

Особенности разработки составных оптических волноводов для устройств дополненной реальности

А. Б. Соломашенко, О. Л. Афанасьева, А. С. Кузнецов

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Составной оптический волновод является одним из наиболее перспективных элементов для применения в составе устройств дополненной реальности, т.к., с одной стороны, объединяет в себе все преимущества волноводов дифракционного типа (минимальная толщина, высокий размер рабочего углового поля зрения и выходного зрачка и др.), но, с другой, обладает гораздо большей эффективностью. Тем не менее существует ряд вопросов, связанных с разработкой технологии изготовления волноводов данного типа как для одномерного, так и для двумерного исполнения, а также реализации оптической схемы проекционного модуля на их основе, которые рассмотрены в данном докладе.

Ключевые слова: Волновод, Дополненная реальность, Технологический процесс, Коэффициент отражения, Яркость.

Цитирование: Соломашенко, А. Б. Особенности разработки составных оптических волноводов для устройств дополненной реальности / А. Б. Соломашенко, О. Л. Афанасьева, А. С. Кузнецов // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 179–182.

Составной оптический волновод представляет собой плоскопараллельную стеклянную пластину, состоящую из склеенных под определённым углом ромбических призм с нанесёнными на их поверхность частично отражающими покрытиями [1, 2], как показано на рис. 1. Излучение в волновод вводится через вспомогательную призму и распространяется внутри волновода под углом полного внутреннего отражения пока не попадает на отражающие грани, которые позволяют вывести излучение в сторону наблюдателя. В данном случае происходит мультиплексирование зрачка по одной (горизонтальной) координате, а для расширения по двум координатам необходимо либо корректным образом смоделировать коллимирующую оптическую систему проектора, либо создать т.н. двумерный составной волновод, в котором будут реализованы отдельные 2 стопки наклонных ромбических призм, но технологический процесс изготовления такого оптического компонента является достаточно сложной задачей.

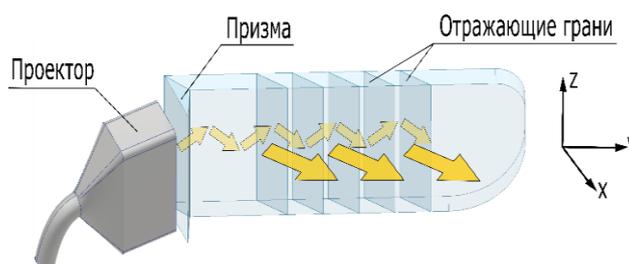


Рис. 1. Модуль отображения информации на основе призмного волновода

В общем случае рабочее угловое поле 2ω , которое может обеспечить волновод, ограничено углом скольжения γ , при котором излучение не будет отражаться от параллельных поверхностей, а будет скользить вдоль одной из них, и углом полного внутреннего отражения α . Варьируя значение показателя преломления в диапазоне от 1,5 до 1,7, можно добиться значений углового поля (по диагонали) от 32° до 44° .

Максимально возможный размер входного зрачка в общем случае связан с толщиной пластины d и углом распространения излучения внутри волновода α и равен:

$$D_{\max} = d / \cos \alpha. \quad (1)$$

Чем меньше толщина пластины, тем меньший размер входного зрачка коллимирующей оптической системы необходимо обеспечить, как показано на рис. 2а. Например, при $d = 2$ мм и показателе преломления в диапазоне от 1,5 до 1,7 значения эффективного размера входного зрачка составляет от 2,4 до 2,5 мм. С одной стороны, небольшой размер входного зрачка обуславливает минимальные размеры коллимирующей оптической системы для ввода излучения в волновод, но с другой, при мультиплексировании такого зрачка по горизонтальной координате (рис. 1) область вывода изображения из волновода будет иметь вид длинной, но узкой (высотой эквивалентной размеру зрачка) линии, что, как было отмечено выше, требует предварительного расширения зрачка по одной (вертикальной) координате.

На рис. 2б приведен график зависимости эффективного размера зрачка коллимирующей оптической системы проектора от толщины пластины для разных значений размера рабочего углового поля. В качестве материала выбрано стекло СТК7 с показателем преломления $n = 1,69$.

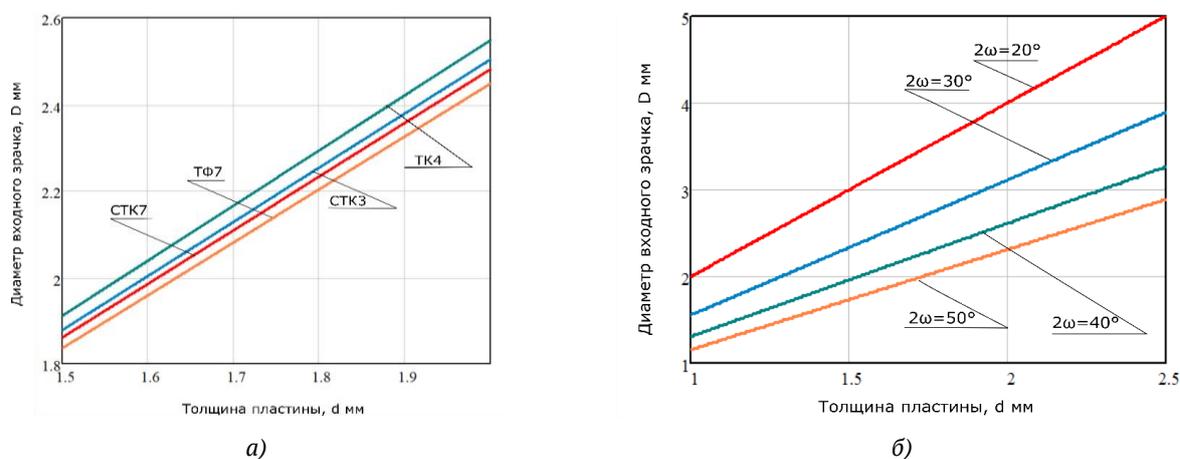


Рис. 2. Зависимость диаметра входного зрачка от толщины пластины: а) для разных материалов, б) для разных угловых полей

Другой особенностью данного волновода является тот факт, что, с одной стороны, он должен иметь высокое светопропускание «на просвет», а с другой, высокое отражение от граней ромбических призм для обеспечения максимальной эффективности. Коэффициент отражения на последней грани примем равным $\rho_6 = 0,4$ для получения коэффициента светопропускания 0,6. Для обеспечения равномерности яркости наблюдаемого изображения, необходимо, чтобы коэффициенты отражения от каждой грани были различными, а формула для определения их значений имеет вид:

$$\rho_i = \frac{\rho_{i+1}}{1 + \rho_{i+1}}. \quad (2)$$

Количество отражающих граней N определяется с учетом требований по размеру рабочего углового поля 2ω , выходного зрачка $D_{зр}^{вых}$, его удаления от пластины волновода L , а также наклона отражающих граней β , т.е. $N = (D_{зр}^{вых} + 2L \cdot \operatorname{tg} \omega) \cdot \operatorname{tg} \beta / d$. В данном случае количество отражающих граней равно 6, а их коэффициенты отражения равны соответственно 0,133; 0,154; 0,182; 0,222; 0,286 и 0,400.

Недостатком составного волновода является технологически сложный процесс изготовления поскольку он собран из различных элементов (пластин) склеенных между собой, важно соблюдать требования по клиновидности для того, чтобы исключить искажения при выводе изображения, как показано на рис. 3.



а) клиновидность пластин 5'



б) клиновидность пластин 8'



в) клиновидность пластин 14'

Рис. 3. Примеры выводимых изображений

Для минимизации размеров коллимирующей оптической системы целесообразно использовать светоделительные кубики или призмы [2, 3], но для устранения паразитных изображений и двоений приходится использовать поляризационные покрытия и четвертьволновые пластинки, что повышает поглощение внутри оптической системы. Например, при использовании монохромного SiOLED дисплея яркостью порядка 8000 кд/м², яркость наблюдаемого изображения составляет порядка 220-250 кд/м².

В результате получен образец со следующими параметрами: стекло пластины СТК7 с показателем преломления $n = 1,69$, толщина $d = 2$ мм, угловое поле $2\omega = 34,132^\circ$, размер входного зрачка $D = 2,406$ мм, удаление выходного зрачка 20 мм, количество отражающих граней – 6.

Благодарность

Исследование проведено в МГТУ им. Баумана в рамках реализации НИР по программе «Приоритет 2030».

Список источников

- [1] Патент № 2016 140 880 РФ. Компактная система дисплея, устанавливаемая на голове / АМИТАИ Яаков – Оpubл. 20.04.2018.
- [2] Патент № 2017 116 184 РФ. Компактная нашьлемная система индикации, защищенная сверхтонкой структурой / Амитаи Яаков, ОФИР Юваль, МОР Элад – Оpubл. 20.04.2018.

- [3] **Zhou, Y.** Design of a dual-focal geometrical waveguide near-eye see-through display / Zhou Y., Zhang J., Fang F. // Optics & Laser Technology. – 2022. – T. 156. – C. 108546. — DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.108546.

Features of the development of optical lightguides for augmented reality devices

A. B. Solomashenko, O. L. Afanaseva, A. S. Kuznetsov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Optical lightguide is one of the most promising elements for use in augmented reality devices, because it combines all the advantages of diffraction-type waveguides (minimum thickness, high field of view and exit pupil, etc.), but it is much more efficient. Nevertheless, there are a number of issues related to the development of the technology for manufacturing this type of lightguides, as well as the implementation of the optical scheme of the projection module based on them.

Keywords: Lightguide, Augmented reality, Technological process, Reflection coefficient, Brightness.