УДК 535.8

# Интеллектуальные технические системы на основе фотоники<sup>\*</sup>

Н.В. Головастиков<sup>1, 2</sup>, П.С. Дорожкин<sup>3, 4</sup>, В.А. Сойфер<sup>1, 2</sup>

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия

<sup>2</sup> Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,

<sup>3</sup> ОАО «Российские железные дороги», Москва, Россия

<sup>4</sup> Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

#### Аннотация

Обсуждаются перспективы развития фотоники, показана значимость и актуальность проведения исследований в данной области. Раскрыт потенциал, которым обладает фотоника при ответе на социально-экономические вызовы цифровой трансформации. Продемонстрированы возможности, открывающиеся при внедрении устройств на основе фотоники в различных технических системах, предназначенных для повышения безопасности среды обитания и качества жизни человека. Рассмотрены структуры и устройства на базе фотоники для таких ключевых приложений как спектроскопия, аналоговые оптические вычисления, оптические нейронные сети. Указаны возможные приложения фотонных сенсоров и спектрометров нового типа, раскрыты их назначение и конкурентные преимущества. Рассмотрены сверхточные компактные фотонные спектрометры различных конфигураций. Обсуждаются преимущества аналоговых вычислителей перед традиционными электронными устройствами. Рассмотрены структуры нанофотоники, предназначенные для вычисления дифференциальных и интегральных операторов, показаны решения для задачи выделения контуров на изображении. Проанализирована концепция реализации искусственного интеллекта на платформе фотоники в виде оптических нейронных сетей. Рассмотрены структуры, состоящие из последовательности дифракционных элементов и основанные на принципе Гюйгенса-Френеля, а также структуры, состоящие из волноводов, взаимодействующих по принципу интерферометров Маха-Цендера. Приведена оценка мирового рынка фотоники, которая показывает, что фотоника прочно займёт своё место в индустрии будущего.

**Ключевые слова:** фотоника, интеллектуальные технические системы, спектрометрия, оптические вычисления, оптические нейронные сети.

**Цитирование:** Головастиков, Н.В. Интеллектуальные технические системы на основе фотоники / Н.В. Головастиков, П.С. Дорожкин, В.А. Сойфер // Онтология проектирования. – 2021. – Т.11, №4(42). - С.422-436. – DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-422-436.

#### Введение. Фотоника и цифровая электроника

Фотоника — отрасль науки и технологии, занимающаяся фундаментальными и прикладными аспектами работы с оптическими сигналами, а также созданием на их базе устройств различного назначения. На сегодняшний день становится понятно, что закон Мура, в одной из интерпретаций обещающий удвоение производительности процессоров каждые 18 месяцев, перестаёт выполняться по причине достижения объективных физических пределов транзисторов. Классической микроэлектронике всё сложнее обеспечить потребности современных стандартов передачи данных (5G+ и 6G), современных запросов вычислительных мощностей. По этой причине внимание научного сообщества вызывают альтернативные техноло-

Самара, Россия

<sup>\*</sup> Статья подготовлена по материалам доклада "Фотоника для умного дома и умного города", с которым 10.11.2021 года академик В.А. Сойфер выступил на конференции по искусственному интеллекту *AI Journey*. - https://ssau.ru/news/19765-viktor-soyfer-prinyal-uchastie-v-mezhdunarodnoy-konferentsii-po-iskusstvennomu-intellektu-ai-journey.

гические платформы, наиболее перспективными среди которых на сегодняшний день являются квантовые системы и системы на основе нанофотоники.

Неразрывная связь между цифровой электроникой и фотоникой возникла в середине 70-х годов прошлого века с появлением игровых видеоприставок, первых персональных компьютеров и вошла в новую фазу с появлением смартфонов и цифрового телевидения в середине 90-х. Создание компактных лазеров, развитие волоконно-оптической связи, появление всё более совершенных преобразователей оптических сигналов - это способствовало становлению фотоники и как фундаментальной науки, и как самостоятельной отрасли техники с огромным прикладным потенциалом.

Сейчас от фотоники ожидают решения более амбициозных задач. Интернету вещей (IoT), ограниченному возможностями Wi-Fi, требуются новые разработки в области волоконной оптики и систем оптической связи в свободном пространстве и Li-Fi (оптическая версия Wi-Fi). Глубокое обучение искусственного интеллекта невозможно без огромных вычислительных ресурсов, которые могут дать оптические вычисления. Оптическая связь в инфракрасном диапазоне и через Li-Fi может обеспечить высокоскоростное беспроводное соединение с очень малым числом ошибок. Энергоэффективные фотонные датчики станут основой для более совершенных систем IoT; собранная ими биометрия и оптическая информация, поможет сделать беспилотный транспорт ещё безопаснее, а Умные города ещё комфортнее. Разработка вычислительных устройств нанофотоники вызывает интерес не только в академическом сообществе, но и в коммерческой сфере. Так, собственные разработки в области кремниевой фотоники ведут компании Intel [1] и IBM [2].

В статье рассмотрено применение фотоники в интеллектуальных технических системах, предназначенных для повышения качества среды обитания в рамках концепции Умного дома и Умного города.

## 1 Фотоника и социально-экономические вызовы цифровой трансформации

Фотоника рассматривается как наиболее перспективное средство ответа на социальноэкономические вызовы цифровой трансформации. На протяжении последних десятилетий растут объёмы генерируемой информации, источниками которой являются системы видеонаблюдения, системы IoT, автономный транспорт, цифровая медицина и др. Это приводит к тому, что большинство данных, сгенерированных в течение последнего десятилетия, никогда не были обработаны или проанализированы. Растут требования к безопасности и контролю качества среды обитания человека. Появляется необходимость использовать новые возможности мониторинга окружающего пространства для задач контроля окружающей среды, состояния продукции, контроля состояния и безопасности материалов и конструкций, разработки гибридных систем визуализации и слежения для автономного транспорта, робототехники и др. Выдвигаются новые требования к системам передачи данных: низкая латентность («мгновенный» отклик), высокая (абсолютная) защищённость каналов, универсальный доступ (по принципу «всегда и везде»), возможность безграничного масштабирования; к системам навигации и технического зрения: сантиметровая точность навигации и позиционирования, функционирование в отсутствие спутникового сигнала, наблюдение в расширенном спектральном диапазоне.

Возрастают требования по скоростям и объёмам передачи и обработке информации, связанные с тем, что электрические соединения не обеспечивают необходимый рост тактовых и несущих частот. Требуемые скорости передачи и обработки информации могут быть достигнуты только с применением фотоники, обеспечивающей безопасность, доступность и масштабирование (оптоволоконная, атмосферная и космическая связь). Фотоника – основная «поддерживающая» технология для обеспечения целевых характеристик беспроводных сетей будущего. Фотоника начинает дополнять электронику при скоростной передаче данных на уровне электронных микросхем и отдельных чипов. Замена электрических каналов связи на оптические приводит к: уменьшению потерь и энергопотребления, уменьшению веса и стоимости, повышению устойчивости к воздействию внешнего электромагнитного излучения (ударам молнии и другим мощным электрическим воздействиям, что актуально для управления инженерными сооружениями, такими как Умный дом или самолёт).

Для «очувствления» роботов требуются сенсоры новых типов, к которым выдвигаются повышенные требования: использование новых спектральных диапазонов (ближний и дальний инфракрасный, терагерцовый и др.), высокая чувствительность (точность идентификации вплоть до одной молекулы примеси, точность позиционирования до десятков сантиметров при спутниковой навигации), дистанционность (работоспособность на расстоянии километров до объекта), миниатюрность (размер сенсора до 1×1 мкм), доступность (стоимость несколько евро за матрицу сенсоров).

#### 2 Повышение безопасности среды обитания и качества жизни

Важным и перспективным применением фотоники в рамках концепции Умного города могут стать системы уличного освещения, совмещающие в себе функции интеллектуального освещения (освещения с управляемой формой и спектральным составом), атмосферной оптической связи для обмена информацией, системы мультиспектральной визуализации в различных диапазонах спектра (видимый, инфракрасный, терагерцовый), системы сенсоров для наблюдения за окружающей средой, системы слежения за пешеходами и трафиком, передачи опорного сигнала для систем сверхточной навигации, технологии *IoT* для сбора, передачи и анализа получаемой информации.

Наиболее распространённым и перспективным подходом для решения прикладных задач повышения качества жизни является применение сенсоров и датчиков, основанных на методах оптической спектрометрии. Применение расширенного спектрального диапазона позволяет детектировать объекты, не видимые человеческому глазу. Методы оптической спектроскопии позволяют, в частности, надёжно определять наличие и концентрацию веществ в смесях без необходимости добавления специальных веществ-меток. Идентификация веществ посредством спектроскопии нашла широкое практическое применение при обеспечении безопасности (идентификация взрывоопасных примесей в порошках, жидкостях, атмосфере, выявление загрязнений окружающей среды), в фармацевтике и здравоохранении (ранняя диагностика заболеваний, определение патологических тканей), контроле качества продуктов питания и промышленных товаров (анализ качества лакокрасочных покрытий, моторного топлива), сельском хозяйстве (анализ отклонений в составе плодов и листьев, раннее обнаружение заболеваний), в криминалистике (анализ состава вещества и наличия малых примесей) и др. [3-5].

Эффективные аналитические системы внелабораторного анализа состава веществ в твёрдой, жидкой и газообразной формах в реальном времени являются основным инструментом оценки состояния и угроз окружающей среды, здоровья человека и протекания технологических и природных процессов.

Для решения перечисленных задач необходима портативная мульти- и гиперспектральная аппаратура. Технологии интегральной фотоники позволяют радикально снизить стоимость и массогабаритные характеристики, а также расширить область применения технологий оптической сенсорики и спектроскопии.

## 3 Спектрометры на основе фотоники

При создании спектрометрических систем возникает задача разделения входящего излучения на большое число спектральных каналов, т.е. одновременной фильтрации большого числа длин волн. Распространённым подходом к решению данной задачи являются схемы Дайсона [6] и Оффнера [7]. Главным недостатком структур на их основе являются громоздкость и сложность в изготовлении, что приводит к необходимости создания гиперспектрометров на основе элементов нанофотоники.

В последние годы был предложен ряд реализаций устройств указанного типа на основе массивов интегральных волноводов [8, 9], нерезонансных дифракционных решёток эшелле (от фр. échelle – лестница) [10], фотонных кристаллов на основе суперпризм [11], микрорезонаторов [12], фильтров на основе резонаторов Фабри-Перо [13], фильтров на основе плазмонных решёток [14], слоистых структур с клиновидными слоями [15-19].

Другим перспективным классом структур для спектральной фильтрации являются цифровые планарные голограммы, интегрированные в двумерный волновод [20-24]. Цифровые планарные голограммы обладают хорошими рабочими характеристиками, однако крайне сложны в изготовлении.

В большинстве других подходов для спектрального анализа используются фильтры в виде «дискретного» набора резонансных структур (конечных «сегментов» дифракционных решёток, систем однородных слоёв или отдельных резонаторов) с различными фиксированными резонансными частотами. Получение различных резонансных частот достигается за счёт выбора геометрических параметров фильтра, в частности, периода сегмента дифракционной решётки, толщины одного из слоёв многослойной структуры или резонатора. Именно к этому классу структур относятся спектрометры на основе метаповерхностей, достаточно активно изучаемые в последнее время [25-27]. Количество спектральных каналов определяется числом резонансных структур, составляющих фильтр, что приводит к необходимости соблюдения баланса между спектральным разрешением, шириной рабочего диапазона и размером фильтра. Это существенно ограничивает практическое применение указанных спектральных фильтров. Также следует отметить высокую сложность изготовления массивов резонаторов (метаповерхностей).

Перспективным подходом к созданию спектральных фильтров, позволяющих осуществлять фильтрацию многих различных длин волн в различных областях фильтра, является использование резонансных дифракционных решеток, у которых один или несколько параметров меняются в «плоскости фильтра» (например, в направлении периодичности решётки или в направлении, перпендикулярном ему). В качестве изменяющегося параметра используется период дифракционной решётки [28, 29], толщина волноводного слоя [30-32], толщина дифракционной решётки [33, 34], скважность решётки [35]. В некоторых работах изменяются одновременно два параметра: период и толщина волноводного слоя [36-39]; период и высота решётки [40]. Большинство исследованных структур осуществляют фильтрацию в видимом диапазоне спектра, при этом ширина рабочего диапазона в разных работах варьируется от 21 до 400 нм. Такие структуры являются компактными, поскольку состоят из одного или двух (решётка и волноводный слой) слоёв. Они просты и дёшевы в изготовлении, их создание основано на сравнительно простых методах интерференционной литографии и травления ионным пучком с маской. В большинстве указанных работ дифракционные решётки с изменяющимися параметрами предлагаются в качестве фильтрующих элементов компактных планарных спектрометров. Такие структуры перспективны для применения в качестве датчиков показателя преломления [41, 42], биосенсоров [35, 38] и датчиков крутящего момента [43].

Для решения задачи интеграции с существующими устройствами в Самарском университете создан сверхкомпактный гиперспектрометр-насадка на камеру смартфона [44] (см. рисунок 1). Для разделения длин волн в нём используется схема Оффнера, при этом приёмником служит цифровая матрица камеры мобильного устройства. Созданное устройство ра-

ботает в широком диапазоне длин волн (0,4– 1,05 мкм), обладает спектральным разрешением 5 нм и 128 спектральными каналами. При таких характеристиках гиперспектрометр компактен (размеры изделия 10х10х20 мм, масса 0,03 кг), энергоэффективен (энергопотребление 0,5 Вт) и сравнительно прост и дёшев в производстве. Главным преимуществом данного устройства является совместимость с камерой смартфона, что может позволить существенно ускорить внедрение практики гиперспектрального анализа для различных быто-



Рисунок 1 – Сверхкомпактный изображающий гиперспектрометр на базе смартфона

вых приложений в повседневную жизнь. Разработанный мобильный гиперспектрометр может быть модифицирован для использования на космических и в беспилотных летательных аппаратах.

#### 4 Аналоговые оптические вычисления

Одним из первых значимых примеров полностью оптической обработки информации является четырёхфокусная схема Фурье-коррелятора, впервые предложенная в 1964 году [45]. Аналоговые оптические вычисления на основе Фурье-коррелятора активно развивались в 1980-е годы, поскольку могли мгновенно осуществить заданное преобразование над падающим сигналом [46]. Однако широкого распространения подобные схемы не получили ввиду громоздкости системы. Прорыв произошёл в 2014 году, когда была предложена структура для аналогового оптического дифференцирования, подобная Фурье-коррелятору, в которой использованы компактные градиентные линзы [47]. Размер такой структуры составляет десятки длин волн, то есть на порядки меньше, чем размеры двухлинзовых схем.

В настоящее время основным направлением развития аналоговых оптических вычислений является создание в дополнение к электронным компьютерам «сопроцессоров», ориентированных на сверхбыстрое решение ряда конкретных задач. Среди задач, которые эффективно и успешно решаются с помощью оптических вычислителей, можно отнести аналоговое дифференцирование, интегрирование, решение дифференциальных и интегральных уравнений, оптическая реализация преобразования Фурье и операций свёртки, а также оптические нейронные сети. К преимуществам аналоговой оптической обработки информации можно отнести возможность производить вычисления со скоростью света, более широкий доступный спектральный диапазон, отсутствие тепловых потерь, отсутствие электромагнитных помех, возможность параллельной обработки, а также возможность обработки комплексных данных (за счёт использования амплитуды и фазы электромагнитной волны).

Ранее были предложены нанофотонные структуры для аналогового оптического решения обыкновенных линейных дифференциальных уравнений второго порядка с правой частью (с использованием оптических волноводов с прямоугольным сечением и кольцевых микрорезонаторов) [48], для решения интегрального уравнения Фредгольма 2-го рода (с использованием интерференционной камеры и зацикленных волноводов) [49], а также для выполнения дискретного преобразования Фурье сигнала, распространяющегося в волноводе (с использо-

ванием линзы в свободном пространстве и интерферометров Маха-Цендера для вывода излучения из волновода и ввода в волновод) [50]. Преимущество подобных устройств заключается в том, что они выполнены в геометрии «на чипе», что существенно уменьшает их формфактор и упрощает интеграцию с электронными компонентами.

В качестве нанофотонных структур для операций дифференцирования и интегрирования оптического сигнала, распространяющегося в плоскости плоскопараллельного волновода, предложены простые структуры в виде выемок и ступенек на поверхности плоскопараллельного волновода (см. рисунок 2). В частности, структура, состоящая из двух параллельных прямоугольных выемок, позволяет осуществлять дифференцирование отражённого сигнала [51]. Данный эффект достигается за счёт резонансного возбуждения собственной моды в центральной ступеньке. Структура, представляющая собой прямоугольную ступеньку на поверхности плоскопараллельного волновода, позволяет выполнять операцию интегрирования отражённого сигнала [52]. Данный эффект связан с возбуждением кросс-поляризованной моды ступеньки, приводящим к резонансному эффекту, известному как связанное состояние в континууме. Обе указанные структуры могут также работать на пропускание, выполняя обратные операции: интегрирование и дифференцирование, соответственно.



Рисунок 2 – Примеры планарных структур для оптического дифференцирования и интегрирования

Важной задачей аналоговой обработки информации является выделение контуров на изображении, которое можно осуществить, расположив дифференцирующую структуру на пути распространения оптического пучка. Для этих целей были предложены фотонные структуры, представляющие собой массив нанорезонаторов [53], а также структуры, принцип действия которых основан на плазмонном резонансе [54] или эффекте Брюстера [55] (см. рисунок 3).



Рисунок 3 – Выделение контуров на изображении с использованием эффекта Брюстера: (а, в) – оригинальные изображения; (б, г) – изображения после преобразования

#### 5 Оптические нейронные сети

Искусственные нейронные сети – вычислительные модели, имитирующие некоторые принципы работы биологических нейронов – позволили совершить рывок во многих задачах машинного обучения, таких как распознавание речи и изображений, задачи классификации и прогнозирования. Важным ограничением таких систем является высокая вычислительная сложность при выполнении вычислений на классической машине фон Неймана. Это приводит к поискам новых технологических подходов, которые позволят осуществлять работу нейронных сетей быстрее и эффективнее, в частности с использованием графических процессоров или полупроводниковых схем специального назначения. Отдельно необходимо отметить развивающиеся направления гибридных оптоэлектронных систем, основанных на обработке оптических импульсов [56] или резервуарных вычислениях [57]. В данной статье рассматривается направление, связанное с полностью оптическими нейронными сетями глубокого обучения, которое предлагает принципиально новую парадигму.

Оптические нейронные сети представляют структуру нанофотоники, имитирующую многослойный перцептрон. С большим интересом научным сообществом была встречена работа, в которой предложена структура, состоящая из набора последовательно расположенных дифракционных элементов, каждый из которых соответствует слою многослойной нейросети, а каждый пиксель на элементе – отдельному нейрону [58]. Согласно принципу Гюйгенса-Френеля, каждый такой пиксель можно считать центром излучения вторичных волн, амплитуда и фаза которых определяется произведением суммы падающих на этот пиксель волн и его комплексного коэффициента отражения или пропускания. Таким образом, каждый из нейронов соединён со всеми нейронами предыдущего слоя посредством падающего излучения и со всеми нейронами следующего слоя посредством излучаемых вторичных волн. При этом вклад нейрона определяется его комплексным коэффициентом пропускания, который задаётся в процессе обучения нейросети вариацией метода обратного распространения ошибки. На основе такого подхода была создана оптическая нейронная сеть, каждый слой которой представлял собой метаповерхность с пикселями разной толщины и которая успешно решала задачу классификации рукописных цифр [58]. По тому же принципу была смоделирована нейронная сеть, интегрированная на чипе, каждый слой которой представлял собой слоты в поверхности волновода. Такая сеть была использована для решения задачи диагностики коронарной болезни сердца [59].

Альтернативной платформой для оптических нейронных сетей могут служить интегрированные на чипе фотонные интегральные сети из волноводов, взаимодействующих друг с другом по принципу интерферометров Маха-Цендера [60]. При данном подходе каждый блок из набора интерферометров позволяет осуществить операцию матричного умножения (базовую операцию искусственной нейронной сети), а добавление между этими блоками нелинейных элементов обеспечивает нелинейную функцию активации нейронов. Исполненная таким образом нейронная сеть позволила успешно решить задачи классификации гласных звуков [60].

При таком подходе обучение оптической нейронной сети происходит на стадии компьютерного моделирования и расчёта параметров фотонной структуры. После этого созданная оптическая нейронная сеть будет выполнять предписанную задачу со скоростью света без выделения тепла и необходимости в дополнительном питании, что является неоспоримым преимуществом перед электронными аналогами.

Широкий спектр возможностей открывается в случае, если на вход подобной нейронной сети подаётся мультиспектральное излучение (см. рисунок 4). За счёт усложнения и вариативности анализа, который может быть осуществлён над спектром, подобное устройство



может быстро и эффективно решать задачи в области обеспечения безопасности и повышения качества жизни человека.

Рисунок 4 – Концепция интеллектуальной системы, состоящей из планарного спектрометра и оптической нейронной сети

# 6 Заключение. Рынок фотоники

Несмотря на то, что фотоника не имеет такой мощной производственной основы и универсальной компонентной базы, как электроника, уже сейчас международное сообщество SPIE (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers) оценивает объём мирового рынка фотоники в 2,02 трлн. долларов (см. рисунок 5) [61]. И большая часть этого рынка – чрезвычайно конкурентные потребительские технологии и сфера развлечений. Сферы обороны и безопасности, идущие следом, обеспечивают лишь шестую часть спроса. Это наглядно демонстрирует, что фотоника, как технология 21-го века, будет развиваться по иным законам, нежели электроника в веке 20-ом. Каждый Умный дом, контролируемый оптическими датчиками, каждый Умный город, покрытый комплексом беспроводных оптических сетей, каждый Умный автомобиль будут собирать невидимые глазу данные и обрабатывать их со скоростью света, принимая всё более совершенные решения. Фотоника имеет потенциал повсеместного распространения, и в данной статье рассмотрены лишь некоторые из наиболее перспективных отраслей.



Рисунок 5 – Исследование SPIE мирового рынка фотоники [61]

## Благодарности

Работа выполнена благодаря финансированию Минобрнауки России новых лабораторий под руководством молодых ученых в рамках нацпроекта «Наука и университеты» (проект FSSS-2021-0016) в лаборатории «Фотоника для умного дома и умного города» Самарского университета.

## Список источников

- [1] *Intel*. Официальный сайт. https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/architecture-and-technology/silicon-photonics/silicon-photonics-overview.html.
- [2] IBM. Официальный сайт. https://www.zurich.ibm.com/st/photonics/optics.html.
- [3] Elosua, C. Volatile Organic Compound Optical Fiber Sensors: A Review / C. Elosua, I. R. Matias, C. Bariain, F. J. Arregui // Sensors. 2006. Vol. 6(11).
- [4] Petibois, C. Chemical Mapping of Tumor Progression by FT-IR Imaging: Towards Molecular Histopathology / C. Petibois, G. Deleris // Trends Biotechnol. 2016. Vol. 24. P.455–462.
- [5] *Ragai, J.* The Scientific Detection of Forgery in Paintings / J. Ragai // Proc. Am. Philos. Soc. 2013. Vol.157. P.164–175.
- [6] Montero-Orille, C. Design of Dyson imaging spectrome-ters based on the Rowland circle concept / C. Montero-Orille, X. Prieto-Blanco, H. GonzalezNunez, R. de la Fuente // Applied Optics. 2011. Vol. 50(35). P.6487-6494.
- [7] *Карпеев, С.В.* Исследование дифракционной решётки на выпуклой поверхности как диспергирующего элемента / С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. 2015. Т.39, № 2. С.211-217.
- [8] Yebo, N. On-Chip Arrayed Waveguide Grating Interrogated Silicon-on-Insulator Microring Resonator-Based Gas Sensor / N. Yebo, W. Bogaerts, Z. Hens, and R. Baets // IEEE Photon. Technol. Lett. 2011. Vol. 23. P.1505–1506.
- [9] Gatkine, P. Arrayed waveguide grating spectrometers for astronomical applications: new results / P. Gatkine, S. Veilleux, Y. Hu, J. Bland-Hawthorn, M. Dagenais // Opt. Express. 2017. Vol.25. P.17918–17935.
- [10] Ma, X. Passive Coherent Polarization Beam Combination of a Four-Fiber Amplifier Array / X. Ma, M. Li, and J. He // IEEE Photon. J. 2013. Vol.5. 7101307 (8 pp.).
- [11] Momeni, B. Integrated photonic crystal spectrometers for sensing applications / B. Momeni, E. S. Hosseini, M. Askari, M. Soltani, A. Adibi // Opt. Commun. 2009. Vol.282. P.3168–3171.
- [12] Xia, Z. High resolution on-chip spectroscopy based on miniaturized microdonut resonators / Z. Xia, A. A. Eftekhar, M. Soltani, B. Momeni, Q. Li, M. Chamanzar, S. Yegnanarayanan, and A. Adibi // Opt. Express. 2011. Vol.19. P.12356–12364.
- [13] Wang, S.-W. Concept of a high-resolution miniature spectrometer using an integrated filter array / S.-W. Wang, C. Xia, X. Chen, W. Lu, M. Li, H. Wang, W. Zheng, and T. Zhang // Opt. Lett. 2007. Vol.32. P. 632–634.
- [14] Li, E. Broadband on-chip near-infrared spectroscopy based on plasmonic grating filter array / E. Li, X. Chong, F. Ren, and A.X. Wang // Opt. Lett. 2016. Vol.41. P.1913–1916.

- [15] *Emadi, A.* Design and implementation of a sub-nm resolution microspectrometer based on a linear-variable optical filter / A. Emadi, H. Wu, G. de Graaf, and R. Wolffenbuttel // Opt. Express. 2012. Vol.20. P.489–507.
- [16] Ayerden, N.P. Compact gas cell integrated with a linear variable optical filter / N. P. Ayerden, G. de Graaf, and R. F. Wolffenbuttel // Opt. Express. 2016. Vol.24. P.2981–3002.
- [17] *Emadi, A.* Linear variable optical filter-based ultraviolet microspectrometer / A. Emadi, H. Wu, G. de Graaf, P. Enoksson, J. H. Correia, and R. Wolffenbuttel // Appl. Opt. 2012. Vol.51. P.4308–4315.
- [18] Hendrix, K. Linear variable filters for NASA's OVIRS instrument: pushing the envelope of blocking / K. Hendrix // Appl. Opt. 2017. Vol.56. P.201–205.
- [19] Sheng, B. Linear variable filters fabricated by ion beam etching with triangle-shaped mask and normal film coating technique / B. Sheng, P. Chen, C. Tao, R. Hong, Y. Huang, and D. Zhang // Chin. Opt. Lett. 2015. Vol.13. 122301 (4 pp.).
- [20] Calafiore, G. Holographic planar lightwave circuit for on-chip spectroscopy / G. Calafiore, A. Koshelev, S. Dhuey, A. Goltsov, P. Sasorov, S. Babin, V. Yankov, S. Cabrini, and C. Peroz // Light: Science & Applications. 2014. Vol.3. e203 (7 pp.).
- [21] Babin, S. Digital optical spectrometer-on-chip / S. Babin, A. Bugrov, S. Cabrini, S. Dhuey, A. Goltsov, I. Ivonin, E.-B. Kley, C. Peroz, H. Schmidt, and V. Yankov // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol.95. 041105 (3 pp.).
- [22] Peroz, C. Multiband wavelength demultiplexer based on digital planar holography for on-chip spectroscopy applications / C. Peroz, C. Calo, A. Goltsov, S. Dhuey, A. Koshelev, P. Sasorov, I. Ivonin, S. Babin, S. Cabrini, and V. Yankov // Opt. Lett. 2012. Vol.37. P. 695–697.
- [23] Peroz, C. High-resolution spectrometer-on-chip based on digital planar holography / C. Peroz, A. Goltsov, S. Dhuey, P. Sasorov, B. Harteneck, I. Ivonin, S. Kopyatev, S. Cabrini, S. Babin, and V. Yankov // IEEE Photonics Journal. 2011. Vol.3. P.888–896.
- [24] Mossberg, T. Planar holographic optical processing devices / T. Mossberg // Opt. Lett. 2001. Vol. 26. P.414–416.
- [25] Faraji-Dana, M. Compact folded metasurface spectrometer / M. Faraji-Dana, E. Arbabi, A. Arbabi, S. M. Kamali, H. Kwon, and A. Faraon // Nature Communications. 2018. Vol.9. 4196 (8 pp.).
- [26] Zhu, A.Y. Compact Aberration Corrected Spectrometers in the Visible Using Dispersion Tailored Metasurfaces / A.Y. Zhu, W.T. Chen, J. Sisler, K.M.A. Yousef, E. Lee, Y.W. Huang, C.W. Qiu, and F. Capasso // Advanced Optical Materials. 2019. Vol.7. 1801144 (8 pp.).
- [27] Ding, F. Beam-size-invariant spectropolarimeters using gap-plasmon metasurfaces / F. Ding, A. Pors, Y. Chen, V.A. Zenin, and S.I. Bozhevolnyi // ACS Photonics. 2017. Vol.4(4). P.943–949.
- [28] *Hsu, H.-Y.* A gradient grating period guided-mode resonance spectrometer / H.-Y. Hsu, Y.-H. Lan, and C.-S. Huang // IEEE Photonics Journal. 2018. Vol.10(1). 4500109 (10 pp.).
- [29] Liu, L. A strain-tunable nanoimprint lithography for linear variable photonic crystal filters / L. Liu, H.A. Khan, J. Li, A.C. Hillier, and M. Lu // Nanotechnology. 2016. Vol.27(29). 295301 (6 pp).
- [30] Hsiung, C.T. Refractive index sensor based on gradient waveguide thickness guided-mode resonance filter / C.T. Hsiung and C.-S. Huang // IEEE Sensors Letters. 2018. Vol.2(4). P.1–4.
- [31] Sheng, B. Tunable and polarization-independent wedged resonance filter with 2D crossed grating / B. Sheng, H. Zhou, C. Tao, A. Zahid, Z. Ni, Y. Huang, R. Hong, D. Zhang // IEEE Photonics Technology Letters. 2016. Vol.28(20). P.2211–2214.
- [32] Yang, J.-M. Gradient waveguide thickness guided-mode resonance biosensor / J.-M. Yang, N.-Z. Yang, C.-H. Chen and C.-S. Huang // Sensors. 2021. Vol.21(2). 376 (12 pp.).
- [33] Dobbs, D.W. Fabrication of a graded-wavelength guided-mode resonance filter photonic crystal / D. W. Dobbs, I. Gershkovich, and B. T. Cunningham // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol.89. 123113 (3 pp.).
- [34] Ganesh, N. Compact wavelength detection system incorporating a guided-mode resonance filter / N. Ganesh, A. Xiang, N. B. Beltran, D. W. Dobbs, and B. T. Cunningham // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol.90. 081103 (3 pp.).
- [35] Triggs, G.J. Chirped guided-mode resonance biosensor / G.J. Triggs, Y. Wang, C.P. Reardon, M. Fischer, G.J.O. Evans, and T.F. Krauss // Optica. 2017. Vol.4(2). P.229–234.
- [36] Qian, L. Non-homogeneous composite GMR structure to realize increased filtering range / L. Qian, K. Wang, G. Wu, L. Zhu, C. Han, and C. Yan // Opt. Express. 2018. Vol.26(18). P.23602–23612.
- [37] Ko, Y.H. Resonant filters with concurrently tuned central wavelengths and sidebands / Y.H. Ko, N. Gupta, and R. Magnusson // Opt. Lett. 2020. Vol.45(21). P.6046–6049.
- [38] Yang, N.-Z. Biosensor based on two-dimensional gradient guided-mode resonance filter / N.-Z. Yang, C.-T. Hsiung, C.-S. Huang // Optics Express. 2021. Vol.29(2). P.1320–1332.
- [39] Hung, Y.-J. Optical spectrometer based on continuously-chirped guided mode resonance filter / Y.-J. Hung, C.-W. Kao, T.-C. Kao, C.-W. Huang, J.-J. Lin, and C.-C. Yin // Opt. Express. 2018. Vol.26. P.27515–27527.
- [40] Fang, C. Tunable guided-mode resonance filter with a gradient grating period fabricated by casting a stretched PDMS grating wedge / C. Fang, B. Dai, Z. Li, A. Zahid, Q. Wang, B. Sheng, and D. Zhang // Optics Letters. 2016. Vol.41. P. 5302–5305.

- [41] Hsiung, C.T. Refractive index sensor based on a gradient grating period guided-mode resonance / C.T. Hsiung and C.-S. Huang // IEEE Photonics Technology Letters. 2019. Vol.31(3). P.253–256.
- [42] Hsiung, C.T. Refractive index sensor based on gradient waveguide thickness guided-mode resonance filter / C.T. Hsiung and C.-S. Huang // IEEE Sensors Letters. 2018. Vol.2(4). P.1–4.
- [43] Wang, Y.-C. Lightweight torque sensor based on a gradient grating period guided-mode resonance filter / Y.-C. Wang, W-Y. Jang, and C.-S. Huang // IEEE Sensors Journal. 2019. Vol.19(16). P.6610–6617.
- [44] Бланк, В.А. Изображающий гиперспектрометр насадка / В.А. Бланк, Р.В. Скиданов // Сборник трудов III международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2017). Самара: Новая техника, 2017. С.253–255.
- [45] Lugt, A.V. Signal detection by complex spatial filtering / A.V. Lugt // IEEE Trans. Inf. Theory. 1964. Vol.10(2). P.139-145.
- [46] Weiner, A.M. Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators / A.M. Weiner // Rev. Sci. Instr. 2000. Vol.71. P.1929–1960.
- [47] Silva, A. Performing mathematical operations with metamaterials / A. Silva, F. Monticone, G. Castaldi, V. Galdi, A. Alù, N. Engheta // Science. 2014. Vol.343. P.160–163.
- [48] Tan, S. High-order all-optical differential equation solver based on microring resonators / S. Tan, L. Xiang, J. Zou, Q. Zhang, Z. Wu, Y. Yu, J. Dong, X. Zhang // Optics Letters. 2013. Vol.38. P.3735–3738.
- [49] Estakhri, N.M. Inverse-designed metastructures that solve equations / N.M. Estakhri, B. Edwards, N. Engheta // Science. 2019. Vol.363. P.1333–1338.
- [50] Cottle E. et al., [White paper] Optalysys Ltd. https://optalysys.com/white-papers.
- [51] Doskolovich, L.L. Planar two-groove optical differentiator in a slab waveguide / L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, N.V. Golovastikov, D.A. Bykov, and V.A. Soifer // Opt. Express. 2017. Vol.25. P.22328–22340.
- [52] Bezus, E.A. Spatial integration and differentiation of optical beams in a slab waveguide by a dielectric ridge supporting high-Q resonances / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, D.A. Bykov, and V.A. Soifer // Opt. Express. 2018. Vol.26. P.25156–25165.
- [53] Zhou, Y. Flat optics for image differentiation / Y. Zhou, H. Zheng, I.I. Kravchenko, J. Valentine // Nat. Photon. 2020. Vol.14. P.316–323.
- [54] Zhu, T. Plasmonic computing of spatial differentiation / T. Zhu, Y. Zhou, Y. Lou, H. Ye, M. Qiu, Z. Ruan, S. Fan // Nature Communications. 2017. Vol.8. 15391 (5 pp.).
- [55] *Нестеренко, Д.В.* Оптическое дифференцирование на основе эффекта Брюстера / Нестеренко Д.В., Колесникова М.Д., Любарская А.В. // Компьютерная оптика. 2018. Т.42(5). С.758-763.
- [56] Prucnal, P.R. Recent progress in semiconductor excitable lasers for photonic spike processing / P.R. Prucnal, B.J. Shastri, T.F. de Lima, M.A. Nahmias & A.N. Tait // Adv. Opt. Phot. 2016. Vol.8. P.228–299.
- [57] Vandoorne, K. Experimental demonstration of reservoir computing on a silicon photonics chip / K. Vandoorne, P. Mechet, T.V. Vaerenbergh, M. Fiers, G. Morthier, D. Verstraeten, B. Schrauwen, J. Dambre, P. Bienstman // Nat. Commun. 2014. Vol.5. 3541 (6 pp.).
- [58] Lin, X. All-optical machine learning using diffractive deep neural networks / X. Lin, Y. Rivenson, N.T. Yardimci, M. Veli, Y. Luo, M. Jarrahi, A. Ozcan // Science. 2018. Vol.361. P.1004-1008.
- [59] Fu, T. On-chip photonic diffractive optical neural network based on a spatial domain electromagnetic propagation model / T. Fu, Y. Zang, H. Huang, Z Du, C Hu, M Chen, S Yang, H Chen // Optics Express. 2021. Vol.29. P.31924-31940.
- [60] Shen, Y. Deep learning with coherent nanophotonic circuits / Y. Shen, N. Harris, S. Skirlo et al. // Nature Photon. 2017. Vol.11. P.441–446.
- [61] SPIE. Official website. 2020 Optics and Photonics Industry Report (Fall Update) URL: https://spie.org/news/2020optics-and-photonics-industry-report.

# Сведения об авторах



Головастиков Никита Владимирович, 1991 г. рождения. Окончил Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (2014), к.ф.-м.н. (2018). Заведующий научно-исследовательской лабораторией «Фотоника для умного дома и умного города» Самарского университета. Доцент кафедры технической кибернетики Самарского университета. Специалист в области оптики и фотоники. ORCID: 0000-0002-0123-252X; Author ID (RSCI): 724573; Author ID (Scopus): 55292665900; Researcher ID (WoS): A-5556-2014. golovastikov.nv@ssau.ru.

Дорожкин Павел Сергеевич, 1977 г. рождения. Окончил Московский физико-технический институт (1999), к.ф.-м.н. (2004). Заместитель руководителя Департамента квантовых коммуникаций ОАО "РЖД". Профессор Сколковского института науки и технологий. Специалист в области прикладных оптики и фотоники . Author ID (RSCI): 35101; Author ID (Scopus): 6701841337. *P.Dorozhkin@skoltech.ru*.





Сойфер Виктор Александрович, 1945 г. рождения. Окончил Куйбышевский авиационный институт им. С.П. Королева (1968), д.т.н. (1981), профессор (1983), академик РАН (2016), президент Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева. Член Международного оптического общества (SPIE), член правления Международной ассоциации распознавания образов (IAPR), член Межведомственного совета по присуждению премий Правительства Российской Федерации в области науки и техники. В списке научных трудов 700 работ. Author ID (RSCI): 3028; Author ID (Scopus): 36836834300; Researcher ID (WoS): C-3088-2017. soifer@ssau.ru

Поступила в редакцию 20.11.2021, после рецензирования 20.12.2021. Принята к публикации 22.12.2021.

# Intelligent systems based on photonics<sup>\*</sup>

N.V. Golovastikov<sup>1,2</sup>, S.P. Dorozhkin<sup>3,4</sup>, V.A. Soifer<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Samara University (Samara National Research University named after academician S.P. Korolyov), Samara, Russia

<sup>2</sup> Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" of RAS,

Samara, Russia

<sup>3</sup> Russian Railways, Moscow, Russia

<sup>4</sup> Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

## Abstract

This paper discusses the prospects of photonics, shows the relevance and applicability of photonics research. The potential of photonics technologies to answer the socio-economic challenges of the digital transformation age is revealed. Opportunities that emerge with the introduction of photonic devices to various technical systems designed for environmental protection and quality of life improvement are demonstrated. Concrete photonics structures and devices for such key applications as spectroscopy, analog optical calculations, and optical neural networks are closely examined. Possible applications for photonic sensors and new type spectrometers are outlined, their competitive advantages explored. Various geometries of extra fine compact photonic spectrometers are presented: based on digital planar diagrams, integrated into the photonic waveguides, metasurfaces, diffraction gratings with varying parameters. The benefits of analog optical computations against conventional electronic devices are discussed. Various nanophotonic structures designed for differential and integral operators are studied, solutions for edge detection are proposed. The concept for artificial intelligence implementation on the photonics platform using optical neural networks is analyzed. Various solutions are examined: containing sequences of diffraction elements and based on Huygens–Fresnel principle, as well as planar structures comprised of waveguides that interact as Mach–Zehnder interferometer. SPIE estimation of the international

<sup>\*</sup> The article was prepared based on the materials of the report "Photonics for a smart home and smart city", presented by Academician V.A. Soifer at the AI Journey conference. - https://ssau.ru/news/19765-viktor-soyfer-prinyal-uchastie-v-mezhdunarodnoy-konferentsii-po-iskusstvennomu-intellektu-ai-journey.

photonics market proposes that the peak of interest for this field is yet to be achieved and photonics will claim its place in the future technological landscape.

Key words: photonics, intelligent systems, spectrometry, optical computing, optical neural networks.

*Citation:* Golovastikov NV, Dorozhkin PS, Soifer VA. Intelligent systems based on photonics [In Russian]. Ontology of designing. 2021; 11(4): 422-436. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-422-436.

*Acknowledgment:* Work was conducted in the new laboratory led by young scientists supported by the Ministry of Science and Higher education of the Russian Federation as part of the national project "Science and Universities" (project FSSS-2021-0016) in the research laboratory "Photonics for smart home and smart city" in Samara University.

## List of figures

- Figure 1 Ultracompact imaging hyperspectrometer
- Figure 2 Examples of planar photonics structures for optical differentiation and integration
- Figure 3 Edge detection using Brewster effect: (a, B) original images, (6, r) images after transformation
- Figure 4 Concept of a smart system comprising a planar spectrometer and an optical neural network
- Figure 5 SPIE estimation of international photonics market value

## References

- [1] Intel. Official website. https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/architecture-and-technology/silicon-photonics/silicon-photonics-overview.html.
- [2] IBM. Official website. https://www.zurich.ibm.com/st/photonics/optics.html.
- [3] *Elosua C, Matias IR, Bariain C, Arregui FJ*. Volatile Organic Compound Optical Fiber Sensors: A Review. *Sensors*. 2006; 6(11).
- [4] *Petibois C, Deleris G.* Chemical Mapping of Tumor Progression by FT-IR Imaging: Towards Molecular Histopathology. *Trends Biotechnol*. 2016; 24: 455–462.
- [5] Ragai J. The Scientific Detection of Forgery in Paintings. Proc. Am. Philos. Soc. 2013; 157: 164–175.
- [6] *Montero-Orille C, Prieto-Blanco X, GonzalezNunez H, de la Fuente R*. Design of Dyson imaging spectrometers based on the Rowland circle concept. *Applied Optics*. 2011; 50(35): 6487-6494.
- [7] *Karpeev SV, Khonina SN, Kharitonov SI.* Study of the diffraction grating on a convex surface as a dispersive element [in Russian]. *Computer Optics*. 2015; 39(2): 211-217.
- [8] Yebo N, Bogaerts W, Hens Z, Baets R. On-Chip Arrayed Waveguide Grating Interrogated Silicon-on-Insulator Microring Resonator-Based Gas Sensor. IEEE Photon. Technol. Lett. 2011; 23: 1505–1506.
- [9] Gatkine P, Veilleux S, Hu Y, Bland-Hawthorn J, Dagenais, M. Arrayed waveguide grating spectrometers for astronomical applications: new results. Optics Express. 2017; 25: 17918–17935.
- [10] Ma X, Li M, He J. Passive Coherent Polarization Beam Combination of a Four-Fiber Amplifier Array. IEEE Photon. J. 2013; 5: 7101307 (8 pp.).
- [11] Momeni B, Hosseini ES, Askari M, Soltani M, Adibi A. Integrated photonic crystal spectrometers for sensing applications. Opt. Commun. 2009; 282: 3168–3171.
- [12] Xia, Z, Eftekhar AA, Soltani M, Momeni B, Li Q, Chamanzar M, Yegnanarayanan S, Adibi A. High resolution on-chip spectroscopy based on miniaturized microdonut resonators. Optics Express. 2011; 19: 12356–12364.
- [13] Wang S-W, Xia C, Chen X, Lu W, Li M, Wang H, Zheng W, Zhang T. Concept of a high-resolution miniature spectrometer using an integrated filter array. Opt. Lett. 2007; 32: 632–634.
- [14] Li E, Chong X, Ren F, Wang AX. Broadband on-chip near-infrared spectroscopy based on plasmonic grating filter array. Optics Letters. 2016; 41: 1913–1916.
- [15] *Emadi A, Wu H, de Graaf G, Wolffenbuttel R.* Design and implementation of a sub-nm resolution microspectrometer based on a linear-variable optical filter. *Opt. Express.* 2012; 20: 489–507.
- [16] Ayerden NP, de Graaf G, Wolffenbuttel RF. Compact gas cell integrated with a linear variable optical filter. Optics Express. 2016; 24: 2981–3002.
- [17] *Emadi A, Wu H, de Graaf G, Enoksson P, Correia JH, Wolffenbuttel R*. Linear variable optical filter-based ultraviolet microspectrometer. *Appl. Opt.* 2012; 51: 4308–4315.
- [18] Hendrix K. Linear variable filters for NASA's OVIRS instrument: pushing the envelope of blocking. Appl. Opt. 2017; 56: 201–205.

- [19] *Sheng B, Chen P, Tao C, Hong R, Huang Y, Zhang D*. Linear variable filters fabricated by ion beam etching with triangle-shaped mask and normal film coating technique. *Chin. Opt. Lett.* 2015; 13: 122301 (4 pp.).
- [20] Calafiore G, Koshelev A, Dhuey S, Goltsov A, Sasorov P, Babin S, Yankov V, Cabrini S, Peroz C. Holographic planar lightwave circuit for on-chip spectroscopy. Light: Science & Applications. 2014; 3: e203 (7 pp.).
- [21] Babin S, Bugrov A, Cabrini S, Dhuey S, Goltsov A, Ivonin I, Kley E.-B, Peroz C, Schmidt H, Yankov V. Digital optical spectrometer-on-chip. Appl. Phys. Lett. 2009; 95: 041105 (3 pp.).
- [22] Peroz C, Calo C, Goltsov A, Dhuey S, Koshelev A, Sasorov P, Ivonin I, Babin S, Cabrini S, Yankov V. Multiband wavelength demultiplexer based on digital planar holography for on-chip spectroscopy applications. Optics Letters. 2012; 37: 695–697.
- [23] Peroz C, Goltsov A, Dhuey S, Sasorov P, Harteneck B, Ivonin I, Kopyatev S, Cabrini S, Babin S, Yankov V. High-resolution spectrometer-on-chip based on digital planar holography. *IEEE Photonics Journal*. 2011; 3: 888– 896.
- [24] Mossberg T. Planar holographic optical processing devices. Optics Letters. 2001; 26: 414–416.
- [25] *Faraji-Dana M, Arbabi E, Arbabi A, Kamali SM, Kwon H, Faraon A*. Compact folded metasurface spectrometer. *Nature Communications*. 2018; 9: 4196 (8 pp.).
- [26] Zhu AY, Chen WT, Sisler J, Yousef KMA, Lee E, Huang YW, Qiu CW, Capasso F. Compact Aberration Corrected Spectrometers in the Visible Using Dispersion Tailored Metasurfaces. Advanced Optical Materials. 2019; 7: 1801144 (8 pp.).
- [27] *Ding F, Pors A, Chen Y, Zenin VA, Bozhevolnyi SI.* Beam-size-invariant spectropolarimeters using gap-plasmon metasurfaces *ACS Photonics*. 2017; 4: 943–949.
- [28] *Hsu HY, Lan Y-H, Huang C-S.* A gradient grating period guided-mode resonance spectrometer *IEEE Photonics Journal.* 2018; 10: 4500109 (10 pp.).
- [29] Liu L, Khan HA, Li J, Hillier AC, Lu M. A strain-tunable nanoimprint lithography for linear variable photonic crystal filters Nanotechnology. 2016; 27: 295301 (6 pp).
- [30] *Hsiung CT, Huang C-S.* Refractive index sensor based on gradient waveguide thickness guided-mode resonance filter *IEEE Sensors Letters*. 2018; 2: P. 1–4.
- [31] Sheng B, Zhou H, Tao C, Zahid A, Ni Z, Huang Y, Hong R, Zhang D Tunable and polarization-independent wedged resonance filter with 2D crossed grating *IEEE Photonics Technology Letters* 2016; 28: P. 2211–2214.
- [32] Yang J-M, Yang N-Z, Chen C-.H, Huang C-S. Gradient waveguide thickness guided-mode resonance biosensor Sensors. 2021; 21: 376 (12 pp.).
- [33] *Dobbs DW, Gershkovich I, Cunningham BT.* Fabrication of a graded-wavelength guided-mode resonance filter photonic crystal *Appl. Phys. Lett.* 2006; 89: 123113 (3 pp.).
- [34] Ganesh N, Xiang A, Beltran NB, Dobbs DW, Cunningham BT. Compact wavelength detection system incorporating a guided-mode resonance filter Appl. Phys. Lett. 2007; 90: 081103 (3 pp.).
- [35] Triggs GJ, Wang Y, Reardon CP, Fischer M, Evans GJO, Krauss TF. Chirped guided-mode resonance biosensor Optica. 2017; 4: 229–234.
- [36] Qian L, Wang K, Wu G, Zhu L, Han C, Yan C. Non-homogeneous composite GMR structure to realize increased filtering range Optics Express. 2018; 26: 23602–23612.
- [37] Ko YH, Gupta N, Magnusson R. Resonant filters with concurrently tuned central wavelengths and sidebands *Op*tics Letters 2020; 45: 6046–6049.
- [38] Yang N-Z, Hsiung C-T, Huang C-S. Biosensor based on two-dimensional gradient guided-mode resonance filter Optics Express. 2021; 29: 1320–1332.
- [39] Hung Y-J, Kao C-W, Kao T-C, Huang C-W, Lin J-J, Yin C-C. Optical spectrometer based on continuouslychirped guided mode resonance filter Optics Express. 2018; 26: 27515–27527.
- [40] Fang C, Dai B, Li Z, Zahid A, Wang Q, Sheng B, Zhang D. Tunable guided-mode resonance filter with a gradient grating period fabricated by casting a stretched PDMS grating wedge Optics Letters. 2016; 41: 5302–5305.
- [41] Hsiung CT, Huang C-S. Refractive index sensor based on a gradient grating period guided-mode resonance IEEE Photonics Technology Letters. 2019; 31: 253–256.
- [42] *Hsiung CT, Huang C-S.* Refractive index sensor based on gradient waveguide thickness guided-mode resonance filter *IEEE Sensors Letters*. 2018; 2: 1–4.
- [43] *Wang Y-C, Jang W-Y, Huang C-S.* Lightweight torque sensor based on a gradient grating period guided-mode resonance filter *IEEE Sensors Journal*. 2019; 19: 6610–6617.
- [44] Blank VA, Skidanov RV. Attachable imaging spectrometer [in Russian]. Book of abstracts of III International conference and school «Information technologies and nanotechnologies» (ITNT-2017) Samara: New technology. 2017. P.253-255.
- [45] Lugt AV. Signal detection by complex spatial filtering. IEEE Trans. Inf. Theory. 1964; 10(2): 139-145.
- [46] Weiner AM. Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators. Rev. Sci. Instr. 2000; 71: 1929–1960.

- [47] *Silva A, Monticone F, Castaldi G, Galdi V, Alù A, Engheta N.* Performing mathematical operations with metamaterials *Science*. 2014; 343: 160–163.
- [48] Tan S, Xiang L, Zou J, Zhang Q, Wu Z, Yu Y, Dong J, Zhang X. High-order all-optical differential equation solver based on microring resonators Optics Letters. 2013; 38: 3735–3738.
- [49] *Estakhri NM, Edwards B, Engheta N.* Inverse-designed metastructures that solve equations. *Science*. 2019; 363: 1333–1338.
- [50] Cottle E, Michel F, Wilson J, New N, Kundu I. [White paper] Optalysys Ltd. https://optalysys.com/white-papers
- [51] *Doskolovich LL, Bezus EA, Golovastikov NV, Bykov DA, Soifer VA* Planar two-groove optical differentiator in a slab waveguide *Opt. Express.* 2017; 25: 22328–22340.
- [52] Bezus EA, Doskolovich LL, Bykov DA, Soifer VA Spatial integration and differentiation of optical beams in a slab waveguide by a dielectric ridge supporting high-Q resonances Opt. Express. 2018; 26: 25156–25165.
- [53] Zhou Y, Zheng H, Kravchenko II, Valentine J. Flat optics for image differentiation Nat. Photon. 2020; 14: 316– 323.
- [54] *Zhu T, Zhou Y, Lou Y, Ye H, Qiu M, Ruan Z, Fan S.* Plasmonic computing of spatial differentiation *Nature Communications*. 2017; 8: 15391 (5 pp.).
- [55] Nesterenko DV, Kolesnikova MD, Lyubarskaya AV. Optical differentiation based on the Brewster effect Компьютерная оптика. 2018; 42: P. 758-763 [in Russian].
- [56] Prucnal PR, Shastri BJ, de Lima TF, Nahmias MA, Tait AN. Recent progress in semiconductor excitable lasers for photonic spike processing Adv. Opt. Phot. 2016; 8: P. 228–299.
- [57] Vandoorne K, Mechet P, Vaerenbergh TV, Fiers M, Morthier G, Verstraeten D, Schrauwen B, Dambre J, Bienstman P. Experimental demonstration of reservoir computing on a silicon photonics chip Nat. Commun. 2014; 5: 3541 (6 pp.).
- [58] *Lin X, Rivenson Y, Yardimci NT, Veli M, Luo Y, Jarrahi M, Ozcan A*. All-optical machine learning using diffractive deep neural networks *Science*. 2018; 361: 1004-1008.
- [59] *Fu T, Zang Y, Huang H, Du Z, Hu C, Chen M, Yang S, Chen H.* On-chip photonic diffractive optical neural network based on a spatial domain electromagnetic propagation model *Optics Express*. 2021; 29: 31924-31940.
- [60] *Shen Y, Harris N, Skirlo S. et al.* Deep learning with coherent nanophotonic circuits. *Nature Photon*. 2017; 11: 441–446.
- [61] SPIE. Official website. 2020 Optics and Photonics Industry Report (Fall Update) https://spie.org/news/2020optics-and-photonics-industry-report.

#### About the authors

*Nikita Vladimirovich Golovastikov* (b. 1991), graduated from S.P. Korolyov Samara national research university (2014); Candidate of Sciences in Physics (2018). Head of research laboratory "Photonics for smart home and smart city" in Samara university. Assistant professor in Samara university. Research interests include optics and photonics. ORCID: 0000-0002-0123-252X; Author ID (RSCI): 724573; Author ID (Scopus): 55292665900; Researcher ID (WoS): A-5556-2014. *golovastikov.nv@ssau.ru*.

*Pavel Sergeevich Dorozhkin* (b. 1977), graduated from Moscow Institute of Physics and Technology (1999), Candidate of Sciences in Physics (2004). Deputy Director of Quantum Communication Department, Russian Railways. Professor of Skolkovo Institute of Science and Technology. Research interests include applied optics and photonics. Author ID (RSCI): 35101; Author ID (Scopus): 6701841337. P.Dorozhkin@skoltech.ru.

*Victor Alexandrovich Soifer* (b. 1945), graduated from S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute in 1968; advanced Doctor of Engineering (1981), Professor (1983); a full member of the RAS (2016), President of Samara National Research University. He is a fellow of the international society for optics and photonics (SPIE), a member of the governing board of the International Association for Pattern Recognition (IAPR), and a member of the interdepartmental council for the Russian Federation Government Awards in Science and Technology. His scientific publications include 700 research works. Author ID (RSCI): 3028; Author ID (Scopus): 36836834300; Researcher ID (WoS): C-3088-2017. *soifer@ssau.ru*.

Received November 20, 2021. Revised December 20, 2021. Accepted December 22, 2021.