
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 535.8, 681.78, 535.44
DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-5-429-435

СИНТЕЗ И АНАЛИЗ СТРУКТУР ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ НА БАЗЕ СВЕТОВОДНОГО КОМБИНЕРА

Л. А. ГУБАНОВА, Р. Е. ЗЕЙГМАН, Т. А. КОНЕВА, Г. Э. РОМАНОВА

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: takoneva@bk.ru*

Представлены результаты синтеза структур интерференционных покрытий, используемых в системе дополненной реальности на базе световодного комбинера, составленного из призм с нанесенными на их грани оригинальными покрытиями. Рассмотрены характеристики покрытий при разных углах падения излучения и рассчитаны структуры покрытий, включающие в себя слои, изготовленные из тугоплавких окислов, обладающих высокой прозрачностью в видимом диапазоне спектра. В результате синтеза получены покрытия, состоящие из слоев неравной и некратной толщины. Показано, что многослойные неравнотолщинные покрытия на базе диэлектрических слоев обеспечивают постоянство коэффициента отражения (пропускания) в рассматриваемом спектральном диапазоне в заданном интервале углов падающего излучения. Приведены результаты моделирования оптической системы, подтверждающие корректность ее работы при наличии разработанных интерференционных покрытий.

Ключевые слова: *световодный комбинер, интерференционные покрытия, диэлектрические слои, непоглощающие слои, коэффициент отражения, диапазон углов падения*

Во многих сферах деятельности человека осуществляется постепенное внедрение систем дополненной реальности. Например, в медицине такие системы могут помочь хирургам во время операций; в военном деле, для тренировок, возможно наложение различных виртуальных объектов на видимую окружающую местность; на производстве можно с помощью очков дополненной реальности демонстрировать дальнейшую последовательность действий, проводя таким образом обучение сотрудников в режиме реального времени. С развитием оптической отрасли и соответствующих технологий растут и потребности пользователей. В связи с этим разработка компактных оптических систем дополненной реальности стала более актуальной, чем когда-либо прежде.

Система дополненной реальности, как правило, состоит из микродисплея, объектива и комбинера. Формируемое объективом виртуальное изображение, полученное от микродисплея, с помощью комбинера накладывается на реальное изображение окружающей действительности. Комбинер играет важнейшую роль, определяя дальнейшую специфику работы системы.

Существуют различные виды оптических комбинеров: сферические и асферические зеркала [1], призмы с поверхностями свободной формы [2, 3], световодные системы [4—6], волноводные системы с дифракционными или голографическими элементами [7, 8].

Наиболее интересным решением представляются световодные и волноводные системы. Волноводные голографические комбинеры, которые используются, например, в очках дополненной реальности Microsoft HoloLens [9], чувствительны как к входному углу падения излучения, так и к длине волны излучения, и поэтому имеют ограниченное поле зрения. В световодных системах возможны различные способы вывода излучения по направлению к глазу человека — при помощи светоделительных слоев [6, 10], а также массивов микропризм или микрозеркал [11]. Световодные комбинеры имеют ряд преимуществ по сравнению с другими вариантами: во-первых, более низкие, относительно других типов комбинеров, затраты на производство; во-вторых, малые вес и размеры (такой комбинер более тонкий — 2...6 мм), что имеет большое значение для пользователя; в-третьих, возможность получения компактной системы с достаточным полем зрения. Однако при расчете световодных систем возникают такие ограничения, как паразитные изображения и „слепые“ зоны, методы устранения которых описаны в работах [5, 12].

В настоящей статье рассматривается световодная система с использованием интерференционных покрытий, так как они представляются наиболее перспективными с точки зрения реализации в условиях российского производства. Один из вариантов организации системы такого типа — использование комбинера, составленного из склеенных между собой призм с нанесенными на их грани оригинальными покрытиями. Показатель преломления используемого клея близок к показателю преломления материала, из которого изготовлены призмы. Такая система имеет малые размеры и может работать как с монохромными, так и с цветными генераторами символов. В последнем случае покрытия должны обеспечивать высокую цветопередачу формируемого изображения в видимой области спектра при условии, что излучение падает на покрытие в заданном диапазоне углов. Принцип работы световодной системы со светоделительными слоями показан на рис. 1, где 1 — широкополосное зеркало, 2—6 — светоделительные покрытия.

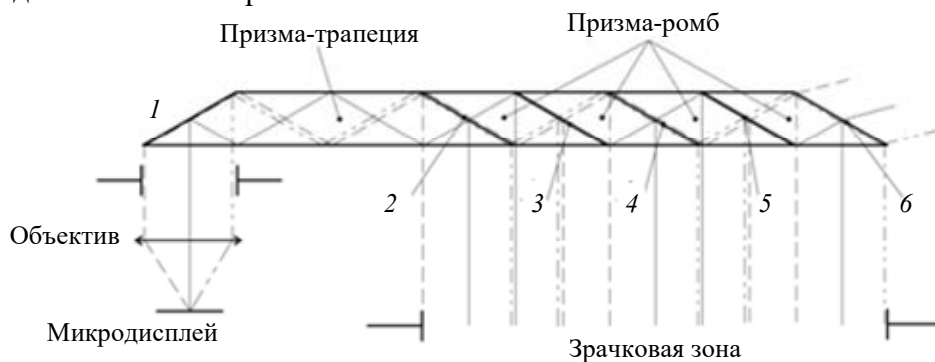


Рис. 1

Несколько светоделительных пластин, которые находятся внутри световода, позволяют обеспечить размер зрачковой зоны (пространство, где расположен глаз пользователя) более 20 мм. Освещенность в зрачковой зоне должна быть равномерной. Для этого необходимо обеспечить равенство световых потоков, выходящих из световодной структуры. При использовании пяти светоделительных пластин покрытия должны иметь следующие характеристики R/T (отражения/пропускания): 0,83/0,17 (покрытие № 2), 0,8/0,2 (№ 3), 0,75/0,25 (№ 4), 0,67/0,33 (№ 5), 0,5/0,5 (№ 6). Если угловое поле системы составляет $2\omega=30^\circ$, входной угол призмы-трапеции $\alpha=30^\circ$, а материал световода — стекло К8, то светоделительные пластины должны корректно работать при углах падения на них излучения, составляющих диапазон $20\text{—}40^\circ$.

Для реализации работы системы необходимо выбрать структуры интерференционных покрытий, спектральные характеристики которых будут обеспечивать функционирование системы в диапазоне длин волн 480—640 нм. При выборе структур покрытий следует учитывать, что данная система может работать, в том числе, и в полевых условиях, что накладывает определенные ограничения на используемые пленкообразующие материалы и метод формирования покрытия.

Исходя из условий эксплуатации, в качестве пленкообразующих материалов были выбраны тугоплавкие окислы: оксид циркония и оксид кремния, покрытия из которых получают методом электронно-лучевого испарения веществ в вакууме. Это обеспечивает высокую механическую и химическую прочность интерференционных покрытий.

Наиболее предпочтительными с точки зрения изготовления являются интерференционные покрытия, состоящие из интерференционных слоев, оптическая толщина которых равна или кратна четверти некоторой (референтной) длины волны. Однако такие покрытия, при условии что они формируются из указанных выше материалов, имеют узкую спектральную область постоянного коэффициента отражения. В связи с этим была проведена оптимизация конструкции интерференционного покрытия с помощью программы OptiLayer в целях достижения постоянства коэффициента отражения в заданном спектральном диапазоне и при требуемых углах падения излучения.

Спектральные характеристики энергетического коэффициента отражения интерференционных покрытий, используемых в качестве светоделительных 2—6, представлены на рис. 2. Покрытия были рассчитаны матричным способом [13, 14]. В ходе исследования использовались интерференционные покрытия на основе непоглощающих для рассматриваемой области спектра материалов. Соответственно значение коэффициента пропускания светового потока, прошедшего через светоделительное покрытие, можно определить как $T=1-R$, где R — коэффициент отражения на грани призмы-ромба, входящей в состав оптической схемы. Спектральные характеристики энергетического коэффициента пропускания интерференционных покрытий, сформированных на элементах 2—6, показаны на рис. 3.

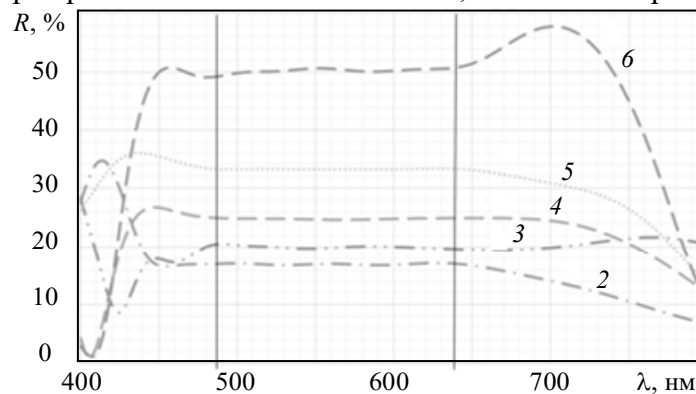


Рис. 2

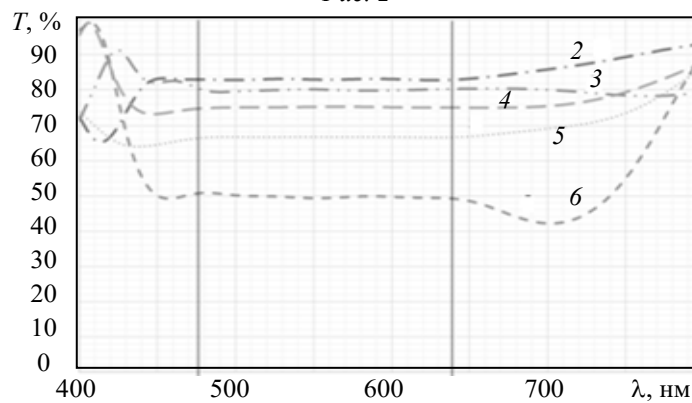


Рис. 3

Основные параметры полученных интерференционных светоделительных покрытий представлены в табл. 1, где h_{\min} и h_{\max} — минимальная и максимальная толщина слоя, входящего в состав покрытия.

Таблица 1

Номер покрытия	Количество слоев	h_{\min} , нм	h_{\max} , нм
2	16	23,403	294,01
3	14	20,491	393,366
4	14	20,429	353,005
5	19	17,574	300,603
6	17	23,557	220,771

Постоянство коэффициента отражения по спектру обеспечивается тем, что в состав интерференционного покрытия входят слои неравной толщины, изготовленные из двух материалов, показатели преломления которых существенно различаются.

Поскольку на каждый из последующих слоев будет падать отличный по интенсивности световой поток, то их спектральные характеристики должны различаться, следовательно, должны различаться и конструкции этих покрытий. Так как в основу покрытия положены интерференционные слои, то при разных углах падения излучения значения энергетического коэффициента отражения одного и того же покрытия будут несколько отличаться. Конструкции светоделительных покрытий подобраны так, что это расхождение не превышает 0,3 %, что для рассматриваемого спектрального диапазона отражено в табл. 2. Для светоделительного покрытия 2 зависимость энергетического коэффициента отражения представлена на рис. 4 как функция от длины волны и угла падающего излучения γ .

Таблица 2

Номер покрытия	Угол падения излучения γ , ...°	Интегральное отражение, %	Интегральное пропускание, %
2	20	17,02	82,98
	30	17,02	82,98
	40	17,02	82,98
3	20	16,58	66,40
	30	16,42	66,56
	40	16,62	66,36
4	20	16,66	49,74
	30	16,53	50,03
	40	16,64	49,72
5	20	16,59	33,15
	30	16,65	33,38
	40	16,58	33,14
6	20	16,60	16,55
	30	16,75	16,62
	40	16,43	16,71

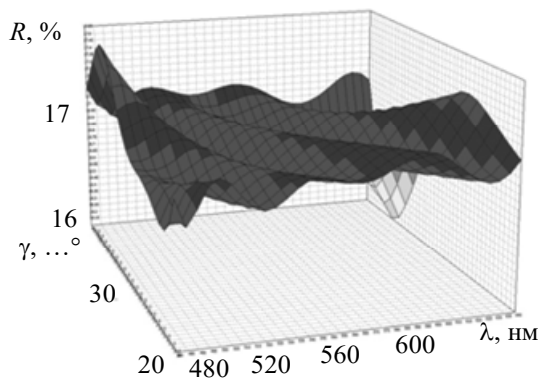


Рис. 4

Полученные в результате исследования покрытия обеспечивают постоянство коэффициента отражения в заданном спектральном диапазоне и минимальный разброс коэффициента отражения (пропускания) при условии падения излучения в некотором интервале углов.

Для оценки эффективности рассчитанных покрытий было выполнено моделирование оптической системы дополненной реальности, состоящей из генератора символов с размером сторон $2,7 \times 3,6$ мм, 4-линзового объектива с вынесенным зрачком и световодной структуры с пятью светоделительными слоями. При этом анализировались освещенность (E) в зрачковой зоне по координате z для осевого пучка в направлении распространения излучения в световоде (рис. 5, *a*) и угловое распределение яркости (L) по полю (рис. 5, *б*) для идеализованных и рассчитанных покрытий (кривые 1 и 2 соответственно).

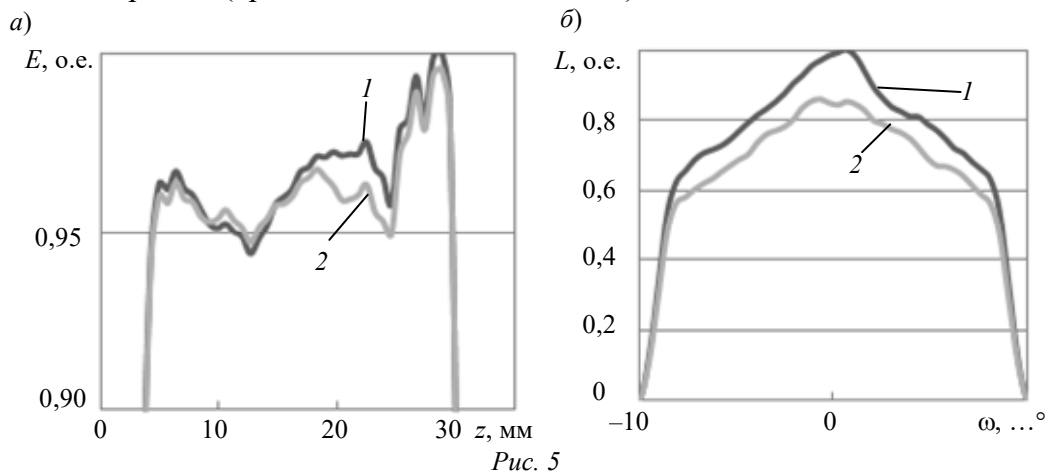


Рис. 5

Анализ приведенных графиков показывает, что кривые освещенности и яркости для разработанных конструкций светоделительных покрытий незначительно отличаются от идеального случая. Это подтверждает, что рассчитанные покрытия, которые имеют незначительные отклонения коэффициента отражения от заданного в рассматриваемом спектральном диапазоне, применимы к световодной системе дополненной реальности и обеспечивают ее корректную работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rolland J. P., Hua H. Head-mounted display systems // Encyclopedia of Optical Engineering. 2005. P. 1—13.
2. Cheng D. et al. Design of an optical see-through head-mounted display with a low f-number and large field of view using a freeform prism // Appl. Optics. 2009. Vol. 48, N 14. P. 2655—2668.
3. Talha M. M. et al. Design, tolerancing and stray light analyses of a freeform HMD optical system // Optik. 2010. Vol. 121, N 8. P. 750—755.
4. Amitai Y. Extremely compact high - performance HMDs based on substrate-guided optical element // SID Symp. Digest of Technical Papers. 2004. Vol. 35, N 1. P. 310—313.
5. Cheng D., Hou Q., Wang Y. Stray light and tolerance analysis of an ultrathin waveguide display // Appl. Optics. 2015. Vol. 54, N 28. P. 8354—8362.
6. Hou Q., Wang Q., Wang Y. Geometrical waveguide in see-through head-mounted display: A review // Proc. SPIE. 2016. Vol. 10021. P. 100210C-1—100210C-8.
7. Kress B., Shin M. Diffractive and holographic optics as optical combiners in head mounted displays // Proc. of the ACM Conf. on Pervasive and Ubiquitous Computing Adjunct Publication. New York, 2013. P. 1479—1482.
8. Kasai I. et al. A practical see-through head mounted display using a holographic optical element // Optical Rev. 2001. Vol. 8, N 4. P. 241—244.
9. Kress B., Cummings W. J. Optical architecture of HoloLens mixed reality headset // Proc. SPIE. 2017. Vol. 10335. P. 103350K—103350K-10.

10. Cheng D., Hou Q., Qiwei W. et al. Design of an ultra-thin near-eye display with geometrical waveguide and freeform optics // *Optics Express*. 2014. Vol. 22, N 17. P. 20705—20719.
11. Xu M., Hua H. Ultrathin optical combiner with microstructure mirrors in augmented reality // *Proc. SPIE*. 2018. Vol. 10676. P. 1067614-1—1067614-15.
12. Романова Г. Э., Васильев В. Н., Конева Т. А. Проектирование оптической системы дополненной реальности на базе световодного комбинера // *Оптический журн.* 2019. Т. 86, № 9. С. 25—29.
13. Губанова Л. А., Путилин Э. С. Оптические покрытия. СПб: Лань, 2016. 268 с.
14. Тихонравов А. В., Трубецков М. К. OptiLayer [Электронный ресурс]: <<https://www.optilayer.com/>>.

Сведения об авторах

- Людмила Александровна Губанова** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; факультет фотоники и оптоинформатики; E-mail: la7777@mail.ru
- Роман Евгеньевич Зейгман** — магистрант; Университет ИТМО; факультет фотоники и оптоинформатики; E-mail: romanbios64@gmail.ru
- Татьяна Александровна Конева** — аспирант; Университет ИТМО; факультет прикладной оптики; E-mail: takoneva@bk.ru
- Галина Эдуардовна Романова** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; факультет прикладной оптики; E-mail: romanova_g_e@mail.ru

Поступила в редакцию
04.02.2020 г.

Ссылка для цитирования: Губанова Л. А., Зейгман Р. Е., Конева Т. А., Романова Г. Э. Синтез и анализ структур интерференционных покрытий для системы дополненной реальности на базе световодного комбинера // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2020. Т. 63, № 5. С. 429—435.

SYNTHESIS AND ANALYSIS OF INTERFERENCE COATING STRUCTURES FOR AN AUGMENTED REALITY SYSTEM BASED ON A LIGHTGUIDE COMBINER

L. A. Gubanova, R. E. Zeigman, T. A. Koneva, G. E. Romanova

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: takoneva@bk.ru

Results of synthesis of interference coating structures used in an augmented reality system based on a lightguide combiner are presented. The lightguide combiner is made up of prisms with original coatings applied to their faces. Optical characteristics of the coatings at different angles of radiation incidence are considered and the structures of the coatings including layers made of refractory oxides with high transparency in the visible spectrum range are calculated. As a result of the synthesis, coatings consisting of layers of unequal and non-multiple thickness are obtained. It is shown that multilayer coatings based on dielectric layers of non-equal thickness provide a constant reflection (transmittance) coefficient in the spectral range of interest for a given range of incident radiation angles. Correct operation of the optical system with developed interference coatings is demonstrated by presented results of computer simulation.

Keywords: lightguide combiner, interference coating, dielectric layers, non-absorbing layers, reflection coefficient, angles of incidence range

REFERENCES

1. Rolland J.P., Hua H. *Encyclopedia of Optical Engineering*, 2005, pp. 1–13.
2. Cheng D. et al. *Applied Optics*, 2009, no. 14(48), pp. 2655–2668.
3. Talha M.M. et al. *Optik*, 2010, no. 8(121), pp. 750–755.
4. Amitai Y. *SID Symp. Digest of Technical Papers*, 2004, no. 1(35), pp. 310–313.
5. Cheng D., Hou Q., Wang Y. *Applied Optics*. 2015, no. 28(54), pp. 8354–8362.
6. Hou Q., Wang Q., Wang Y. *Proceedings SPIE*, 2016, vol. 10021, pp. 100210C-1–100210C-8.
7. Kress B., Shin M. *Proceedings 2013 ACM Conference on Pervasive and ubiquitous computing adjunct publication*, 2013, pp. 1479–1482.
8. Kasai I. et al. *Optical Review*, 2001, no. 4(8), pp. 241–244.
9. Kress B., Cummings W.J. *Proceedings SPIE*, 2017, vol. 10335, pp. 103350K–103350K-10.
10. Cheng D., Hou Q., Qiwei W. et al. *Optics Express*, 2014, no. 17(22), pp. 20705–20719.
11. Xu M., Hua H. *Proc. SPIE*, 2018, vol. 10676, pp. 1067614-1–1067614-15.

12. Romanova G.É., Vasil'ev V.N., Koneva T.A. *Opticheskiy Zhurnal*, 2019, no. 9(86), pp. 25–29. (in Russ.)
13. Gubanova L.A., Putilin E.S. *Opticheskiye pokrytiya* (Optical Coatings), St. Petersburg, 2016, 268 p. (in Russ.)
14. <https://www.optilayer.com>.

Data on authors

- Ludmila A. Gubanova** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Photonics and Optical Information; E-mail: la7777@mail.ru
- Roman E. Zeigman** — Undergraduate Student; ITMO University, Faculty of Photonics and Optical Information; E-mail: romanbios64@gmail.ru
- Tatiana A. Koneva** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Applied Optics; E-mail: takoneva@bk.ru
- Galina E. Romanova** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Applied Optics; E-mail: romanova_g_e@mail.ru

For citation: Gubanova L. A., Zeigman R. E., Koneva T. A., Romanova G. E. Synthesis and analysis of interference coating structures for an augmented reality system based on a lightguide combiner. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 5. P. 429–435 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-5-429-435