

УДК 535.42

Анализ ограничений в работе волноводных дифракционных перископов в схемах дисплеев дополненной реальности

Путилин Николай Андреевич^{1,2(*)}

nick.putilin.01@mail.ru

SPIN-код: 6753-7109

Дубынин Сергей Евгеньевич¹

dubyninse@lebedev.ru

Путилин Андрей Николаевич^{1,2}

putilinan@lebedev.ru

SPIN-код: 9244-3851

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, Россия² МИИГАиК, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены особенности построения схем волноводных дифракционных перископов, ограничивающие оптические характеристики систем дополненной реальности на их основе. Проанализирована взаимосвязь между угловым полем, размером выходного зрачка проекционной оптической системы, толщиной волновода. Исследованы ограничения, связанные с возможностью дифракции 2-го порядка при выводе излучения из волновода. Рассмотрено возникновение паразитных засветок от внешних источников для ряда известных схем. Указанные ограничения анализировались как для моноцветных дисплеев дополненной реальности, так и для вариантов с полноцветным изображением. Отмечены преимущества и недостатки схем и отдельных типов элементов, приведены оценки предельных характеристик систем при заданных параметрах компонентов.

Ключевые слова: дисплей дополненной реальности, волноводные дифракционные перископы, рельефно-фазовые дифракционные решетки, угловое поле, мультипликация выходного зрачка

Analysis of the limitations of waveguide diffraction periscopes in augmented reality display designs

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

nick.putilin.01@mail.ru

SPIN-code: 6753-7109

Dubynin Sergey Evgenievich¹

dubyninse@lebedev.ru

Putilin Andrey Nikolaevich^{1,2}

putilinan@lebedev.ru

SPIN-code: 9244-3851

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, Russia² Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia

Abstract. The specific features of waveguide diffraction periscope circuits design that limit the optical characteristics of augmented reality systems based on them are considered. The

relationship between the angular field of view, the size of the exit pupil of the projection optical system, and the waveguide thickness is analyzed. The limitations associated with the possibility of second-order diffraction when light beams outcoupling from the waveguide are investigated. The occurrence of parasitic illumination from external sources is considered for a number of known schemes. The specific limitations for both monochrome and full-color augmented reality displays are analyzed. The advantages and disadvantages of the schemes and individual types of elements are noted, the estimations of the characteristics limitation of the systems for given component parameters are given.

Keywords: augmented reality display, waveguide diffraction periscopes, surface-relief diffraction gratings, angular field of view, output pupil multiplication

Введение. В дисплеях дополненной реальности (AR — Augmented Reality) дифракционные элементы выполняют функции, аналогичные таковым для классических перископов, — перенос выходного зрачка оптической системы. Однако при этом также осуществляется увеличение размера выходного зрачка, его мультипликация. Это позволило кратно уменьшить габариты проекционных оптических систем и определило широкое распространение данных элементов [1, 2]. Для случая плоских волноводов с периодическими дифракционными решетками для ввода-вывода излучения, оптическая система перископа, без учета погрешностей изготовления, остается анаберрационной, также как оптические призмённые оборачивающие системы и ряд других элементов классической оптики.

Основные схемы построения волноводных дифракционных перископов (ВДП) были предложены еще в 1980–2000-х гг. [3, 4], их отличает наглядность и простота заложенных в них идей. Однако практическая реализация подобных систем по-прежнему сталкивается с рядом сложностей. Среди них есть часто обсуждаемые проблемы (низкая энергетическая эффективность, ограничения углового поля), а есть и менее известные, требующие более детального исследования и анализа.

Материалы и методы. Волноводные дифракционные перископы являются достаточно новым типом оптических элементов. Создание модели, которая бы давала исчерпывающее описание их функционирования в рассматриваемых схемах, является пока нерешенной задачей, которая осложняется тем, что в отдельных ситуациях для ее решения могут потребоваться самые различные подходы (например, учет модовой структуры волноводов). В связи с этим, любые результаты моделирования должны проходить экспериментальную проверку. Описываемые практические исследования выполнялись с использованием специально изготовленных экспериментальных образцов волноводных рельефно-фазовых голографических решеток, а также на примерах имеющихся коммерческих образцов систем AR-очков (TCL RayNeo X2, Meizu AR Smart Glasses). Моделирование выполнялось с использованием оригинальных компьютерных программ, включающих в себя модели непоследовательной трассировки. Также в исследованиях используется метод векторных диаграмм, которые строятся на основе полусфер Эвальда [5, 6].

Результаты. Рабочее угловое поле ВДП ограничивается, с одной стороны, углом полного внутреннего отражения. С другой стороны, периодом точек возврата лучей (вывода их из волновода), т. е. условием слитности формируемого выходного зрачка. Выполнение же этого условия зависит уже и от размера выходного зрачка проекционной оптической системы, формирующей исходное виртуальное изображение. Одновременно периоды точек возврата зависят от толщины волновода.

Учет всех этих ограничений наиболее удобен при использовании векторных диаграмм, пример работы соответствующей программы показан на рис. 1, а. Штриховой голубой линией показано ограничение по периоду точек (областей) возврата (5 мм при 1 мм толщины волновода). Однако определенные таким образом рабочие угловые диапазоны отличаются для разных длин волн. На рис. 1, б это показано для ВДП типа WaveOptics с периодом 500 нм и $n = 1,5$, на рис. 1, в показаны результаты эксперимента, выполненного с использованием RGB лазера. И в модели, и в эксперименте можно видеть, насколько мала зона пересечения рабочих угловых диапазонов. Общая конфигурация наблюдаемого окрашенного изображения белого поля (сформированного ВДП) для модели (рис. 1, б) и для эксперимента (рис. 1, в) совпадают, размытость границ связана с конечной апертурой фотоаппарата. При этом наблюдается большое количество паразитных засветок, синего цвета.

Авторы поставили перед собой задачу выявить возможные причины появления показанных или подобного рода бликов, которые наблюдаются, в том числе при полностью закрытых гранях волновода. Для ВДП основными источниками бликов и паразитных засветок являются внешние источники излучения, расположенные под большим углом к ВДП, а также рассеяние в волноводе. Однако в схеме эксперимента на рис. 1, г они отсутствовали.

В ходе экспериментов был установлен еще один источник паразитных засветок, требующий изучения. Так, обычно работу ВДП иллюстрируют схемами, аналогичными трассировке лучей на рис. 1, з, при этом «нерабочая» ветвь (направление Б) для крайних углов поля может быть не волноводной. Дифрагированный и преломленный луч (Б) идет под большим углом к нормали (угол β') и не должен, согласно модели, попасть в область выходного зрачка. Однако на рис. 1, з не учитывается дифракция 2-го порядка. Авторы ранее исследовали данный режим работы ВДП в работе [7], для рассматриваемого случая учет вторых порядков дифракции означает возможность вывода излучения под углами β' при каждом взаимодействии лучей с дифракционной решеткой. Это можно видеть в модели на рис. 1, д, а также и в эксперименте на рис. 1, е, где лучи, идущие в направлении Б оказались размноженными на выходе из волноводного дифракционного перископа (для данного случая ВДП — подложка с изготовленной одномерной дифракционной решеткой (ДР) периода 500 нм). Мультиплицированные лучи, показанные на рис. 1, д и е, уже могут попасть в область выходного зрачка, в связи с чем требуется ограничивать размеры выводной ДР.

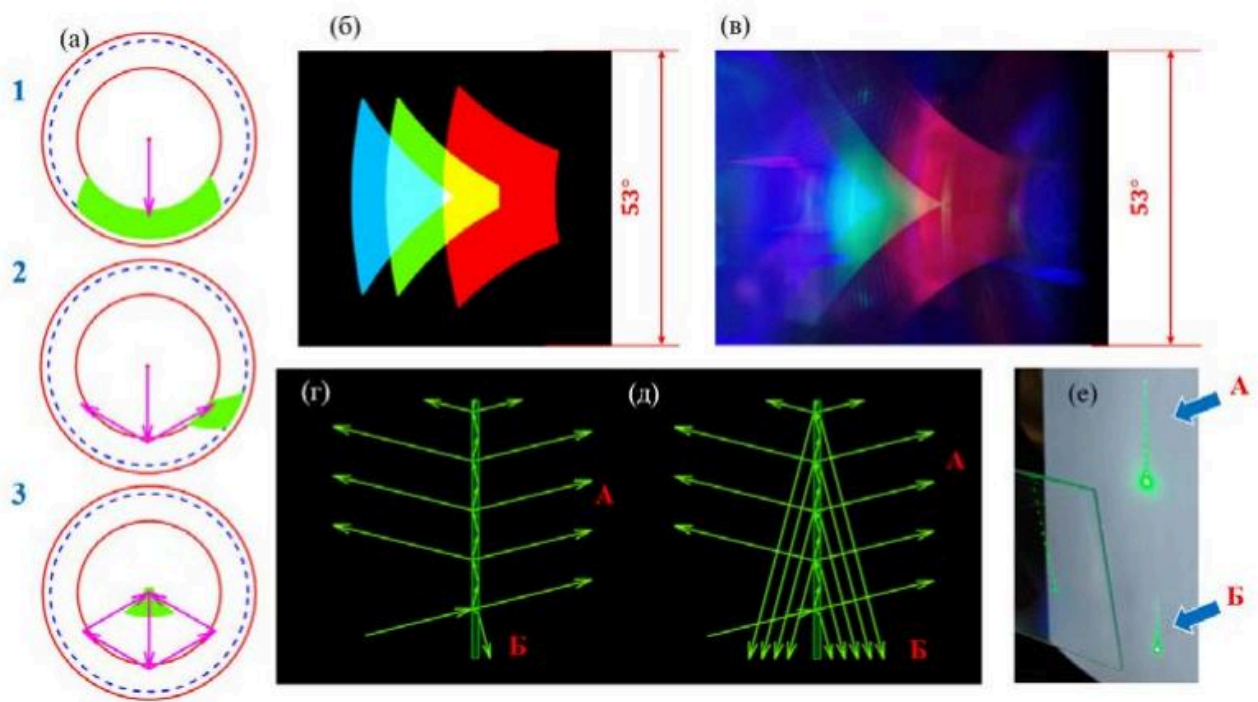


Рис. 1. Исследование угловых диапазонов работы ВДП:

a — векторные диаграммы для схемы типа WaveOptics; *б* — угловые диапазоны для одиночного волновода, модель; *в* — экспериментальный результат; *г* — трассировка лучей в волноводе без учета вторых порядков дифракции; *д* — трассировка лучей с учетом вторых порядков дифракции; *е* — распространение лучей в ВДП, эксперимент

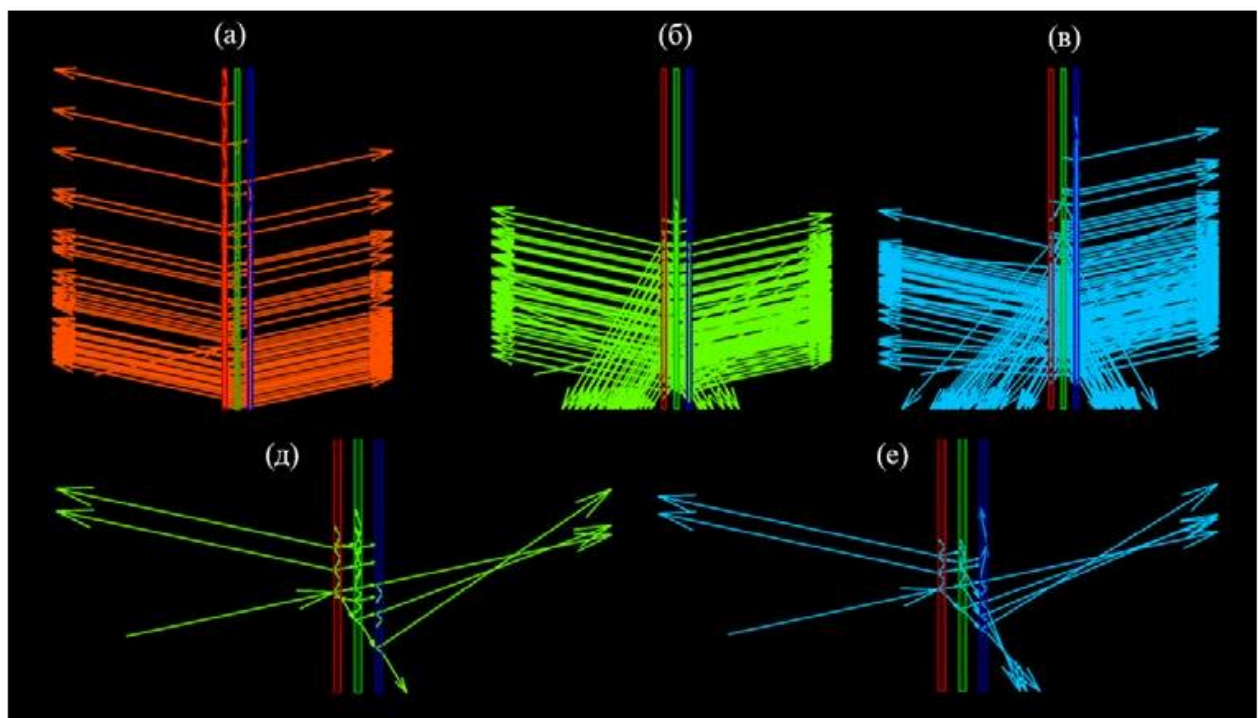


Рис. 2. Трассировка лучей через трехволноводную структуру:

a — для $\lambda = 630$ нм; *б* — для $\lambda = 532$ нм; *в* — для $\lambda = 475$ нм; *д* — увеличенный фрагмент рис. 2, б (7 итераций трассировки); *е* — увеличенный фрагмент рис. 2, в (7 итераций трассировки)

Выше отмечалось, что одиночный волновод с стандартным показателем преломления не может обеспечить приемлемый угловой диапазон формирования полноцветного изображения. В связи с этим, используется несколько волноводов, оптимизированных по периоду решетки для отдельных цветов. Однако для рельефно-фазовых ДР практически отсутствует спектральная селективность, значит требуется исследовать взаимодействие между отдельными ВДП. Не учитывая для простоты возможность дифракции 2-го порядка, получим результат, показанный на рис. 2, где красным, зеленым и синим цветом условно показаны волноводы с разными периодами (500, 440 и 375 нм). Выполнялось 15 итераций трассировки, после чего работа программы останавливалась.

Как видно, для красного цвета ($\lambda = 630$ нм) паразитных лучей не возникло, однако для зеленого ($\lambda = 532$ нм) и синего ($\lambda = 475$ нм) возникли не только лучи, аналогичные наблюдаемым на рис. 1, δ для 2-ых порядков дифракции, но и ряд других лучей, идущих под различными углами, близкими к исходным. Данные лучи возникают в результате падения на «зеленый» и «синий» волновод не волноводной ветви лучей, дифрагированных на «красном» волноводе. Детальнее механизм их возникновения можно наблюдать на рис. 2, δ и e .

Обсуждение полученных результатов. Полученные результаты демонстрируют необходимость проведения дальнейших экспериментальных исследований и уточнения обычно используемых моделей. Однако можно сделать вывод, что наличие 2-ых порядков дифракции при стремлении максимально использовать угловой диапазон ВДП может привести к появлению искажения изображения. Также важно отметить, что взаимодействие между отдельными волноводами может являться источником возникновения «духов» и паразитных засветок. Общим методом борьбы с рассматриваемыми негативными явлениями являются:

- ограничение областей изготовления дифракционных решеток зонами, в которых они должны функционировать;
- использование дифракционных элементов со спектральной, угловой или поляризационной чувствительностью, с целью минимизации взаимного влияния между отдельными ВДП;
- использование волноводов с высоким показателем преломления для использования одноволноводных схем.

Заключение. Затронутые в работе вопросы показывают необходимость проведения дальнейших исследований. При этом необходимо отметить, что использование брэгговских или поляризационных дифракционных элементов несет в себе потенциально не только ряд преимуществ, связанных с повышением энергетической эффективности, но и может обеспечить минимизацию внешних засветок и прочих искажений виртуального изображения.

Список источников

- [1] Ding Y., Yang Q., Li Y. et al. Waveguide-based augmented reality displays: perspectives and challenges. *eLight*, 2023, vol. 3, no. 1, pp. 24–58. <https://doi.org/10.1186/s43593-023-00057-z>

- [2] Kress B.C., Pace M. Holographic optics in planar optical systems for next generation small form factor mixed reality headsets. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, vol. 3, no. 4, pp. 771–801. <https://doi.org/10.37188/lam.2022.042>
- [3] Upatnieks J. Compact holographic sight. *Holographic optics: Design and applications*. SPIE, 1988, vol. 883, pp. 171–176.
- [4] Levola T. Compact See-through Near to Eye Display with Diffractive Optical Elements. *Korea Information Display Society: Conference Proceedings*, 2007, vol. 7001, pp. 1749–1752. <https://doi.org/10.1117/12.781168>
- [5] Introduction to integrated optics. Ed. by Barnoski M. NY, Plenum Press, 1974, 515 p.
- [6] Rolland J.P., Goodsell J. Waveguide-based augmented reality displays: a highlight. *Light: Science & Applications*. 2024, vol. 13, no. 1, pp. 22–24. <https://doi.org/10.1038/s41377-023-01371-4>
- [7] Путилин Н.А., Дубынин С.Е., Путилин А.Н., Копёнкин С.С., Бородин Ю.П. Исследование режимов дифракции в волноводных голографических перископах в схемах НМД и HUD дисплеев. *HOLOEXPO 2024. XXI Междунар. конф. по голографии и прикладным оптическим технологиям: тез. докл.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024, с. 84–87.