

Метаповерхности и перспективы развития информационной оптики

Н.Л. Казанский
Институт систем обработки изображений, НИЦ
«Курчатовский институт»
Самара, Россия;
kazanskiy@ipsiras.ru

С.Н. Хонина
Институт систем обработки изображений, НИЦ
«Курчатовский институт»
Самара, Россия;
khonina@ipsiras.ru

Аннотация — Метаповерхности обеспечивают новый шаг в развитии информационной 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. Метаповерхности являются логическим развитием элементов дифракционной компьютерной оптики, открывая новые уникальные возможности управления светом при одновременном повышении универсальности и многофункциональности, что обеспечивает формирование новых областей применения фотоники, в том числе, информационной оптики. В этом обзоре представлены основные приложения метаповерхностей с точки зрения расширения возможностей информационной оптики, а также обсуждаются проблемы и перспективы развития метаповерхностей, в том числе, на основе перестраиваемых устройств и с использованием методов искусственного интеллекта.

Ключевые слова — метаповерхность, информационная оптика, перспективы развития и применения

I. ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее быстро развивающихся областей исследований за последнее десятилетие в фотонике стали метаповерхности (МП) [1-3]. Эти тонкие оптические элементы, рельеф которых составляют массивы субволновых метатомов, были разработаны для широкого спектра задач и функций, включая фокусировку, контроль поляризации, голографию, структурирование цвета, спектроскопию, датчики, и многое другое [4-6]. Они позволяют одновременно управлять несколькими характеристиками электромагнитных волн, способностью блокировать, поглощать, концентрировать, рассеивать или направлять волны в широком диапазоне микроволновых и оптических частот. Отметим, что программируемость и адаптивность, присущие устройствам на базе МП, обеспечивают беспрецедентную гибкость при настройке оптических нейронных сетей и реализации сложных вычислительных задач, открывая путь для разработки сверхбыстрых и энергоэффективных опто-информационных вычислительных платформ [7, 8].

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

II. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Метаповерхности являются логическим развитием дифракционных оптических элементов (ДОЭ), которые, в свою

очередь, явились качественным переходом от классических рефракционных элементов. Характерные размеры микрорельефа (ДОЭ) пропорциональны длине волны излучения, для которой элемент изготавливается. Это позволяет использовать для их проектирования и расчета геометрические соотношения или приближения скалярной теории дифракции. Размеры элементов структуры метаповерхностей (мета-атомы) составляют доли рабочей длины волны (см. рис. 1), поэтому для их расчета и моделирования необходимо использовать строгую электромагнитную теорию, то есть применять уравнения Максвелла.

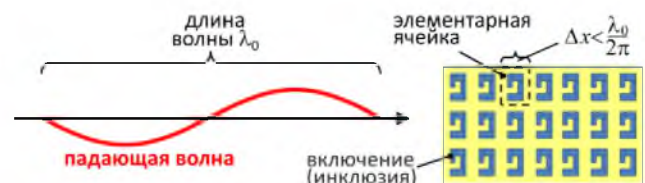


Рис. 1. Мета-атомы: элементарные ячейки существенно субволнового размера.

III. ОСНОВНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Примечательно, что способность МП одновременно выполнять несколько функций в компактном пространстве является принципиальным преимуществом по сравнению с громоздкостью и ограничениями традиционных оптических компонентов. Именно эти особенности позволяют успешно применять метаповерхности во множество приложений (рис. 2).



Рис. 2. Потенциальные возможности применения МП.

IV. ВЛИЯНИЕ НА РАЗВИТИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКИ

Реконфигурируемые МП 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 [9, 10]. В этом контексте МП можно использовать для разработки компактных и универсальных компонентов нейроморфных систем [7]. 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 [11, 12].

В свою очередь, алгоритмы искусственного интеллекта (ИИ) могут использоваться в проектировании и оптимизации наноструктур метализов для улучшения ахроматических и фокусирующих характеристик МП [13]. Кроме того, методы глубокого обучения применяются для эффективного устранения шума и искажения, возникающие в процессе формирования изображения [14].

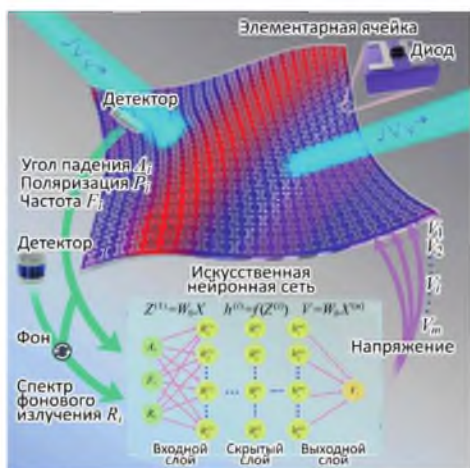


Рис. 3. Синергия ИИ и перестраиваемых метаповерхностей.

V. ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

МП, хотя и многообещающие в своей способности манипулировать электромагнитными волнами с беспрецедентной многофункциональностью, сталкиваются с рядом проблем и ограничений. Среди таких проблем: несовершенство изготовления, поглощение материала и чувствительность к углу падения или поляризации.

Прогнозируется рост применения МП в дисплеях, медицинских технологиях, освещении, обороне и безопасности, в системах дистанционного зондирования и сенсорике. К глобальным современным вызовам можно отнести разработку высокоэффективных компонентов фотоники для создания новой элементной базы систем оптической обработки и передачи информационных сигналов [15-17].

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для расширения функциональных возможностей и областей применения компонентов дифракционной фотоники, особенно МП, необходимо ускорение методов расчета и моделирования, а также совершенствование технологий формирования оптических микро- и нанорельефов. Как и в прошедшие годы развития дифракционной оптики, так и для МП, их прогресс будет опираться на использовании достижений нанoeлектроники.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа частично финансировалась Российским научным фондом в рамках гранта № 24-19-00080 (в части приложений к информационной оптике) и в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» (в части перспектив развития).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Chen, H.-T. A review of metasurfaces: physics and applications / H.-T. Chen, A. J. Taylor and N. Yu // Rep. Prog. Phys. – 2016. – Vol. 79. – P. 076401. DOI: 10.1088/0034-4885/79/7/076401.
- [2] Hu, J. A review on metasurface: From principle to smart metadevices / J. Hu, S. Bandyopadhyay, Y. Liu, et al. // Front. Phys. – 2021. – Vol. 8. – P. 586087. DOI: 10.3389/fphy.2020.586087.
- [3] Greisukh, G.I. Metasurfaces in Optics: Physical Basis and Results Achieved. Review / G.I. Greisukh, V.A. Danilov, E.G. Ezhov, A.I. Antonov // Optoelectron., Instrument. and Data Processing. – 2020. – Vol. 56(2). – P. 109–121. DOI: 10.3103/S8756699020020077.
- [4] Wan, W. Metasurface holograms for holographic imaging / W. Wan, J. Gao, X. Yang // Adv. Opt. Mater. – 2017. – Vol. 5(21). – P. 011303. DOI: 10.1002/adom.201700541.
- [5] Li, A. Metasurfaces and their applications / A. Li, S. Singh, D. Sevenpiper // Nanophotonics. – 2018. – Vol. 7(6). – P. 989–1011.
- [6] Li, L. All-metallic metasurfaces towards high-performance magneto-plasmonic sensing devices / L. Li, X. Zong, Y. Liu // Photonics Res. – 2020. – Vol. 8(11). – P. 1742–1748. DOI: 10.1364/PRJ.399926.
- [7] Wu Z, Zhou M, Khoram E, et al. Neuromorphic metasurface. Photon Res 2020; 8(1): 46-50. DOI: 10.1364/PRJ.8.000046.
- [8] Kazanskiy, N.L. Revolutionary integration of artificial intelligence with meta-optics-focus on metalenses for imaging / N.L. Kazanskiy, S.N. Khonina, I.V. Oseledets, A.V. Nikonorov, M.A. Butt // Technologies. – 2024. – Vol. 12(9). – P. 143.
- [9] Berini, P. Optical beam steering using tunable metasurfaces / P. Berini // ACS Photonics. – 2022. – Vol. 9(7). – P. 2204–2218.
- [10] Khonina, S.N. A review on reconfigurable metalenses revolutionizing flat optics / S.N. Khonina, M.A. Butt, N.L. Kazanskiy // Adv. Opt. Mater. – 2024. – Vol. 12. – P. 2302794. DOI: 10.1002/adom.202302794.
- [11] Wu, C. Programmable phase-change metasurfaces on waveguides for multimode photonic convolutional neural network / C. Wu, H. Yu, S. Lee, et al. // Nat. Commun. – 2021. – Vol. 12. – P. 96.
- [12] Ma, Q. Information metasurfaces and intelligent metasurfaces / Q. Ma, C. Liu, Q. Xiao, Z. Gu, X.X. Gao, L. Li, T.J. Cui // Photon. Insights. – 2022. – Vol. 1(1). – P. R01.
- [13] Yang, Y. Intelligent metasurfaces: Integration of artificial intelligence technology and metasurfaces / Y. Yang, H. Xin, Y. Liu, et al. // Chin. J. Phys. – 2024. – Vol. 89. – P. 991–1008.
- [14] He, S. Computing metasurfaces for all-optical image processing: a brief review / S. He, R. Wang, H. Luo // Nanophotonics. – 2022. – Vol. 11(6). – P. 1083–1108. DOI: 10.1515/nanoph-2021-0823.
- [15] Soifer, V.A. Diffractive nanophotonics and advanced information technologies / V.A. Soifer // Herald of the RAS. - 2014. – Vol. 84(1). – P. 9–20. DOI: 10.1134/S1019331614010067
- [16] Kazanskiy, N.L. Metasurfaces: Shaping the future of photonics / N.L. Kazanskiy, S.N. Khonina, M.A. Butt // Sci. Bull. – 2024. – Vol. 69(11). – P. 1607–1611. DOI: 10.1016/j.scib.2024.04.056.
- [17] Киберфотоника / Под. ред. академика РАН В.А. Соифера. – Самара: Новая техника, 2025. – 248 с. – ISBN 978-5-88940-167-4.