

Резонансные структуры нанофотоники для аналоговых оптических вычислений

А.С. Бугаев^{1,2}

¹Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН, Моховая 11, корп. 7, Москва, Россия, 125009

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский переулок 9, Долгопрудный, Россия, 141701

Аннотация. В настоящее время фотоника рассматривается в качестве основного научного направления, призванного обеспечить дальнейшее развитие вычислительных систем. В этом обзоре рассмотрены основные научные результаты, полученные в последние годы в области разработки и создания структур нанофотоники для аналоговых оптических вычислений. Основное внимание уделено оптической реализации базовых операций дифференцирования и интегрирования оптического сигнала во времени и по пространственной переменной.

1. Введение

На сегодняшний день развитие электроники, существенным образом изменившей технологию прошлого века, вступает в новую фазу. Приближение степени интеграции современных электронных вычислительных устройств к фундаментальным физическим ограничениям неизбежно влечет замедление темпов роста их быстродействия и эффективности. В качестве основного научного направления, призванного обеспечить дальнейшее развитие вычислительных систем рассматривается фотоника. Ведущие компании-производители вычислительной техники (IBM, Intel) активно развивают технологии создания вычислительных систем, в которых в качестве информационных носителей используются оптические сигналы вместо электрических. При этом элементы нанофотоники рассматриваются как новая платформа (новая элементная база) для аналоговых электронно-оптических вычислительных систем [1–4]. В частности, в работе [2] было показано, что слой определенным образом спроектированного метаматериала позволяет оптически выполнить ряд важных математических операций (дифференцирование и интегрирование оптического сигнала по пространственной координате, свертку сигнала с заданным ядром). Указанная работа вызвала большой резонанс и послужила стимулом к разработке новых структур нанофотоники для аналоговых оптических вычислений.

В настоящем докладе представлен краткий обзор научных результатов, полученных в течение последних 10 лет в области разработки и создания структур нанофотоники для аналоговых оптических вычислений. Основное внимание уделено базовым операциям

дифференцирования и интегрирования оптического сигнала во времени и по пространственной переменной.

2. Дифференцирование и интегрирование временных оптических сигналов

Под дифференцированием (интегрированием) временного оптического сигнала (оптического импульса) понимается дифференцирование (интегрирование) огибающей импульса. По мнению автора настоящей работы, наиболее значимые научные результаты в области разработки и создания оптоволоконных структур фотоники для дифференцирования (интегрирования) оптических импульсов, распространяющихся в оптических волокнах, были получены в научной группе профессора José Azaña (INRS-EMT, Монреаль, Канада) [5–11]. В работах данной научной группы для реализации операций временного дифференцирования (интегрирования) были использованы резонансные брэгговские структуры и кольцевые резонаторы. Использование резонансных структур для выполнения операций дифференцирования (интегрирования) связано с тем, что спектры отражения и пропускания в окрестности резонансов, описываемых профилем Фано, в пределах определенных интервалов частот могут аппроксимировать передаточные функции дифференцирующих и интегрирующих фильтров. Следует отметить, что более сложные системы, состоящие из нескольких резонаторов, позволяют решать во времени обыкновенные дифференциальные уравнения различных порядков и системы дифференциальных уравнений [12, 13].

Помимо временных преобразований оптических сигналов, распространяющихся в оптических волокнах, большой интерес представляет реализация операций дифференцирования и интегрирования оптических импульсов, распространяющихся в свободном пространстве. Ряд важных результатов в данной области был получен в научной группе академика В.А. Соифера. В частности, в работах [14–19] данной научной группы впервые было показано, что операции дифференцирования и интегрирования огибающей оптического импульса могут быть эффективно реализованы резонансной дифракционной решеткой. При этом набор из нескольких последовательно расположенных дифракционных решеток позволяет эффективно вычислить производные высших порядков [17]. Теоретические описания дифракции временного оптического импульса на резонансных дифракционных структурах, предложенные в работах [14–19], послужили основой для развития теории пространственно-временных преобразований оптических сигналов, рассмотренных ниже в разделе 4.

3. Пространственное дифференцирование и интегрирование оптических сигналов

Под пространственным дифференцированием (интегрированием) понимается дифференцирование (интегрирование) профиля падающего монохроматического светового пучка по пространственной координате.

Широкий класс операций пространственной фильтрации оптического сигнала может быть выполнен оптическим коррелятором [20, 21]. Оптический коррелятор, или когерентный оптический Фурье-процессор, состоит из двух линз, оптически реализующих преобразование Фурье, и пространственного фильтра, который кодирует передаточную функцию, описывающую требуемое пространственное преобразование входного светового пучка. В частности, для реализации операции дифференцирования в такой системе в качестве пространственного фильтра следует использовать дифференцирующий фильтр с функцией комплексного пропускания, пропорциональной пространственной частоте. К сожалению, относительно большие размеры оптического коррелятора существенно ограничивают область его практических применений.

Использование структур нанофотоники позволяет создать пространственные дифференциаторы и интеграторы, имеющие толщину порядка длины волны обрабатываемого оптического сигнала. Концепция применения структур нанофотоники для выполнения пространственных преобразований оптических сигналов была предложена только в 2014 году в группе профессора Н. Энгеты (Университет Пенсильвании). В основной работе [2] была теоретически рассмотрена реализация операций пространственного дифференцирования,

интегрирования и свертки оптического сигнала. При этом было предложено два подхода. Первый подход состоял в использовании компактных аналогов оптических корреляторов, в которых «обычные» фурье-линзы были заменены компактными слоями с градиентным показателем преломления, а в качестве пространственного фильтра использовалась метаповерхность (тонкий слой метаматериала), кодирующая заданную функцию пропускания. Второй подход состоял в использовании многослойной структуры, рассчитанной непосредственно из условия формирования заданного пространственного преобразования входного сигнала, описываемого оператором свертки с заданным ядром.

Первый эксперимент, подтверждающий возможности дифференцирования и интегрирования по пространственной переменной с использованием метаповерхности, был выполнен в группе профессора С.И. Божевольного (Университет Южной Дании) в 2015 году [4]. Для оптического дифференцирования и интегрирования был использован первый подход, в рамках которого выполнение указанных операций осуществляется в оптическом корреляторе, состоящем из линзы и отражающего пространственного фильтра. В качестве фильтра использовалась отражающая метаповерхность, кодирующая функцию пропускания дифференцирующего (интегрирующего) фильтра. Метаповерхность была представлена в виде набора резонаторов типа металл-диэлектрик-металл [4, 22]. В таких резонаторах формируются резонансы Фабри-Перо плазмонных мод, распространяющихся в металлических щелях. Представленные в [4] результаты экспериментальных исследований подтверждают реализуемость операции оптического дифференцирования (интегрирования) с помощью метаповерхности. В то же время, важно отметить, что метаповерхности в [4] реализуют операции дифференцирования и интегрирования только вместе с линзой, что не позволяет говорить о компактности предложенной системы. В ряде последующих работ [23–25] для кодирования требуемых функций пропускания пространственного фильтра были использованы диэлектрические метаповерхности, которые позволяют уменьшить потери, связанные с поглощением в металлических обкладках нанорезонаторов, и достичь более высокой эффективности при реализации дифференциальных и интегральных преобразований.

По мнению автора настоящей работы, более перспективным является второй подход, в рамках которого структура нанофотоники непосредственно реализует заданное пространственное преобразование входного сигнала. В этом случае одна структура (без дополнительных линз) по функциональности заменяет оптический коррелятор. Отметим, что коэффициенты отражения и пропускания структуры, рассматриваемые как функции пространственной частоты (тангенциальной компоненты волнового вектора падающей волны), соответствуют передаточным функциям, описывающим преобразование падающего светового пучка [4]. Соответственно, для реализации базовых операций пространственного дифференцирования и интегрирования светового пучка следует использовать структуры нанофотоники, у которых коэффициенты отражения или пропускания позволяют аппроксимировать передаточные функции дифференциатора и интегратора. В частности, передаточная функция интегратора может быть аппроксимирована резонансным спектром отражения или пропускания с Лоренцевой формой линии. Передаточная функция дифференциатора хорошо аппроксимируется в окрестности нулей отражения и пропускания, возникающих вблизи резонанса. Наиболее значимые результаты в области расчета и создания дифференцирующих и интегрирующих структур указанного типа были получены в научной группе академика В.А. Соифера. В частности, в работах данной научной группы впервые было показано, что операции дифференцирования и интегрирования профиля оптического сигнала могут быть эффективно реализованы т.н. брэгговскими решётками с дефектным слоем (БРДС) [26–28], резонансными дифракционными решётками [29, 30] и трехслойными структурами с W-образным профилем показателя преломления [31]. Интересно отметить, что резонансные структуры также позволяют оптически вычислить оператор Лапласа [28, 32]. Данная операция широко используется в обработке изображений для выделения контуров.

Первый эксперимент, подтверждающий возможность дифференцирования по пространственной переменной с использованием резонансной дифракционной решетки, был выполнен в 2018 году [30] на оборудовании Центра коллективного пользования "Нанофотоника

и дифракционная оптика" [33], созданного совместными усилиями Самарского университета и Института систем обработки изображений РАН [34]. При этом было достигнуто хорошее качество дифференцирования, значительно превышающее качество дифференцирования с помощью метаповерхности в работе [4]. Важно также отметить, что дифференциаторы и интеграторы на основе резонансных дифракционных решеток и БРДС не только значительно компактнее, чем аналогичные структуры на основе корреляторов с метаповерхностью, но и значительно более просты с точки зрения технологической реализации.

Интересные металлодиэлектрические структуры для дифференцирования рассмотрены в работах [35, 36]. В частности, в [35] рассмотрен дифференциатор, который состоит из призмы, на одну из граней которой нанесена металлическая пленка. Операция дифференцирования падающего пучка в данном случае осуществляется при отражении за счет возбуждения падающим пучком поверхностного плазмон-поляритона на поверхности металлической пленки. Экспериментальные исследования показывают эффективность использования такой структуры для оптического выделения контуров.

Большой интерес также представляет разработка планарных (интегрированных «на чипе») дифференцирующих и интегрирующих устройств. В качестве перспективных платформ для интегрированных «на чипе» систем фотоники рассматриваются технологическая платформа «диэлектрик на диэлектрике» [37-38], гребенчатые фотоннокристаллические волноводы [39-40] и одномерные фотонные кристаллы (ФК), выполненные в виде системы однородных диэлектрических слоев [41]. Информационными носителями в таких интегрированных системах являются волноводные моды, распространяющиеся в двумерном волноводном слое и блоховские поверхностные волны, распространяющиеся по границе ФК [42]. Для блоховских поверхностных волн, распространяющихся по границе ФК, были предложены дифференциаторы на основе планарных аналогов брэгговских решеток с «дефектом» [43, 44]. Для дифференцирования и интегрирования оптических сигналов, распространяющихся в двумерном волноводном слое, была предложена простая планарная структура, соответствующая двум выемкам на поверхности волноводного слоя [45, 46]. Выполнение операций дифференцирования и интегрирования в такой структуре осуществляется за счет резонанса, связанного с возбуждением моды, локализованной в области между выемками. Ещё одной крайне простой резонансной структурой для дифференцирования и интегрирования волноводных пучков является диэлектрическая ступенька на поверхности волновода [47]. Интересно отметить, что поскольку операция интегрирования реализуется структурой с Лоренцевой формой спектра, то указанные выше планарные структуры также могут быть использованы в качестве интегрированных «на чипе» угловых и частотных фильтров [48–50].

4. Пространственно-временные преобразования оптических сигналов

В рассмотренных выше работах временные и пространственные преобразования оптических пучков описывались по отдельности. То есть при рассмотрении пространственных операций оптический пучок предполагался монохроматическим, а при описании временных преобразований не учитывалась пространственная структура пучка. В данном разделе рассматриваются пространственно-временные преобразования оптических сигналов, реализуемые резонансными структурами нанофотоники в виде дифракционных решеток и многослойных структур.

Сначала поясним, как преобразование пространственно-временного оптического пучка, происходящее при его дифракции на структуре нанофотоники, можно описать в рамках теории линейных систем. Функционирование линейной системы может быть описано передаточной функцией (ПФ), которая представляет реакцию системы на экспоненциальный гармонический сигнал. В оптике аналогом такого сигнала является плоская волна. Действительно, оптический пучок общего вида может быть представлен в виде суперпозиции плоских волн различных частот и направлений. Для простоты рассмотрим двумерный случай. В этом случае плоская волна может быть описана частотой k и пространственной частотой (тангенциальной компонентой волнового вектора) k_x . Для простоты будем считать, что поляризация падающего

пучка (плоских волн, составляющих пучок) волны является постоянной и не изменяется при взаимодействии со структурой.

При падении плоской волны с некоторой частотой на многослойную структуру или субволновую дифракционную решётку, у которой существуют только нулевые распространяющиеся порядки дифракции, в отражении и пропускании также получим одну плоскую волну такой же частоты. При этом поперечная компонента волнового вектора k_x также сохраняется. Изменения амплитуды и фазы отражённой (прошедшей) волны будут описываться комплексным коэффициентом отражения (пропускания). Таким образом, мы имеем полную аналогию с линейными системами, только вместо реакции на экспоненциальный сигнал следует рассматривать реакцию системы на падающую плоскую волну. Согласно приведённому анализу, преобразование пространственно-временного оптического пучка в приближении линейной оптики можно описать как преобразование сигнала линейной системой с ПФ, соответствующей коэффициенту отражения (пропускания) структуры, рассматриваемому как функция двух переменных k и k_x .

Общий вид только временных или только пространственных преобразований, реализуемых резонансными структурами, может быть описан профилями Фано (резонансными аппроксимациями коэффициентов отражения и пропускания), рассматриваемыми как функции только «временной» частоты k или только пространственной частоты k_x . Именно тот факт, что профили Фано позволяют аппроксимировать ПФ дифференциаторов и интеграторов, позволил использовать резонансные структуры для выполнения операций временного и пространственного дифференцирования и интегрирования. Для описания преобразований пространственно-временного оптического пучка необходимы пространственно-временные обобщения профиля Фано, соответствующие резонансным аппроксимациям коэффициентов отражения и пропускания структуры, рассматриваемым как функции двух переменных k и k_x . Ряд таких $k k_x$ аппроксимаций был получен в научной группе академика В.А. Сойфера [51–54]. Указанные аппроксимации позволяют в рамках единой методологической основы описать класс пространственно-временных преобразований оптических сигналов, осуществляемых резонансными дифракционными структурами, установить связь структуры и параметров резонансов с изменениями пространственно-временных характеристик преобразуемого оптического сигнала. В частности, в работе [54] показано, что резонансная дифракционная решетка выполняет сложное преобразование, описываемое неоднородным дифференциальным уравнением параболического типа. В случае низкодобротного резонанса данное преобразование включает операции дифференцирования огибающей импульса по времени и дифференцирование второго порядка по пространственной координате. В работах [55–57] получены пространственно-временные обобщения профиля Фано в общем трехмерном случае, когда коэффициенты отражения и пропускания структуры рассматриваются как функции трёх переменных, частоты k и двух пространственных частот k_x , k_y . На основе данных аппроксимаций показано, что преобразование огибающей пространственно-временного оптического импульса, происходящее при дифракции на резонансной структуре, описывается дифференциальным уравнением в частных производных гиперболического типа, сводящимся к уравнению Клейна-Гордона. В частных случаях пространственного или временного падающего пучка данное преобразование сводится к рассмотренным ранее операциям дифференцирования и интегрирования по пространственной координате или во времени.

5. Заключение

Рассмотрены основные научные результаты, полученные в последние годы в области разработки и создания структур нанофотоники для аналоговых оптических вычислений и оптической обработки информации. Ведущими научными группами, работающими в данной области, являются группа профессора José Azaña (INRS-EMT, Монреаль, Канада), группа академика В.А. Сойфера (Самарский университет, Самара, Россия) и группа профессора Н. Энгеты (Университет Пенсильвании).

Представленный анализ показывает, что базовые операции дифференцирования и интегрирования оптического сигнала во времени и по пространственной координате могут

быть выполнены резонансными структурами нанофотоники в виде дифракционных решеток, многослойных покрытий и их планарных (интегрированных «на чипе») аналогов. Данные структуры могут найти применение при создании новых устройств для аналоговых оптических вычислений и перспективных оптоинформационных технологий [58].

По мнению автора настоящей работы, перспективным направлением развития данной тематики является разработка теории т.н. каскадных резонансных структур. Под каскадными структурами понимаются структуры нанофотоники, состоящие из нескольких последовательно расположенных резонансных дифракционных структур (например, резонансных дифракционных решеток, многослойных покрытий или их планарных аналогов). В каскадных структурах может существовать одновременно несколько резонансов (несколько взаимодействующих собственных мод), что усложняет вид резонансов и значительно увеличивает возможности контроля формы спектров [50, 59, 60]. Это, в свою очередь, позволит существенно расширить класс реализуемых временных, пространственных и пространственно-временных преобразований оптических пучков. Также большой интерес представляет исследование возможности применения резонансных структур нанофотоники для оптической обработки некогерентных и частично когерентных оптических сигналов [61].

6. Благодарность

Обзор подготовлен в рамках работ по проекту РФФИ № 17-47-500273.

7. Литература

- [1] Single-chip microprocessor that communicates directly using light / C. Sun, M.T. Wade, Y. Lee, J.S. Orcutt, L. Alloatti // *Nature*. – 2015. – Vol. 528. – P. 534-538.
- [2] Silva, A. Performing Mathematical Operations with Metamaterials / A. Silva, F. Monticone, G. Castaldi, V. Galdi, A. Alù, N. Engheta // *Science*. – 2014. – Vol. 343. – P. 161-163.
- [3] Solli, D.R. Analog optical computing / D.R. Solli, B. Jalali // *Nature Photonics*. – 2015. – Vol. 9. – P. 704-706.
- [4] Pors, A. Analog Computing Using Reflective Plasmonic Metasurfaces / A. Pors, M.G. Nielsen, S.I. Bozhevolnyi // *Nano Lett.* – 2015. – Vol. 15(1). – P. 791-797.
- [5] Ferrera, M. On-chip CMOS-compatible all-optical integrator / M. Ferrera, Y. Park, L. Razzari, B.E. Little, S.T. Chu, R. Morandotti, D.J. Moss, J. Azaña // *Nature Communications*. – 2010. – Vol. 1(3).
- [6] Pasquazi, A. Sub-picosecond phase-sensitive optical pulse characterization on a chip / A. Pasquazi, M. Peccianti, Y. Park, B.E. Little, S.T. Chu, R. Morandotti, J. Azaña, D.J. Moss // *Nature Photonics*. – 2011. – Vol. 5(10). – P. 618-623.
- [7] Fernandez-Ruiz, M.R. Design of ultrafast all-optical signal processing devices based on fiber Bragg gratings in transmission / M.R. Fernandez-Ruiz, A. Carballar, J. Azana // *Journal of Lightwave Technology*. – 2013. – Vol. 31(10). – P. 1593-1600.
- [8] Ashrafi, R. Figure of merit for photonic differentiators / R. Ashrafi, J. Azaña // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20(3). – P. 2626-2639.
- [9] Rutkowska, K.A. Ultrafast all-optical temporal differentiators based on CMOS-compatible integrated-waveguide Bragg gratings / K.A. Rutkowska, D. Duchesne, M.J. Strain, R. Morandotti, M. Sorel, J. Azaña // *Optics Express*. – 2011. – Vol. 19(20). – P. 19514-19522.
- [10] Asghari, M.H. Photonic integrator-based optical memory unit / M.H. Asghari, J. Azaña // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2011. – Vol. 23(4). – P. 209-211.
- [11] Li, M. Arbitrary-order all-fiber temporal differentiator based on a fiber Bragg grating: design and experimental demonstration / M. Li, D. Janner, J. Yao, V. Pruneri // *Opt. Exp.* – 2009. – Vol. 17. – P. 19798-19807.
- [12] Tan, S. All-optical computation system for solving differential equations based on optical intensity differentiator / S. Tan, Z. Wu, L. Lei, S. Hu, J. Dong, X. Zhang // *Opt. Exp.* – 2013. – Vol. 21(6). – P. 7008-7013.

- [13] 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 // *Opt. Lett.* – 2013. – Vol. 38(19). – P. 3735-3738.
- [14] Безус, Е.А. Дифракционная оптика и нанофотоника / Е.А. Безус, Д.А. Быков, Л.Л. Досколович, А.А. Ковалев, В.В. Котляр, А.Г. Налимов, А.П. Порфирьев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, С.С. Стафеев, С.Н. Хонина – М.: Физматлит, 608 с.
- [15] Bykov, D.A. Temporal differentiation of optical signals using resonant gratings / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, V.A. Soifer // *Opt. Lett.* – 2011. – Vol. 36(11). – P. 3509-3511.
- [16] Bykov, D.A. Integration of optical pulses by resonant diffraction gratings / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, V.A. Soifer // *JETP Letters.* – 2012. – Vol. 95(1). – P. 6-9.
- [17] Bykov, D.A. On the ability of resonant diffraction gratings to differentiate a pulsed optical signal / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, V.A. Soifer // *Journal of Experimental and Theoretical Physics.* – 2012. – Vol. 141(5). – P. 724-730.
- [18] Bykov, D.A. Single-resonance diffraction gratings for time-domain pulse transformations: integration of optical signals / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, V.A. Soifer // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2012. – Vol. 29(8). – P. 1734-1740.
- [19] Bykov, D.A. Time-domain differentiation of optical pulses in reflection and in transmission using the same resonant grating / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, N.V. Golovastikov, V.A. Soifer // *Journal of Optics.* – 2013. – Vol. 15. – P. 105703.
- [20] Shamir, J. Half a century of optics in computing—a personal perspective // *Appl. Opt.* – 2013. – Vol. 52. – P. 600-612.
- [21] Goodman, J. *Introduction to Fourier Optics* – McGraw-hill, 1996.
- [22] Pors, A. Plasmonic metasurfaces for efficient phase control in reflection / A. Pors, S.I. Bozhevolnyi // *Opt. Express.* – 2013. – Vol. 21. – P. 27438-27451.
- [23] Chizari, A. Analog optical computing based on a dielectric meta-reflect array / A. Chizari, S. Abdollahramezani, M.V. Jamali, J.A. Salehi // *Opt. Lett.* – 2016. – Vol. 41. – P. 3451-3454.
- [24] Abdollahramezani, S. Dielectric metasurfaces solve differential and integro-differential equations / S. Abdollahramezani, A. Chizari, A.E. Dorche, M.V. Jamali, J.A. Salehi // *Opt. Lett.* – 2017. – Vol. 42. – P. 1197-1200.
- [25] Babashah, H. Integration in analog optical computing using metasurfaces revisited: toward ideal optical integration / H. Babashah, Z. Kavehvasht, S. Koohi, A. Khavasi // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 2017. – Vol. 34. – P. 1270-1279.
- [26] Doskolovich, L.L. Spatial differentiation of optical beams using phase-shifted Bragg grating / L.L. Doskolovich, D.A. Bykov, E.A. Bezus, V.A. Soifer // *Optics Letters.* – 2014. – Vol. 39. – P. 1278-1281.
- [27] Golovastikov, N.V. Spatial optical integrator based on phase-shifted Bragg gratings / N.V. Golovastikov, D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, E.A. Bezus // *Optics Communications.* – 2015. – Vol. 338. – P. 457-460.
- [28] Bykov, D.A. Optical computation of the Laplace operator using phase-shifted Bragg grating / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, V.A. Soifer // *Optics Express.* – 2014. – Vol. 22(21). – P. 25084-25092.
- [29] Golovastikov, N.V. Resonant diffraction gratings for spatial differentiation of optical beams / N.V. Golovastikov, D.A. Bykov, L.L. Doskolovich // *Quantum Electronics.* – 2014. – Vol. 44(10). – P. 984-988.
- [30] Bykov, D.A. First-order optical spatial differentiator based on a guided-mode resonant grating / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, A.A. Morozov, V.V. Podlipnov, E.A. Bezus, P. Verma, V.A. Soifer // *Opt. Express.* – 2018. – Vol. 26(8). – P. 10997-11006.
- [31] Golovastikov, N.V. An optical differentiator based on a three-layer structure with a W-shaped refractive index profile / N.V. Golovastikov, L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, D.A. Bykov, V.A. Soifer // *Journal of Experimental and Theoretical Physics.* – 2018. – Vol. 127(2). – P. 202-209.
- [32] Guo, C. Photonic crystal slab Laplace operator for image differentiation / C. Guo, M. Xiao, M. Minkov, Y. Shi, S. Fan // *Optica.* – 2018. – Vol. 5. – P. 251-256.

- [33] Kazanskiy, N.L. Technological line for creation and research of diffractive optical elements / N.L. Kazanskiy, R.V. Skidanov // *Proc. SPIE.* – 2019. – Vol. 11146. – P. 111460W. DOI: 10.1117/12.2527274.
- [34] Kazanskiy, N.L. Efficiency of deep integration between a research university and an academic institute // *Procedia Engineering.* – 2017. – Vol. 201. – P. 817-831. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.604.
- [35] Zhu, T. Plasmonic computing of spatial differentiation / T. Zhu, Y. Zhou, Y. Lou, H. Ye, M. Qiu, Z. Ruan, S. Fan // *Nat. Commun.* – 2017. – Vol. 8. – P. 15391.
- [36] Wesemann, L. Selective near-perfect absorbing mirror as a spatial frequency filter for optical image processing / L. Wesemann, E. Panchenko, K. Singh, E.D. Gaspera, D.E. Gómez, T.J. Davis, A. Roberts // *APL Photon.* – 2019. – Vol. 4. – P. 100801.
- [37] 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, C. Peroz // *Light: Science & Applications.* – 2014. – Vol. 3(9). – P. e203.
- [38] Butt, M.A. Optical elements based on silicon photonics / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Computer Optics.* – 2019. – Vol. 43(6). – P. 1079-1083. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1079-1083.
- [39] Kazanskiy, N.L. Use of photonic crystal cavities for temporal differentiation of optical signals / N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich, S.N. Khonina // *Optics Letters.* – 2013. – Vol. 38(7). – P. 1149-1151. DOI: 10.1364/OL.38.001149.
- [40] Kazanskiy, N.L. Coupled-resonator optical wave-guides for temporal integration of optical signals / N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich // *Optics Express.* – 2014. – Vol. 22(11). – P. 14004-14013. DOI: 10.1364/OE.22.014004.
- [41] Yu, L. Manipulating Bloch surface waves in 2D: a platform concept-based flat lens / L. Yu, E. Barakat, T. Sfez, L. Hvozdar, J. Di Francesco, H.P. Herzig // *Light: Science & Applications,* 2014. – Vol. 3. – P. e124.
- [42] Bezus, E.A. Phase Modulation of Bloch Surface Waves with the Use of a Diffraction Microrelief at the Boundary of a One-Dimensional Photonic Crystal / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, D.A. Bykov, V.A. Soifer // *JETP Lett.* – 2014. – Vol. 99(2). – P. 63-66.
- [43] Doskolovich, L.L. Spatial differentiation of Bloch surface wave beams using an on-chip phase-shifted Bragg grating / L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, D.A. Bykov, V.A. Soifer // *Journal of Optics.* – 2016. – Vol. 18(11). – P. 115006.
- [44] Doskolovich, L.L. Phase-shifted Bragg gratings for Bloch surface waves / L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, D.A. Bykov // *Opt. Express.* – 2015. – Vol. 23(21). – P. 27034-27045.
- [45] Doskolovich L.L. Planar two-groove optical differentiator in a slab waveguide / L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, N.V. Golovastikov, D.A. Bykov, V.A. Soifer // *Opt. Express.* – 2017. – Vol. 25(19). – P. 22328-22340.
- [46] Zangeneh-Nejad, F. Spatial integration by a dielectric slab and its planar graphene-based counterpart / F. Zangeneh-Nejad, A. Khavasi // *Opt. Lett.* – 2017. – Vol. 42. – P. 1954-1957.
- [47] 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, V.A. Soifer // *Opt. Express.* – 2018. – Vol. 26(19). – P. 25156-25165.
- [48] Doskolovich, L.L. Two-groove narrowband transmission filter integrated into a slab waveguide / L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, D.A. Bykov // *Photonics Research.* – 2018. – Vol. 6(1). – P. 61-65.
- [49] Bezus, E.A. Bound states in the continuum and high-Q resonances supported by a dielectric ridge on a slab waveguide / E.A. Bezus, D.A. Bykov, L.L. Doskolovich // *Photonics Research.* – 2018. – Vol. 6(11). – P. 1084-1093.
- [50] Doskolovich, L.L. Integrated flat-top reflection filters operating near bound states in the continuum / L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, D.A. Bykov // *Photonics Research.* – 2019. – Vol. 7. – P. 1314-1322.

- [51] Golovastikov, N.V. Spatiotemporal Optical Pulse Transformation by a Resonant Diffraction Grating / N.V. Golovastikov, D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, V.A. Soifer // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 2015. – Vol. 121. – P. 785-792.
- [52] Emelyanov, S.V. Differentiating space–time optical signals using resonant nanophotonics structures / S.V. Emelyanov, D.A. Bykov, N.V. Golovastikov, L.L. Doskolovich, V.A. Soifer // *Doklady Physics*. – 2016. – Vol. 61(3). – P. 108-111.
- [53] Bykov, D.A. Spatiotemporal coupled-mode theory of guided-mode resonant gratings / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich // *Opt. Express*. – 2015. – Vol. 23. – P. 19234-19241.
- [54] Bykov, D.A. ω - k_x Fano line shape in photonic crystal slabs / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich // *Physical Review A*. – 2015. – Vol. 92. – P. 013845.
- [55] Golovastikov, N.V. Analytical description of 3D optical pulse diffraction by a phase-shifted Bragg grating / N.V. Golovastikov, D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, V.A. Soifer // *Opt. Express*. – 2016. – Vol. 24(17). – P. 18828-18842.
- [56] Bykov, D.A. Coupled-mode theory and Fano resonances in guided-mode resonant gratings: the conical diffraction mounting / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, V.A. Soifer // *Opt. Express*. 2017. – Vol. 25(2). – P. 1151-1164.
- [57] Головастиков, Н.В. Дифференцирование и интегрирование трёхмерного оптического импульса во времени с использованием брэгговских решёток с дефектным слоем / Н.В. Головастиков, Д.А. Быков, Л.Л. Досколович // *Компьютерная оптика*. – 2017. – Т. 41, № 1. – С. 13-21.
- [58] Soifer, V.A. Diffractive nanophotonics and advanced information technologies // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. – 2014. – Vol. 84(1). – P. 9-18 DOI: 10.1134/S1019331614010067
- [59] Doskolovich, L.L. Resonant properties of composite structures consisting of several resonant diffraction gratings / L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, D.A. Bykov, N.V. Golovastikov, V.A. Soifer // *Opt. Express*. – 2019. – Vol. 27. – P. 25814-25828.
- [60] Doskolovich, L.L. Analytical design of flat-top transmission filters composed of several resonant structures / L.L. Doskolovich, N.V. Golovastikov, D.A. Bykov, E.A. Bezus // *Opt. Express*. – 2019. – Vol. 27. – P. 26786-26798.
- [61] Wang, H. Compact incoherent image differentiation with nanophotonic structures / H. Wang, C. Guo, Z. Zhao, S. Fan // *ACS Photonics*, accepted, 2020. DOI: 10.1021/acsp Photonics.9b01465.

Resonant nanophotonics structures for analog optical computing

A. Bugaev^{1,2}

¹Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of Russian Academy of Sciences, Mokhovaya 11-7, Moscow, Russia, 125009

²Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy per. 9, Dolgoprudny, Russia, 141701

Abstract. Currently, photonics is considered as the main scientific direction, designed to ensure the further development of computer systems. This review discusses the main scientific results obtained in recent years in the field of development and creation of nanophotonic structures for analog optical computing. The main attention is paid to the optical implementation of the basic operations of differentiation and integration of the optical signal in time and spatial variable.