

УДК 535.42:778.38

Тенденции развития оптических технологий дополненной реальности

Путилин Андрей Николаевич^{1,2(*)}

putilinan@lebedev.ru

SPIN-код: 9244-3851

Дубынин Сергей Евгеньевич¹

dubyninse@lebedev.ru

Путилин Николай Андреевич^{1,2}

nick.putilin.01@mail.ru

SPIN-код: 6753-7109

Копенкин Сергей Сергеевич^{1,2}

kopenkinss@yandex.ru

SPIN-код: 5919-7631

Бородин Юрий Петрович^{1,2}

yuri.borodin47@yandex.ru

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия² Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

Аннотация. В работе рассмотрены тенденции развития оптических технологий, используемых в современных системах дополненной реальности. Анализ основывался как на собственном опыте в разработке элементов AR дисплеев, так и на анализе активности известных разработчиков подобных систем. Приоритетное внимание уделено анализу тех моментов, которые ограничивают развитие дисплеев дополненной реальности. Также рассматриваются новые оптические технологии, способные преодолеть указанные ограничения.

Ключевые слова: дисплеи дополненной реальности, дифракционная оптика, микрозеркальная оптика, волноводные оптические элементы

Trends in the development of optical augmented reality technologies

Putilin Andrey Nikolaevich^{1,2}

putilinan@lebedev.ru

SPIN-code: 9244-3851

Dubynin Sergey Evgenievich¹

dubyninse@lebedev.ru

Putilin Nikolay Andreevich^{1,2(*)}

nick.putilin.01@mail.ru

SPIN-code: 6753-7109

Kopenkin Sergey Sergeevich^{1,2}

kopenkinss@yandex.ru

SPIN-code: 5919-7631

Borodin Yuriy Petrovich^{1,2}

yuri.borodin47@yandex.ru

¹ Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia² Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia

Abstract. This paper examines trends in the development of optical technologies used in modern augmented reality systems. The analysis is based on both our own experience in developing AR display elements and an analysis of the activities of well-known investigators of similar systems. Priority is given to analyzing the issues that limit the development of augmented reality displays. We also explore how certain new optical technologies can overcome existing limitations.

Keywords: augmented reality displays, diffractive optics, micromirror optics, waveguide optical elements

Введение. Дисплеи дополненной реальности на данный момент все в большей мере становятся коммерческим продуктом, переходя из области научных разработок в область серийного и массового производства [1]. Применимость тех или иных моделей очков или индикаторов на лобовом стекле определяется в действительности не только их оптическими характеристиками, но и проработанностью используемого программного обеспечения, наличием датчиков, систем слежения и многим другим [2].

Однако по-прежнему большинство моделей по совокупности своих параметров далеки от запросов пользователей. Появившееся компактные образцы имеют малое угловое поле и ограниченный функционал. Низкая эффективность волноводных элементов требует использования особо ярких пространственно-временных модуляторов света (ПВМС), что снижает технологичность устройства. Основные ожидания, как и ранее, во многом связаны с совершенствованием оптических технологий.

Материалы и методы. Для того чтобы стало возможным оценить значимость тех или иных инновационных решений, вначале необходимо определить образ «идеальных» дисплеев дополненной реальности. Для этого следует отдельно рассмотреть наголовные дисплеи (HMD) и индикаторы на лобовом стекле (HUD) и определить те устройства, с которыми часто сопоставляют дисплеи дополненной реальности.

Анализ ограничений тех или иных схем можно выполнить на основе результатов моделирования, представленных ранее в ряде исследований, а также на основе некоторых новых данных. В такой ситуации станет более понятным, насколько важными и существенными могут являться те или иные решения, предлагаемые современными производителями в ходе конференций, выставок или в патентах.

Результаты. Требования к наголовным дисплеям дополненной реальности во многом связаны с опытом использования офтальмологических очков рядовыми пользователями. Целый ряд моделей весьма близко приблизились к подобному форм-фактору [3, 4]. Однако в вопросе оптических характеристик многие пользователи начинают проводить параллели со шлемами виртуальной реальности (VR-шлемы), среди которых все больше моделей работает в режиме сквозного канала (Mixed Reality) [5, 6]. Подобного рода модели имеют угловое поле около 100...110°. Соединение вместе всех этих требований формируют практически нереализуемую задачу создания сверхлегких очков со сверхшироким угловым полем при сохранении достаточно большого выходного зрачка.

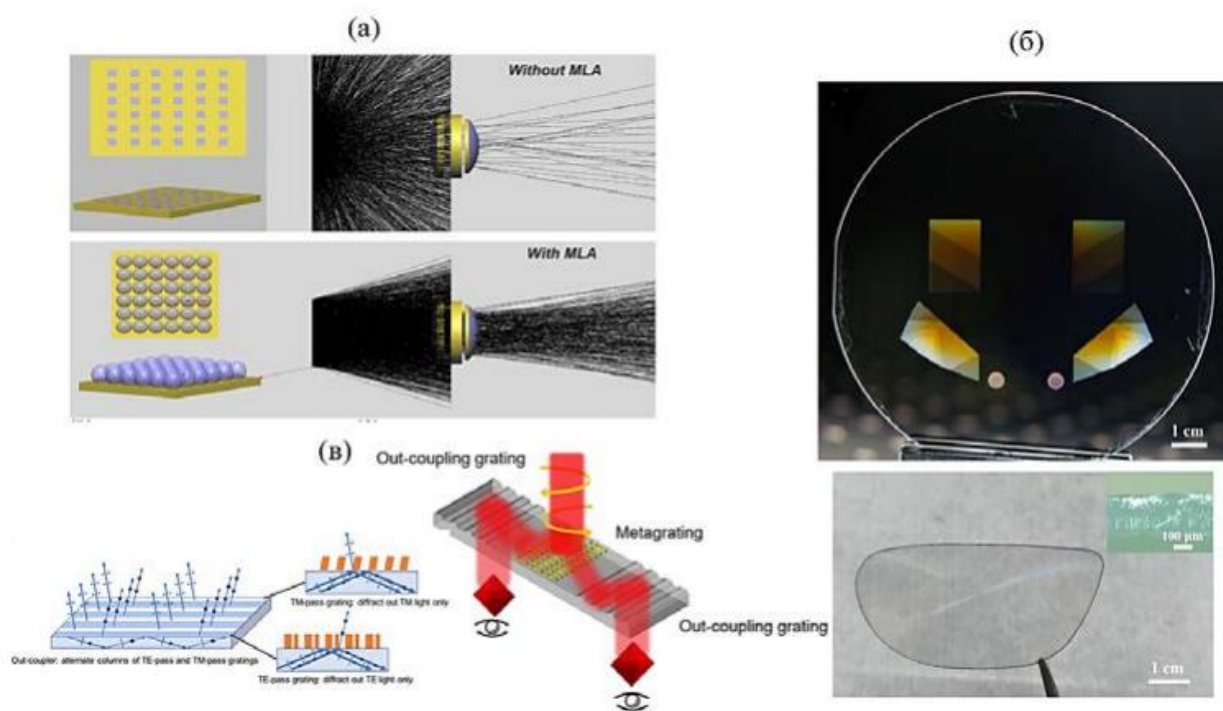
В вопросе индикаторов на лобовом стекле самые жесткие требования на данный момент предъявляются, пожалуй, производителями коммерческих автомобилей, которые требуют: во-первых, все большие угловые поля (более 30 градусов), и при этом стремятся интегрировать совместитель пучков непосредственно в лобовое стекло.

Все вышесказанное наглядно показывает масштаб задач, решение которых ждут от оптиков в ближайшие десятилетия. Рассмотрим теперь, где в оптических схемах дисплеев дополненной реальности происходят потери света или где мы ограничены в возможности его трансформации:

1. Неэффективное использование света от пространственно-временного модулятора света. Большинство ПВМС близки к ламбертовским источникам, а светосила широкоугольных окуляров, как правило, крайне ограничена. Выходом может стать использование растров микролинз или фоконов [7].

2. Увеличенные габариты внеосевых оптических систем. Выход — использование Free-form поверхностей [8] или элементов с микромеханическим сканированием.

3. Ограничения в угловых диапазонах работы волноводных элементов. Последние позволяют кратно уменьшить апертуры классических оптических компонентов. Однако их угловой диапазон напрямую связан с величиной показателя преломления. В связи с этим в последние годы наблюдается резкий рост работ по созданию волноводов на основе различных кристаллов (например, на основе карбида кремния [9]) либо специальных полимеров.



Перспективные направления развития оптических технологий для систем дополненной реальности:

а — применение микролинзового раstra для увеличения использования света окуляром (или объективом) [7];
б — волноводные дифракционные перископы на волноводе из карбида кремния (SiC) [9]; *в* — использование поляризационно-чувствительных дифракционных мета-решеток для формирования стереоизображения [11]

4. Увеличение эффективности при одновременном расширении углового диапазона работы дифракционных элементов. Это может быть достигнуто использованием метаповерхностей различных типов (на основе ЖК-полимеров либо на основе поверхностного рельефа с наноразмерными структура-

ми) [10, 11]. Как и с предыдущими позициями, мы наблюдаем существенный рост интереса к данной тематике. Также весьма ограничены возможности по локальному изменению параметров рельефно-фазовых дифракционных решеток с глубоким наклонным профилем и брэгговских дифракционных решеток.

Обсуждение. Как мы видим, развитие оптических технологий дополненной реальности напрямую связано с прогрессом в целом ряде областей (см. рисунок). При этом многие из них крайне важны и для других задач прикладной оптики:

- интеграция микрооптических элементов в схемы фотонных устройств (ПВМС);
- развитие технологий free-form внеосевой оптики и создание сложных оптических систем, состоящих из подобных элементов;
- создание материалов с сверхвысокими показателями преломления и подложек (волноводов) из них;
- точное управление параметрами дифракционных элементов по площади и улучшение их характеристик.

Заключение. Выявленные тенденции позволили назвать те направления развития оптических технологий, которые существенным образом могут влиять на развитие устройств дополненной реальности. По ряду указанных направлений наблюдается кратно возросшая активность исследовательских работ по всему миру. Полученные результаты пока далеки от идеального результата, поэтому дальнейшие научно-исследовательские работы по указанной тематике продолжают оставаться крайне востребованными.

Список источников

- [1] Lin W. Augmented Reality Smart Glasses: Current Challenges and Future Innovations in Wearable Technology. Proceedings of the 4th International Conference on Computing Innovation and Applied Physics, 2025, pp. 209–215. <https://doi.org/10.54254/2753-8818/83/2025.20151>
- [2] Tran T.T.M. et al. Wearable augmented reality: research trends and future directions from three major venues. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2023, vol. 29, no. 11, pp. 4782–4793. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2023.3320231>
- [3] AR очки фирмы Halliday. URL: <https://hallidayglobal.com/> (accessed 15.01.2026).
- [4] AR очки фирмы Meizu. URL: <https://www.meizuworld.com/meizu-myvu-ar-smart-glasses.html> (accessed 15.01.2026).
- [5] MR-шлем Vision Pro фирмы Apple. URL: <https://www.apple.com/apple-vision-pro/> (accessed 15.01.2026).
- [6] MR-шлем Oculus Quest-3 фирмы Meta. URL: <https://oculus.ru/ru/vr-quest-3s/> (accessed 15.01.2026).
- [7] Li Y. et al. Highly efficient and ultra-compact micro-LED pico-projector based on a microlens array. Journal of the Society for Information Display, 2023, vol. 31, no. 7, pp. 483–493. <https://doi.org/10.1002/jsid.1215>
- [8] Afanaseva O., Solomashenko A., Shishova M. et al. Design of freeform elements with a large exit pupil for AR display. Optik, 2024, vol. 319, art. no. 172101. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2024.172101>

- [9] Chen B. et al. SiC diffractive waveguides for augmented reality: single-layer, full-color, rainbow-artifact-free display with vision correction. *eLight*, 2025, vol. 5, no. 1, art. no. 21. <https://doi.org/10.1186/s43593-025-00100-1>
- [10] Gu Y. et al. Holographic waveguide display with large field of view and high light efficiency based on polarized volume holographic grating. *IEEE Photonics Journal*, 2021, vol. 14, no. 1, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2021.3127547>
- [11] Liu Z. et al. Metasurface-enabled augmented reality display: a review. *Advanced Photonics*, 2023, vol. 5, no. 3, pp. 034001–034001. <https://doi.org/10.1117/1.AP.5.3.034001>