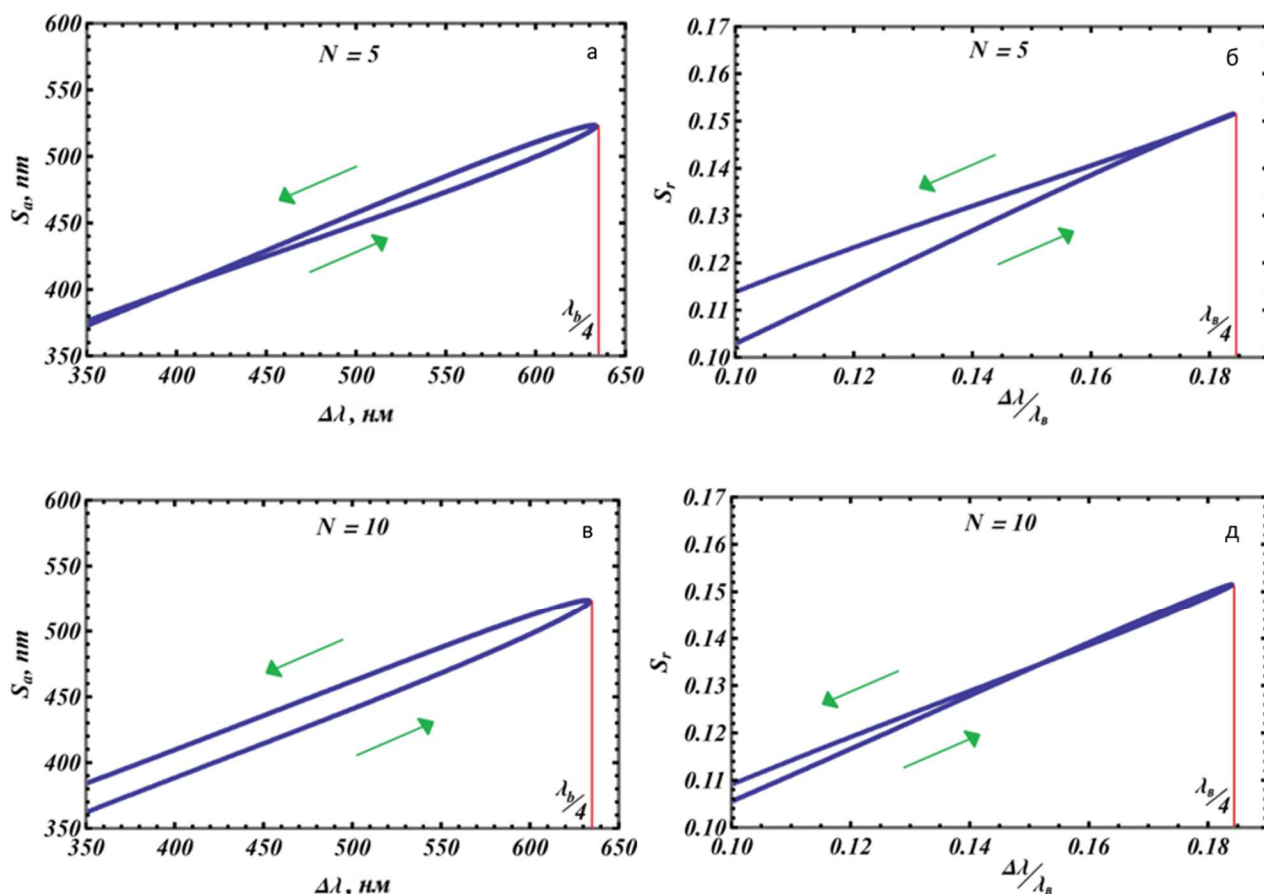


Рисунок 7. Зависимость абсолютной чувствительности от ширины ФЗЗ (а, с) и относительной чувствительности от относительной ширины ФЗЗ (б, д). Где  $d\lambda$  варьируется путем изменения  $h_1$ . Зеленые стрелки указывают на увеличение  $h_1$  при постоянном периоде. Красная линия обозначает выполнение четвертьволнового стека.  $\lambda_B$  - длина волны центра ФЗЗ



Анализ зависимости чувствительности от относительной ширины ФЗЗ ( $\Delta\lambda/\lambda_B$ ) подтверждает, что максимальная чувствительность достигается при максимальной ширине ФЗЗ. Это позволяет использовать относительную ширину как удобный параметр для оптимизации сенсоров. На рисунке 8 показано, что увеличение оптического контраста также приводит к росту ширины ФЗЗ и чувствительности, хотя зависимость становится нелинейной для больших значений  $\Delta n$ .

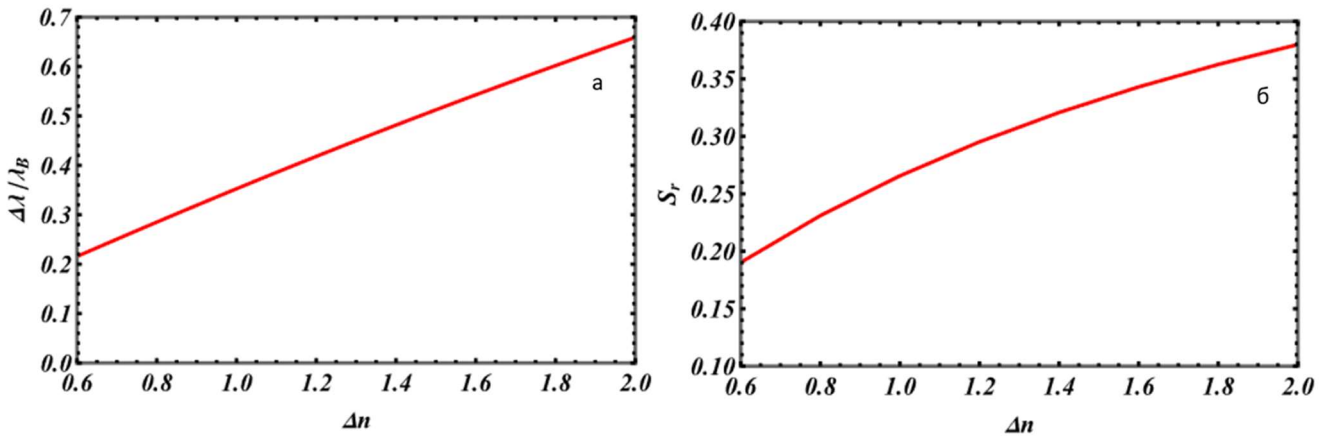


Рисунок 8. Зависимость относительной ширины ФЗЗ (а) и относительной чувствительности (б) от разности показателей преломления. Параметры:  $n_m = 1.75$ ,  $h_1 n_1 = h_2 n_2 = \lambda_B / 4$

Положение ДМ определяется периодом ячейки, средним показателем преломления и параметрами дефектного слоя ( $h_d, n_d$ ). Исследование показывает, что положение ДМ остается постоянным при изменении  $\Delta n$ , что упрощает подбор толщины ДС для центрирования ДМ в ФЗЗ. На рисунке 9 показан эволюционный график зависимости разницы между положением дефектной моды и центром ФЗЗ относительно толщины дефектного слоя  $h_d$  и от разности показателей преломления  $\Delta n$ .

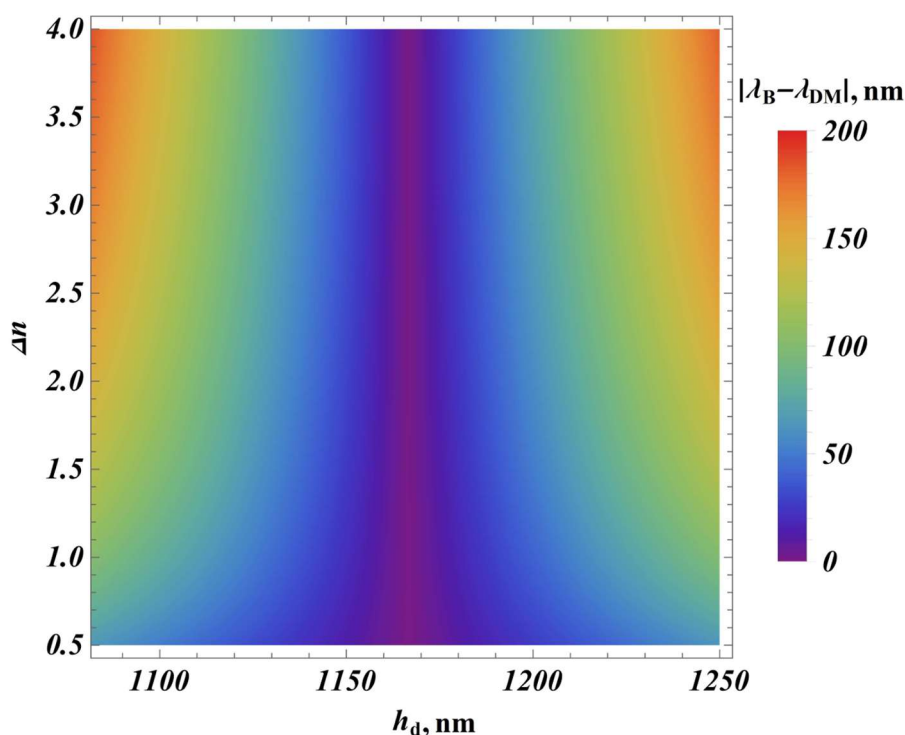


Рисунок 9. Зависимость разницы между положением ДМ и центром ФЗЗ относительно толщины дефектного слоя  $h_d$  и от разности показателей преломления  $\Delta n$

Таким образом, оптимизация сенсора требует максимизации относительной ширины ФЗЗ и расположения дефектной моды в центре ФЗЗ.

#### **Параграф 3.4. "Оптимизация сенсора, решение проблемы селективности"**

В данной главе исследуется проблема отсутствия селективности при определении концентраций компонентов в небинарных смесях и предлагаются пути её решения. Рассматривается случай трехкомпонентной газовой смеси, состоящей из кислорода ( $O_2$ ), азота ( $N_2$ ) и углекислого газа ( $CO_2$ ). Для понимания проблемы перехода от показателя преломления к концентрации для небинарной смеси представлена треугольная диаграмма показателя преломления (рис. 10).

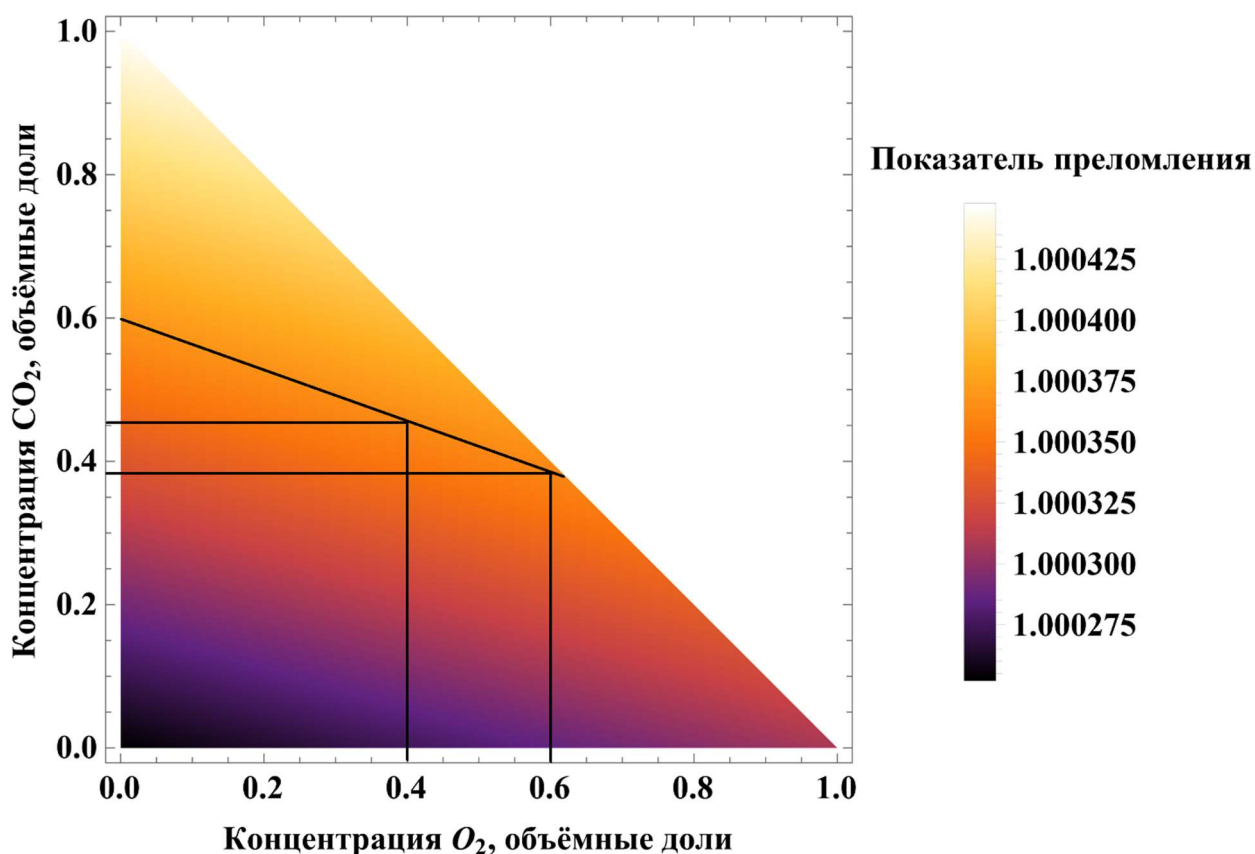


Рисунок 10. Треугольная диаграмма показателя преломления смеси в зависимости от концентрации компонентов, показатели преломления взяты на длине волны  $\lambda = 1945$  нм

Диаграмма демонстрирует неоднозначность определения концентраций компонентов по значению показателя преломления дефекта, так как существуют семейства решений по концентрациям компонентов для одного показателя преломления. В частности, на рисунке отмечен случай, когда при разных концентрациях веществ показатель преломления смеси будет одинаковым. Для устранения этой неоднозначности предлагается использовать несколько дефектных мод на разных длинах волн. Благодаря дисперсии показателя преломления компонентов, для каждой моды можно записать уравнение, связывающее показатель преломления компонентов на своей длине волны с показателем преломления дефектной моды на той же длине волны с помощью разработанной системы уравнений 5:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_d(\lambda_1) = \sum_{i=1}^m n_i(\lambda_1)\delta_i \\ n_d(\lambda_2) = \sum_{i=1}^m n_i(\lambda_2)\delta_i \\ \vdots \\ n_d(\lambda_j) = \sum_{i=1}^m n_i(\lambda_j)\delta_i \\ \vdots \\ n_d(\lambda_{m-1}) = \sum_{i=1}^m n_i(\lambda_{m-1})\delta_i \\ \sum_{i=1}^m \delta_i = 1 \end{array} \right. , \quad (5)$$

где  $\lambda_j$  - положение дефектной  $j$ -ой моды,  $n_d(\lambda_j)$  - показатель преломления смеси на длине волны дефектной  $j$ -ой моды,  $\delta_i$  - концентрация  $i$ -ого компонента,  $n_i$  - показатель преломления  $i$ -ого компонента.

Система основана на том, что каждое вещество имеет свой оригинальный спектр показателя преломления и нет веществ, у которых на разных длинах волн будут одинаковые показатели преломления. Следовательно, на разных длинах волн, в частности на длинах волн дефектов, мы получим свои значения показателя преломления, связав которые с уже известными спектрами показателя преломления чистых веществ, можно однозначно узнать концентрацию компонентов. Таким образом, предложенный подход позволяет достичь однозначного определения концентраций компонентов в многокомпонентных смесях.

В **заключении** изложены основные результаты диссертационной работы:

- Разработана модель оптического сенсора для определения показателя преломления на основе ФК с дефектом в структуре и исследованы его оптические свойства.
- Показано преимущество нормированной чувствительности по отношению к абсолютной, а также показано, что сенсор на основе ФК с дефектом позволяет однозначно определить только показатель преломления ДС.
- Оптимизирована структура сенсора и изучено влияние различных параметров, включая ширину ФЗЗ и оптический контраст, на чувствительность.
- Разработана модель многомодового сенсора, позволяющая определить концентрацию компонентов небинарной смеси.

### **Список литературы**

1. F. Segovia-Chaves et al., “Defect mode modulation for a protein solution cavity surrounded by graphene and nanocomposite layers.” *Optik*, vol. 242, 2021, p. 167161.
2. S. A. Taya et al., “Highly sensitive nano-sensor based on a binary photonic crystal for the detection of mycobacterium tuberculosis bacteria.” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 32, 2021, pp. 28406–28416.

3. J. D. Joannopoulos, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*. Princeton, Princeton Univ. Press, USA, 1995, p. 305.
4. E. Shkondin et al., “Large-scale high aspect ratio Al-doped ZnO nanopillars arrays as anisotropic metamaterials.” *Optical Materials Express*, vol. 7, no. 5, 2017, pp. 1606–1627.
5. W. R. Tinga, W. A. G. Voss, and D. F. Blossey, “Generalized approach to multiphase dielectric mixture theory.” *Journal of Applied Physics*, vol. 44, no. 9, 1973, pp. 3897–3902.
6. S. Sarkar et al., “Hybridized guided-mode resonances via colloidal plasmonic self-assembled grating.” *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 11, no. 14, 2019, pp. 13752–13760.
7. V. A. Belyakov, *Diffraction Optics of Complex-Structured Periodic Media*. New York, Springer-Verlag, USA, 1992.
8. I. M. Efimov et al., “Optical biosensor based on a photonic crystal with a defective layer designed to determine the concentration of SARS-CoV-2 in water.” *Physica Scripta*, vol. 97, no. 5, 2022, p. 055506.
9. V. G. Bordo, “Theory of light reflection and transmission by a plasmonic nanocomposite slab: Emergence of broadband perfect absorption.” *JOSA B*, vol. 38, no. 5, 2021, pp. 1442–1451.
10. P. Yeh, *Optical Waves in Layered Media*. New York, Wiley, USA, 1988, p. 416.
11. A. Yariv and P. Yeh, *Optical Waves in Crystals*. New York, Wiley, USA, 1984, p. 604.
12. N. A. Vanyushkin, A. H. Gevorgyan, and S. S. Golik, “Scattering of a plane wave by an inhomogeneous 1D dielectric layer with gradient refractive index.” *Optical Materials*, vol. 127, 2022, p. 112306.
13. G. M. Hale and M. R. Querry, “Optical constants of water in the 200-nm to 200- $\mu$ m wavelength region.” *Applied Optics*, vol. 12, no. 3, 1973, pp. 555–563.

Ефимов Илья Михайлович

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ С  
ДЕФЕКТОМ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УПРАВЛЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ  
ДЛЯ ЗАДАЧ СОЗДАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Подписано к печати  
30.05.2024 г.  
Формат 60×90/16

Усл.п.л. 1.16  
Тираж 100 экз.

Уч.-изд. л. 1.16  
Заказ № 5

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
автоматики и процессов Управления Дальневосточного отделения Российской  
академии наук (ИАПУ ДВО РАН)

Издано ИАПУ ДВО РАН. 690041, г. Владивосток, ул. Радио, дом 5

Отпечатано участком оперативной печати ИАПУ ДВО РАН

690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5

Email: [director@iacp.dvo.ru](mailto:director@iacp.dvo.ru)

[www.iacp.dvo.ru](http://www.iacp.dvo.ru)