

УДК 535.42; 778.38

Есть ли логика в развитии дисплеев 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

Копёнкин Сергей Сергеевич^{1,2}

kopenkinss@yandex.ru

Бородин Юрий Петрович^{1,2}

yuri.borodin47@yandex.ru

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

² МИИГАиК, Москва, Россия

Аннотация. Проведен анализ тенденций в развитии технологий и методов, используемых в разработке различных дисплейных систем дополненной (AR) и смешанной реальности (MR). Проанализированы оптические схемы самих дисплеев дополненной реальности их слабые и сильные стороны, их технологичность и устойчивость к ошибкам изготовления, в частности рассмотрены волноводные голографические и микрозеркальные перископы, дисплеи на основе линзовых и катадиоптрических оптических элементов. Сравнительный анализ различных типов, разрабатываемых AR-дисплеев позволяет определить их критические параметры, такие как угол поля зрения, выходной зрачок и вынос зрачка, а также общую световую эффективность. Отдельно рассмотрены технологии изготовления базовых оптических элементов и проекционных микродисплеев.

Ключевые слова: дисплеи дополненной реальности, волноводные голографические элементы, дифракционные оптические элементы, устройства совмещения световых пучков

Is there any logic in the development of Augmented Reality Displays?

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

Borodin Yuriy Petrovich^{1,2}

yuri.borodin47@yandex.ru

¹ Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia

Abstract. The analysis of trends in the engineering of technologies and methods used in the development of various augmented (AR) and mixed reality (MR) display systems is present-

ed. The optical circuits of augmented reality displays themselves, their weaknesses and strengths, their manufacturability and resistance to manufacturing errors are analyzed, in particular, waveguide holographic and micro-mirror periscopes, displays based on lens and catadioptric optical elements are considered. A comparative analysis of the various types of AR displays being developed allows us to determine their critical parameters, such as the field of view, exit pupil size and eye relief, as well as overall optical efficiency. Manufacturing technologies for basic optical elements and projection microdisplays are considered separately.

Keywords: augmented reality displays, waveguide holographic elements, diffractive optical elements, beam combiners

Введение. Большинство широко используемых дисплейных технологий имели долгий и непростой путь развития, прежде чем завоевали себе место в наших офисах, домах и на производствах. AR- и VR-дисплеи в том виде, как привыкли их использовать, прошли несколько волн интереса и охлаждения за прошедшие 30 лет и каждый раз возвращение интереса к ним базировалось на новых оптических схемах и технологиях [1]. Необходимо отметить, что сами принципы построения дисплеев, формирующих виртуальное изображение, сформировались еще в начале 20 века, но их использование было уделом профессионалов, прежде всего военных. Новый всплеск интереса к этим технологиям обусловлен широким их использованием в бытовой технике и профессиональным оборудованием для высокотехнологичных производств [1, 2].

Варианты схем построения AR-дисплеев. Анализ технологий AR- и VR-дисплеев начнем с объективных тенденций развития микроэлектроники, проявивших себя в конце 20 века. На рис. 1 приведен слайд из одной презентации того времени (1998 г.), где рассматривали изменения в дизайне носимой электроники, а именно размеров дисплеев в сравнении с размерами самих устройств. И тогда мы сделали вывод о необходимости переориентации дальнейшего развития дисплейных технологий в сторону массового внедрения AR- и VR-дисплеев. Сейчас это тенденция стала очевидной и даже банальной. С другой стороны, логика разработки новых видов дисплеев проявилась именно в переводе дисплейных систем от формирования действительного изображения к мнимому (виртуальному).

Главной составляющей любой системы, формирующей виртуальное изображение, является окуляр, задачей которого является формирование выходного зрачка, согласованного по положению и параметрам с глазом наблюдателя. Например, в окулярах снайперских прицелов выходной зрачок мог быть размером до 7 мм и вынос зрачка до 50–70 мм, при этом размеры превышают все допустимые пределы для большинства схем носимых AR-дисплеев. При этом для любого массового применения дисплеев, строящих виртуальное изображение, необходимо было обеспечить использование их произвольным наблюдателем без- или с минимальной подстройкой оптической схемы. Известно, что межглазное расстояние может изменяться от 62 до 66 мм, при этом установлено, что движение глаз диктует расширение зрачка

примерно до 0,4 мм на каждый градус FOV (поля зрения) виртуального дисплея, т. е. зрачок должен приближаться к 12–15 мм для 50–60 градусного поля зрения.

Некоторой исходной точкой для развития наголовных AR-дисплеев стали стационарные системы — head up displays (HUD) или индикаторы на лобовом стекле транспортных средств (ИЛС) (рис. 2, а). Попытки по аналогичной схеме создать шлем (на основе плоских полупрозрачных зеркал) привели к появлению громоздких футуристичных образцов (рис. 2, б). При этом наблюдался резкий рост секторов поля зрения оператора, заблокированных габаритными проекционными системами [2, 3]. Замена плоских зеркал на асферические позволила через несколько итераций добиться приемлемой для военных летчиков конфигурации, дав, однако, весьма сложную и нетехнологичную конструкцию (рис. 2, в). При этом продольные размеры совместителей световых пучков (бим-комбайнеров) для данных систем и общие габариты продолжают оставаться неприемлемо большими. Голографические внеосевые линзы (фокусирующие зеркала), традиционно использовавшиеся в качестве бим-комбайнеров, позволяют уменьшить продольные размеры системы, но не дают возможности отказаться от сложной и габаритной внеосевой проекционной системы.

DISPLAY ERGONOMICS CONTRADICTIONS

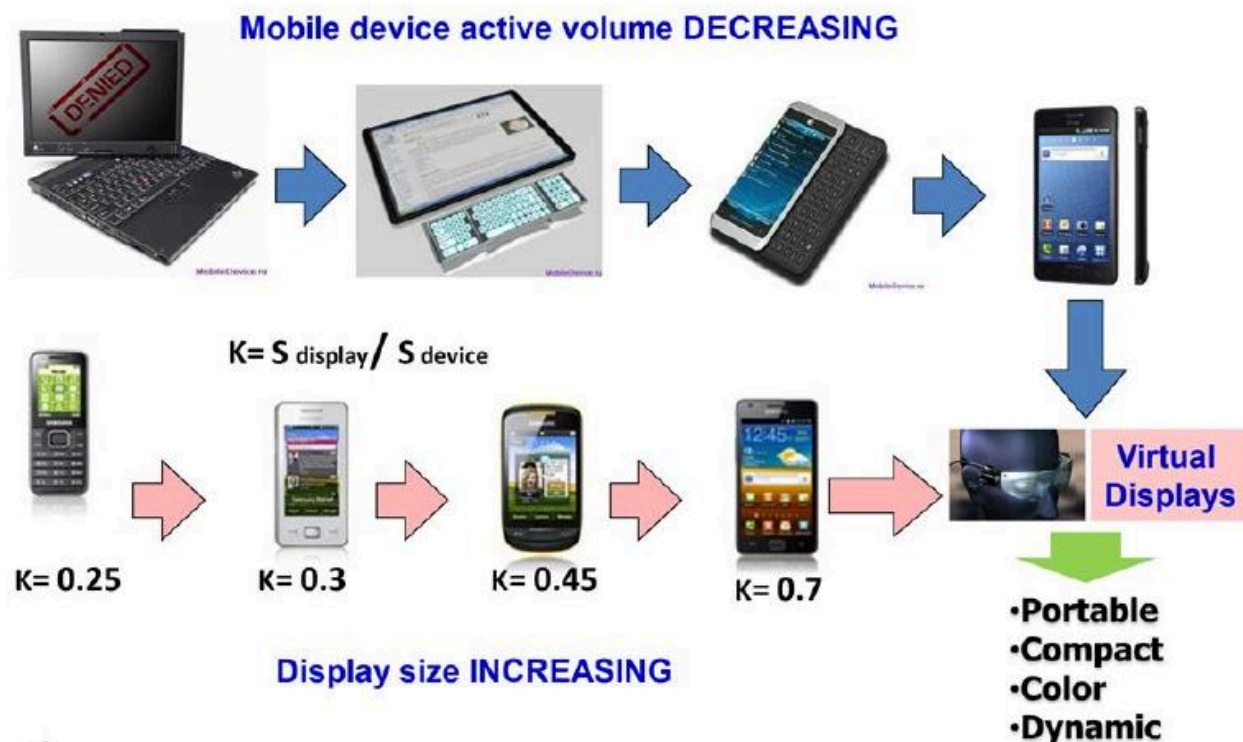


Рис. 1. Тенденция развития эргономики мобильных устройств на 1998 год (из архива)

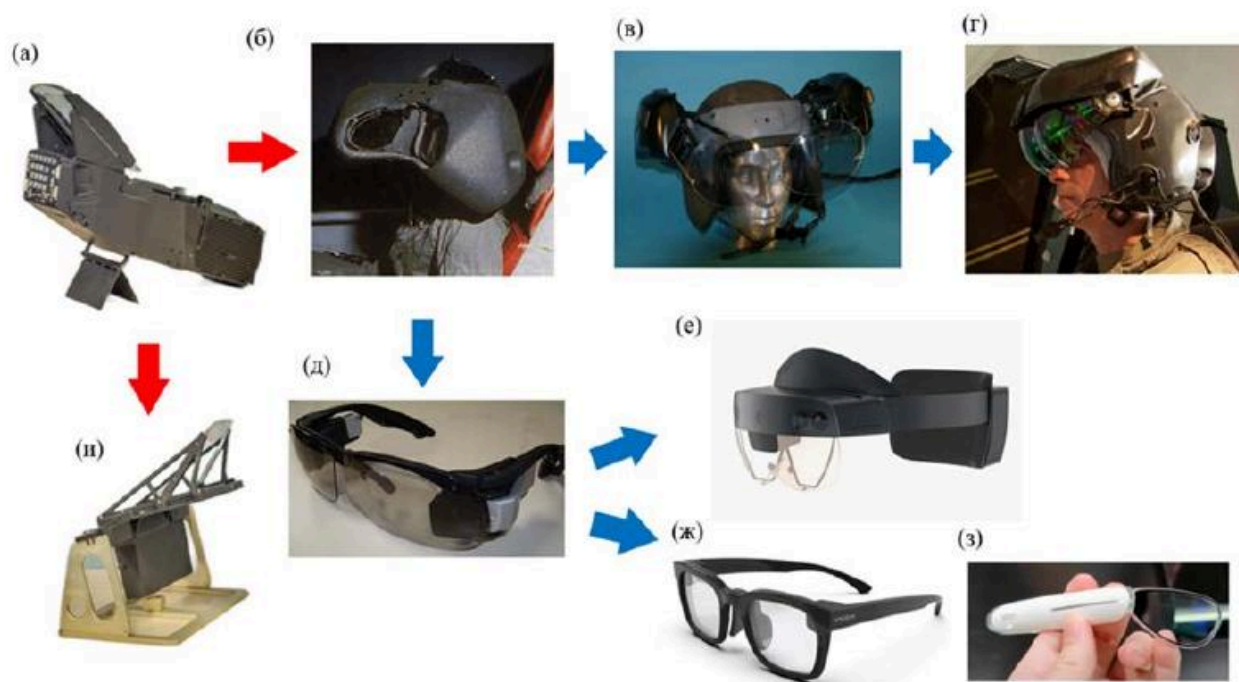


Рис. 2. Тенденции развития дисплеев дополненной реальности

К качественному скачку привели исследования в области систем на основе волноводных голографических и дифракционных элементов. В профессиональной среде давно указывались их важные преимущества: планарность, размножение (мультипликация) выходного зрачка, ПВО разделение недифрагированных пучков и возможность компенсации хроматизма дифракционных решеток. При этом принципиальные решения в данной области были предложены еще в 80-е годы 20 века и развиты в начале 2000-х, когда появились компактные пространственно-временные модуляторы света [4, 5]. Первыми оптическими схемами компактных волноводных дисплеев, формирующих виртуальное изображение были голографические прицелы [4, 6]. Однако в то время большого развития они не получили. А вот в начале волны нового интереса к дисплеям, формирующим виртуальное изображение (с начала 21 века), внимание к волноводным голографическим перископам многократно возросло, не в последнюю очередь благодаря работа в лабораториях фирм Nokia и Sony (рис. 2, д). Таким образом, сформировалась еще одна логическая линия в разработке AR- и VR-технологий — это планаризация (предельное сокращение продольных размеров оптических схем таких дисплеев) [7]. Современные волноводные голографические перископы имеют отношение размеров зрачка к толщине волноводной структуры от 30:1 для HMD дисплеев (рис. 2, е–з) и до 50:1 для HUD дисплеев (рис. 2, и). При этом выходной мультиплицированный зрачок может достигать 300 мм и более по диагонали для HUD, что гораздо больше межглазного расстояния. В развитии AR-дисплеев на основе волноводных дифракционных элементов наблюдается, с одной стороны, стремление обеспечить максимальные пользовательские характеристики, в том числе яркость, угловое поле (рис. 2, е, Hololens-2),

а с другой стороны, — приблизить систему к привычному форм-фактору очков (рис. 2, ж, з), что значительно ограничивает их функционал. На стремлении решить данное противоречие строится развитие данных систем.

Последней логической линией в развитии дисплеев дополненной реальности является тенденция к разработке технологии массового тиражирования как оптических компонентов дисплеев, так и проекторных модулей к ним. В данной связи стоит отметить рельефно-фазовые волноводные дифракционные элементы как более предпочтительные в сравнении, например с микрозеркальными структурами. При этом надо помнить, что формирование большого выходного зрачка системы одновременно привело к драматическому уменьшению световой эффективности всей системы, эффективность всего тракта формирования виртуального изображения не превышает одного процента даже для очень технологически совершенных устройств, поэтому в настоящее время самой насущной задачей исследований в области создания новых схем и технологий для дисплеев дополненной реальности является необходимость минимизации потерь света и разработка экономичных микродисплеев.

Заключение. Необходимо отметить, что данная статья не может вместить описание и анализ всех насущных проблем создания перспективных схем для дисплеев дополненной реальности, поэтому она только призвана очертить контуры проблем и показать, как в разные периоды развития данного направления решения проблем так или иначе находилось, что позволило не только разработать оригинальные схемы, но и довести их разработку до массового производства.

Список источников

- [1] Xiong J., Hsiang E.-L., He Z., Zhan T., Wu S.-T. Augmented reality and virtual reality displays: Emerging technologies and future perspectives. *Light Sci. Appl.*, 2021, vol. 10, no. 216. <https://doi.org/10.1038/s41377-021-00658-8>
- [2] Rolland J.P. Wide-angle, off-axis, see-through head-mounted display. *Optical engineering*, 2000, vol. 39, no. 7, pp. 1760–1767. <https://doi.org/10.1117/1.602555>
- [3] Dunn D., Tippetts C., Torell K. et al. Wide field of view varifocal near-eye display using see-through deformable membrane mirrors. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 1322–1331. <https://doi.org/10.1109/tvcg.2017.2657058>
- [4] Upatnieks J. Compact head-up display. Patent no. US4711512A. 1985, 1987.
- [5] Levola T. Diffractive optics for virtual reality displays. *Journal of the Society for Information Display*, 2006, vol. 14, no. 5, pp. 467–475. <https://doi.org/10.1889/1.2206112>
- [6] Putilin A.N., Morozov V.N., Huang Q., Caulfield H.J. Waveguide holograms with white light illumination. *Optical Engineering*, 1991, vol. 30, no 10, pp. 1615–1619. <https://doi.org/10.1117/12.55969>
- [7] Kress B.C., Peroz C. Optical architectures for displays and sensing in augmented, virtual, and mixed reality (AR, VR, MR). *Proc. SPIE*, 2020, vol. 11310, art. no. 1131001. <http://doi.org/10.1117/3.2559304>