

Метаповерхности и перспективы развития компьютерной оптики

Н.Л. Казанский^{1,2}, С.Н. Хонина^{1,2}

¹ Институт систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт»,
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151;

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

Аннотация

Метаповерхности обеспечивают новый шаг в развитии компьютерной оптики, который продолжает этап многофункциональных преобразований света с использованием ультратонких элементов. В отличие от традиционного подхода, основанного на рефракционных и дифракционных оптических элементах, в метаповерхностях используются сложные массивы субволновых структур для управления фазой, амплитудой и поляризацией падающих световых волн. Эта перспективная технология даёт множество преимуществ, включая обеспечение поляризационных преобразований и острой фокусировки с преодолением дифракционного предела, а также компенсации оптических aberrаций в значительно более тонком и лёгком формате. Метаповерхности успешно применяются во множестве приложений: от формирования высококачественных изображений до предоставления дополненной реальности, в спектроскопии, мониторинге окружающей среды, в совершенствовании диагностических технологий и медицинского оборудования. Благодаря своей замечательной адаптируемости и исключительным характеристикам метаповерхности обладают огромным потенциалом, позволяющим выйти за рамки, казалось бы, непреодолимых пределов в области световых технологий. В этом обзоре представлены основные приложения метаповерхностей с точки зрения расширения возможностей компьютерной оптики. Обсуждаются проблемы и перспективы развития метаповерхностей, в том числе на основе перестраиваемых устройств и с использованием методов искусственного интеллекта.

Ключевые слова: метаповерхность, компьютерная оптика, перспективы развития и использования.

Цитирование: Казанский, Н.Л. Метаповерхности и перспективы развития компьютерной оптики / Н.Л. Казанский, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2025. – Т. 49, № 3. – С. 349-361. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1627.

Citation: Kazanskiy NL, Khonina SN. Metasurfaces & perspectives of computer optics. Computer Optics 2025; 49(3): 349-361. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1627.

Введение

Одной из наиболее быстро развивающихся областей исследований за последнее десятилетие в оптике стали метаповерхности (МП). Эти сверхтонкие оптические элементы, рельеф которых составляют массивы субволновых метаатомов, были разработаны для широкого спектра задач и функций, включая фокусировку, контроль поляризации, голографию, структурирование цвета, спектроскопию, датчики и многое другое. Они позволяют одновременно управлять несколькими характеристиками электромагнитных (ЭМ) волн, способностью блокировать, поглощать, концентрировать, рассеивать или направлять волны в широком диапазоне микроволновых и оптических частот.

Высота дифракционного микрорельефа элементов компьютерной оптики пропорциональна рабочей длине волны (соответствует длине волны излучения, для которой элемент изготавливается), и для их расчета и проектирования могут использоваться геометрикооптический расчет или приближения скалярной теории дифракции. Размеры элементов дифракционной структуры метаповерхностей составляют доли рабочей длины волны, по-

этому для их расчета и моделирования необходимо использовать строгую электромагнитную теорию, то есть применять уравнения Максвелла. При этом и микрорельеф дифракционных оптических элементов (ДОО), и нанорельеф метаповерхностей обычно размещается на подложке, толщина которой существенно больше высоты дифракционного рельефа. Таким образом, выигрыш в массогабаритных характеристиках МП по сравнению с ДОО в стандартном случае не слишком велик, основное сравнительное достоинство МП – это расширение функциональных возможностей при одновременном росте требований к точности воспроизведения дифракционного нанорельефа.

Перспективы использования МП значительно улучшились благодаря прогрессу в вычислительных методах решения уравнений Максвелла и в технологиях нанопроизводства, что позволяет говорить о влиянии на развитие компьютерной оптики и о коммерческих приложениях.

1. Принцип работы

МП представляет собой тонкую, искусственно созданный поверхность, состоящую из совокупности

субволновых структур, которые различным образом взаимодействуют со светом. Субволновые структуры (меньше длины волны света, с которым они взаимодействуют) являются особенностью МП и позволяют управлять такими свойствами света, как поляризация, фаза и амплитуда. Механизм работы МП зависит от точного расположения и конфигурации этих субволновых структур [1, 2].

При прохождении через МП свет претерпевает разнообразные преобразования, связанные с характеристиками элементов наноструктуры, такими как их размер, форма и положение. Благодаря тщательному манипулированию этими параметрами учёные могут настроить оптический отклик МП для достижения конкретных функций. Например, становится возможным манипулировать направлением распространения света, концентрировать свет в желаемых конфигурациях, а также генерировать сложные волновые фронты для таких приложений, как голография.

Теория эффективной среды хорошо описывает рассеивающие свойства отдельных метаатомов, а их совокупное воздействие можно объяснить на основе Фурье-оптики и их пространственной передаточной функции. Рассмотрим плоскую волну

$$I(x, y) = A \exp[-i(k_x x + k_y y + k_z z)],$$

падающую на фазовую маску в плоскости $z=0$, описываемую передаточной функцией (рис. 1):

$$H(x, y) = \exp[i\Phi(x, y)].$$

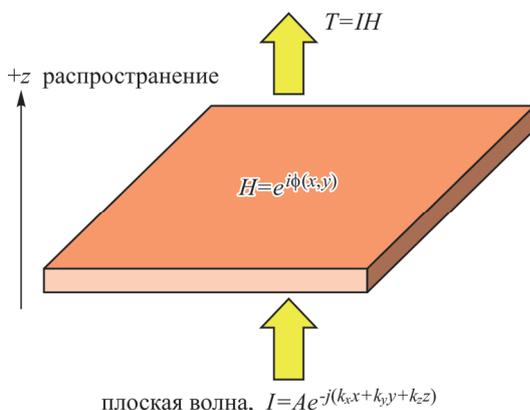


Рис. 1. Принцип действия метаповерхности

Используя разложение в ряд Тейлора вблизи точки (x_0, y_0) для фазового распределения, можно записать:

$$\Phi(x, y) \approx \Phi(x_0, y_0) + (x - x_0) \left. \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} \right|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}} + (y - y_0) \left. \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial y} \right|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}}. \quad (1)$$

Тогда воздействие передаточной функции $H(x, y)$ на плоскую волну можно описать следующим образом:

$$T(x, y) = I(x, y)H(x, y) \approx A \exp \left\{ -i \left[\left(k_x + \left. \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} \right|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}} \right) x + \left(k_y + \left. \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial y} \right|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}} \right) y + k_z z + \Theta \right] \right\}, \quad (2)$$

где под символом Θ объединены все слагаемые с постоянной фазой.

Таким образом, градиент распределения фазы (1) приводит к изменению волнового вектора падающей волны в соответствии с (2), что объясняет, как МП позволяет изменять волновой фронт.

Физическая реализация дискретной фазовой функции на МП обеспечивается с помощью метаатомов. Выбор конфигурации метаатомов имеет определённые ограничения. Основным ограничением является требование субволнового размера по отношению к длине волны рабочего излучения, которое гарантирует, что МП передаёт только дифракционную моду нулевого порядка. Второе ограничение заключается в том, что метаатомы должны иметь одинаковую высоту по всей поверхности, что позволяет изготавливать МП с помощью одной литографической стадии. Это условие оставляет возможность изменения только геометрии или ориентации метаатомов.

Существует три основных типа механизмов, с помощью которых метаповерхность управляет изменением фазы при определённых состояниях поляризации, включая резонансы с линейно поляризованным светом, фазу Панчаратнама–Берри для циркулярно поляризованного света и принцип Гюйгенса с независимостью от поляризации [3].

2. Основные приложения

МП обладают важной способностью тонко манипулировать светом на наноуровне, что открывает огромный потенциал для преобразований в фотонике. Настраивая конструкции МП, исследователи могут изготавливать плоские, лёгкие компоненты, такие как линзы, волновые пластины и голограммы, заменяющие традиционную громоздкую оптику тонкими плоскими структурами. Такая миниатюризация не только упрощает существующие технологии, но также открывает путь для разнообразных приложений, охватывающих телекоммуникации, формирование изображений, зондирование и квантовые технологии [4].

В области изображающей оптики МП демонстрируют большой потенциал для улучшения разрешения, контрастности и восприятия глубины. Они обладают способностью исправлять aberrации, обеспечивать получение изображений со сверхвысоким разрешением и упрощать создание компактных и лёгких объек-

тивов, предназначенных для бортовых камер и миниатюрных микроскопов [5].

Кроме того, МП можно адаптировать к широкому спектру длин волн, от видимого света до ТГц-излучения, что делает их пригодными для различных методов визуализации в таких приложениях, как медицинская диагностика, дистанционное зондирование и промышленный контроль. На рис. 2 приведены потенциальные возможности применения МП.

Одна из разновидностей МП, называемая *плоскими линзами* [6], привлекла значительное внимание своим потенциалом в приложениях, связанных с повышением качества фокусировки и формирования изображений [7]. Эти линзы, называемые также металлинзами, обходят ограничения традиционной громоздкой оптики, предлагая ультратонкий и лёгкий дизайн, сохраняя при этом первоклассные характеристики. В частности, позволяют преобразовывать лазерное излучение в поле с новыми особыми характеристиками [8], такими как усиленная продольная компонента электрического поля, обратный поток энергии или заданное распределение углового момента [9–14].



Рис. 2. Потенциальные возможности применения МП

МП имеют значительный потенциал в компьютерной оптике *свободного пространства* [15–18], предоставляя компактную и универсальную альтернативу традиционным громоздким компонентам, таким как линзы, зеркала и светоделители, радикально уменьшая размер, вес и сложность оптической системы [19–21].

Оптика с широким полем зрения играет решающую роль в различных оптических устройствах, используемых для формирования изображений, отображения, зондирования и управления лучом. Традиционная преломляющая оптика с широким полем обзора обычно состоит из нескольких расположенных друг за другом линз, что приводит к созданию громоздких, тяжёлых и дорогих объективов. Металлинзы предлагают многообещающую альтернативу для достижения оптики с широким полем обзора без необходимости использования сложных линз в сборе [22].

Голографические дисплеи на базе МП [23–24] обещают захватывающий визуальный опыт, оживляя

виртуальные объекты яркими цветами, чёткими деталями и широкими углами обзора. Более того, компактный форм-фактор и масштабируемость конструкций МП открывают пути для приложений дополненной реальности, 3D-изображений и проекционных дисплеев, обеспечивая заметный прогресс в том, как мы взаимодействуем с цифровым контентом в различных контекстах.

Другой вид МП, известный как волновые пластинки [25–27], служит для управления поляризацией, способствуя развитию оптической связи и изображающих устройств.

Перспективным является сочетание в одной метаповерхности нескольких функциональных возможностей, связанных с преобразованием поляризации и фокусировкой, разделением, смещением и другими преобразованиями излучения [28–31].

Благодаря структурному расположению субволновых структур, МП могут манипулировать свойствами поляризации падающего света с беспрецедентной точностью. Эта возможность имеет огромный потенциал для улучшения поляриметрических измерений в различных приложениях, включая дистанционное зондирование, определение характеристик материалов и оптическую связь [32].

Поляриметры на основе МП [33, 34] перспективны для улучшения чувствительности, что позволит обнаруживать тонкие изменения поляризации, которые сложно заметить с использованием традиционных методов. Кроме того, универсальность МП позволяет разрабатывать компактные и лёгкие поляриметрические устройства [35, 36], облегчающие их интеграцию в компактные портативные системы.

Оптические датчики являются одним из наиболее перспективных направлений совершенствования за счёт применения МП. Оптический датчик состоит из источника света, который производит электромагнитные волны, сенсорной платформы, где свет взаимодействует с веществом, и детектора, который распознаёт и измеряет изменения спектра электромагнитных волн в ответ на целевой контакт с аналитом [37, 38]. Концепция восприятия оптического датчика основана на изменениях в оптическом сигнале сигнатуры оптической платформы, вызванных взаимодействием с молекулами аналита, которые впоследствии преобразуются в количественные и/или качественные измерения, например, смещение резонансной длины волны (рис. 3).

Конструкция сенсорной платформы имеет важное значение, поскольку она определяет специфику взаимодействия света и материи [39]. На рис. 4 представлены основные типы сенсорных МП-структур, известные как полностью металлические, полностью диэлектрические и гибридные [13].

Плазмонные МП [40, 41] предусматривают присутствие металла в структуре метаатомов, чаще всего серебра или золота [42]. Отметим, что нали-

чие металлов препятствует использованию плазмонных МП для видов деятельности, требующих совместимости с CMOS (КМОП), сверхтонких плёнок, химической инертности, устойчивости к высокоинтенсивному лазерному излучению или температурной стабильности. Новые нитриды переходных металлов имеют решающее значение в этой области применения плазмоники из-за их высокой биосовместимости, электропроводности, химической и термической стабильности при сходстве с благородными металлами с точки зрения их электронной структуры. Полностью диэлектрические МП, изготовленные из материалов с высоким показателем преломления, только начали набирать обороты как новая актуальная тема в микро/наноплатонике [43–45]. В отличие от плазмонных МП диэлектрические наноплатонные структуры локализуют свет в диапазоне порядка единиц нанометров, что создаёт зону мощных ЭМ-полей, так называемую «горячую точку». Это приводит к тому, что локальное поле становится на 3–4 порядка интенсивнее, что эффективно влияет на по-

вышение чувствительности обнаружения молекул аналита.

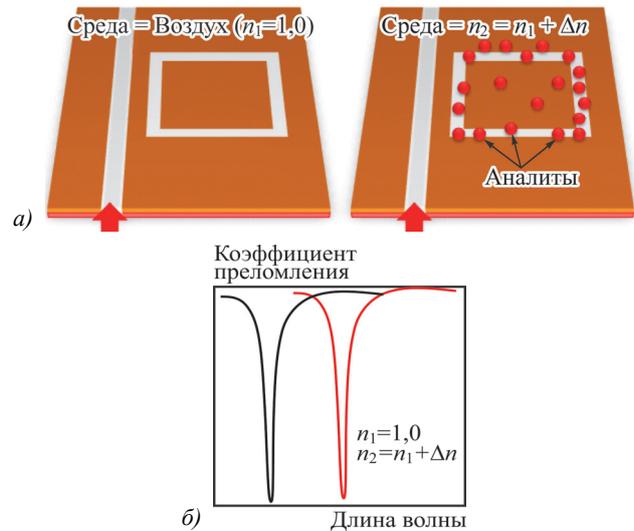


Рис. 3. Иллюстрация работы плазмонных датчиков (а), красное смещение λ_{res} происходит из-за увеличения показателя преломления в окружающей среде (б)

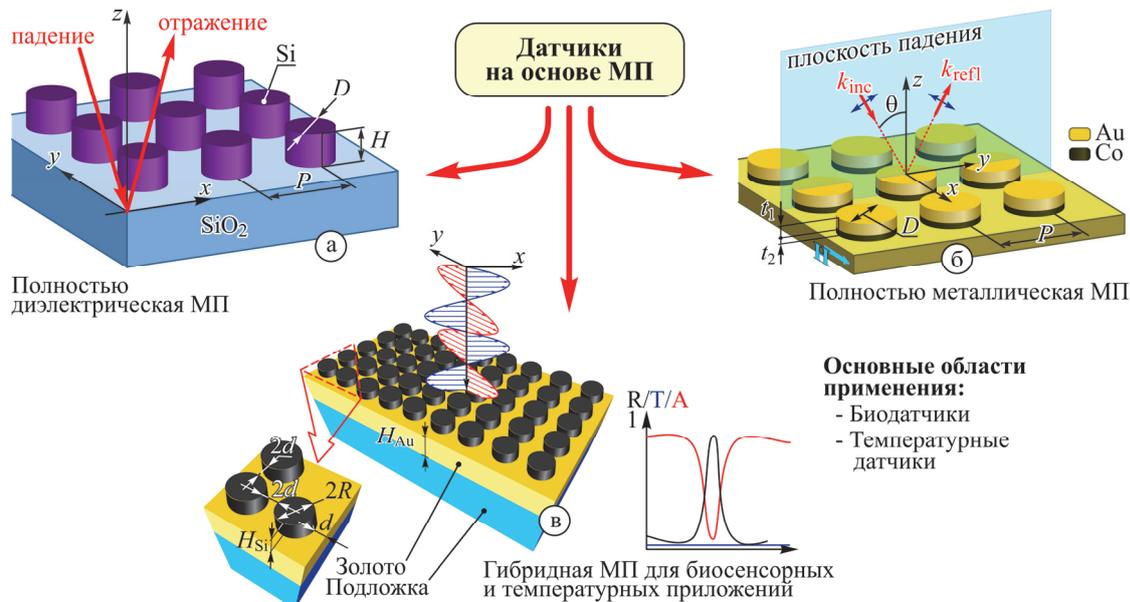


Рис. 4. Полностью диэлектрическая МП (а), полностью металлическая МП (б) и гибридная МП для биосенсорных и температурных приложений (в) (R – отражение, T – пропускание, A – поглощение)

МП находят применение в терагерцовой и инфракрасной спектроскопии [46–48] для химического анализа материалов, а также в квантовых технологиях манипулирования и обнаружения отдельных фотонов. Точно подбирая геометрию, свойства материала и расположение метаатомов, поглотители МП могут достичь почти идеального поглощения в желаемом диапазоне длин волн. Эта способность делает их ценными в различных приложениях, включая сбор солнечной энергии [49], тепловидение и стелс-технологии [50].

Маскировка с помощью МП [51, 52] предлагает инновационный метод, позволяющий сделать объек-

ты невидимыми путём манипулирования взаимодействиями света и материи на наноуровне. Эта перспективная технология имеет разнообразные применения: от военной скрытности до медицинских изображений и телекоммуникаций. МП могут изгибать или перенаправлять световые волны вокруг объекта, создавая скрытую область, где он становится необнаруживаемым на определённых длинах волн света [53]. Управляя распространением электромагнитных волн, маскировочные устройства на базе МП скрывают объекты от радаров и инфракрасных датчиков. Несмотря на такие проблемы, как ограниченные полосы пропускания и углы обзора, продолжающиеся исследования в

области проектирования МП обещают практические решения маскировки в будущем.

3. Материалы и технологии изготовления

Двумерные материалы играют ключевую роль в развитии технологии МП, предлагая уникальные свойства, которые позволяют улучшить контроль над взаимодействием света и материи. Графен, например, выделяется своей исключительной проводимостью и возможностью настройки, что позволяет динамически манипулировать электромагнитными волнами в широком спектре. Интегрируя графен в конструкции МП, исследователи могут добиться реконфигурируемых

функций, таких как фазовая модуляция и управление лучом, посредством электрического стробирования [54]. Другие двумерные материалы, например, ди-халькогениды переходных металлов, демонстрируют особые оптические свойства, такие как сильное взаимодействие света и вещества, а также широкая запрещённая зона, что делает их подходящими для различных приложений МП, включая нелинейную оптику и фотодетектирование.

Атомноразмерная природа 2D-материалов также облегчает интеграцию с традиционными методами изготовления МП, обеспечивая универсальность и масштабируемость.

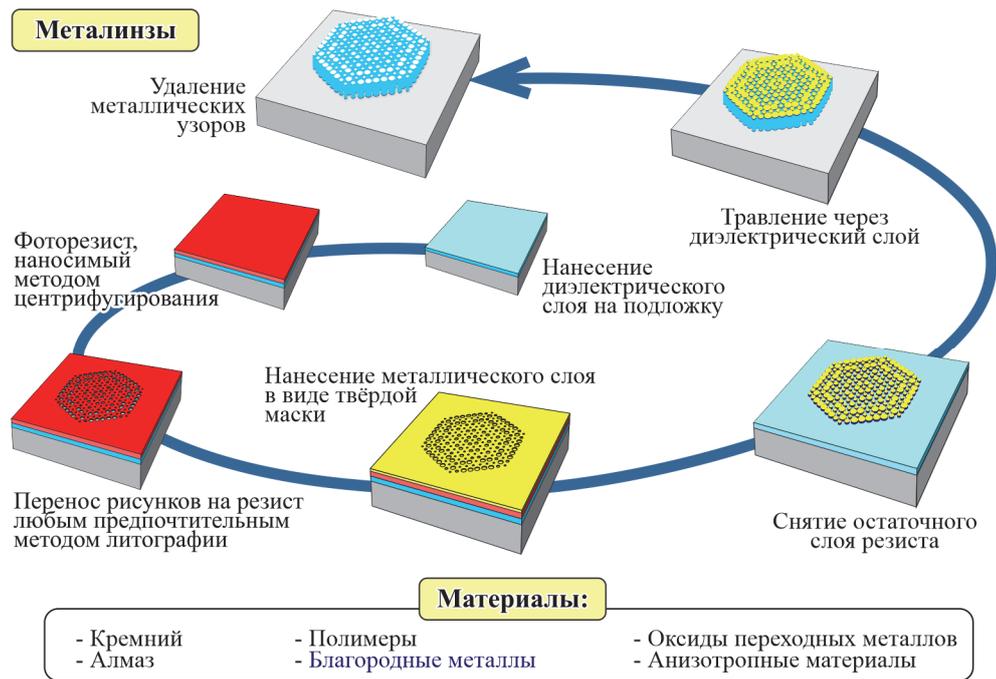


Рис. 5. Материальные платформы и процесс изготовления МП

Производство МП включает в себя широкий спектр методов, адаптированных к конкретным требованиям дизайна и характеристикам материала [55]. Как правило, для производства МП используют методы, развитые в свое время для изготовления дифракционных оптических элементов [56–58] (рис. 5, 6).

Одним из распространенных подходов является электронно-лучевая литография, которая ценится за способность достигать высокого разрешения и точности при создании наноструктур на подложках [59, 60]. Фотолитография с использованием масок и воздействия света облегчает массовое производство МП за счет относительно более простой конструкции. Наносферная литография использует самоорганизующиеся монослои микросфер для создания периодических узоров, хорошо подходящих для определённых приложений МП.

Прямая лазерная запись использует сфокусированные лазерные лучи, чтобы вызвать локализованные модификации материала, с высокой точностью

формируя желаемые структуры. Наноимпринтная литография (НИЛ) позволяет крупномасштабное копирование наноструктур путём прессования формы в полимерный резист. Фан и др. [61] продемонстрировали очки-дисплей Мета-II, который сочетает в себе коммерческий микродисплей и матрицу металлинз. Массив металлинз был изготовлен с использованием технологии НИЛ большой площади, а для создания массива элементарных изображений был предложен новый алгоритм рендеринга в реальном времени.

Узкие места дисплеев Мета-II со скоростью передачи видео были решены с помощью аппаратного и программного обеспечения. Кроме того, на основе этого Мета-II дисплея был построен прозрачный прототип, демонстрирующий возможность дополненной реальности. Метаголограмма, произведенная из резиста со встроенными наночастицами (nano-PER), достигла высокого уровня эффективности 96,9% [62]. Эта рекордная эффективность была обеспечена на основе высокопроизводительного одноэтапного про-

изводственного процесса НИЛ. Было показано, что оптические свойства nano-PER превосходят по эффективности другие диэлектрические материалы, что делает данный метаматериал перспективным для создания высокоэффективных метаголограмм.



Рис. 6. Возможные методы изготовления МП

Кроме того, такие методы, как атомно-слоевое осаждение и физическое осаждение из паровой фазы, способствуют нанесению тонких плёнок с тщательным контролем толщины и состава.

Каждый из представленных на рис. 6 методов имеет определенные преимущества и ограничения, обусловленные такими факторами, как разрешение, масштабируемость и совместимость материалов, что стимулирует текущие исследования, направленные на совершенствование методов изготовления МП.

МП быстро стали ключевыми компонентами коммерчески доступных фотонных устройств, что способствовало развитию различных отраслей промышленности [63]. В то время как многие компании активно разрабатывают металинзы, компания «Metalenz» выделяется как пионер, объявивший о коммерческом внедрении своей технологии в потребительские устройства. В июне 2022 года «Metalenz» заключила стратегическое партнерство с полупроводниковым гигантом STMicroelectronics (ST, штаб-квартира в Женеве, Швейцария), эффективно заменив традиционные многоэлементные оптические системы инновационным оптическим решением «Metalenz» [63]. Первоначально технология «Metalenz» будет служить важнейшим компонентом модуля времени полёта (*time-of-flight*, ToF) фирмы ST, известного как FlightSense. Этот модуль ToF использует скорость света для точного измерения близости, вычисляя время, необходимое фотону для перемещения к поверхности и от неё. Ключевые потребительские устройства, интегрирующие модуль ToF ST, включают смартфоны, дроны, роботы и транспортные средства.

Метаустройства играют решающую роль в продвижении технологии ToF, увеличивая её универсальность в различных приложениях [64]. Созданные на основе метаматериалов или МП, эти устройства обладают отличительными чертами, недостижимыми классическими методами компьютерной оптики. В

приложениях ToF метаустройства используются для тщательного и эффективного манипулирования электромагнитными волнами, преимущественно световыми или лазерными импульсами. Они предназначены для управления распространением, отражением, преломлением и рассеянием волн, тем самым обеспечивая хорошие возможности обнаружения и визуализации. Метаустройства в рамках технологии ToF способствуют разработке компактных высокопроизводительных датчиков, характеризующихся повышенной точностью, дальностью действия и разрешением. Используя потенциал метаматериалов, устройства ToF достигают более точного контроля над распространением сигнала, способствуя прогрессу в таких областях, как 3D-изображение, распознавание жестов, робототехника и автомобильные системы безопасности.

В телекоммуникациях антенны на базе МП обеспечивают компактную и эффективную передачу сигналов, повышая производительность систем беспроводной связи. Аналогичным образом оптические фильтры и модуляторы на основе МП являются неотъемлемой частью оптических сетей следующего поколения, предлагая точный контроль над передачей света и манипулированием им для обработки и маршрутизации данных. В бытовой электронике дисплеи и камеры с усовершенствованной технологией МП обеспечивают улучшенное разрешение изображения и точность цветопередачи, улучшая качество просмотра для пользователей. Кроме того, датчики на основе МП находят применение в медицинской диагностике, мониторинге окружающей среды и промышленном контроле качества, предлагая высокую чувствительность и специфичность для обнаружения целевых молекул или материалов [65]. Коммерциализация фотонных устройств с поддержкой МП подчеркивает их практическую значимость и потенциал для преобразования различных секторов экономики на основе внедрения инновационных методов манипулирования светом.

4. Проблемы и способы преодоления

МП, хотя и многообещающие в своей способности манипулировать электромагнитными волнами с беспрецедентной точностью и эффективностью, сталкиваются с рядом проблем и ограничений. Такие проблемы, как несовершенство изготовления, поглощение материала и чувствительность к углу падения или поляризации, могут повлиять на эффективность МП [66]. Эти проблемы могут привести к снижению производительности в определённых случаях.

Более того, на данный момент нельзя говорить о безусловном преимуществе МП перед элементами дифракционной оптики [67; 68]. Выигрыш МП по сравнению с ДОЭ по высоте рельефа нивелируется высотой подложки, а изготовление МП требует более сложных технологий. При этом дифракционная эффективность металинз, как правило, проигрывает по

сравнению с многоуровневыми дифракционными линзами [69; 70]. Принципиальная возможность МП одновременно выполнять преобразование для нескольких характеристик электромагнитного поля может быть осуществлена многоуровневыми ДОЭ [71, 72], несколькими ДОЭ [73–75] или сочетанием их с элементами анизотропной оптики [76–78].

Отметим, что структура металинз требует определенных усилий для обеспечения ахроматичности, высокого отношения сигнал/шум и числовой апертуры. Разработанные на данный момент ахроматические металинзы ограничены по длинам волн ближнего ИК-диапазона, малыми диаметрами (обычно 10–40 мкм), низкой числовой апертурой ($<0,3$) или пониженной эффективностью фокусировки. Преодоление этих проблем требует изготовления наностолбиков, которые значительно выше, имеют более высокие соотношения сторон и более сложны геометрически, чем те, для которых отработаны стандартные технологии изготовления.

Кроме того, достижение стабильной функциональности в широком диапазоне частот остаётся сложной задачей из-за присущих ограничений по материалам и сложности конструкции. Ещё одно ограничение заключается в их узком поле зрения, что ограничивает их применимость в ряде приложений.

Например, ахроматическая металинза, в которой используются прозрачные материалы с высоким показателем преломления, такие как диоксид титана, связана с ограничениями из-за своей небольшой толщины и демонстрирует относительно низкую эффективность фокусировки на более длинных волнах [79].

Гибридные ахроматические изображающие системы сочетают в себе дифракционную и преломляющую оптику, используя их противоположные дисперсионные свойства для эффективной коррекции хроматической аберрации. Этот подход обеспечивает баланс между размером линз и ахроматичностью, превосходя дифракционные линзы в хроматической коррекции и традиционные рефракционные дублеты с точки зрения более тонкой геометрии. Ричардс и др. [80] продемонстрировали плотно интегрированные выровненные преломляющие и дифракционные элементы с использованием подповерхностной 3D-печати внутри мезопористых матриц, что привело к созданию тонкой высокопроизводительной гибридной ахроматической изображающей микрооптики.

Изображающая оптика на основе металинз в пределах окна прозрачности биологических тканей до сих пор существенно ограничена. Ван и др. [81] экспериментально продемонстрировали эффективность нечувствительной к поляризации широкополосной ахроматической металинзы из диоксида титана для применения в биологической визуализации в ближнем инфракрасном диапазоне. Разработана крупномасштабная технология изготовления наностолбков из диоксида титана с рекордно высоким соотношением

сторон, высотой столбцов 1,5 мкм и 90-градусными вертикальными боковыми стенками. Предложенные металинзы демонстрируют резко увеличенный диапазон групповой задержки, а спектральный диапазон ахроматизма существенно расширен до 650–1000 нм со средней эффективностью 77,1–88,5% и числовой апертурой 0,24–0,1. Это исследование представляет собой солидный шаг на пути к практическому применению компонентов плоской нанофотоники.

Более того, конструкции МП часто основаны на сложной геометрии и наноразмерных функциях, требующих передовых технологий изготовления, которые могут быть не масштабируемыми или экономически неэффективными для крупномасштабного производства.

Ещё одно ограничение заключается в том, что интеграция МП с существующими устройствами и системами создаёт проблемы совместимости и взаимодействия. Решение этих проблем требует междисциплинарных усилий, охватывающих материаловедение, нанотехнологии, оптику и инженерии, чтобы раскрыть весь потенциал МП в различных приложениях.

5. Перспективы развития

Оптимизация методов проектирования и изготовления становится потенциальным решением для упомянутых выше проблем. Одновременно прогресс в материаловедении способствует созданию новых материалов с уменьшенными оптическими потерями, которые могут повысить производительность МП после интеграции. Кроме того, текущие исследования углубляются в инновационные методологии, такие как механизмы активной настройки и адаптивного управления, направленные на динамическое изменение свойств МП в реальном времени, тем самым повышая их эффективность для конкретных приложений.

В отличие от обычных статических МП, реконфигурируемые МП [82, 83] обеспечивают возможность изменять свои оптические характеристики по мере необходимости, обеспечивая разнообразные функциональные возможности и приложения. Реконфигурируемость МП имеет огромное значение в ситуациях, когда необходимо управлять светом в реальном времени, например, в системах адаптивной оптики, устройствах управления лучом и сетях оптической связи [84]. Более того, эти МП открывают путь для разработки настраиваемых линз, фазовращателей и фильтров, способствуя совершенствованию изображающих систем, технологий зондирования и связи. Важность реконфигурируемых МП заключается в их способности предоставлять гибкие и адаптивные решения для управления светом, стимулируя инновации в фотонике и за её пределами.

На рис. 7 показаны различные типы воздействия, включая электрические, тепловые и механические, которые используются для того, чтобы подстраивать однослойные или двухслойные МП. Кроме того, манипулируя состоянием поляризации падающего све-

та, можно эффективно изменять выходной волновой фронт, тем самым придавая МП настраиваемые возможности.

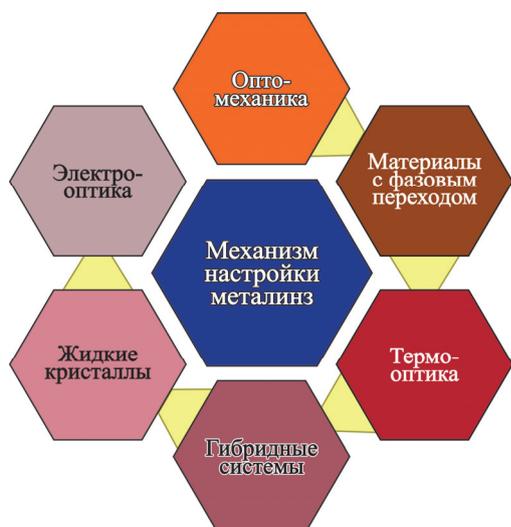


Рис. 7. Основные механизмы динамической перестройки МП

Отметим, что программируемость и адаптивность, присущие устройствам на базе МП, обеспечивают беспрецедентную гибкость при настройке нейронных сетей и реализации сложных вычислительных задач, открывая путь для разработки сверхбыстрых и энергоэффективных нейроморфных вычислительных платформ. В этом контексте МП можно использовать для разработки компактных и универсальных компонентов нейроморфных систем, таких как настраиваемые фильтры, элементы управления лучом и фазовращатели. Используя уникальные свойства МП, такие как субволновая локализация и индивидуальные дисперсионные характеристики, новые устройства, способные имитировать синаптические связи и поведение нейронов, могут быть спроектированы с высокой эффективностью [85].

В свою очередь, методы глубокого обучения и искусственного интеллекта (ИИ) имеют значительные перспективы в решении ключевых проблем, связанных с металинзами [86–89], включая ахроматичность, соотношение сигнал/шум и числовую апертуру.

Алгоритмы глубокого обучения могут использоваться в проектировании и оптимизации наноструктур металинза для достижения ахроматических характеристик, обеспечивающих последовательную фокусировку в широком спектре длин волн [90, 91].

Кроме того, модели глубокого обучения могут повысить отношение сигнал/шум металинза за счёт разработки алгоритмов, которые эффективно устраняют шумы и искажения, возникающие в процессе формирования изображения [92, 93].

Также ИИ может оптимизировать числовую апертуру металинза путём точной настройки геометрии и распределения наноструктур, обеспечивая лучшую

эффективность и разрешение сфокусированного излучения [94–96].

Одной из основных проблем в разработке МП с использованием ИИ является размер набора данных. По мере увеличения степеней свободы в пространстве проектирования данные могут расти экспоненциально, а сильно нелинейные отношения между входами и выходами усложняют возможности обобщения алгоритмов обучения. В настоящее время подгонка низкоразмерных входов и выходов даёт хорошие результаты, но производительность простых алгоритмов в многомерных сценариях требует дальнейшего изучения. Распространённым подходом является расширение размера выборки, хотя это может быть ограничено временем, необходимым для генерации достаточного количества данных.

На рис. 8 приведены типы алгоритмов ИИ, используемые при разработке и оптимизации МП. Обучение с подкреплением (reinforcement learning) предлагает многообещающее решение этой проблемы [97] на основе использования многомерного пространства проектирования.

Используя возможности ИИ, можно усовершенствовать МП, чтобы преодолеть существующие фундаментальные ограничения и обеспечить расширение их применения [98, 99].

По мере углубления понимания предмета исследования созданы новые исключительные классы многофункциональных МП, которые открывают дополнительные возможности в самых разных областях: от телекоммуникаций до биомедицинской визуализации. Примечательно, что способность МП одновременно выполнять несколько функций в компактном пространстве является принципиальным преимуществом по сравнению с громоздкостью и ограничениями традиционных оптических компонентов.

Эта функциональность не только упрощает конструкцию устройства, но также повышает производительность и эффективность. Будь то направление световых лучей, изменение состояния поляризации или формирование спектральных характеристик, многофункциональные МП демонстрируют замечательную универсальность, становясь незаменимыми в поиске передовых технологических решений.

Дальнейшее изучение их возможностей и совершенствование методов производства обещают расширить их потенциальное применение, катализируя преобразующее воздействие в различных отраслях и областях.

Тем не менее, такие проблемы, как масштабируемость производства, снижение материальных потерь и сложности интеграции, сохраняются, что подчеркивает необходимость постоянных исследований и инноваций для полного раскрытия возможностей этих необычных структур.



Рис. 8. Типы алгоритмов ИИ, используемые при разработке и оптимизации МП

Заключение

Метаповерхности являются логическим развитием элементов дифракционной компьютерной оптики, открывая новые уникальные возможности управления светом при одновременном повышении универсальности и улучшении массогабаритных характеристик, что обеспечивает формирование новых областей применения фотоники. В настоящее время фотонику можно рассматривать не только как фундаментальное научное направление, но и как стремительно развивающуюся огромную отрасль. Например, по оценке фирмы «Mordor Intelligence», рынок фотоники (<https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/photronics-market-market>) оценивается в 1,64 триллиона долларов США в 2024 году и, как ожидается, достигнет 2,25 триллиона долларов США к 2029 году, при этом среднегодовой темп роста составит 6,5 % в течение прогнозируемого периода (2024–2029 гг.). По оценке фирмы «Future Market Insights, Inc» (FMI), в 2023 году объем мирового рынка фотоники превысил 900 миллиардов долларов, а через десять лет составит более 1,6 триллиона долларов США (<https://www.futuremarketinsights.com/reports/photronics-market>). Прогнозируется, что общий объем продаж фотоники значительно вырастет в течение этого периода (с 2023 по 2033 год), превысив 1,6 триллиона долларов США к концу 2033 года. Прогнозируется рост отрасли на основе расширения использования в дисплеях, медицинских технологиях, освещении, обороне и безопасности, в системах дистанционного зондирования и сенсорике. К глобальным вызовам 21-го века можно отнести разработку высокоэффективных компонентов фотоники для создания новой элементной базы систем оптической обработки и передачи информационных сигналов [99–101], обсуждение проблем которых началось с первого выпуска нашего журнала [102, 103]. В новых достижениях большинства из перечисленных областей важную роль будет играть совершенствование процессов со-

здания и использования оптических метаповерхностей, как одного из принципиальных направлений развития компьютерной оптики. Как и предсказывалось 38 лет тому назад в базисной для компьютерной оптики статье [103], для расширения функциональных возможностей и областей применения компонентов дифракционной фотоники необходимо развитие методов расчета и моделирования, а также совершенствование технологий формирования оптических микро- и нанорельефов. Как и в прошедшие годы развития компьютерной оптики, так и сейчас для метаповерхностей их прогресс будет опираться на использовании достижений наноэлектроники.

Благодарности

Работа частично финансировалась Российским научным фондом в рамках гранта № 24-19-00080 (параграфы 4 и 5) и в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» (параграфы 1–3).

References

- [1] Hu J, Bandyopadhyay S, Liu Y, et al. A review on metasurface: From principle to smart metadevices. *Front Phys* 2021; 8: 586087. DOI: 10.3389/fphy.2020.586087.
- [2] Greisukh GI, Danilov VA, Ezhov EG, Antonov AI. Metasurfaces in optics: Physical basis and results achieved. *Review. Optoelectron Instrum Data Process* 2020; 56(2): 109-121. DOI: 10.3103/S8756699020020077.
- [3] Wan W, Gao J, Yang X. Metasurface holograms for holographic imaging. *Adv Opt Mater* 2017; 5(21): 011303. DOI: 10.1002/adom.201700541.
- [4] Li A, Singh S, Sevenpiper D. Metasurfaces and their applications. *Nanophotonics* 2018; 7(6): 989-1011. DOI: 10.1515/nanoph-2017-0120.
- [5] Lin CH, Huang SH, Lin TH, et al. Metasurface-empowered snapshot hyperspectral imaging with convex/deep (CODE) small-data learning theory. *Nat Commun* 2023; 14: 6979. DOI: 10.1038/s41467-023-42381-5.
- [6] Yu N, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces. *Nat Mater* 2014; 13: 139-150. DOI: 10.1038/nmat3839.
- [7] Khonina SN, Kazanskiy NL, Butt MA. A review on reconfigurable metalenses revolutionizing flat optics. *Adv*

- Opt Mater 2023; 12(14): 2302794. DOI: 10.1002/adom.202302794.
- [8] He Y, Wang P, Wang C, Liu J, Ye H, Zhou X, Li Y, Chen S, Zhang X, Fan D. All-optical signal processing in structured light multiplexing with dielectric meta-optics. ACS Photonics 2020; 7(1): 135-146. DOI: 10.1021/acsp Photonics.9b01292.
- [9] Bomzon Z, Niv A, Kleiner V, Hasman E. Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings. Opt Lett 2002; 27(5): 285-287. DOI: 10.1364/OL.27.000285.
- [10] Wen D, Yue F, Li G, Zheng G, Chan K, Chen S, Chen M, Li KF, Wong PWH, Cheah KW, Pun EYB, Zhang S, Chen X. Helicity multiplexed broadband metasurface holograms. Nat Commun 2015; 6: 8241. DOI: 10.1038/ncomms9241.
- [11] Remnev MA, Klimov VV. Metasurfaces: a new look at Maxwell's equations and new ways to control light. Physics-Uspekhi 2018; 61(2): 157-190. DOI: 10.3367/UFNe.2017.08.038192.
- [12] Degtyarev S, Savelyev D, Khonina S, Kazanskiy N. Metasurfaces with continuous ridges for inverse energy flux generation. Opt Express 2019; 27(11): 15129-15135. DOI: 10.1364/OE.27.015129.
- [13] Khonina SN, Degtyarev SA, Ustinov AV, Porfirev AP. Metalenses for the generation of vector Lissajous beams with a complex Poynting vector density. Opt Express 2021; 29(12): 18651-18662. DOI: 10.1364/OE.428453.
- [14] Jin M, Sanchez-Padilla B, Liu X, Tang Y, Hu Z, Li K, Coursault D, Li G, Brasselet E. Spin-orbit modal optical vortex beam shaping from dielectric metasurfaces. Adv Opt Mater 2024; 12(6): 2202149. DOI: 10.1002/adom.202202149.
- [15] Shapiro JH, Guha S, Erkmen BI. Ultimate channel capacity of free-space optical communications. J Opt Netw 2005; 4: 501-516. DOI: 10.1364/JON.4.000501.
- [16] Fu S, Zhai Y, Zhou H, Zhang J, Wang T, Liu X, Gao C. Experimental demonstration of free-space multi-state orbital angular momentum shift keying. Opt Express 2019; 27: 33111-33119. DOI: 10.1364/OE.27.033111.
- [17] Khonina SN, Karpeev SV, Butt AM. Spatial-light-modulator-based multichannel data transmission by vortex beams of various orders. Sensors 2021; 21(9): 2988. DOI: 10.3390/s21092988.
- [18] Karpeev SV, Podlipnov VV, Khonina SN, Ivliev NA, Ganchevskay SV. Free-space transmission and detection of variously polarized near-IR beams using standard communication systems with embedded singular phase structures. Sensors 2022; 22(3): 890. DOI: 10.3390/s22030890.
- [19] Li Q-T, Dong F, Wang B, Chu W, Gong Q, Brongersma ML, Li Y. Free-space optical beam tapping with an all-silica metasurface. ACS Photonics 2017; 4(10): 2544-2549. DOI: 10.1021/acsp Photonics.7b00812.
- [20] Guo X, et al. Molding free-space light with guided wave-driven metasurfaces. Sci Adv 2020; 6(29): eabb4142. DOI: 10.1126/sciadv.abb4142.
- [21] Di Francescantonio A, Zilli A, Rocco D, et al. All-optical free-space routing of upconverted light by metasurfaces via nonlinear interferometry. Nat Nanotechnol 2024; 19(3): 298-305. DOI: 10.1038/s41565-023-01549-2.
- [22] Spägle C, Tamagnone M, Kazakov D, et al. Multifunctional wide-angle optics and lasing based on supercell metasurfaces. Nat Commun 2021; 12: 3787. DOI: 10.1038/s41467-021-24071-2.
- [23] Song W, Liang X, Li S, Li D, Paniagua-Domínguez R, Lai KH, Lin Q, Zheng Y, Kuznetsov AI. Large-scale Huygens' metasurfaces for holographic 3D near-eye displays. Laser Photon Rev 2021; 15(9): 2000538. DOI: 10.1002/lpor.202000538.
- [24] Shen C, Xu R, Sun J, Wang Z, Wei S. Metasurface-based holographic display with all-dielectric meta-axilens. IEEE Photon J 2021; 13(5): 4600105. DOI: 10.1109/JPHOT.2021.3107442.
- [25] Deng Y, Wu C, Meng C, Bozhevolnyi SI, Ding F. Functional metasurface quarter-wave plates for simultaneous polarization conversion and beam steering. ACS Nano 2021; 15(11): 18532-18540. DOI: 10.1021/acsnano.1c08597.
- [26] Deng Y, Cai Z, Ding Y, Bozhevolnyi SI, Ding F. Recent progress in metasurface-enabled optical waveplates. Nanophotonics 2022; 11(10): 2219-2244. DOI: 10.1515/nanoph-2022-0030.
- [27] Pavelyev V, Khonina S, Degtyarev S, Tukmakov K, Reshetnikov A, Gerasimov V, Osintseva N, Knyazev B. Subwavelength diffractive optical elements for generation of terahertz coherent beams with pre-given polarization state. Sensors 2023; 23(3): 1579. DOI: 10.3390/s23031579.
- [28] Yang H, Cao X, Yang F, et al. A programmable metasurface with dynamic polarization, scattering and focusing control. Sci Rep 2016; 6: 35692. DOI: 10.1038/srep35692.
- [29] Stafeev SS, Kotlyar VV, Nalimov AG, Kotlyar MV, O'Faolain L. Subwavelength gratings for polarization conversion and focusing of laser light. Photonic Nanostruct 2017; 27: 32-41. DOI: 10.1016/j.photonics.2017.09.001.S.
- [30] Degtyarev SA, Volotovskiy SG, Khonina SN. Sublinearly chirped metalenses for forming abruptly autofocusing cylindrically polarized beams. J Opt Soc Am B 2018; 35(8): 1963-1969. DOI: 10.1364/JOSAB.35.001963.
- [31] Ding F, Chen Y, Bozhevolnyi SI. Gap-surface plasmon metasurfaces for linear-polarization conversion, focusing, and beam splitting. Photon Res 2020; 8(5): 707-714. DOI: 10.1364/PRJ.386655.
- [32] You X, Fumeaux C, Withayachumnankul W. Tutorial on broadband transmissive metasurfaces for wavefront and polarization control of terahertz waves. J Appl Phys 2022; 131(6): 061101. DOI: 10.1063/5.0077652.
- [33] Ding F, Chen Y, Bozhevolnyi SI. Metasurface-based polarimeters. Appl Sci 2018; 8(4): 594. DOI: 10.3390/app8040594.
- [34] Shah YD, Dada AC, Grant JP, Cumming DRS, Altuzarra C, Nowack TS, Lyons A, Clerici M, Faccio D. An all-dielectric metasurface polarimeter. ACS Photonics 2022; 9(10): 3245-3252. DOI: 10.1021/acsp Photonics.2c00395.
- [35] Mueller JPB, Leosson K, Capasso F. Ultracompact metasurface in-line polarimeter. Optica 2016; 3(1): 42-47. DOI: 10.1364/OPTICA.3.000042.
- [36] Wei S, Yang Z, Zhao M. Design of ultracompact polarimeters based on dielectric metasurfaces. Opt Lett 2017; 42(8): 1580-1583. DOI: 10.1364/OL.42.001580.
- [37] Kazanskiy NL, Khonina SN, Butt MA, Kazmierczak A, Piramidowicz R. State-of-the-art optical devices for biomedical sensing applications – a review. Electronics 2021; 10(8): 973. DOI: 10.3390/electronics10080973.
- [38] Kazanskiy NL, ed. Photonics elements for sensing and optical conversions. Boca Raton: CRC Press; 2024. ISBN: 978-1-032-57294-9.

- [39] Javaid M, Haleem A, Singh R, Rab S, Suman R. Significance of sensors for industry 4.0: Roles, capabilities, and applications. *Sens Int* 2021; 2(1): 100110. DOI: 10.1016/j.sintl.2021.100110.
- [40] Li L, Zong X, Liu Y. All-metallic metasurfaces towards high-performance magneto-plasmonic sensing devices. *Photonics Res* 2020; 8(11): 1742-1748. DOI: 10.1364/PRJ.399926.
- [41] Kazanskiy NL, Butt MA, Khonina SN. Carbon dioxide gas sensor based on polyhexamethylene biguanide polymer deposited on silicon nano-cylinders metasurface. *Sensors* 2021; 21(2): 378. DOI: 10.3390/s21020378.
- [42] Zhang Y, Zhang A. Additive printing of gold/silver nanostructures towards plasmonic metasurfaces. *Proc SPIE* 2022; 12197: 1219702. DOI: 10.1117/12.2633216.
- [43] Kuznetsov A, Miroschnichenko A, Brongersma M, Kivshar Y, Lukyanchuk B. Optically resonant dielectric nanostructures. *Science* 2016; 354(6314): aag2472. DOI: 10.1126/science.aag2472.
- [44] Iwanaga M. All-dielectric metasurfaces with high-fluorescence-enhancing capability. *Appl Sci* 2018; 8(8): 1328. DOI: 10.3390/app8081328.
- [45] Son H, Kim S-J, Hong J, Sung J, Lee B. Design of highly perceptible dual-resonance all-dielectric metasurface colorimetric sensor via deep neural networks. *Sci Rep* 2022; 12(1): 8512. DOI: 10.1038/s41598-022-12592-9.
- [46] Zi J, Xu Q, Wang Q, Tian C, Li Y, Zhang X, Han J, Zhang W. Antireflection-assisted all-dielectric terahertz metamaterial polarization converter. *Appl Phys Lett* 2018; 113(10): 101104. DOI: 10.1063/1.5042784.
- [47] Khonina SN, Tukmakov KN, Degtyarev SA, Reshetnikov AS, Pavelyev VS, Knyazev BA, Choporova YuYu. Design, fabrication and investigation of a subwavelength axicon for terahertz beam polarization transforming. *Computer Optics* 2019; 43(5): 756-764. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-756-764.
- [48] Yang T, Liu X, Wang C, Liu Z, Sun J, Zhou J. Polarization conversion in terahertz planar metamaterial composed of split-ring resonators. *Opt Commun* 2020; 472(11): 125897. DOI: 10.1016/j.optcom.2020.125897.
- [49] Juneja S, Pavelyev VS, Khonina SN, Kumar S. Fabrication of innovative diffraction gratings for light absorption enhancement in silicon thin films for solar cell application. *J Opt (India)* 2023; 52: 1758-1774. DOI: 10.1007/s12596-023-01127-8.
- [50] Khonina SN, Butt MA, Kazanskiy NL. Numerical investigation of metasurface narrowband perfect absorber and a plasmonic sensor for a near-infrared wavelength range. *J Opt* 2021; 23(6): 065102. DOI: 10.1088/2040-8986/abf890.
- [51] Chu H, Li Q, Liu B, et al. A hybrid invisibility cloak based on integration of transparent metasurfaces and zero-index materials. *Light Sci Appl* 2018; 7: 50. DOI: 10.1038/s41377-018-0052-7.
- [52] Vellucci S, Monti A, Barbuto M, Toscano A, Bilotti F. Progress and perspective on advanced cloaking metasurfaces: from invisibility to intelligent antennas. *EPJ Appl Metamat* 2021; 8: 7. DOI: 10.1051/epjam/2020013.
- [53] Liao JM, Ji C, Yuan LM, et al. Polarization-insensitive metasurface cloak for dynamic illusions with an electromagnetic transparent window. *ACS Appl Mater Interfaces* 2023; 15(13): 16953-16962. DOI: 10.1021/acsami.2c21565.
- [54] Ghosh SK, Das S, Bhattacharyya S. Graphene-based metasurface for tunable absorption and transmission characteristics in the near mid-infrared region. *IEEE Trans Anten Propag* 2022; 70(6): 4600-4612. DOI: 10.1109/TAP.2022.3140904.
- [55] Lee Y-M. Introduction to optical lithography. In Book: Lee Y-M. Efficient extreme ultraviolet mirror design: An FDTD approach. IOP Publishing; 2021. DOI: 10.1088/978-0-7503-2652-0ch1.
- [56] Kazanskiy NL, Skidanov RV. Technological line for creation and research of diffractive optical elements. *Proc SPIE* 2019; 11146: 111460W. DOI: 10.1117/12.2527274.
- [57] Khonina SN, Kazanskiy NL, Butt MA. Exploring diffractive optical elements and their potential in free space optics and imaging: A comprehensive review. *Laser Photonics Rev* 2024; 2024: 2400377. DOI: 10.1002/lpor.202400377.
- [58] Khonina SN, Kazanskiy NL, Skidanov RV, Butt MA. Advancements and applications of diffractive optical elements in contemporary optics: A comprehensive overview. *Adv Mater Technol* 2024: 2401028. Early View [online]. Source: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/admt.202401028>>. DOI: 10.1002/admt.202401028.
- [59] Nakamura N, et al. High-power EUV free-electron laser for future lithography. *Jpn J Appl Phys* 2023; 62(SG): SG0809. DOI: 10.35848/1347-4065/acc18c.
- [60] Khonina SN, Kazanskiy NL, Butt MA. Grayscale lithography and a brief introduction to other widely used lithographic methods: A state-of-the-art review. *Micromachines* 2024; 15(11): 1321. DOI: 10.3390/mi15111321.
- [61] Fan Z, Cheng Y, Chen Z, et al. Integral imaging near-eye 3D display using a nanoimprint metalens array. *eLight* 2024; 4: 3. DOI: 10.1186/s43593-023-00055-1.
- [62] Kim J, Oh DK, Kim H, et al. Metasurface holography reaching the highest efficiency limit in the visible via one-step nanoparticle-embedded-resin printing. *Laser Photonics Rev* 2022; 16(8): 2200098. DOI: 10.1002/lpor.202200098.
- [63] Fretty P. World's first metasurface for consumer electronics makes commercial debut. *Laser Focus World*. 2022. Source: <<https://www.laserfocusworld.com/optics/article/14277991/worlds-first-metasurface-for-consumer-electronics-makescommercial-debut>>.
- [64] Yang B, Liu T, Guo H, et al. High-performance meta-devices based on multilayer meta-atoms: Interplay between the number of layers and phase coverage. *Sci Bull* 2019; 64(12): 823-835. DOI: 10.1016/j.scib.2019.05.028.
- [65] Kazanskiy NL, Khonina SN, Butt MA. Recent development in metasurfaces: A focus on sensing applications. *Nanomaterials* 2023; 13(1): 118. DOI: 10.3390/nano13010118.
- [66] Presutti F, Monticone F. Focusing on bandwidth: achromatic metalens limits. *Optica* 2020; 7(6): 624-631. DOI: 10.1364/OPTICA.389404.
- [67] Banerji S, Meem M, Majumder A, Vasquez FG, Sensale-Rodriguez B, Menon R. Imaging with flat optics: metalenses or diffractive lenses? *Optica* 2019; 6(6): 805-810. DOI: 10.1364/OPTICA.6.000805.
- [68] Zhang Q, He Z, Xie Z, Tan Q, Sheng Y, Jin G, Cao L, Yuan X. Diffractive optical elements 75 years on: from micro-optics to metasurfaces. *Photon Insights* 2023; 2(4): R09. DOI: 10.3788/PI.2023.R09.
- [69] Chen WT, Zhu AY, Sanjeev V, Khorasaninejad M, Shi Z, Lee E, Capasso F. A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the visible. *Nat Nanotechnol* 2018; 13: 220-226. DOI: 10.1038/s41565-017-0034-6.

- [70] Liang Y, Liu H, Wang F, Meng H, Guo J, Li J, Wei Z. High-efficiency, near-diffraction limited, dielectric metasurface lenses based on crystalline titanium dioxide at visible wavelengths. *Nanomaterials* 2018; 8(5): 288. DOI: 10.3390/nano8050288.
- [71] Kazanskii NL, Khonina SN, Skidanov RV, Morozov AA, Kharitonov SI, Volotovskiy SG. Formation of images using multilevel diffractive lens. *Computer Optics* 2014; 38(3): 425-434. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-3-425-434.
- [72] Mohammad N, Meem M, Wan X, Menon R. Full-color, large area, transmissive holograms enabled by multi-level diffractive optics. *Sci Rep* 2017; 7: 5789. DOI: 10.1038/s41598-017-06229-5.
- [73] Gülses AA, Jenkins BK. Cascaded diffractive optical elements for improved multiplane image reconstruction. *Appl Opt* 2013; 52(15): 3608-3616. DOI: 10.1364/AO.52.003608.
- [74] Meem M, Majumder A, Menon R. Full-color video and still imaging using two flat lenses. *Opt Express* 2018; 26(21): 26866-26871. DOI: 10.1364/OE.26.026866.
- [75] Doshkolovich LL, Soshnikov DV, Motz GA, Byzov EV, Bezus EA, Bykov DA, Kazanskiy NL. Design of cascaded DOEs for focusing different wavelengths to different points. *Photonics* 2024; 11(9): 791. DOI: 10.3390/photonics11090791.
- [76] Xu F, Ford JE, Fainman Y. Polarization-selective computergenerated holograms: design, fabrication, and applications. *Appl Opt* 1995; 34(2): 256-266. DOI: 10.1364/AO.34.000256.
- [77] Noda K, Kawai K, Sasaki T, Kawatsuki N, Ono H. Multilevel anisotropic diffractive optical elements fabricated by means of stepping photo-alignment technique using photo-cross-linkable polymer liquid crystals. *Appl Opt* 2014; 53(12): 2556-2561. DOI: 10.1364/AO.53.002556.
- [78] Karpeev SV, Podlpinov VV, Khonina SN, Pararin VD, Tukmakov KN. Anisotropic diffractive optical element for generating hybrid-polarized beams. *Opt Eng* 2018; 58(8): 082402. DOI: 10.1117/1.OE.58.8.082402.
- [79] Khorasaninejad M, Chen WT, Devlin RC, et al. Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging. *Science* 2016; 352(6290): 1190-1194. DOI: 10.1126/science.aaf6644.
- [80] Richards CA, Ocier CR, Xie DJ, et al. Hybrid achromatic microlenses with high numerical apertures and focusing efficiencies across the visible. *Nat Commun* 2023; 14(1): 3119. DOI: 10.1038/s41467-023-38858-y.
- [81] Wang YJ, Chen QM, Yang WH, et al. High-efficiency broadband achromatic metalens for near-IR biological imaging window. *Nat Commun* 2021; 12(1): 5560. DOI: 10.1038/s41467-021-25797-9.
- [82] Shalaginov MY, An S, Zhang Y, et al. Reconfigurable all-dielectric metalens with diffraction-limited performance. *Nat Commun* 2021; 12: 1225. DOI: 10.1038/s41467-021-21440-9.
- [83] Liu Y, Lin J, Lin Y-S. Reconfigurable metalens with dual-linear-focus phase distribution. *Opt Laser Technol* 2023; 164(6054): 109526. DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.109526.
- [84] Berini P. Optical beam steering using tunable metasurfaces. *ACS Photonics* 2022; 9(7): 2204-2218. DOI: 10.1021/acsp Photonics.2c00439.
- [85] Wu Z, Zhou M, Khoram E, et al. Neuromorphic metasurface. *Photonics Res* 2020; 8(1): 46-50. DOI: 10.1364/PRJ.8.000046.
- [86] Qiu TS, Shi X, Wang JF, Li YF, Qu SB, Cheng Q, Cui TJ, Sui S. Deep learning: A rapid and efficient route to automatic metasurface design. *Adv Sci* 2019; 6(12): 1900128. DOI: 10.1002/adv.201900128.
- [87] Shi X, Qiu T, Wang J, Zhao X, Qu S. Metasurface inverse design using machine learning approaches. *J Phys D: Appl Phys* 2020; 53(27): 275105. DOI: 10.1088/1361-6463/ab8036.
- [88] An S, Zheng B, Shalaginov MY, Tang H, Li H, Zhou L, Ding J, Agarwal AM, Rivero-Baleine C, Kang M, Richardson KA, Gu T, Hu J, Fowler C, Zhang H. Deep learning modeling approach for metasurfaces with high degrees of freedom. *Opt Express* 2020; 28(21): 31932-31942. DOI: 10.1364/OE.401960.
- [89] Kazanskiy NL, Khonina SN, Oseledets IV, Nikonorov AV, Butt MA. Revolutionary integration of artificial intelligence with meta-optics-focus on metalenses for imaging. *Technologies* 2024; 12(9): 143. DOI: 10.3390/technologies12090143.
- [90] Wu H, Yi Y, Zhang N, Zhang Y, Wu H, Yi Z, Liu S, Yi Y, Tang B, Sun T. Inverse design broadband achromatic metasurfaces for longwave infrared. *Opt Mater* 2024; 148: 114923. DOI: 10.1016/j.optmat.2024.114923.
- [91] Yang Y, Xin H, Liu Y, Cheng H, Jin Y, Li C, Lu J, Fang B, Hong Z, Jing X. Intelligent metasurfaces: Integration of artificial intelligence technology and metasurfaces. *Chin J Phys* 2024; 89: 991-1008. DOI: 10.1016/j.cjph.2024.03.043.
- [92] He S, Wang R, Luo H. Computing metasurfaces for all-optical image processing: a brief review. *Nanophotonics* 2022; 11(6): 1083-1108. DOI: 10.1515/nanoph-2021-0823.
- [93] Khonina SN, Kazanskiy NL, Skidanov RV, Butt MA. Exploring types of photonic neural networks for imaging and computing – A review. *Nanomaterials* 2024; 14(8): 697. DOI: 10.3390/nano14080697.
- [94] Jakšić Z. Synergy between AI and optical metasurfaces: A critical overview of recent advances. *Photonics* 2024; 11(5): 442. DOI: 10.3390/photonics11050442.
- [95] Chen MK, Liu X, Sun Y, Tsai DP. Artificial Intelligence in Meta-optics. *Chem Rev* 2022; 122(19): 15356-15413. DOI: 10.1021/acs.chemrev.2c00012.
- [96] Ueno A, Hu J, An S. AI for optical metasurface. *npj Nanophotonics* 2024; 1: 36. DOI: 10.1038/s44310-024-00037-2.
- [97] Kaelbling LP, Littman ML, Moore AW. Reinforcement learning: A survey. *J Artif Intell Res* 1996; 4: 237-285. DOI: 10.1613/jair.301.
- [98] Khonina SN, Kazanskiy NL, Efimov AR, Nikonorov AV, Oseledets IV, Skidanov RV, Butt MA. A perspective on the artificial intelligence's transformative role in advancing diffractive optics. *iScience* 2024; 27(7): 110270. DOI: 10.1016/j.isci.2024.110270.
- [99] Kazanskiy NL, Khonina SN, Butt MA. Metasurfaces: Shaping the future of photonics. *Sci Bull* 2024; 69(11): 1607-1611. DOI: 10.1016/j.scib.2024.04.056.
- [100] Soifer VA. Diffractive nanophotonics and advanced information technologies. *Herald of the Russian Academy of Sciences* 2014; 84(1): 9-20. DOI: 10.1134/S1019331614010067.
- [101] Nesterenko DV, Hayashi S, Soifer V. Fabry-Perot resonances in planar metal-insulator-metal structures for optical data processing: A review. *Phys Wave Phenom* 2023; 31(5): 293-311. DOI: 10.3103/S1541308X23050096.
- [102] Velikhov EP. Foreword I. *Computer Optics* 1989; 1(1): 1.
- [103] Sisakyan IN, Soifer VA. Computer Optics: achievements and problems. *Computer Optics* 1989; 1(1): 3-12.

Сведения об авторах

Казанский Николай Львович в 1981 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (Самарский университет)) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (1996 г.), профессор, работает руководителем Института систем обработки изображений (ИСОИ), НИЦ «Курчатовский институт», профессором кафедры технической кибернетики Самарского университета. Заведующий базовой кафедрой высокопроизводительных вычислений Самарского университета в ИСОИ. Является членом международных научных обществ OSA, SPIE и IAPR. Н.Л. Казанский – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанофотоники. В списке научных работ Н.Л. Казанского 290 статей, 12 монографий, 53 авторских свидетельства и патента.

Страница в интернете: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/kazanskiy.htm> . E-mail: kazanskiy@ssau.ru

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор Самарского университета; главный научный сотрудник Института систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт». Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений.

E-mail: khonina@ipsiras.ru

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 23 октября 2024 г. Окончательный вариант – 10 ноября 2024 г.

Metasurfaces & prospects of computer optics

N.L. Kazanskiy^{1,2}, S.N. Khonina^{1,2}

¹Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute",
Molodogvardeyskaya Str. 151, Samara, 443001, Russia;

²Samara National Research University,
Moskovskoye Shosse 34, Samara, 443086, Russia

Abstract

Metasurfaces represent a revolutionary paradigm shift in optics that has opened the era of multifunctional light transformations using ultra-thin elements. In contrast to the traditional approach based on refractive and diffractive optical elements, metasurfaces use complex arrays of subwavelength structures to control the phase, amplitude, and polarization of incident light waves. This revolutionary technology offers many advantages, including the creation of ultra-compact optical systems, providing polarization transformations and sharp focusing beyond the diffraction limit, as well as compensation for optical aberrations in a significantly thinner and lighter format. Metasurfaces have been successfully applied in a variety of applications: from high-quality imaging to augmented reality, spectroscopy, environmental monitoring, and improving technology and medical equipment. Due to their remarkable adaptability and exceptional properties, metasurfaces have enormous potential to break the seemingly insurmountable boundaries of light technology. This review presents main applications of metasurfaces in terms of expanding the capabilities of computer optics, discusses challenges and prospects for development, including based on reconfigurable devices and using artificial intelligence methods.

Keywords: metasurface, computer optics, development prospects.

Citation: Kazanskiy NL, Khonina SN. Metasurfaces & prospects of computer optics. *Computer Optics* 2025; 49(3): 349-361. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1627.

Acknowledgements: The work was partly funded by the Russian Science Foundation under grant # 24-19-00080 (Parts 1, 3, 4, and 6) and the NRC 'Kurchatov Institute' under a government project (Parts 2 and 5).

Author's information

Nikolay Lvovich Kazanskiy graduated with honors (1981) from Kuibyshev Aviation Institute (presently, Samara University), majoring in Applied Mathematics. He received his Candidate in Physics & Maths (1988) and Doctor in Physics & Mathematics (1996) degrees from Samara University. He is the Head of the Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute", also holding a part-time position of a professor at Technical Cybernetics department of Samara University, holding the chair at the of High-Performance Computing department at the Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute". He is a member of OSA, SPIE and IAPR. He co-authored 290 scientific papers, 12 monographs, 53 inventions and patents. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, computer vision, and nanophotonics.

Website: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/kazanskiy.htm> . E-mail: kazanskiy@ssau.ru

Svetlana Nikolaevna Khonina, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara National Research University. Main researcher of the Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute". Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing. E-mail: khonina@ipsiras.ru

Received October 23, 2024. The final version – November 10, 2024.
