

# АДАПТИВНАЯ КОРРЕКЦИЯ ХРОМАТИЧЕСКОЙ ДИСТОРСИИ В ВОЛНОВОДНЫХ AR-ДИСПЛЕЯХ С ПОМОЩЬЮ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ

Горох П.И.<sup>1</sup>, ассистент, p.goroh@bsuir.by  
Кузмин И.А.<sup>2</sup>, ассистент, i.kuzmin@bsuir.by

2026

1. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
2. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Ключевые слова: *Augmented Reality*, *ARCore*, дополненная реальность.

Аннотация: в работе предложен метод динамической компенсации хроматических искажений в волноводных дисплеях дополненной реальности, основанный на использовании активно перестраиваемых метаповерхностей. В отличие от традиционных подходов, предполагающих применение многоэлементных релейных или многослойных волноводных систем, разработанная архитектура интегрирует массив субволновых наностолбиков  $\text{TiO}_2$  с управляемым жидкокристаллическим слоем, что позволяет модулировать локальный фазовый профиль в реальном времени.

**Введение.** Волноводные дисплеи дополненной реальности (AR) в настоящее время рассматриваются как наиболее перспективная архитектура для создания компактных и легких очков. Ключевыми элементами таких систем являются вводной и выводной дифракционные элементы, которые осуществляют связь изображения с волноводом и его последующее извлечение к глазу наблюдателя. Однако все существующие дифракционные решения – будь то рельефно-фазовые решетки, голографические оптические элементы (НОЕ) или резонансные структуры – обладают фундаментальным недостатком: сильной хроматической дисперсией. Это приводит к тому, что различные спектральные компоненты RGB-источника распространяются под разными углами, вызывая поперечный хроматизм и хроматическую дисторсию увеличения на выходном зрачке.

Традиционные методы борьбы с этим явлением включают использование многослойных волноводов (каждый для своего цвета) или сложных компенсационных оптических систем, состоящих из нескольких линз и призм. Подобные подходы, развиваемые, в частности, в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, хотя и эффективны, увеличивают массу, габариты и стоимость конечного устройства. Целью настоящего исследования является разработка принципиально иного подхода – использование активно перестраиваемых метаповерхностей, способных динамически компенсировать хроматические искажения непосредственно в области выводного зрачка, без добавления громоздких оптических компонентов.

**Теоретическая модель метаповерхности.** Предлагаемая метаповерхность состоит из массива субволновых столбиков из диоксида

титана ( $\text{TiO}_2$ ), расположенных на подложке из плавленого кварца. Выбор  $\text{TiO}_2$  обусловлен его высоким показателем преломления ( $n \approx 2.4$  в видимом диапазоне) и низкими потерями. Каждый наностолбик действует как волновод с усечённой модой, вносящий локальный фазовый сдвиг, зависящий от его геометрических размеров (ширины, длины) и угла поворота  $\theta$ . Для реализации ахроматического поведения мы используем комбинацию двух механизмов: геометрической фазы Панчаратнама-Берри и динамической фазы, управляемой жидкокристаллическим (ЖК) слоем.

Интегрированный поперек массива столбиков ЖК-слой с вертикальной ориентацией молекул позволяет изменять эффективный показатель преломления среды  $n_{\text{eff}}$  под действием приложенного напряжения  $V$ . Фазовый профиль в точке  $(x,y)$  для длины волны  $\lambda$  записывается как:

$$\Delta\varphi(x,y,\lambda,V) = (2\pi/\lambda) \cdot \Delta n_{\text{eff}}(V) \cdot h(x,y) + 2\sigma\theta(x,y) \quad (1.1)$$

где  $h(x,y)$  – локальная высота наностолбика;  
 $\sigma = \pm 1$  – циркулярность падающего света;  
 $\theta(x,y)$  – угол ориентации столбика.

Подбирая распределение  $h(x,y)$  и  $\theta(x,y)$ , можно создать фазовую функцию, которая компенсирует дисперсионное уширение волновода, а изменяя  $V$  – динамически подстраивать её под текущую длину волны излучателя.

**Моделирование и оптимизация.** Численное моделирование проводилось методом конечных разностей во временной области (FDTD) в пакете Lumerical. Была построена параметрическая модель элементарной ячейки метаповерхности с периодом 350 нм. Варьировались ширина столбика  $w$  (от 80 до 200 нм), его длина  $l$  (от 100 до 280 нм) и угол поворота  $\theta$  ( $0-180^\circ$ ). Для каждой комбинации рассчитывались амплитудное пропускание и фазовый сдвиг на трёх длинах волн: 450 нм, 532 нм и 630 нм.

В таблице 1 представлены оптимизированные параметры для трёх типов ячеек, обеспечивающих требуемый градиент фазы при минимальной хроматической вариации.

Параметр	Ячейка типа А (450 нм)	Ячейка типа В (532 нм)	Ячейка типа С (630 нм)
Ширина $w$ , нм	95	120	155
Длина $l$ , нм	210	240	270
Угол $\theta$ , град.	45	60	75
Пропускание $T$	0.91	0.93	0.89
Фазовая ошибка, рад	0.12	0.09	0.15

Таблица 1 – Оптимизированные параметры

Результаты моделирования показывают, что комбинированная структура обеспечивает среднее пропускание порядка 91% и фазовую ошибку не более 0.15 рад во всём видимом диапазоне, что достаточно для эффективной компенсации хроматизма.

**Заключение.** Предложенная архитектура адаптивной метаповерхности демонстрирует возможность отказа от громоздких многолинзовых компенсаторов в волноводных AR-дисплеях. Использование перестраиваемого ЖК-слоя позволяет динамически подстраивать фазовый профиль под текущие условия, включая не только длину волны, но и температурные флуктуации.

#### Список использованных источников

[1] Chen, W. T., Zhu, A. Y., & Capasso, F. (2019). Broadband achromatic metasurface optics. *Nature Communications*, 10, 355.

[2] Lee, G.-Y., Hong, J.-Y., Hwang, S., et al. (2018). Metasurface eyepiece for augmented reality. *Nature Communications*, 9, 4562.

[3] Муравьев, Н.В., Борисов, В.Н. (2022). Голографические перископы для AR-дисплеев. *Оптический журнал*, 89(4), 22–31.

[4] Devlin, R. C., Khorasaninejad, M., Chen, W. T., et al. (2016). Broadband high-efficiency dielectric metasurfaces. *Science*, 358(6367), 893–896.