

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.011

Вычислительные диэлектрические метаповерхности в фотонных топологических устройствах обработки многомерных сигналов

Потапов А.А.

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>
Москва 125009, Российская Федерация

Джинанский университет, Совместная китайско-российская лаборатория информационных технологий и фрактальной обработки сигналов, <https://jnu.edu.cn/>

Гуанчжоу 510632, Китай

E-mail: potapov@cplire.ru

Поступила 29.09.2023, рецензирована 02.10.2023, принята 09.10.2023, опубликована 15.03.2024.

Аннотация: Предложена однослойная вычислительная диэлектрическая широкополосная метаповерхность (МП) с кремниевыми нанодисками для реализации операций пространственного дифференцирования и распознавания контуров. Рассмотрено многообразие физических механизмов диэлектрических МП для выполнения аналогичных математических операций. Раскрывается необходимость таких вычислительных наноконструкций для совершенствования многочисленных методов топологической текстурно-фрактальной обработки сигналов и полей в современной радиофизике и радиоэлектронике.

Ключевые слова: фотоника, радиофотоника, нанотехнологии, радиофизика, радиолокация, радиотехника, текстура, фракталы, обработка многомерных сигналов, граничная оптика, вычислительная метаповерхность, оптическая передаточная функция, оптические аналоговые вычисления

УДК 519.24+ 537.86+621.396.96

Благодарности: Исследования выполнены в рамках Государственного задания ИРЭ РАН, тема "Эфир-2". Автор выражает искреннюю благодарность китайским ученым, с которыми были совместно выполнены и опубликованы статьи по фотонике в ведущих международных научных журналах: Weiping Liu, Tianhua Feng, Lei Wan, Danping Pan, Min Ouyang, Zixian Liang, Zhaohui Li, Shuaifeng Yang, Xia Wu, Yi Xu, Ning Lai, Weilian Chen, Fugen Wang, Wei Zhang.

Для цитирования: Потапов А.А. Вычислительные диэлектрические метаповерхности в фотонных топологических устройствах обработки многомерных сигналов. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(1):11-30. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.011.

Computational Dielectric Metasurfaces in Photonic Topological Devices for Multidimensional Signal Processing

Alexander A. Potapov

Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, <http://www.cplire.ru/>
Moscow 125009, Russian Federation

Jinan University, JNU-IREE RAS Joint Laboratory of Information Technology and Fractal Processing of Signals, <https://jnu.edu.cn/>

Guangzhou 510632, China

E-mail: potapov@cplire.ru

Received September 29, 2023, peer-reviewed October 02, 2023, accepted October 09, 2023, published March 15, 2024.

Abstract: A single-layer computational dielectric broadband metasurface (MS) with silicon nanodiscs is proposed to implement spatial differentiation and contour recognition operations. The variety of physical mechanisms of dielectric MSs for performing similar mathematical operations is considered. The necessity of such computational nanostructures for improving the numerous

methods of topological texture-fractal processing of signals and fields in modern radio physics and radio electronics is revealed.

Keywords: photonics, radio photonics, nanotechnology, radiophysics, radar, radio engineering, texture, fractals, processing of multidimensional signals, frontier optics, computing metasurface, optical transfer function, optical analog computing

Acknowledgments: The research has been performed in the framework of the state task for IRE RAS, theme "Aether-2". The author expresses sincere gratitude to the Chinese scientists with whom articles on photonics were jointly completed and published in leading international scientific journals: Weiping Liu, Tianhua Feng, Lei Wan, Danping Pan, Min Ouyang, Zixian Liang, Zhaohui Li, Shuaifeng Yang, Xia Wu, Yi Xu, Ning Lai, Weilian Chen, Fugen Wang, Wei Zhang.

For citation: Alexander A. Potapov. Computational Dielectric Metasurfaces in Photonic Topological Devices for Multidimensional Signal Processing. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(1):11-30e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.011.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (12)
2. НЕСКОЛЬКО ОПРЕДЕЛЕНИЙ (13)
3. ФИЗИКА И ДИЗАЙН ОСНОВНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МП (14)
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСНОВНЫХ КЛАССОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МП (18)
5. РАЗРАБОТКА НОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТИ В КИТАЙСКО-РОССИЙСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ФРАКТАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ (22)
6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (28)

ЛИТЕРАТУРА (28)

1. ВВЕДЕНИЕ

Существует два основных типа технологий обработки изображений – цифровая и оптическая. Оптическая обработка изображений – это технология, в которой используются оптические средства и устройства для выполнения аналоговой вычислительной обработки и передачи информации об изображении. Оптическая обработка изображений характеризуется возможностью обработки в реальном времени вплоть до скорости света. В то же время оптические аналоговые вычисления имеют естественные характеристики параллельной работы.

Цифровое изображение фактически использует набор цифровых матриц для объективного изображения объектов. Цифровая обработка изображений также называется компьютерной обработкой изображений, но

обычно она должна сочетаться с программными алгоритмами и аппаратной совместной обработкой. Однако у этой технологии есть недостатки: высокие требования к оборудованию и относительно низкая скорость. Кроме того, скорость и энергопотребление стандартных электронных компонентов трудно значительно улучшить. Таким образом, исследования новых фотонных устройств обеспечивают потенциальный способ преодоления этих ограничений.

Быстрое развитие нанотехнологий способствовало научным исследованиям и промышленному применению микро-наноструктур. Оптические свойства микро-наноструктур стали одной из горячих точек исследований в области граничной оптики (frontier optics), которая привела к возникновению новых дисциплин, таких как нанофотоника, оптика поверхностных плазмонов, метаповерхность, оптика метаматериалов, трансформационная оптика, топологическая фотоника, неэрмитова оптика и т.д.

Данное введение необходимо для того, чтобы показать, что непрерывное совершенствование впервые предложенных автором в ИРЭ АН СССР, начиная с 80-х годов XX века, многочисленных методов топологической текстурно-фрактальной обработки (ГТФО) сигналов и полей в современной радиофизике и радиоэлектронике [1-9] подразумевает естественную необходимость улучшения скорости обработки информации и поиск новых физических принципов для ее осуществления. Здесь, несомненно, будущее принадлежит рассматриваемым ниже наиболее

характерным фотонным и радиофотонным технологиям. По сравнению с традиционными громоздкими оптическими аналоговыми дифференциаторами пространственные дифференциаторы на основе метаповерхностей (МП) имеют то преимущество, что они проще и компактнее. Таким образом, современные оптические аналоговые вычисления могут способствовать развитию технологии обработки изображений совместно с электронными платформами.

В статье также представлены избранные результаты в области фотоники, радиофотоники и оптических 2D метаматериалов (ММ), которые были получены автором с китайскими учеными в совместной лаборатории информационных технологий и фрактальной обработки сигналов в Китае [10-17] за период 2019-2021 гг.

2. НЕСКОЛЬКО ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Напомним несколько необходимых по тексту определений. *Фотоника* (photonics) - дисциплина, занимающаяся фундаментальными и прикладными аспектами работы с оптическими сигналами, а также созданием на их базе различных устройств; или еще так: фотоника – раздел науки, изучающий системы, в которых носителями информации являются фотоны. *Нанофотоника* (nanophotonics) – раздел фотоники, рассматривающий сложные взаимодействия между светом и веществом в субволновом масштабе. Фотонные системы (в сравнении с “электронными”) не подвержены внешним электромагнитным полям, более устойчивы к помехам, обладают также более высоким быстродействием и шириной полосы пропускания сигнала. *Радиофотоника* (microwave photonics) – комплекс областей науки и техники, связанных с передачей, приемом и преобразованием сигнала с помощью электромагнитных волн СВЧ диапазона и фотонных приборов и систем. Радиофотонные методы улучшают функциональное построение аппаратуры нового поколения, снимут многие проблемы электромагнитной совместимости, в тысячу и более раз поднимут скорость и объем передачи информации, на порядок снизят вес, габариты и энергопотребление.

Метаматериалы (от греч. *meta* – за пределами, *сверх*) – искусственно структурированные (рукотворные) материалы с необычными свойствами, которые отсутствуют у природных материалов [18]. Метаматериалы (ММ) и метаповерхности (МП) или 2D метаматериалы открыли широкие возможности для реализации новых электромагнитных свойств и функциональных возможностей за счет создания субволновых структур и интеграции функциональных материалов.

Все МП можно подразделить на два типа: рассеивающий тип на основе металлических наноматериалов и пропускающий тип на основе наноструктур диэлектрических материалов. Определим вычислительные метаповерхности (computing metasurface) как двумерные искусственные наноструктуры, которые способны выполнять математические операции над входным электромагнитным полем, включая его амплитудные, фазовые, поляризованные и частотные распределения [15,19]. Вычислительные МП продемонстрировали замечательные способности в оптических дифференциальных операциях и периферийной улучшенной визуализации. Наиболее распространенными являются ММ, в которых структура элементов (метаатомы размером в несколько нанометров), размер и расстояние между элементами значительно меньше по сравнению с длиной волны возбуждающего поля. В этом случае результат взаимодействия отдельных элементов приводит к тому, что свойства ММ обусловлены не столько свойствами составляющих его элементов, сколько искусственно созданной периодической структурой. МП в качестве типичного прототипа устройства состоят из искусственных субволновых структур над плоскими поверхностями диэлектрического материала, которые облегчают гибкое управление амплитудой, фазой и поляризацией электромагнитных волн. Можно сказать, что в МП – корень многих увлекательных топологических явлений в физике и экзотических манипуляций с волнами.

Отметим [20], что в Китае действует специальная государственная программа и в 2015 году Китай стал мировым лидером по объему производства устройств фотоники.

3. ФИЗИКА И ДИЗАЙН ОСНОВНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МП

Структуры, вдохновленные ММ, продолжают бросать вызов нашему воображению и нашим физическим и инженерным основам. Они влияют на взаимодействие волны и материи на многих частотах и даже в различных областях науки и техники.

Концепция вычислительных ММ (computational metamaterials) была впервые введена в 2014 г. в [21]: вычислительные ММ – это метаматериалы, которые могут выполнять желаемые математические операции над сигналами произвольной волны по мере их распространения через него.

Здесь мы ограничимся физикой и элементарной математикой исключительно вычислительных МП. Путем проектирования геометрии диэлектрических МП могут быть получены оптические аналоговые вычислительные устройства с различными функциями, такие как пространственные дифференциаторы [11,12,15,16,19,21-24], интеграторы [25] и решатели уравнений [26,27]. Введение диэлектрических МП упрощает процесс производства и увеличивает гибкость конструкции оптических аналоговых вычислительных устройств по сравнению с традиционными многослойными пленочными структурами [24]. Несмотря на огромный интерес к МП и наличие большого количества англоязычных обзоров, в русскоязычной литературе этот вопрос за редким исключением практически не освещен [28,29]. Эта работа с последующим изложением собственных результатов частично восполняет этот пробел.

Основными параметрами МП, по которому их сравнивают между собой и с другими оптическими устройствами, являются эффективность и рабочая длина волны (см. например [28]). Электромагнитная волна, попадая на МП, частично поглощается и рассеивается в разных направлениях, и только часть этой волны рассеивается в нужном направлении. Отношение интенсивности электромагнитной волны, которая распространяется в нужном направлении после прохождения через МП, к интенсивности падающей волны называется эффективностью МП. Рабочая длина волны МП по мере развития

технологий уменьшается, и в настоящее время она находится в видимом диапазоне. Так как резонансы в метаатомах являются достаточно узкими, МП работают в небольшом интервале частот, который стараются увеличивать.

Хорошо известна классическая обработка оптических сигналов, так называемая Фурье-оптика (или радиооптика) с использованием обычных линз и пространственных фильтров [30-32]. Этот вид обработки широко применялся автором еще в 80-90-е гг. XX века совместно с учеными из ВГУ для исследования всех ансамблей текстурных признаков оптических и первых радиолокационных (в миллиметровом диапазоне радиоволн) изображений земных покровов с объектами [33-36].

Обычно модулированный световой луч ориентируется на оптическую линзу, которая может выполнять преобразование Фурье (FT); таким образом, спектр Фурье может быть получен в задней фокальной плоскости. Поскольку информация о краях представлена компонентами Фурье высокого порядка, которые обычно находятся вне области шаблона Фурье, тщательным выбором этих компонентов высокого порядка можно извлечь информацию о контурах. Наконец, реальные изображения, содержащие профиль контура, могут быть получены с помощью обратного преобразования Фурье (IFT) с помощью другой оптической линзы. Поскольку все операции выполняются по мере распространения света, процессы оптических аналоговых вычислений намного быстрее и потребляют гораздо меньше энергии, чем электронный метод. Хотя вышеупомянутые оптические аналоговые вычисления пространственного дифференцирования и обнаружения контуров просты и понятны, большой размер линзы является критической проблемой для интеграции устройства. В оптических линзах необходимый волновой фронт формируется при прохождении излучения через вещество с определенным коэффициентом преломления. Прохождение лучей через линзу приводит к сдвигу фазы, и вследствие непрерывного изменения толщины линзы фаза приобретает градиент. По принципу Ферма градиент фазы приводит к изменению волнового фронта.

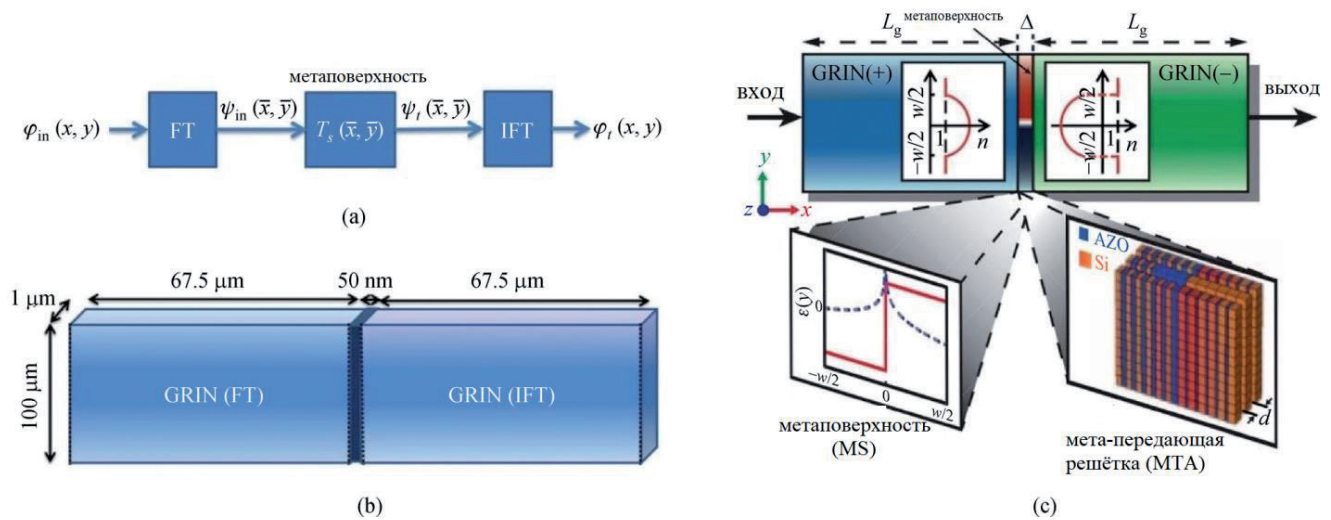


Рис. 1. Основной принцип пространственного дифференцирования и распознавания контуров ММ и МП. (а) Информация о Фурье-спектре входного сигнала может быть получена блоком с функцией преобразования Фурье (FT). После прохождения через МП выходной сигнал может быть получен с помощью операции обратного преобразования Фурье (IFT). (б) ММ с градиентным индексом (GRIN) могут быть использованы для реализации FT и IFT [37]. (в) Практическая реализация конфигурации [21].

Использование рассеивающих и пропускающих ММ для оптических аналоговых вычислений прокладывает путь к реализации полностью интегрированных устройств пространственной фильтрации. Базовая конфигурация представлена на **Рис. 1** [15,21]. В этом процессе диэлектрическая пластина с двумерным градиентным индексом (GRIN) использовалась для выполнения FT и вывода спектра Фурье. Требуемая информация была отселектирована соответствующим образом спроектированной МП в качестве пространственного фильтра, а IFT был реализован с помощью другого ММ с градиентным индексом. В качестве первого блока рассматриваем диэлектрическую пластину GRIN(+) с двумерным градиентным индексом, магнитной проницаемостью $\mu = \mu_0$ и параболическим изменением диэлектрической проницаемости $\epsilon(y) = \epsilon_0[1 - (\pi/2L_g)^2 y^2]$, где ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость в центральной плоскости GRIN, а L_g – характерная длина.

На Рис. 1с GRIN(+) обозначает обычный GRIN, где знак (+) относится к положительным значениям диэлектрической проницаемости. В параксиальном приближении пластина ГРИН(+) работает как преобразователь Фурье на "фокусном" расстоянии L_g вдоль направления распространения. Для обратного преобразования Фурье, т.е. блок GRIN(-),

используется идеальная структура GRIN с отрицательными параметрами: проницаемостью $\mu = -\mu_0$ и диэлектрической проницаемостью $\epsilon = -\epsilon(y)$. Следуя концепции дополнительных материалов, GRIN(-) имеет обратную функциональность по сравнению с GRIN(+); т.е. он действует как обратный преобразователь Фурье. Тонкий, правильно спроектированный метаструктурный экран толщиной $\Delta = \lambda_0/3$ и шириной $W = 10\lambda_0$, размещенный между двумя GRIN-структурами с положительными и отрицательными параметрами, может выполнять математические операции в области Фурье. GRIN(+) и GRIN(-), каждая длиной $L_g \approx 12\lambda_0$, действуют как преобразователи Фурье и обратные преобразователи Фурье. Предлагаются две конструкции ММ: тонкая МП, образованная одним слоем с заданными диэлектрической и магнитной проницаемостями [врезка слева, с реальной (красной) и мнимой (синяя) частями параметров материала] и реалистичная метAPERодующая решетка (МТА), образованная тремя слоями из двух чередующихся материалов (кремний Si и легированный алюминий оксид цинка AlZnO) с правильно заданным неоднородным распределением их объемных долей наполнения и с необходимыми потерями для придания нужного затухания (правая вставка). Эта система образует вычислительную единицу ММ, которая может выполнять математические

операции по выбору над входной функцией, когда волна распространяется через данную систему. В работе [21] рассмотрены подходы к моделированию операций дифференцирования и свертки.

Другим методом пространственного дифференцирования и обнаружения контуров является метод функции Грина (GF) [15,21]. При использовании этого метода не требуется преобразований Фурье, что дополнительно минимизирует размер всей системы. Критическим моментом при использовании метода GF является достижение определенной оптической передаточной функции (ОПФ) $T(k_x, k_y)$ с правильно спроектированными МП. Обычно, когда падающее модулированное световое поле $E_{in}(x, y)$ попадает на планарную структуру, как отражение, так и пропускание проявляют поляризационную зависимость. Следовательно, ОПФ МП можно выразить с помощью матрицы 2×2 , которая связывает поля входа и вывода следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \tilde{E}^{(s)}(k_x, k_y) \\ \tilde{E}^{(p)}(k_x, k_y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{ss}(k_x, k_y) & T_{sp}(k_x, k_y) \\ T_{ps}(k_x, k_y) & T_{pp}(k_x, k_y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{E}_{in}^{(s)}(k_x, k_y) \\ \tilde{E}_{in}^{(p)}(k_x, k_y) \end{bmatrix} \quad (1)$$

В выражении (1) k_x и k_y – компоненты волнового вектора \vec{k} , рассмотрены две поляризации s - и p -волн и учитывается преобразование поляризации с недиагональными членами ОПФ-матрицы. Следовательно, разумно настраивая МП, мы можем получить надлежащую ОПФ, которая может реализовать желаемую обработку или операцию с входной информацией для конкретных приложений. Фактически, дифракция света более значительна на краях мишени, что приводит к увеличению волновых чисел в плоскости. Это означает, что если мы сможем достичь ОПФ для передачи этих компонентов с большим волновым числом при блокировании компонентов с меньшим волновым числом, тогда мы сможем иметь только информацию о краях на выходе, что приведет к реализации пространственного дифференцирования и обнаружения контура. Заметим, что в оптике и электродинамике s -поляризованная волна (нем. senkrecht – перпендикулярный) имеет вектор электрического поля E , перпендикулярный

плоскости падения. s -поляризованную волну также называют σ -поляризованной, сагиттально поляризованной, волной E -типа, TE -волной (Transverse Electric). p -поляризованная волна (лат. parallel – параллельный) имеет вектор электрического поля E , параллельный плоскости падения. p -поляризованную волну также называют π -поляризованной, поляризованной в плоскости падения, волной H -типа, TM -волной (Transverse Magnetic).

Ключевым моментом метода GF является разработка конкретных ОПФ МП, чтобы входное световое поле могло обрабатываться подходящим образом. Для пространственного дифференцирования первого порядка мы считаем, что падающее световое поле включает плоский волновой вектор вдоль направления x . Связь между полями вывода и ввода можно выразить как [38]:

$$\tilde{E}(k_x) = \frac{d}{dx} \tilde{E}_{in}(k_x) = ik_x \tilde{E}_{in}(k_x), \quad (2)$$

где падающее световое поле предполагается равным $\tilde{E}_{in}(k_x) = E_0 e^{ik_x x}$. Следовательно, ОПФ должна быть линейной функцией плоскостного волнового числа. Для пространственного дифференцирования второго порядка можно получить ОПФ аналогичным образом:

$$\tilde{E}(k_x) = \frac{d^2}{dx^2} \tilde{E}_{in}(k_x) = -k_x^2 \tilde{E}_{in}(k_x). \quad (3)$$

Это указывает на то, что ОПФ должна вести себя как парабола. Заметим, что в обоих случаях интенсивность выходного светового поля тесно связана с волновым числом. Обе ОПФ должны пропускать падающие световые поля с большими волновыми числами, подавляя поля с меньшими волновыми числами, тем самым обеспечивая обнаружение контуров изображения.

Для разработки правильного ОПФ для пространственного дифференцирования и обнаружения контуров изображений, адаптация нелокальных эффектов МП является многообещающим способом. В нелокальном эффекте реакции МП на падающее световое поле не только связаны с нормальной составляющей падающей волны, но также зависят от тангенциальных составляющих. Это означает, что пропускание, отражение и ОПФ

МП зависят от угла падения светового поля. Такая зависимость ОПФ от угла падения обычно создается путем настройки резонансов МП, которые обычно включают в себя резонанс с управляемыми модами (GMR), резонанс Фано, мультипольный резонанс (электрический или магнитный диполь) и т.д. GMR – это уникальный вид резонанса, который может быть сильно ограничен в структурах, но при этом имеет слабую связь с внешним излучением [39]. По сравнению с традиционной волной в волноводе GMR обычно сопровождается ограниченным, но высоким коэффициентом качества. Более того, его резонансная частота и добротность существенно зависят от плоскостного волнового вектора. Как еще один важный вид резонанса, резонансы Фано были продемонстрированы на различных платформах [40]. Резонансы Фано возникают из-за интерференции двух волновых каналов, которые обычно имеют узкую и широкую полосу пропускания. В частности, резонанс с узкой полосой пропускания, который определяется структурами, обеспечивает универсальную степень свободы настройки для резонансов Фано.

В дополнение к двум видам резонансов, описанных выше, мультипольные резонансы диэлектрических наночастиц также предоставляют многообещающий путь для настройки ОПФ МП [11,41]. По сравнению с плазмонными структурами диэлектрические наноструктуры могут не только решить проблему потерь и повысить эффективность работы МП, но также облегчить управление рассеянием и распространением света (Рис. 2). Электрический и магнитный дипольные резонансы наноструктур предлагают множество степеней свободы для настройки ОПФ МП. Такие виды диэлектрических МП характеризуются большой пространственной полосой пропускания, а также было успешно продемонстрировано двумерное обнаружение края изображений для произвольной поляризации. Учитывая эти преимущества, можно полагать, что диэлектрические МП могут играть важную роль в других математических операциях и оптических аналоговых вычислениях. Помимо резонансных схем для реализации пространственного дифференцирования и обнаружения контуров

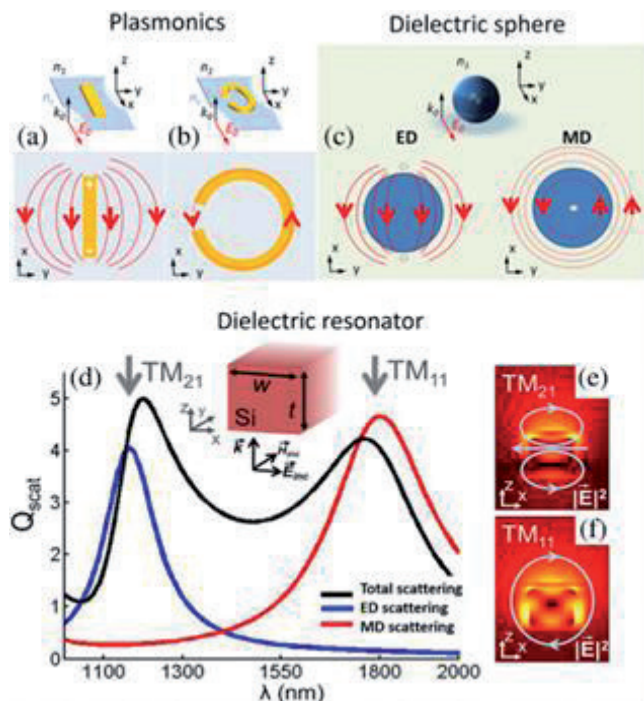


Рис. 2. Схематические изображения электрических полей в (a, b) плазмонных резонаторах и в (c) диэлектрической сфере. Плазмонные стержневые антенны поддерживают только электрические резонансы с незначительным магнитным вкладом. Сильный магнитный дипольный резонанс может быть достигнут в плазмонных частицах путем формирования металлического стержня в виде расщепленного кольцевого резонатора [42,44]. d) прямоугольные диэлектрические наночастицы также обладают электрической и магнитной поляризуемостью. Показаны электрические дипольные (ЭД), магнитные дипольные (МД) и полные поперечные сечения рассеяния (произвольные единицы), связанные с соответствующими режимами, приведенными на (e) и (f) [43,44].

изображений, нерезонансные схемы, такие как спин-орбитальное взаимодействие в фазовых МП Панчаратнама-Берри, также были исследованы для достижения обнаружения контуров изображений [45,46].

Использование диэлектрических ММ вместо классических плазмонных структур уменьшает омические (тепловые) потери, и позволяет реализовать управление не только электрической, но и магнитной компонентой световой волны. Иначе говоря, из-за свободного проникновения электромагнитного поля внутрь диэлектриков такие наноструктуры обладают как электрическим, так и магнитным резонансом Ми.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСНОВНЫХ КЛАССОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МП

В этом разделе мы в основном сосредоточимся на характеристическом анализе и сравнении встроенных пространственных дифференциаторов, реализованных с помощью GMR, резонанса Фано и мультипольного резонанса [15]. Начнем с того, что с двумерным массивом отверстий в диэлектрической пластине фотонные кристаллы могут обеспечить почти изотропное дифференцирование второго порядка или математическую операцию Лапласа [15,47,48]. На **Рис. 3а** представлена структура устройства оптического пространственного дифференциатора на основе фотонного кристалла, состоящего из фотонно-кристаллической пластины и отдельной диэлектрической пластины. Резонанс Фано может быть построен путем вмешательства в GMR структурированной пластины с падающей волной, что позволяет установить правильную ОТФ для расчета Лапласа в режиме передачи. Фактически свойства отражения и пропускания МП зависят от поляризации. Поэтому необходимо учитывать влияние поляризации на оптические аналоговые вычисления. Для линейно поляризованной волны ОПФ пространственного дифференциатора на основе диэлектрических МП обычно различаются между s - и p -волнами. Как показано на **Рис. 3б** и **3в**, пропускание

p -волны намного ниже, чем пропускание s -волны. В зависимости от частоты света и выбора режима пропускания или отражения устройство реализует изотропную фильтрацию высоких частот, нижних частот и полосовых частот в волновекторном пространстве. Эти функции фильтра важны для различных задач обработки изображений, включая обнаружение краев, сглаживание, подавление белого шума и подавление или извлечение периодических шумов.

Однако пространственный дифференциатор на основе фотонного кристалла имеет небольшую пространственную полосу пропускания (менее 1°) из-за большой добротности. В отличие от вышеупомянутой двухслойной структуры, однослойная диэлектрическая МП с резонансами Фано для пространственных дифференциаторов первого и второго порядка позволила расширить диапазон до 17° [49].

Пространственная полоса пропускания может быть расширена разработкой нелокального отклика МП. Дифференциатор второго порядка с полосой около 40° на основе нелокальной МП с разъемными кольцами представлен в [25] – **Рис. 4**.

На пропускающие свойства МП влияло рассеяние между элементарными ячейками, приводящее к разным кривым пропускания при разных углах падения – см. **Рис. 4б**.

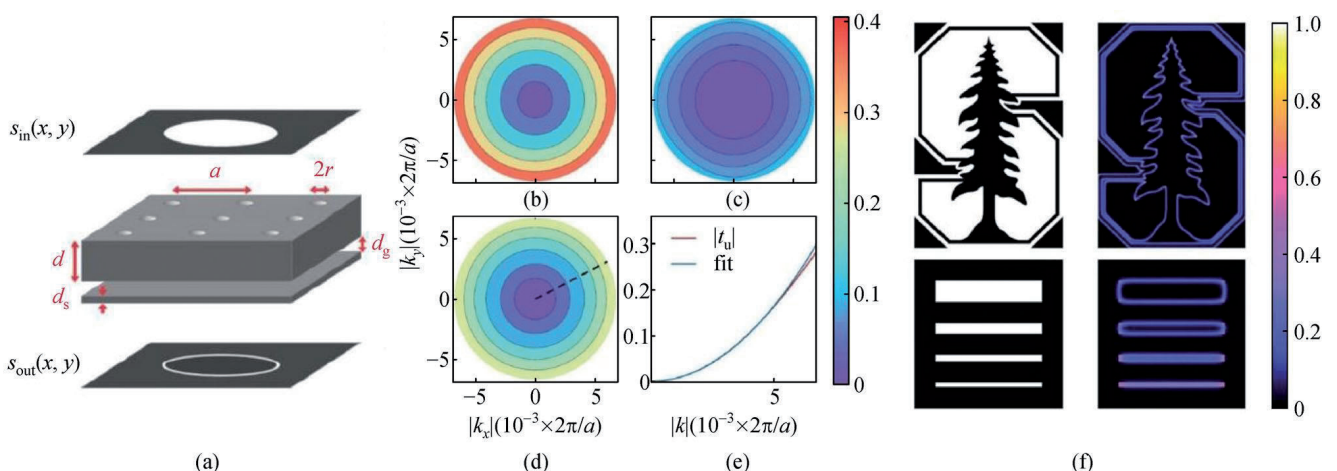


Рис. 3. Схема изотропного пространственного дифференциатора второго порядка, реализованного в виде пластины фотонного кристалла и отдельной диэлектрической пластины. (b) ОПФ устройства для s -волны, (c) p -волны и (d) неполяризованного света. (e) Одномерная ОПФ как функция волнового вектора и соответствующая квадратичная аппроксимация. (f) Морфология рисунков эмблемы Стэнфорда и прорезей (левый столбец) и соответствующих изображений краев (правый столбец) [47].

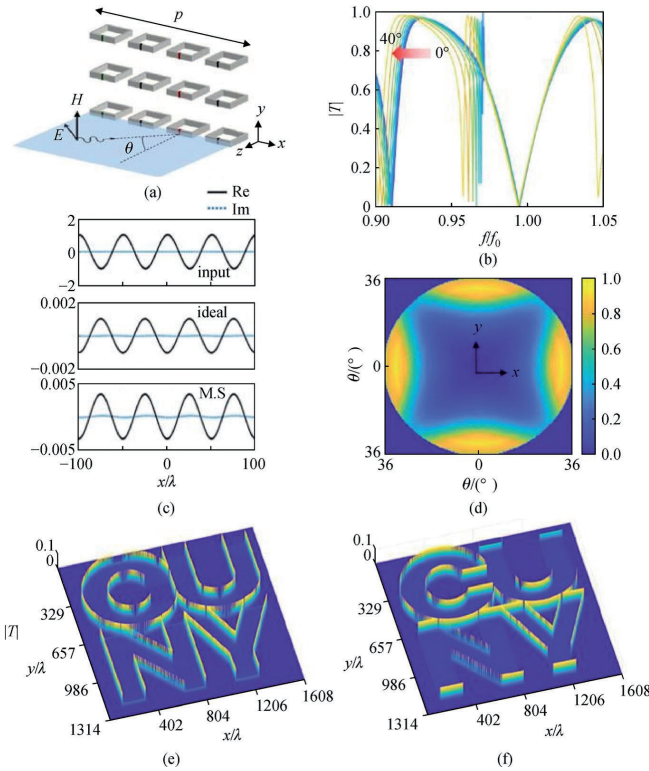


Рис. 4. (a) Схема пространственного дифференциатора второго порядка на основе нелокальных МП, состоящих из разомкнутых кольцевых резонаторов. (b) Эволюция кривых пропускания пространственного дифференциатора на основе МП при увеличении угла падения от 0° до 45° . (c) Результаты идеальной операции d^2/dx^2 для синусоиды. (d) 2D ОПФ дифференциатора как функция угла падения. (e) Результаты обнаружения контура при x -поляризованной волне и (f) y -поляризованной волне [25].

Реализации операции дифференцирования второго порядка способствовал резонанс Фано МП. Однако отсутствующая информация о краях вдоль некоторых направлений дополнительно иллюстрирует свойства анизотропной оптической передачи пространственного дифференциатора. Что касается морфологии устройств, то трехмерные симметричные или антисимметричные решетки резонаторов с разъемным кольцом повысили сложность изготовления. Хотя предложенные нелокальные МП, основанные на решетке резонаторов с разъемным кольцом, значительно улучшили характеристики пространственного дифференциатора, реализация конфигурации устройства должна

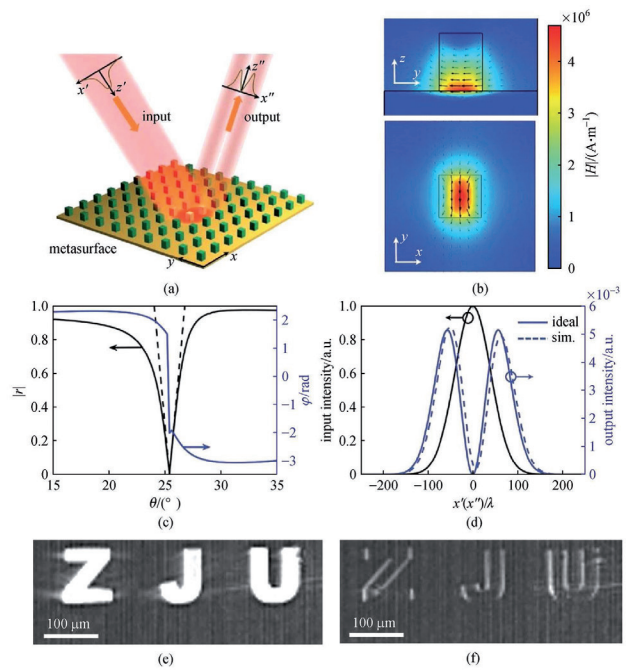


Рис. 5. Схема пространственного дифференциатора первого порядка на основе отражающей диэлектрической МП. (b) Профили магнитного поля в плоскостях x - z и x - y . (c) 1D ОПФ пространственного дифференциатора, соответствующего изменениям амплитуды и фазы отражения при падении света с поперечно-магнитной (ТМ) поляризацией. (d) Кривая выходной интенсивности МП и теоретически рассчитанные результаты для входной гауссоиды. (e) Входное изображение — буквы "ZJU". (f) Выходное изображение отраженной волны [50].

быть тщательно рассмотрена в практических приложениях.

Помимо режима передачи, пространственный дифференциатор на основе диэлектрической МП может также работать в режиме отражения. В 2020 году в [50] предложен пространственный дифференциатор первого порядка, использующий диэлектрическую МП, которая состояла из массива кремниевых квадратных фрагментов на золотой пластине, как показано на **Рис. 5**.

Было достигнуто резкое изменение отражения, сопровождаемое изменением фазы на π вблизи угла падения 25.4° на длине волны 1565 нм, что привело к ОПФ для пространственного дифференцирования первого порядка. В принципе, реализация операции дифференцирования первого порядка выиграла от гибридизации моды локализованного магнитного резонанса с

классической модулированной решеткой, ограниченной поверхностной модой. Однако потеря информации в горизонтальном направлении повлияла на обнаружение контура из-за поляризационной зависимости.

Чтобы уменьшить ограничения поляризационной зависимости, в [51] представлена модель поляризационно-независимых МП на основе резонансов Фано (Рис. 6).

Как показано на Рис. 6, МП образована однослойной треугольной решеткой отверстий в кремниевой мембране, которая индуцирует сильный нелокальный отклик в поперечном пространственном частотном спектре. Генерация резонанса Фано возникла из-за связи между вытекающей волной и продольным резонансом Фабри-Перо в структуре МП без потерь. Путем

оптимизации геометрии элементарной ячейки в диэлектрических МП были достигнуты 2D ОПФ, приближающиеся к изотропному пропусканию для s - и p -поляризованного пучка в пределах угла 8° – Рис. 6с и 6d. В дополнение к реализации дифференцирования четного порядка, изотропный отклик нечетного порядка был также получен путем изменения элементарной ячейки МП, чтобы нарушить как поперечную, так и продольную зеркальную симметрию.

Как упоминалось ранее, пространственное дифференцирование и распознавание границ могут работать как в режимах передачи, так и в режимах отражения. Фактически, режим передачи предпочтительнее в традиционных оптических системах, поскольку установка обычно более удобна, чем в режиме отражения. Поэтому желательно перенести традиционные оптические конфигурации на платформу ММ и МП, работающие в режиме передачи. Кроме того, модуль передаточного типа удобнее интегрировать с другими модулями, особенно в оптических системах формирования изображений.

В работе [52] продемонстрирована применимость пространственных дифференциаторов на основе диэлектрических МП в реальной оптической системе визуализации. Для реализации требуемой передаточной функции использовался двумерный фотонный кристалл, состоящий из цилиндрических наностержней кремния, встроенных в полиметилметакрилат (ПММА) на подложке из диоксида кремния (SiO_2) (Рис. 7а,б). Там же представлена схема двумерной МП и ее соответствующее изображение, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Кремниевые наностержни имеют высоту 440 нм, диаметр 280 нм и период 600 нм. В этой структуре была теоретически рассчитана амплитуда коэффициента пропускания как функция частоты и угла падения вдоль направления Γ -X ($\varphi = 0$, где φ – азимутальный угол в горизонтальной плоскости) для s - и p -поляризации. Следует отметить, что для проходящего света не происходит преобразования поляризации.

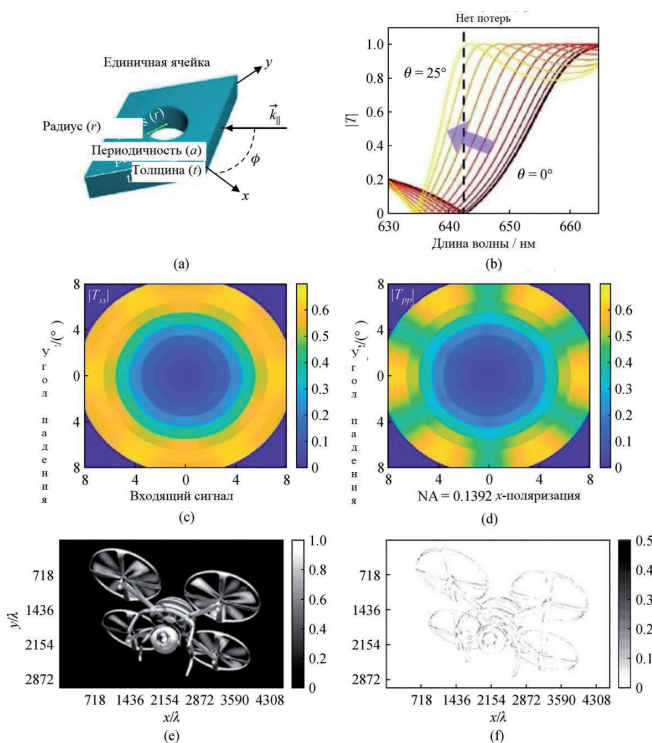


Рис. 6. (а) Элементарная ячейка пространственного дифференциатора второго порядка на основе дырочной диэлектрической МП. (б) Кривые пропускания Фано дифференциатора в зависимости от угла падения от 0 до 25° . 2D ОПФ устройства, соответствующие падению s -поляризованной волны (с) и p -поляризованной волны (d). (f) Выходной результат обнаружения краев (е) сложного входного 2D-изображения при освещении x -поляризованным светом [51].

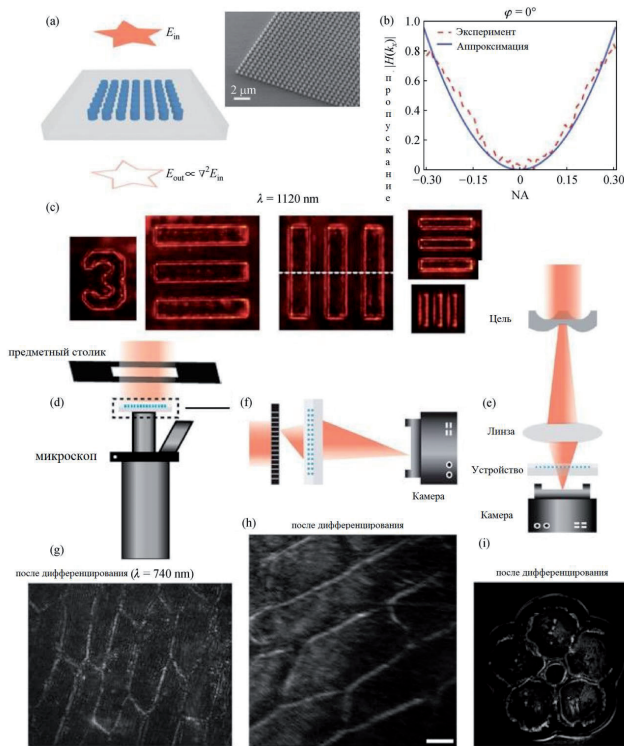


Рис. 7. (а) Схема пространственного дифференциатора второго порядка, состоящего из массива кремниевых наностержней, и соответствующее изображение, полученное с помощью СЭМ. (б) Результаты измерений и подобранная параболическая кривая 1D ОПФ как функция числовой апертуры (NA). (с) Изображения распознавания контуров с использованием тестовой таблицы с дифференциатором при освещении неполяризованным светом 1120 нм. Конфигурации оптических путей, соответствующие дифференциаторам, интегрированным в передней части (d) линзы объектива, в передней части (e) коммерческой камеры устройства с зарядовой связью и в задней части (f) металлической линзы. Целевые краевые изображения (g), (h) биологической клетки и (i) пластиковой цветочной формы с двумерным пространственным дифференциатором, соответствующим трем типам конфигураций оптических путей [52].

При нормальном падении наблюдаются два широких провала пропускания на частотах 244 и 268 ТГц, что указывает на наличие двух резонансов Ми с низкой добротностью. Учитывая зеркальную симметрию и взаимность 2D-пластины фотонного кристалла в направлении, перпендикулярном МП, выходной сигнал для s -поляризованного освещения отсутствовал. Однако резонанс Фано, образованный квазиуправляемой модой,

привел к резкому изменению пропускания с увеличением угла падения для освещения p -поляризованным светом. Одномерная ОПФ $H(k_x)$ была измерена вдоль азимутальной плоскости $\varphi = 0$ и аппроксимирована с использованием параболической кривой в диапазоне числовой апертуры (NA) $nk_x = 0.3$, как показано на Рис. 7b. Здесь n означает показатель преломления диэлектрика. МП была экспериментально проверена с использованием тестовой таблицы разрешения при освещении неполяризованным и коллимированным светом на длине волны 1120 нм ($f = 268$ ТГц).

Результаты, показанные на Рис. 7c, представляют результат обнаружения краев, когда модулированный свет проходил через МП из кремниевых наностержней, что иллюстрирует, что пространственное разрешение обнаружения было менее $4 \mu\text{m}$.

В сочетании с пространственным дифференциатором на основе МП и практической системой оптической визуализации были созданы три типа конфигураций оптических путей на основе коммерческого микроскопа и элементов устройства с зарядовой связью (ПЗС) для получения форм и границ различных биологических клеток и пластиковых цветочных форм, как показано на Рис. 7d, 7e и 7f. За счет интеграции дифференциатора на поверхности линзы объектива и ПЗС-камеры были четко видны изображения краев цели, чтобы продемонстрировать возможность создания компактной оптической системы обработки изображений, основанной на полностью диэлектрических МП – Рис. 7g, Рис. 7h и 7i. Реализация монолитного оптического пространственного дифференциатора на основе двумерных кремниевых МП и его интеграционные применения для систем обработки изображений могут проложить путь к разработке встроенных оптических аналоговых вычислительных устройств в области биологической визуализации. Кроме того, в [52] продемонстрировано, как полная система обработки изображений может быть выполнена с использованием монолитной плоской оптики.

5. РАЗРАБОТКА НОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТИ В КИТАЙСКО-РОССИЙСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ФРАКТАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Оптические аналоговые вычисления с использованием метаповерхностей являются предметом многочисленных исследований, направленных на реализацию высокоэффективной и сверхбыстрой обработки изображений в компактном устройстве. Предложенные на сегодняшний день подходы показали ограничения с точки зрения пространственного разрешения, общей эффективности, поляризации и азимутальной угловой зависимости. Здесь мы представляем дизайн нечувствительной к поляризации метаповерхности. В наших работах представлен путь к реализации высокоэффективных оптических МП, выполняющих изотропное и нечувствительное к поляризации обнаружение краев на произвольном 2D-изображении [11,12,15,16].

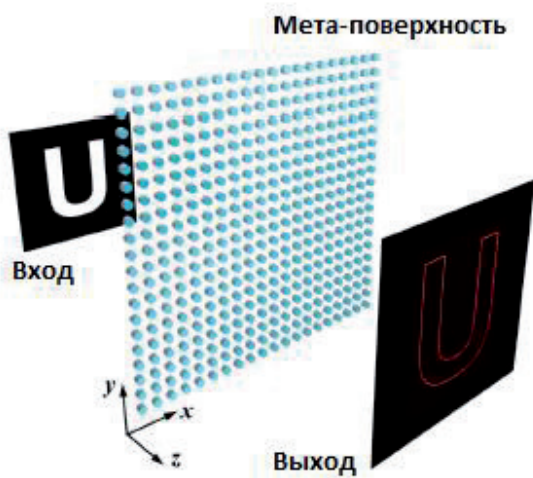


Рис. 8. Схема оптических аналоговых вычислений для пространственного 2D дифференцирования и обнаружения контура с помощью МП. 2D-изображение символа U является входной информацией, а падающий свет вдоль направления z будет модулироваться таким образом, чтобы он проходил через белую область, пока он заблокирован черной областью. При прохождении модулированного светового поля через МП, профиль контура символа U будет показан на выходном изображении [11].

Базовая конфигурация для оптических аналоговых вычислений пространственного дифференцирования с диэлектрической МП схематически показана на **Рис. 8**. Информация о границе между однородными областями с высокой контрастностью будет учитываться компонентами волнового вектора, отклоняющимися от нормального направления z вследствие дифракции. Если пространственная дисперсия МП должным образом спроектирована, такие компоненты волнового вектора могут проходить через МП с высокой эффективностью, в то время как при малых углах падения, учитывающих однородные области модулированного света, будут блокироваться МП, что приводит к реализации пространственного дифференцирования, а затем обнаружения края объекта.

В качестве примера рассмотрим МП, состоящую из кремниевых нанодисков с радиусом и высотой 92 нм и 150 нм соответственно. Такие нанодиски расположены в квадратной решетке

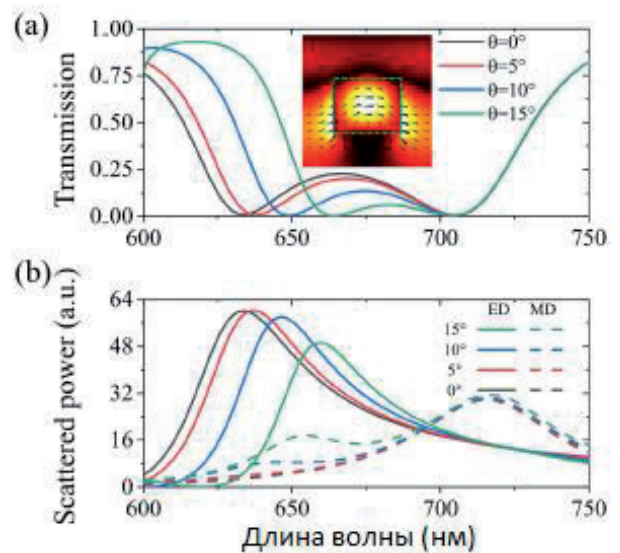


Рис. 9. (a) Спектр пропускания МП для s -волны и разных углов падения θ . Вставка: величина электрического поля на 630 нм для нормального падения. Стрелки обозначают направление поля. (b) Результаты мультипольного разложения, показывающие, что резонансы на более коротких волнах соответствуют резонансам электрического диполя (ED) (сплошные линии), в то время как более длинные волны соответствуют резонансам магнитного диполя (MD) (пунктирные линии). По оси ординат – рассеянная мощность [11].

с периодом 350 нм и внедрены в однородную среду с показателем преломления 1.45. Спектр пропускания нормально падающей плоской волны рассчитывается методом конечных элементов (COMSOL Multiphysics 5.3a) и показан на Рис. 9a. Видны два резонанса, соответствующих двум провалам пропускания около $\lambda = 630$ нм и $\lambda = 710$ нм соответственно.

Чтобы выяснить природу резонансов, мы используем для анализа технологию мультипольного разложения. Результаты представлены на Рис. 9b и показывают, что два резонанса являются электрическим дипольным резонансом на более короткой длине волны и магнитным дипольным резонансом на большей длине волны, соответственно. Чтобы исследовать пространственную дисперсию двух резонансов, мы рассчитали спектры пропускания для s -волны под разными углами падения вдоль направления x , которые также показаны на Рис. 9a. При увеличении угла падения провал на $\lambda = 630$ нм смещается в сторону большей длины волны, а на $\lambda = 710$ нм он практически не изменяется. Такие свойства также могут быть определены с помощью результатов мультипольного анализа – Рис. 9b.

Фактически, сдвиг электрического дипольного резонанса с увеличением угла падения θ обеспечивает основной механизм пространственного дифференцирования и обнаружения краев. Например, предполагая, что длина волны модулированного светового поля составляет 630 нм, более высокая пропускная способность может быть получена для большего угла падения, который содержит информацию о пространственных изменениях, которая может быть собрана после прохождения света через МП. Чтобы явным образом представить свойства, мы показали на Рис. 10a пропускание в зависимости от угла падения, а именно ОПФ $H(k_x)$ на длине волны 630 нм. Можно заметить, что это похоже на параболическую форму линии. Следует отметить, что угол падения может составлять до 15° , а соответствующая числовая апертура составляет около 0.37, что указывает на большую пространственную пропускную полосу по сравнению с большинством предыдущих работ. Такая полоса пропускания может обеспечить пространственное разрешение 1.93λ . Между тем, максимальное пропускание составляет около

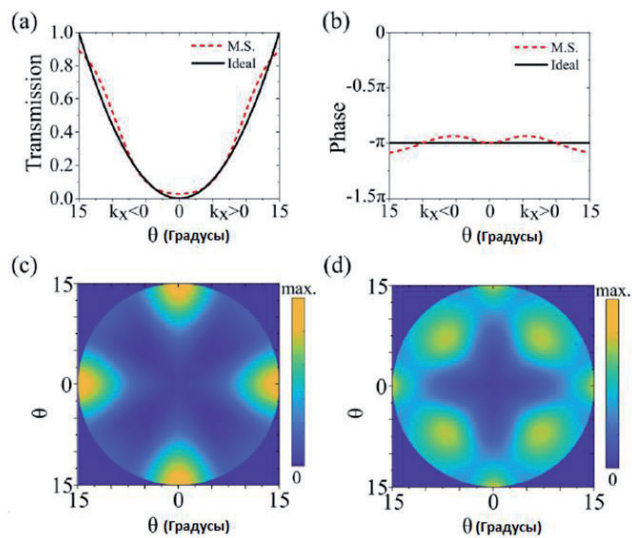


Рис. 10. (a) ОПФ вдоль направления x как для МП (красная пунктирная линия, M.S.), так и для идеального (черная сплошная линия) случая на длине волны 630 нм. (b) Соответствующие фазы ОПФ. Плоскость отсчета намеренно выбрана так, чтобы фаза передачи составляла $-\pi$ при нормальном падении. (c) и (d) 2D ОПФ для волн s и p соответственно [11].

90% на $\theta = 15^\circ$, что может обеспечить хорошее соотношение сигнал/шум на выходе.

Для удобства сравнения мы также представили результаты для идеальной передаточной функции дифференцирования второго порядка (3) $H_0(k_x) = -\alpha k_x^2 / 2$, где α – константа, гарантирующая, что передача равна единице при $\theta = 15^\circ$. Можно обнаружить, что оба результата находятся в хорошем согласии друг с другом. Кроме того, мы показали соответствующие фазы передачи на Рис. 10b, и есть только небольшие отклонения между ними. Следовательно, такая МП может обеспечить оптические аналоговые вычисления для производной второго порядка и обнаружения краев. Поскольку решетка обладает симметрией вращения четвертого порядка, ОПФ вдоль направления y такая же. Это означает, что возможно двумерное взятие производной второго порядка. Мы рассчитали двухмерную ОПФ $H(k_x, k_y)$ МП для волн s и p , которые показаны на Рис. 10c и 10d. Можно обнаружить, что передачи для меньших углов падения близки к нулю, а для больших углов падения приближаются к единице для большинства волновых векторов. Хотя ОПФ МП не является идеально изотропной в плоскости xu , что обеспечило бы существование дифференциального оператора Лапласа,

она все же может практически выполнять обнаружение контура для 2D-изображений. Кроме того, поскольку ОПФ для волн s и p имеют одинаковую параболическую форму вдоль направлений с высокой симметрией, пространственное дифференцирование может быть выполнено как для поляризованных, так и для неполяризованных световых полей, что указывает на большой потенциал в практике.

Чтобы явно продемонстрировать функциональность пространственного дифференцирования с помощью разработанной МП, мы сначала исследуем применение смоделированных на Рис. 10а и 10б результатов для одномерных пространственных функций. Два случая, типичных для логической функции и синусоиды, показанные в верхнем ряду Рис. 11а и 11б, были изучены, соответственно. Сначала мы рассчитали частотные спектры $\tilde{S}(k_x)$ пространственных функций с помощью ФТ. Затем мы умножили его на ОПФ $H(k_x)$ и результаты были возвращены в пространственную область обратным ФТ.

В качестве стандартных выходных данных мы представили результаты, обработанные с помощью идеальной производной второго порядка – средний ряд Рис. 11а и 11б. Нет сомнений в том, что отчетливые выходные данные появляются только в местах с

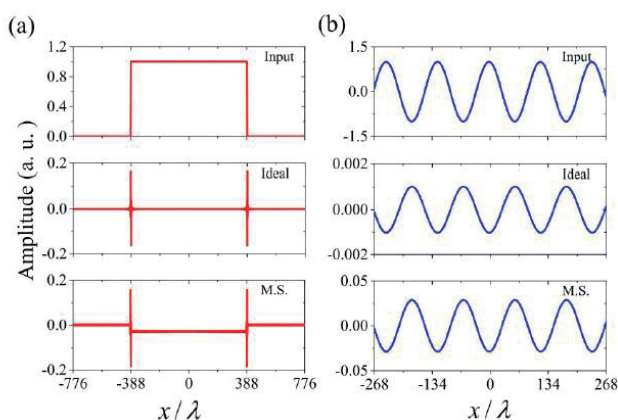


Рис. 11. (а) Результаты нахождения производной второго порядка 1D пространственной логической функции. Входные и выходные данные для идеального случая и предложенной МП показаны в верхнем, среднем и нижнем рядах соответственно. (б) Соответствующие результаты для одномерной синусоидальной пространственной функции. В обоих случаях размер пикселя на входе составляет 1.94λ [11].

быстрыми изменениями логической функции. Для синусоидальной функции выходной сигнал также является синусоидальным, но с противоположным знаком. Для случая предлагаемой нами МП мы показываем результаты на нижних рядах Рис. 11а и 11б. В случае логической функции выходные данные от МП также показывают очевидные сигналы в позициях изменения, хотя есть очень слабый сигнал вокруг центральной области из-за исчезающей передачи для малых углов падения, которая должна быть оптимизирована для приближения к идеальным результатам и увеличения пропускной способности. Для синусоидальной функции выходной сигнал с МП обеспечивает превосходное соответствие профиля идеальному случаю. Следовательно, МП действительно может выполнять функциональные возможности взятия производной второго порядка для одномерных пространственных функций.

Как уже упоминалось выше, предлагаемая нами МП может проводить пространственное дифференцирование и обнаружение границ для 2D-изображений. Далее мы рассмотрим его с помощью входного изображения, состоящего из

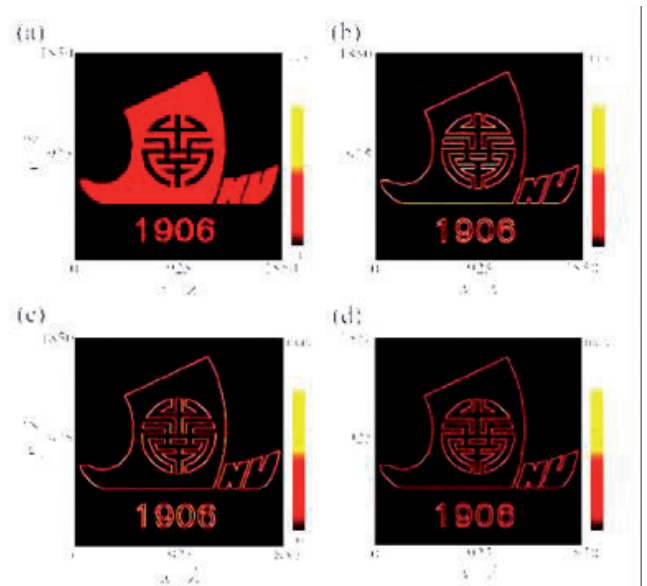


Рис. 12. (а) Двумерное изображение с логотипом лодки университета Цзинань. Размеры пикселей в направлениях x и y установлены равными 1.94λ . (б) Выходное изображение с МП для модулированного светового поля с поляризацией x . (с) Выходное изображение для случая y поляризации. (д) Выходное изображение для случая неполяризованного света [11].

логотипа лодки университета Цзинань, который показан на Рис. 12а. Это изображение должно быть хорошим образцом для тестирования, поскольку оно содержит края линий, дуг и окружностей.

Чтобы получить выходные данные, мы проецируем поля ввода с линейной поляризацией на поляризациях s и p , а затем применяем соответствующие ОПФ. Усреднением отдельных выходов s и p поляризаций, получим результаты для неполяризованного случая. Во-первых, мы предположим, что изображение модулирует x -поляризованную плоскую волну. В этом случае выходное изображение после того, как свет пройдет через МП, показано на Рис. 12b. Можно видеть, что края всех элементов были успешно извлечены, и такие эффекты не ограничиваются конкретными направлениями. Это связано с тем, что ОПФ предложенной МП имеет параболическую форму вдоль большинства направлений на плоскости xy . Кроме того, ОПФ для s - и p -волн дополняют друг друга в разных плоскостных направлениях – см. Рис. 10c и 10d. Далее мы изучили случай для светового поля с поляризацией вдоль направления y – Рис. 12c. В этом случае выходное изображение также показывает четко определенный профиль края, который очень похож на случай x -поляризации.

Наконец, результат для неполяризованного света показан на Рис. 12d. Поскольку края всех элементов в изображении могут быть хорошо обнаружены для обоих линейно поляризованных световых полей, они также могут быть обнаружены и для случая неполяризованного света. Как обсуждалось выше, ОПФ предложенной МП не может рассматриваться как идеальный оператор Лапласа. Тем не менее, данная МП может по-прежнему предлагать приемлемые результаты для обнаружения контуров, хотя выходные значения не совсем одинаковы для разных поляризаций. Кроме того, такая МП включает в себя только один слой кремниевых нанодисковых резонаторов, что может значительно упростить настройку параметров и изготовление ее для практических приложений.

Реализация операции Лапласа в виде оптических аналоговых вычислений недавно

привлекла внимание, и компактное устройство с высоким пространственным разрешением все еще не изобретено. В [16] мы предложили метаповерхность Лапласа, которая может выполнять почти идеально операцию Лапласа для разных конфигураций падающего светового поля. Наиболее важно то, что максимальный угол падения θ был значительно расширен, и числовая апертура может приближаться к 0.14, что улучшает практическую установку и приводит к пространственному разрешению, примерно в 4 раза превышающему рабочую длину волны. Предлагаемая МП Лапласа основана на возбуждении связанного состояния в континууме, которое продемонстрировало экзотические оптические свойства. Высоко симметричный профиль режима обеспечивает почти изотропную ОПФ операции Лапласа. Мы продемонстрировали, что такая ОПФ может не только выполнять дифференцирование второго порядка для одномерной пространственной функции Гаусса, но также выводит правильные результаты для двумерной функции Бесселя. Кроме того, мы также показали, что МП Лапласа может использоваться для реализации

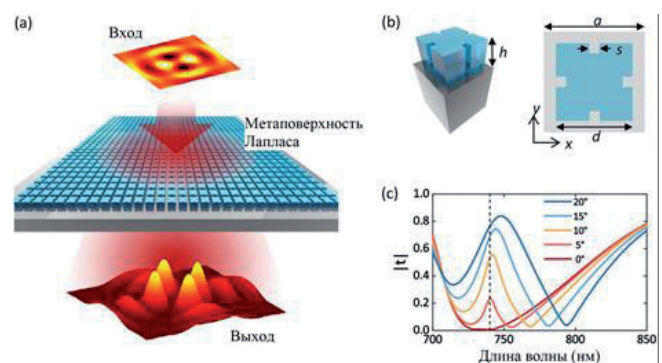


Рис. 13. (а) Диэлектрическая МП, преобразующая входную двумерную пространственную функцию в другую функцию как оператор Лапласа; (b) Элементарная ячейка диэлектрической МП. Слева, трехмерный вид элементарной ячейки. Она состоит из кремниевого кирпичика (голубой цвет) толщиной $h = 163$ нм и стеклянной подложки (серый цвет). Справа, вид сверху на элементарную ячейку. Период составляет $a = 331$ нм, а ширина кремниевого кирпича $d = 251$ нм. В центре всех краев расположены четыре квадратные пустоты шириной 33 нм. (с) Спектры коэффициента пропускания МП Лапласа при различных углах падения вдоль направления x для p -волны [16].

обнаружения краев интересующих объектов на изображении. Предлагаемая МП Лапласа может быть настроена для работы на разных длинах волн в режиме передачи, что дает преимущества для приложений оптических вычислений, медицинской диагностики, машинного зрения и т.д.

Чтобы удовлетворить требованиям по ОПФ и свойствам передачи, мы разработали новую МП Лапласа, которая показана на Рис. 13а. При прохождении через МП Лапласа входное световое поле будет автоматически обрабатываться, и результаты операции Лапласа могут быть получены просто путем простой и мгновенной записи выходного светового поля.

МП Лапласа состоит из квадратной решетки модифицированного кремниевого кирпичика на стеклянной подложке, который показан на Рис. 13б. Высокая симметрия квадратной решетки и дефекты на четырех сторонах кремниевого кирпичика обеспечивают изотропную ОПФ для направлений в плоскости. Мы рассчитали спектры пропускания МП Лапласа при различных углах падения и привели их на Рис. 13с. Можно обнаружить, что резонанс проявляется на длине волны $\lambda \approx 740$ нм, когда световое поле падает под углом. Коэффициент пропускания увеличивается с увеличением угла падения θ . В результате обеспечиваются необходимые условия для реализации операции Лапласа. Чтобы объяснить зависимость пропускания от угла θ для МП Лапласа, мы вычислили дисперсионные полосы около 740 нм предлагаемой диэлектрической МП (кремний без потерь с показателем преломления 3.73). Все расчеты подробно приведены в [16].

Для проверки правильности выполнения операции Лапласа вначале использовалась одномерная пространственная функция – Рис. 14а. Эта функция состоит из трех гауссовых огибающих и может рассматриваться как профиль электрического поля входящего светового луча. Выходные сигналы показаны на Рис. 14б и 14с. Крошечная разница между результатами идеального случая и МП может быть объяснена небольшим отклонением ОПФ МП Лапласа от идеального. Мы установили пространственное разрешение 3.6λ для входной функции, что

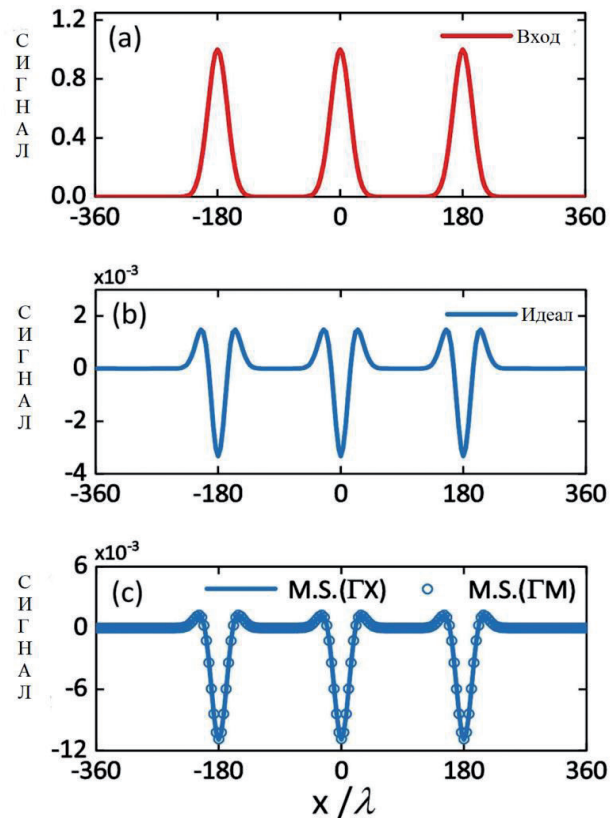


Рис. 14. Одномерная пространственная функция с тремя гауссовыми огибающими в качестве входного светового поля; (b) Результат после операции идеального дифференцирования второго порядка; (c) Результат от МП Лапласа. Рассмотрены как ОПФ по направлениям ГХ (сплошная линия), так и ГМ (символы). Размер входного пикселя составляет 3.6λ [16].

близко к максимальному пространственному разрешению данной МП.

Одно из применений операции Лапласа – обнаружение краев проблемных целей на изображении. Мы также продемонстрировали, что предлагаемую МП Лапласа можно использовать для распознавания дорожных знаков, что имеет решающее значение для автоматизированного вождения. Был выбран дорожный знак, который показан на Рис. 15а.

Полутоновое изображение на Рис. 15б можно рассматривать как неполяризованное световое поле с модуляцией интенсивности, которое падает на МП Лапласа. Из результатов после идеальной операции Лапласа, которые показаны на Рис. 15с, можно заметить, что края как внешних кругов, так и стрелки могут быть четко идентифицированы. Следовательно, необходимая информация может быть безопасно сохранена, в то время как избыточная будет отброшена, что ускоряет обработку

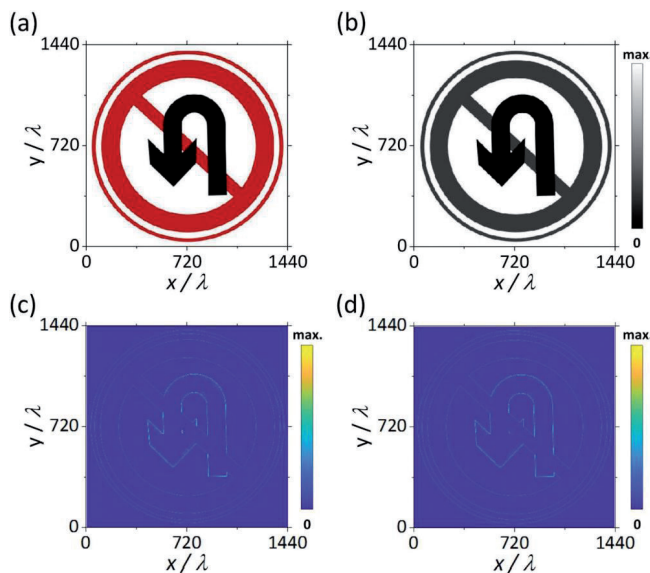


Рис. 15. (a) Цветное изображение дорожного знака. (b) Соответствующее изображение в градациях серого в качестве входных данных. (c) и (d) Выходное изображение из идеального оператора Лапласа и МП Лапласа для (b) соответственно [16].

информации на первом этапе. Мы показали выходные результаты МП Лапласа на Рис. 15d, где можно обнаружить, что подобное обнаружение краев также может быть успешно реализовано.

МП Лапласа может быть переведена для работы на других длинах волн путем регулировки размера структуры. Чтобы продемонстрировать это, аналогичным образом была разработана другая МП Лапласа, работающая на длине волны 1550 нм (окно прозрачности оптического волокна). Форма структуры такая же, как на Рис. 13b, но с другими параметрами: $a = 743$ нм, $d = 560$ нм, $s = 69$ нм и $b = 360$ нм, соответственно. При этом коэффициент пропускания мог достигать 0.9, а угол падения 10° .

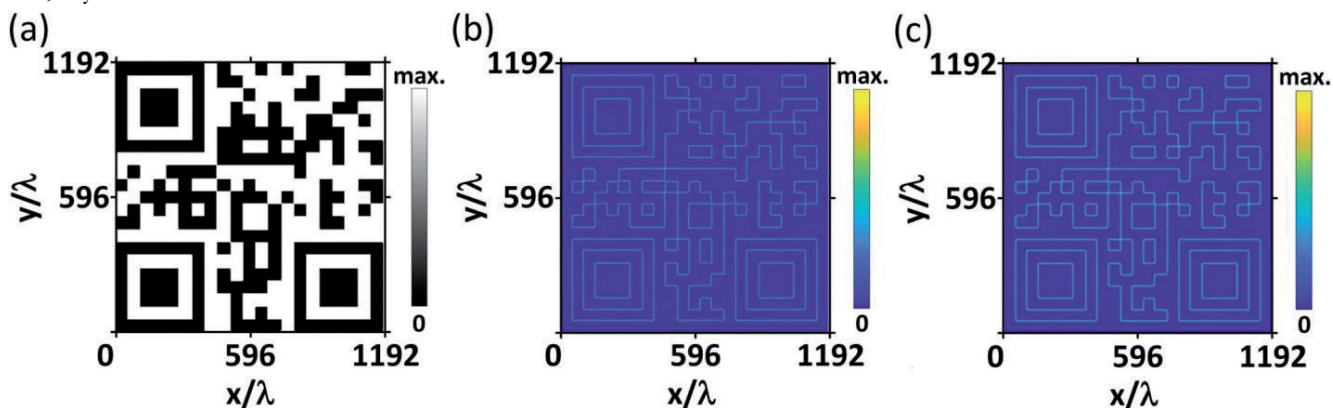


Рис. 16. (a) Входное изображение, состоящее из QR-кода; (b) выходное изображение идеальной операции Лапласа; (c) выход из МП Лапласа. Все изображения представляют собой профиль интенсивности света; размеры пикселей установлены как 2.88λ [16].

Мы использовали типичный QR-код в качестве входного 2D изображения, поскольку QR-коды теперь важны в нашей повседневной жизни, и обнаружение краев для них играет решающую роль в обнаружении области QR-кода. Выбранный нами QR-код показан на Рис. 16a, который несет информацию о китайском иероглифе, означающем "Свет". Посредством процедуры обработки, обсуждаемой в данном контексте, мы можем получить результаты от идеальной операции Лапласа и от МП Лапласа, которые показаны на Рис. 16b и 16c.

Из данных Рис. 16 видно, что края всех элементов были успешно обнаружены. Кроме того, интенсивность света на выходе из МП очень похожа на идеальную, что подразумевает высокое качество обнаружения границ для изображений с МП Лапласа.

Ввиду ограниченного объема статьи автор лишь конспективно перечислит другие направления фотоники, которые также исследуются в наших работах [10-17] и подробно там представлены. Это: управление рассеянием света наночастицами с помощью магнито-электрической связи и нулевое обратное рассеяние (теория рассеяния света наночастицами и электромагнитные мультиполи, численное моделирование, проверочные эксперименты в области частот от 4 до 7.5 ГГц) [10,13,14]; сильная оптомеханическая связь в цепочечных волноводах из наночастиц кремния с квазисвязанными состояниями в континууме (фотон-фононное взаимодействие с микроструктурами) [17] и т.п. Эти направления, несомненно, могут стать темами будущих докладов на конференциях "Радиолокация, навигация, связь - RLNC" в ВГУ.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метаповерхности – это очень широкая область исследований в фотонике, ее развитие только начинается, при этом, исследование диэлектрических МП вызывает большой интерес. МП имеют преимущество в том, что занимают меньше физического пространства, чем трехмерные ММ; следовательно, МП предлагают возможность конструирования структур с меньшими потерями. В частности, отметим, что использование диэлектрических МП вместо плазмонных структур наряду с уменьшением омических потерь помогает реализовать управление не только электрической, но и магнитной компонентой световой волны, что повышает эффективность управления светом в наноразмерных структурах.

К настоящему времени встроенные оптические пространственные дифференциаторы были продемонстрированы с использованием различных искусственных МП [15,18,19]. По сравнению с конфигурациями пространственных дифференциаторов на основе металлических МП, полностью диэлектрические операционные устройства на основе МП в последнее время стали популярной темой исследований из-за их превосходной совместимости и интеграции с реальными системами визуализации. Для дальнейшего удовлетворения требований обнаружения границ в практических приложениях предпочтение будет отдано высокопроизводительным пространственным дифференциаторам с высокой эффективностью и разрешением. Построение пространственных дифференциаторов с высокой передачей энергии, большой пространственной полосой пропускания и независимостью от поляризации в настоящее время является доминирующей задачей. В сочетании с коммерческой кремниевой фотонной платформой и передовыми технологиями нанопроизводства будут проводиться экспериментальные демонстрации математических операций и обнаружения границ в многочисленных сценах обработки изображений, чтобы раскрыть гораздо больший потенциал применения. Более того, интеграция на кристалле операционных устройств с другими планарными оптическими элементами, основанными на диэлектрических метаповерхностных

платформах, таких как металинза, также будет ценным направлением в будущем.

Итак, в статье были достаточно подробно рассмотрены вычислительные диэлектрические МП, реализующие математические операции пространственного дифференцирования и распознавания контуров в фотонных топологических устройствах обработки сигналов и полей. Такие МП имеют широкий спектр потенциальных приложений в электромагнетизме.

Их применение в целом выводит на новый уровень все функциональные характеристики предложенной автором в конце XX века топологической текстурно-фрактальной обработки сигналов и полей при решении классических задач обнаружения, измерения, распознавания и классификации интеллектуальными радиотехническими системами и устройствами. Такая задача пока не ставилась в научном мире. Автором движет уверенность, что наши текущие и будущие исследования окажутся чрезвычайно полезными для будущих устройств обработки потоков информации, и не только в радиолокации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Потапов А.А. *Фракталы в радиофизике и радиолокации*. М., Логос, 2002, 664 с. Потапов А.А. *Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки*. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., Университетская книга, 2005, 848 с.
2. Профессор Александр Алексеевич Потапов. *Фракталы в действии: Библиографический указатель*. Под ред. академика Ю.В. Гуляева. М., ЦИУ “Радуга”, 2019, 256 с.
3. Potapov Alexander A, Wu Hao, Xiong Shan. *Fractality of Wave Fields and Processes in Radar and Control*. Guangzhou, South China University of Technology Press (First edition: Nov. 2020), 2020, 280 pp.
4. Кузнецов ВА, Потапов АА, Аликулов ЕА. *Патент RU 2746038 C1 G06T 5/50 (2020.09)*. Способ фрактального комплексирования многочастотных радиолокационных изображений. Приоритет изобретения 05.09.2020 г., дата государственной регистрации 06.04.2021 г. Бюл. № 10.
5. Потапов АА, Кузнецов ВА, Аликулов ЕА. Анализ способов комплексирования изображений, формируемых многодиапазонными радиолокационными

- станциями с синтезированной апертурой. *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*, 2021, 24(3):6-21.
6. Потапов АА, Кузнецов ВА, Потоцкий АН. Новый класс топологических текстурно-мультифрактальных признаков и их применение для обработки радиолокационных и оптических малоконтрастных изображений. *Радиотехника и электроника*, 2021, 66(5):457-467.
 7. Потапов АА. Математические основы фрактально-скейлингового метода в статистической радиофизике и приложениях. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2021, 13(3):245-296. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.245.
 8. Beliaeva VS, Klyuev DS, Neshcheret A M, Potapov AA, Sokolova YV. Fractal Antenna Systems with Chiral Metamaterials Substrates for MIMO Systems. In: Hu Z, Petoukhov S, He M (eds). *Advances in Artificial Systems for Medicine and Education V*. (Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, v. 107). Cham, Springer, 2022, pp. 329-345.
 9. Потапов АА, Кузнецов ВА, Аликулов ЕА. Структурно-параметрический синтез систем оптимальной текстурно-фрактальной обработки многомерных радиолокационных изображений. *Радиотехника и электроника*, 2022, 67(1):51-67.
 10. Danping Pan, Tianhua Feng, Wei Zhang, and Alexander A. Potapov. Unidirectional light scattering by electric dipoles induced in plasmonic nanoparticles. *Optics Letters*, 2019, 44(11):2943-2946.
 11. Wan Lei, Pan Danping, Yang Shuaifeng, Zhang Wei, Potapov Alexander A., Wu Xia, Liu Weiping, Feng Tianhua, and Li Zhaohui. Optical analog computing of spatial differentiation and edge detection with dielectric metasurfaces. *Optics Letters*, 2020, 45(7):2070-2073.
 12. Pan Danping, Wan Lei, Potapov Alexander A., Feng Tianhua. Performing Spatial Differentiation and Edge Detection with Dielectric metasurfaces. *QELS Fundamental Science "OSA Technical Digest Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO) (San Jose, California, USA, 10-15 May 2020)"*. – Washington, Optical Society of America, 2020. Paper FW4B.2.pdf. 2 pp. (From the session "Inverse Design and Computation (FW4B)").
 13. Feng Tianhua, Potapov Alexander A., Liang Zixian, Xu Yi. Huygens Metasurfaces Based on Congener Dipole Excitations. *Physical Review Applied*, 2020, 13, Article No. 021002, 6 pp.
 14. Feng Tianhua, Yang Shuaifeng, Lai Ning, Chen Weilian, Pan Danping, Zhang Wei, Potapov Alexander A., Liang Zixian, Xu Yi. Manipulating light scattering by nanoparticles with magnetoelectric coupling. *Physical Review B*, 2020, V 102, Article No. 205428, 7 pp.
 15. Wan Lei, Pan Danping, Feng Tianhua, Liu Weiping, Potapov A.A. A review of dielectric optical metasurfaces for spatial differentiation and edge detection. *Frontiers of Optoelectronics*, 2021, 14(2):187-200.
 16. Wan Lei, Pan Danping, Ouyang Min, Zhang Wei, Potapov Alexander A., Liu Weiping, Liang Zixian, Feng Tianhua, Li Zhaohui. Laplace metasurfaces for optical analog computing based on quasi-bound states in the continuum. *Photonics Research*, 2021, 9(9):1758-1766.
 17. Yang Shuaifeng, Wan Lei, Wang Fugen, Potapov Alexander A., Feng Tianhua. Strong optomechanical coupling in chain-like waveguides of silicon nanoparticles with quasi-bound states in the continuum. *Optics Letters*, 2021, 46(18):4466-4469.
 18. Ziolkowski RW, Engheta N. Metamaterials: Two Decades Past and Into Their Electromagnetics Future and Beyond. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 2020, AP-68(3):1232-1237; doi: 10.1109/TAP.2019.2938674.
 19. He Shanshan, Wang Ruisi, Luo Hailu. Computing metasurfaces for all-optical image processing: a brief review. *Nanophotonics*, 2022, 26 p.; doi: 10.1515/nanoph-2021-0823.
 20. Гуляев Ю.В. Интервью. *Интеллект & Технологии*, 2017, 4(19):6-11.
 21. Silva A, Monticone F, Castaldi G, Galdi V, Alù A, Engheta N. Performing mathematical operations with metamaterials. *Science*, 2014, 343(6167):160-163.
 22. Pors A, Nielsen MG, Bozhevolnyi SI. Analog computing using reflective plasmonic metasurfaces. *Nano Letters*, 2015, 15(1):791-797.
 23. Chen H, An D, Li Z, Zhao X. Performing differential operation with a silver dendritic metasurface at visible wavelengths. *Optics Express*, 2017, 25(22):26417-26426.
 24. Wu W, Jiang W, Yang J, Gong S, Ma Y. Multilayered analog optical differentiating device: performance analysis on structural parameters. *Optics Letters*, 2017, 42(24):5270-5273.
 25. Kwon H, Sounas D, Cordaro A, Polman A, Alù A. Nonlocal metasurfaces for optical signal

- processing. *Physical Review Letters*, 2018, 121(17). Article No. 173004.
26. Zhang W, Qu C, Zhang X. Solving constant-coefficient differential equations with dielectric metamaterials. *Journal of Optics*, 2016, 18(7). Article No. 075102.
 27. Abdollahramezani S, Chizari A, Dorche AE, Jamali MV, Salehi JA. Dielectric metasurfaces solve differential and integro-differential equations. *Optics Letters*, 2017, 42(7):1197-1200.
 28. Ремнев МА, Климов ВВ. Метаповерхности: новый взгляд на уравнения Максвелла и новые методы управления светом. *Успехи физ. наук*, 2018, 188(2):169-205.
 29. Рыбин МВ, Лимонов МФ. Резонансные эффекты в фотонных кристаллах и метаматериалах. *Успехи физ. наук*, 2019, 189(8):881-898.
 30. Гудмен Дж. *Введение в Фурье-оптику*. М., Мир, 1970, 364 с.
 31. Папулис А. *Теория систем и преобразований в оптике*. М., Мир, 1971, 495 с.
 32. Зверев ВА. *Радиооптика*. М., Советское радио, 1975, 304 с.
 33. Потапов АА. Статистический подход к описанию изображений текстур земной поверхности в оптическом и радиодиапазоне. *Тез. докл. Всесоюз. конф. "Математические методы распознавания образов – ММРО-IV"*, Рига, Изд-во МИПКРРиС при СМ Латв. ССР, 1989, Часть 4, с. 3-5.
 34. Потапов АА, Колесников АИ. Корреляционные характеристики изображений земной поверхности. *Радиотехника и электроника*, 1993, 38(7):1270-1279.
 35. Потапов АА, Колесников АИ. Спектральные характеристики изображений земной поверхности. *Радиотехника и электроника*, 1993, 38(10):1851-1862.
 36. Потапов АА. Синтез изображений земных покровов в оптическом и миллиметровом диапазонах волн. *Автореферат дис. ... д-ра физ.-мат. наук*, М., ИРЭ РАН, 1994, 44 с.
 37. Farmahini-Farahani M, Cheng J, Mosallaei H. Metasurfaces nanoantennas for light processing. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(9):2365-2370.
 38. Zhu T, Zhou Y, Lou Y, Ye H, Qiu M, Ruan Z, Fan S. Plasmonic computing of spatial differentiation. *Nature Communications*, 2017, 8(1). Article No. 15391.
 39. Fan S, Joannopoulos JD. Analysis of guided resonances in photonic crystal slabs. *Physical Review B*, 2002, 65(3). Article No. 235112.
 40. Limonov MF, Rybin MV, Poddubny AN, Kivshar YS. Fano resonances in photonics. *Nature Photonics*, 2017, 11(9):543-554.
 41. Kuznetsov AI, Miroshnichenko AE, Brongersma ML, Kivshar YS, Luk'yanchuk B. Optically resonant dielectric nanostructures. *Science*, 2016, 354(6314). Article No. aag2472.
 42. Whitehead LA, Hardy WN. Split-ring resonator for use in magnetic resonance from 200-2000 MHz. *Rev. Sci. Instrum.*, 1981, 52:213-216.
 43. Aieta F, Kats MA, Genevet P, Capasso F. Multiwavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation. *Science*, 2015, 347:1342-1345.
 44. Genevet Patrice, Capasso Federico, Aieta Francesco, Khorasaninejad Mohammadreza, Devlin Robert. Recent advances in planar optics: from plasmonic to dielectric metasurfaces. *Optica*, 2017, 4(1):139-152.
 45. Zhou J, Qian H, Chen CF, Zhao J, Li G, Wu Q, Luo H, Wen S, Liu Z. Optical edge detection based on high-efficiency dielectric metasurface. *Proc. National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(23):11137-11140.
 46. He S, Zhou J, Chen S, Shu W, Luo H, Wen S. Wavelength-independent optical fully differential operation based on the spin-orbit interaction of light. *APL Photonics*, 2020, 5(3). Article No. 036105.
 47. Guo C, Xiao M, Minkov M, Shi Y, Fan S. Photonic crystal slab Laplace operator for image differentiation. *Optica*, 2018, 5(3):251-256.
 48. Guo C, Xiao M, Minkov M, Shi Y, Fan S. Isotropic wavevector domain image filters by a photonic crystal slab device. *Journal of the Optical Society of America*, 2018, A35(10):1685-1691.
 49. Cordaro A, Kwon H, Sounas D, Koenderink AF, Alù A, Polman A. High-index dielectric metasurfaces performing mathematical operations. *Nano Letters*, 2019, 19(12):8418-8423.
 50. Zhou Y, Wu W, Chen R, Chen W, Chen R, Ma Y. Analog optical spatial differentiators based on dielectric metasurfaces. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(4). Article No. 1901523.
 51. Kwon H, Cordaro A, Sounas D, Polman A, Alù A. Dual-polarization analog 2D image processing with nonlocal metasurfaces. *ACS Photonics*, 2020, 7(7):1799-1805.
 52. Zhou Y, Zheng H, Kravchenko II, Valentine J. Flat optics for image differentiation. *Nature Photonics*, 2020, 14(5):316-323.

Потапов Александр Алексеевич

д.ф.-м.н.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Москва 125009, Россия

E-mail: potapov@cplire.ru.