

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора по научной работе  
Самарского филиала Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Физического института им. П.Н. Лебедева  
Российской академии наук



к.ф.-м.н. Казакевич В.С.

10 октября 2016 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Самарского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук на диссертационную работу **Серафимовича Павла Григорьевича** на тему: «Расчет и моделирование фотонно-кристаллических резонаторов в гребенчатом волноводе», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика».

Диссертация посвящена разработке методов моделирования компактных, интегрированных на кристалле резонаторов на основе расчета дифракции когерентного электромагнитного излучения на субволновых структурах, а также исследованию новых способов сверхбыстрой обработки оптических сигналов с использованием перспективных фотонных устройств.

**Актуальность диссертационной работы** определяется необходимостью реализации оптических интегральных схем следующего поколения. В частности, актуальна оптическая реализация базовых вычислительных операций. Для решения этой задачи в диссертации разработаны методы моделирования компактных, интегрированных на кристалле резонаторов на основе расчета дифракции когерентного электромагнитного излучения на субволновых структурах. Также в диссертации предложены новые способы сверхбыстрой обработки оптических сигналов с использованием перспективных фотонных устройств. Актуальность избранной темы подтверждается также тем, что в данной области ведутся активные исследования. Например, недавно были предложены интегрированные на кристалле решения для оптического дифференцирования и интегрирования на основе решёток Брэгга и кольцевого резонатора. Размеры этих устройств, используемых, как правило, в виде массивов, составляют десятки микрометров. Поэтому для практического использования нанофотонных уст-

ройств данные размеры должны быть значительно уменьшены. Недавно были предложены оптические дифференциаторы и интеграторы на основе дифракционных решеток с волноводным и плазмонным резонансами. Тем не менее, данные устройства не являются интегрированными на кристалле. Таким образом, актуальность темы исследования не вызывает сомнений.

### **Структура диссертации и общая характеристика**

Диссертационная работа Серафимовича П.Г. состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации – 221 страница, включая 45 рисунков. Список цитируемой литературы составляет 239 наименований.

**Во введении** диссертации приведена классификация существующих методов, используемых в оптике для моделирования таких резонаторов. Показаны достоинства и недостатки существующих методов. Обосновывается актуальность, научная новизна работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** исследованы особенности использования различных аналитических и численных методов для моделирования фотонно-кристаллических (ФК) резонансных структур. Поскольку размеры минимальных деталей ФК структур соответствуют примерно  $1/10$  длины волны используемого электромагнитного излучения, то параметры таких устройств могут быть рассчитаны с помощью прямого численного решения уравнений Максвелла. В качестве упрощенной альтернативы в диссертации использован аналитический метод, который основан на теории связанных мод. Этот метод позволяет получить функции пропускания и отражения системы из резонатора и волновода. Метод связанных волн предоставляет полезное понимание физических законов взаимодействия волновода и резонатора. Это понимание может быть использовано, например, для изучения влияния на работу устройства малых возмущений его параметров. Такие возмущения вызываются, в частности погрешностями изготовления. Моделирование таких искажений численными методами, основанными на временном или частотном представлении, требует использования очень мелкой расчетной сетки. Это, в свою очередь, требует использования еще большего количества процессорного времени и ресурсов памяти.

**Вторая глава** диссертации посвящена расчету ФК резонаторов для интегрирования и дифференцирования оптических сигналов. Оптическая реализация базовых вычислительных операций способна повысить уровень аналоговой об-

работки сигналов. В главе выполнен расчет параметров конкретных ФК резонаторов, выполняющих интегрирование и дифференцирование оптического сигнала. В качестве такого резонатора выбран вариант на основе гребенчатого ФК волновода. По сравнению с двумерными ФК структурами в слое резонаторы на основе гребенчатого ФК волновода обладают меньшей площадью и естественным образом интегрируются в волноводную геометрию соединений на кристалле.

**Третья глава** диссертации посвящена расчету ФК резонаторов, структура которых адаптирована к использованию нелинейных материалов. Одним из способов адаптационного изменения формы резонансной моды является введение дополнительной переходной области между зоной резонатора и зоной фотонного кристалла. Такая модификация формы резонансной моды позволяет также усилить электрическое поле в заданных областях резонатора. Например, использование щелевого резонатора даёт возможность усилить электрическое поле в щели резонатора на величину  $n_{wg}^2/n_{sl}^2$ , где  $n_{wg}$  – индекс рефракции волновода,  $n_{sl}$  – индекс рефракции материала, который заполняет щель. С одной стороны, такой подход позволяет уменьшить потери энергии внутри волновода, например, вследствие двухфотонного поглощения света в кремнии. С другой стороны, усиливается взаимодействие света с материалом, которым заполнена щель. Это позволяет эффективно использовать, например, нелинейные оптические материалы.

**Четвертая глава** диссертации посвящена расчету спектральных фильтров, оптических датчиков и модуляторов на основе резонансных структур. Рассмотрены также способы численной компенсации погрешности изготовления ФК резонаторов.

В заключении перечислены основные результаты работы.

### **Научная новизна диссертационной работы:**

- Предложена структура и разработан метод моделирования компактного интегрированного на кристалле элемента нанофотоники для интегрирования оптических сигналов. При этом для интегрирования различных порядков оптических сигналов впервые использован массив ФК резонаторов. Это позволяет на порядок повысить компактность устройства по сравнению с существующими аналогами.

- Предложена структура и разработан метод моделирования компактного интегрированного на кристалле элемента нанофотоники для дифференцирова-

ния оптических сигналов. При этом для дифференцирования оптических сигналов впервые использован ФК резонатор. Размеры предложенного дифференциатора на порядок меньше существующих аналогов.

- Предложена структура и разработан метод моделирования компактного двухкомпонентного ФК резонатора. При этом предложенная структура позволяет впервые реализовать вертикальную электронную накачку резонатора.

- Предложена структура и разработан метод моделирования пересекающихся ФК резонаторов с повышенным коэффициентом модового перекрытия. При этом использование щелевой резонансной камеры позволяет в десятки раз повысить плотность энергии электромагнитного поля в области перекрытия резонансных мод.

- Предложена структура и разработан метод моделирования компактного оптического модулятора на основе каскада из двух ФК резонаторов. При этом предложенный модулятор позволяет реализовать модуляцию в области малой интенсивности резонансной моды, что упрощает его электронную накачку.

- Предложена структура и разработан метод моделирования компактного оптического датчика на основе каскада из двух ФК резонаторов. При этом появляется возможность двукратного повышения добротности оптической резонансной системы.

- Предложен новый параллельный алгоритм расчета нанофотонных элементов на основе алгоритма Фурье-мод. При этом интенсивный по вычислениям алгоритм трансформирован в алгоритм интенсивный по обработке данных.

### **Обоснованность и достоверность научных положений и выводов**

Полученные аналитические выражения передаточных функций оптических фильтров на основе ФК резонаторов согласуются с результатами численного моделирования. Результаты моделирования, полученные с помощью численных методов, верифицировались путем увеличения количества узлов дискретной сетки в расчетной области до достижения сходимости. Кроме того, полученные автором результаты прошли апробацию на профильных научных конференциях.

Также достоверность полученных результатов обеспечивается физической адекватностью используемых математических моделей, корректностью математических выкладок и подтверждается сравнением результатов численного расчета по нескольким методам: методу конечных разностей во временной области (англ. Finite Difference Time Domain – FDTD), методу связанных волн и методу Фурье-мод.

## **Теоретическая и практическая значимость**

В целом работа носит теоретический характер, проведено большое число численных экспериментов. Наиболее важными теоретическими результатами являются: результаты численного моделирования и оценка структурных и функциональных параметров сверхкомпактных интегрированных на кристалле элементов нанофотоники на основе ФК резонатора для интегрирования и дифференцирования оптических сигналов; оценка структурных и функциональных параметров компактных оптических модуляторов и датчиков на основе массива ФК резонаторов.

Ряд положений работы, несомненно, обладает практической значимостью. К их числу можно отнести предложенные в диссертации оптические структуры на основе ФК резонаторов, которые могут быть изготовлены стандартными средствами КМОП (CMOS)-совместимых процессов изготовления нанофотонных структур, а также с помощью технологий наноимпринтинга. Такие структуры также естественным образом интегрируются электронными компонентами на кристалле.

## **Рекомендации по применению результатов**

Предложенные диссертационной работе П. Г. Серафимовича нанофотонные устройства могут быть использованы в системах управления, оптических датчиках, сенсорах, модуляторах, линиях задержки. Полностью оптическая реализация описанных структур на кристалле обеспечивает быстроедействие, компактность и энергоэффективность соответствующего устройства. Рост объёма информации в мире и необходимость обрабатывать эту информацию в реальном времени порождают новые требования к вычислительной технике. Значение максимальной рабочей частоты современных электронных вычислительных компонентов достигло естественного предела. Переход на оптоэлектронные интегрированные на кристалле вычислительные компоненты, предложенные в работе, позволит увеличить скорость обработки информации на несколько порядков. Результаты, полученные в диссертации, будут полезны в учебной и научной работе ФГБУН Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва» (Самарский университет), Института систем обработки изображений РАН - филиал ФГУ «ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН».

### **Замечания по диссертации:**

1. В диссертации не указано в явном виде, что подразумевается под «интегрированностью устройства на кристалле».

2. В формуле 2.9 из §2.2.1 неясно, чем отличаются энергетические потери в пространстве для двух- и трехмерных ФК резонаторов.

3. В главе 2 неясно, чем определяется «сверхкомпактность» предложенных решений. В частности, сравнивая с уже существующими устройствами на основе кольцевого резонатора радиусом 2 мкм.

4. Для формулы 3.5 из §3.2 нет объяснения, почему ТМ-поляризация используется для ФК-резонатора, который рассчитан для ТЕ-поляризованного света.

5. В главе 2 неясно, каким образом располагаются электроды для вертикальной накачки ФК-резонатора.

6. Имеются опечатки в формулах, например, в автореферате (на стр.16, 22), в диссертации формула (4.2).

### **Оценка диссертации в целом**

Указанные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, выполненной на высоком научном уровне и представляющей завершённое научное исследование.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации П.Г. Серафимовича, представляются научно обоснованными и достоверными. Материал диссертации изложен грамотно и логично, работа достаточно хорошо оформлена. Автореферат соответствует диссертации, в полной мере отражает основные разделы и положения выполненной работы.

Результаты диссертационной работы опубликованы в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах, докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях. По теме диссертации опубликовано 44 печатные работы из списка, рекомендованного ВАК.

### **Заключение**

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в нанофотонике. В соответствии с паспортом заявленной специальности 01.04.05 – «Оптика» направление исследований диссертации можно отнести к пункту: «Оптические методы передачи и обработки информации». Таким образом, диссертация П.Г. Серафимовича на тему: «Расчет и

моделирование фотонно-кристаллических резонаторов в гребенчатом волноводе» удовлетворяет требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней» и всем требованиям ВАК Российской Федерации, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Серафимович П.Г. заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика».

Отзыв подготовлен:

Заведующая теоретическим сектором  
Самарского филиала ФГБУН  
Физического института им. П.Н. Лебедева  
Российской академии наук

Н.Е. Молевич

Молевич Нонна Евгеньевна, доктор физико-математических наук, профессор, заведующая теоретическим сектором Самарского филиала ФГБУН Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Адрес: 443011, Самара, ул. Ново-Садовая, 221

телефон: +7 (846) 3340536

эл. адрес: [molevich@fian.smr.ru](mailto:molevich@fian.smr.ru)

Самарский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (СФ ФИАН).

Адрес: 443011, Самара, ул. Ново-Садовая, 221

телефон: +7 (846) 3341481

сайт: <http://www.fian.smr.ru>; эл. адрес: [laser@fian.smr.ru](mailto:laser@fian.smr.ru)

Диссертационная работа и отзыв были рассмотрены и одобрены на заседании Учёного совета Самарского филиала ФГБУН Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (протокол №5 от 12 октября 2016 г.)

Ученый секретарь  
СФ ФИАН, д.т.н.



С.И. Ярьско