

УДК 681.7.068.6

Особенности технологического процесса изготовления рефрактивных световодов для устройств дополненной реальности

Семченков Петр Владимирович^(*)

semchenkovpv@mail.ru

Афанасьева Ольга Леонидовна

o-lin98@mail.ru

SPIN-код: 5989-1990

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Одним из перспективных направлений разработки компактных устройств дополненной реальности являются рефрактивные световоды. Однако их производство сопряжено с высокими технологическими требованиями к точности и качеству изготовления. В работе описан технологический процесс изготовления рефрактивного световода и методика расчета некоторых его параметров. На основе полученных расчетов получены экспериментальные образцы.

Ключевые слова: рефрактивный световод, дополненная реальность, расширение зрачка, изготовление световодов

Key aspects of refractive waveguide fabrication for augmented reality devices

Semchenkov Petr Vladimirovich^(*)

semchenkovpv@mail.ru

Afanaseva Olga Leonidovna

o-lin98@mail.ru

SPIN-code: 5989-1990

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. Refractive waveguides are among the most promising approaches for developing compact augmented reality devices. However, their fabrication involves significant technological requirements for precision and manufacturing quality. This paper describes the fabrication process of a refractive waveguide and presents a methodology for calculating its parameters. Based on the calculated specifications, experimental prototypes were fabricated.

Keywords: refractive waveguide, augmented reality, pupil expansion, waveguide fabrication

Введение. К настоящему времени достигнут существенный прогресс в области технологий визуализации информации за счет оптических систем дополненной реальности. На практике подтверждены их преимущества в промышленном секторе, медицине, сфере обучения и др. Несмотря на доступность устройств дополненной реальности, их широкое применение ограничивается качеством формируемого изображения и габаритами конструкции. Данные параметры напрямую зависят от оптического элемента вывода изображения, в роли которого чаще всего используются полупрозрачные призмы, элементы

свободной формы или дифракционные световоды. В качестве альтернативы традиционным элементам выступают рефрактивные световоды [1, 2], обладающие малыми размерами, низкими энергетическими потерями и минимальными цветовыми искажениями, но при этом относительно большим угловым размером поля зрения.

Производство рефрактивных световодов ограничено строгими требованиями к качеству изготовления. В настоящей работе описан технологический процесс изготовления рефрактивного световода и представлена методика расчета его параметров.

Материалы и методы. Принцип работы рефрактивного световода основан на сочетании эффекта полного внутреннего отражения (ПВО) и частичного вывода светового излучения. Световод представляет собой плоскопараллельную стеклянную пластину, состоящую из склеенных под определенным углом призм. На рабочие грани призм нанесены частично отражающие покрытия, коэффициенты которых обеспечивают равномерную яркость выводимого изображения. В зависимости от места установки в оправе (сбоку или сверху), световод может быть реализован в горизонтальном или вертикальном исполнении, что определяет направление распространения излучения и ось расширения зрачка (рис. 1).

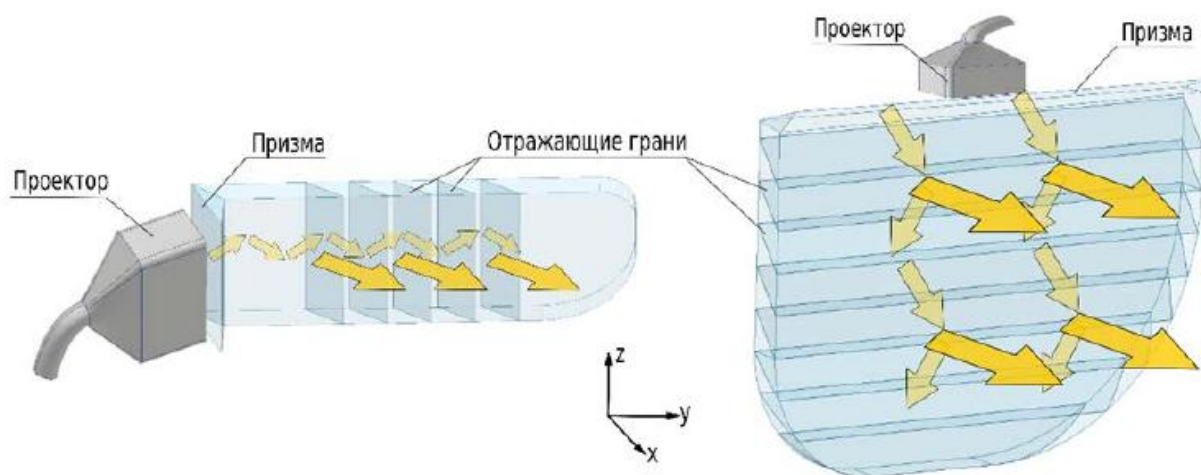


Рис. 1. Рефрактивный волновод в горизонтальном и вертикальном исполнении

Ввод излучения осуществляется через вспомогательную призму [3], после чего пучок распространяется внутри световода под углами ПВО и при отражении от полупрозрачных граней частично выводится в сторону наблюдателя. Этот эффект повторяется для каждой грани, реализуя таким образом принцип мультиплексирования (расширения) зрачка вдоль направления распространения излучения. Описанная конструкция является одномерной, поскольку реализует мультиплексирование зрачка вдоль одной оси. Для расширения зрачка по двум координатам применяются двумерные световоды, в которых две группы частично отражающих граней отвечают за расширение по ортогональным направлениям.

Расчет рефрактивного световода сводится к определению его оптических характеристик и геометрических параметров, обеспечивающих эти характеристики. Среди основных параметров выделяют толщину пластины d , угол наклона призм β , количество отражающих поверхностей N и их коэффициенты отражения ρ . Выходная область световода у формируется из рабочих граней призм, количество которых определяют соотношением:

$$N = \frac{y \operatorname{tg}(\beta)}{d}. \quad (1)$$

В процессе прохождения излучения внутри световода его энергия уменьшается, и до последних граней доходит лишь малая часть исходного потока. Чтобы изображение на выходе имело равномерную яркость, необходимо, чтобы на каждой отражающей грани волновода из пластины выходил равный по величине поток, т. е.

$$\Phi'_1 = \Phi'_2 = \Phi'_3 = \Phi'_4 = \Phi'_5 = \text{const}. \quad (2)$$

Для простоты расчета примем, что на первую отражающую поверхность приходит поток $\Phi_1 = 1$ (рис. 2).

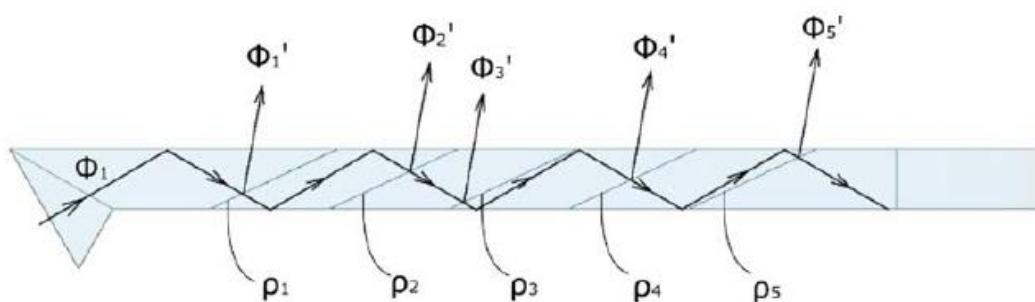


Рис. 2. Распределение потока излучения в волноводе

Определим поток, отраженный от каждой грани:

$$\begin{cases} \Phi'_1 = \Phi_1 \cdot \rho_1, \\ \Phi'_2 = \Phi_1 \cdot (1 - \rho_1) \cdot \rho_2, \\ \Phi'_3 = \Phi_1 \cdot (1 - \rho_1) \cdot (1 - \rho_2) \cdot \rho_3, \\ \Phi'_4 = \Phi_1 \cdot (1 - \rho_1) \cdot (1 - \rho_2) \cdot (1 - \rho_3) \cdot \rho_4, \\ \Phi'_5 = \Phi_1 \cdot (1 - \rho_1) \cdot (1 - \rho_2) \cdot (1 - \rho_3) \cdot (1 - \rho_4) \cdot \rho_5. \end{cases} \quad (3)$$

В связи с тем что система должна иметь высокое светопропускание, примем коэффициент отражения на последней грани $\rho_5 = 0,4$. Коэффициент отражения рабочих поверхностей должен монотонно возрастать ($\rho_{i+1} > \rho_i$), достигая максимального значения на последней грани ρ_N [4]. Рекуррентная формула для расчета коэффициентов имеет вид:

$$\rho_i = \frac{\rho_{i+1}}{1 + \rho_{i+1}}. \quad (4)$$

В таком случае коэффициенты отражения будут иметь значения: $\rho_5 = 0,400$; $\rho_4 = 0,375$; $\rho_3 = 0,273$; $\rho_2 = 0,214$; $\rho_1 = 0,176$.

Технологический процесс изготовления одномерных рефрактивных световодов представлен на рис. 3 и включает четыре основных этапа: подготовка светоделительных пластин, склейка многослойной заготовки, распиловка и финишная обработка.

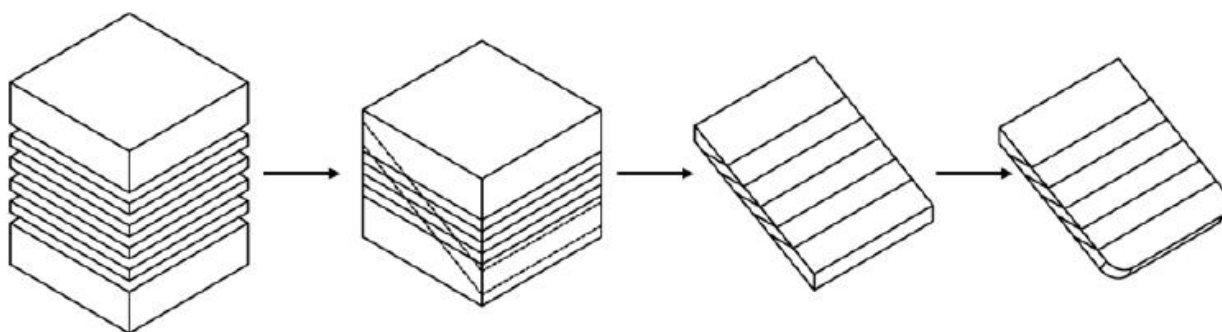
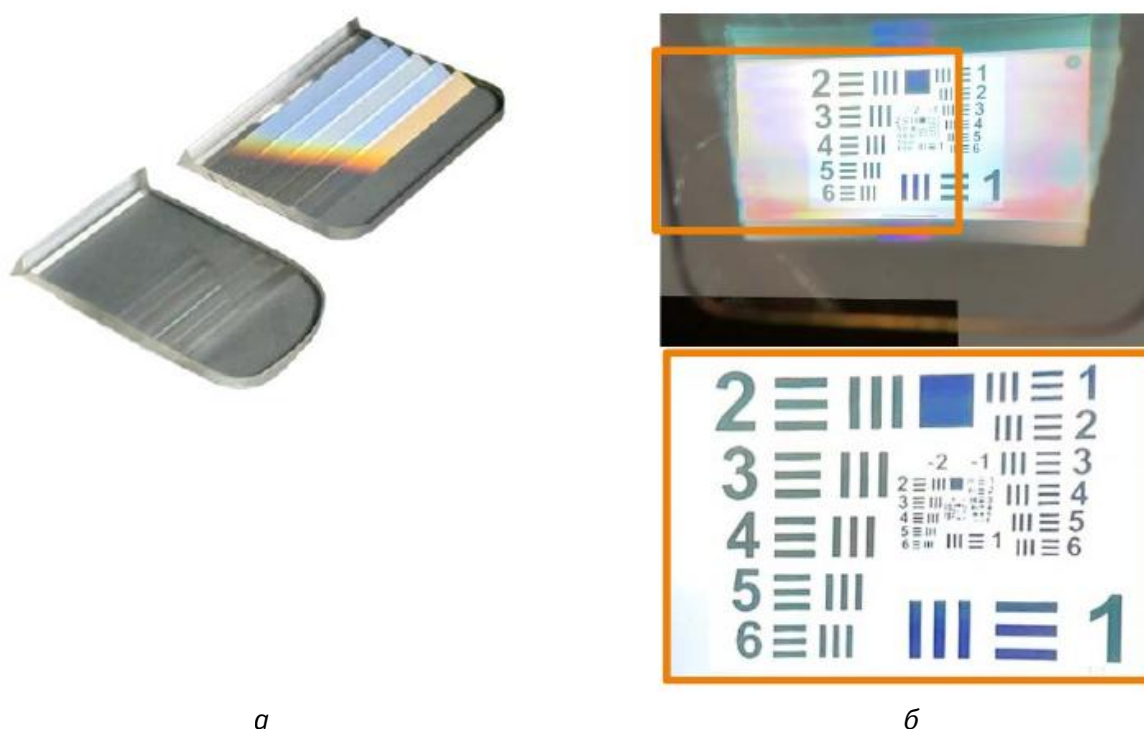


Рис. 3. Технологический процесс изготовления рефрактивного световода

Изготовление светоделительных пластин является наиболее ответственным этапом, поскольку дефект каждой пластины накладывается на итоговое изображение, что приводит к двоению и размытию. Каждая пластина должна обладать клиновидностью менее $5'$, общей ошибкой формы не более 5 колец Ньютона и местной ошибкой не более 0,5 колец Ньютона [5]. После обработки проводят промежуточный контроль формы и только затем наносят отражающие покрытия.



а

б

Рис. 4. Одномерный рефрактивный световод:

а — внешний вид световодов; б — тестовое изображение на выходе световода

Многослойную заготовку формируют путем склейки пластин с помощью двухкомпонентного или УФ-клея, соблюдая порядок коэффициентов отражения. Собранный блок нарезают таким образом, чтобы выдержать угол наклона граней β . В результате из одной заготовки получается несколько составных пластин, которые нуждаются в финальной полировке и обработке по контуру.

Результаты. По предложенной методике рассчитаны и изготовлены одномерные рефрактивные световоды в горизонтальном и вертикальном исполнении со следующими характеристиками: $d = 2$ мм; $N = 5$; $\beta = 30^\circ$. На рис. 4 представлены изготовленные световоды и формируемое с помощью них изображение.

Заключение. В данной работе описан технологический процесс изготовления рефрактивного световода и представлена методика расчета коэффициентов отражения. Согласно расчету, коэффициенты отражения граней световодов имеют следующие значения: $\rho_5 = 0,4$; $\rho_4 = 0,375$; $\rho_3 = 0,273$; $\rho_2 = 0,214$; $\rho_1 = 0,176$. На основе предложенной методики спроектированы и изготовлены рабочие образцы горизонтального и вертикального световодов со следующими характеристиками: $d = 2$ мм; $N = 5$; $\beta = 30^\circ$.

Список источников

- [1] Hou Q., Wang Q., Cheng D., Wang Y. Geometrical waveguide in see-through head-mounted display: a review. *Optical Design and Testing VII*, 2016, vol. 10021, pp. 52–59. <https://doi.org/10.1117/12.2247323>
- [2] Amitai Y. P-27: A Two-Dimensional Aperture Expander for Ultra-Compact, High-Performance Head-Worn Displays. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2005, vol. 36(1), pp. 360–363. <https://doi.org/10.1889/1.2036446>
- [3] Cheng D., Wang Y., Xu C., Song W., Jin G. Design of an ultra-thin near-eye display with geometrical waveguide and freeform optics. *Optics Express*, 2014, vol. 22, pp. 20705–20719. <https://doi.org/10.1364/OE.22.020705>
- [4] Соломашенко А.Б., Афанасьева О.Л., Кузнецов А.С. Особенности разработки составных оптических волноводов для устройства дополненной реальности. *HOLOEXPO 2023: 20-я Междунар. конф. по голографии и прикладным оптическим технологиям: тез. докл.* Санкт-Петербург, Изд-во СБГЭТУ «ЛЭТИ», 2023, с. 179–182.
- [5] Афанасьева О.Л., Соломашенко А.Б. Технологические аспекты изготовления оптических волноводов для устройств дополненной реальности. *Лазеры в науке, технике, медицине. XXXIV Междунар. конф.: сб. тр.* Москва, Московское НТО радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2024, с. 223–225.