

## КОМБИНИРОВАННЫЕ ГОЛОГРАММНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ИНДИКАТОРОВ ЗНАКО-СИМВОЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Одиноков С.Б., Жердев А.Ю., Колочкин В.В., Соломашенко А.Б.  
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

### Аннотация

В статье предложен комбинированный голограммный оптический элемент для оптических систем многоцветных индикаторов знако-символьной информации. Данный элемент сочетает в себе функции четырёхуровневых дифракционных решёток с повышенной дифракционной эффективностью и спектральных плазмонных фильтров с изменяемой полосой пропускания в зависимости от угла падения излучения. Проведённые теоретические исследования свидетельствуют о возможности объединения двух типов элементов в одной комбинированной структуре.

**Ключевые слова:** голографический индикатор, дифракционный оптический элемент, многоуровневая дифракционная решётка, плазмонная решётка, дифракционная эффективность.

### Введение

В настоящее время одним из перспективных практических применений «плоской» оптики является разработка голограммных и дифракционных оптических элементов (ГОЭ-ДОЭ) с бинарным и многоуровневым поверхностным рельефом, а также создание на их базе приборов и устройств [1]. ГОЭ-ДОЭ в сочетании со световодными пластинами стали использоваться в миниатюрных системах отображения информации, что вывело их на качественно новый этап развития, позволив существенно снизить массогабаритные параметры систем отображения и визуализации, особенно в системах для автомобилей и вертолётов, где наблюдаемое изображение перекрывается с реальной сценой [2–4, 8, 9].

Работа голографических индикаторов в различных климатических условиях обуславливает необходимость подбора специального фоточувствительного материала для получения ГОЭ или его защиты либо получения ГОЭ-ДОЭ непосредственно в стекле. Вместе с тем при разработке подобных систем на данный момент остро стоит проблема повышения дифракционной эффективности ГОЭ, необходимой для возможности использования менее мощных и соответственно габаритных систем подсвета источника формирования изображения вплоть до возможности перехода на OLED-дисплеи [5]. Также на данный момент актуальной является задача получения многоцветного изображения с помощью голографического индикатора, т.е. создания ГОЭ-ДОЭ с необходимой спектрально-угловой селективностью. Таким образом, разработка нового типа комбинированных голограммных оптических элементов с повышенной дифракционной эффективностью и спектрально-угловой селективностью на различных фоточувствительных материалах и на стекле позволит решить отдельные задачи создания нового поколения устройств отображения знако-символьной информации на основе голограммных оптических элементов и световодных пластин.

### 1. Схема комбинированного голограммного оптического элемента

Структурная схема индикатора знако-символьной информации представлена на рис. 1. Основным компонентом индикатора является оптическое устрой-

во вывода знако-символьной информации оператору, которое закрепляется непосредственно на голове пилота, бойца, мотоциклиста и т.п. В состав устройства отображения входят: источник изображения, формирующий необходимую оператору знако-символьную информацию; оптическая система, коллимирующая пучки лучей, которые вводятся в световодную пластину с ДОЭ, а затем передаются оператору.

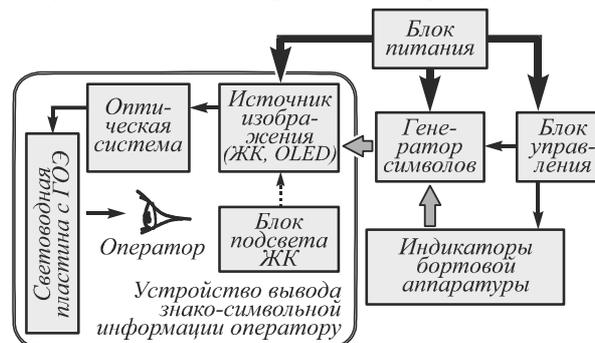


Рис. 1. Структурная схема оптического индикатора знако-символьной информации с комбинированным голограммным оптическим элементом

Таким образом, основным отличительным элементом голографического индикатора является стеклянная пластина, в которой излучение может распространяться под действием полного внутреннего отражения (ПВО), с нанесёнными на поверхность дифракционными решётками (ДР) для ввода и вывода излучения из пластинки [6–9]. Существенным недостатком таких рельефно-фазовых решёток является их невысокая дифракционная эффективность [6, 7], а также то, что получаются они в слое фоточувствительного материала, который не всегда обладает удовлетворительными эксплуатационными характеристиками. Таким образом, необходимо рассмотреть возможность получения ДР непосредственно в стекле [11, 12]. В работах [13, 14] описаны высокоэффективные бинарные ДОЭ, полученные в слоях фото- или электронного резиста. Для обеспечения же повышенной дифракционной эффективности ДОЭ, полученных непосредственно в стекле, необходимо прибегнуть к дискретизации поверхностного микрорельефа ДОЭ, т.е. получать не бинарные, а многоуровневые структуры [12], как показано на рис. 2.

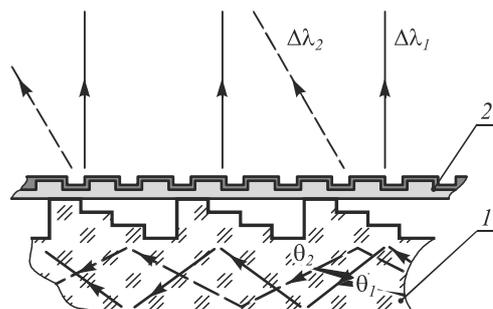


Рис. 2. Схема комбинированного двухкомпонентного ДОО-ГОО, состоящего из плазмонного фильтра 2- и 4-уровневой дифракционной решётки 1

Согласно [10] достаточно всего 4 уровней дискретизации поверхностного микрорельефа, чтобы повысить дифракционную эффективность вдвое по сравнению с использованием бинарных структур. Таким образом, в качестве ГОЭ для индикатора знакосимвольной информации будут использованы ДР, полученные непосредственно в стекле, а их повышенная эффективность будет достигаться за счёт получения нескольких уровней дискретизации пилообразного поверхностного микрорельефа решётки.

Решение проблемы получения многоцветных изображений в индикаторах возможно за счёт использования спектральных фильтров, селекционирующих падающее на ДОО-ГОО излучение по длинам волн. В работах [15–17, 20, 21] представлены пропускающие спектральные фильтры с высокой эффективностью. Однако только фильтры, представляющие собой металлическую ДР [20], могут работать с достаточно большими апертурами углов падения излучения, что важно именно для реализации работы голографического индикатора. Использование плазмонных эффектов в тонких металлодиэлектрических плёнках [20–25] позволяет создавать широкополосные и узкополосные спектральные фильтры с регулируемой полосой пропускания при изменении угла падения входного света. Применение таких спектральных фильтров в новом поколении миниатюрных приборов и систем индикации и отображения информации позволяет дополнительно обеспечить в них необходимую спектрально-угловую селективность проходящего или отражённого излучения, что, в свою очередь, позволяет создавать цветные (многоцветные) изображения.

Схема комбинированного двухкомпонентного ГОЭ, состоящего из четырёхуровневой ДР, выполняющей функцию вывода пучков излучения из световодной пластины, и металлизированной ДР, выполняющей спектральную селекцию излучения, представлена на рис. 2. При этом рассматривалась следующая модель: излучение распространяется под действием полного внутреннего отражения внутри подложки, выполненной из стекла с показателем преломления 1,51, как показано на рис. 2. При попадании на дифракционную решётку из пластинки в сторону оператора выводится первый порядок дифракции излучения. Дифракционная решётка имеет период  $d$ , равный 0,49 мкм [9], а её поверхностный микрорельеф

состоит из 4 уровней. Далее излучение первого порядка дифракции попадает на спектральный фильтр. В качестве пропускающего фильтра, как было описано выше, будет выступать металлическая прямоугольная решётка, у которой спектр пропускания в нулевом порядке дифракции зависит от угла падения излучения. В зависимости от угла падения полихроматического излучения плазмонный фильтр селекционирует ту или иную спектральную составляющую излучения, выводимого решёткой из световода.

## 2. Теоретические исследования

Дифракционную эффективность любой дифракционной структуры можно определить с помощью уравнений Максвелла. Существует большое количество работ, посвящённых строгому решению прямой задачи дифракции электромагнитного излучения на периодических структурах [27, 28]. В данной работе для определения параметров ДР будет использоваться метод Фурье-мод, являющийся одним из наиболее распространённых и универсальных методов [26, 29–34]. Реализация метода Фурье-мод была проведена в программной среде MATLAB, для чего была написана соответствующая программа. Данная программа решает прямую задачу дифракции плоской волны на прямоугольных ДР, что позволяет проводить анализ исследуемых структур, получать спектральные характеристики и энергетические параметры в различных порядках дифракции.

Для вывода излучения из пластинки необходимо обеспечить максимальную дифракционную эффективность, поэтому построим график зависимости дифракционной эффективности решётки от глубины рельефа для различного числа уровней дискретизации поверхностного рельефа ДР.

Как видно из рис. 3, максимальная дифракционная эффективность решётки достигается, когда число уровней дискретизации поверхностного рельефа решётки больше восьми.

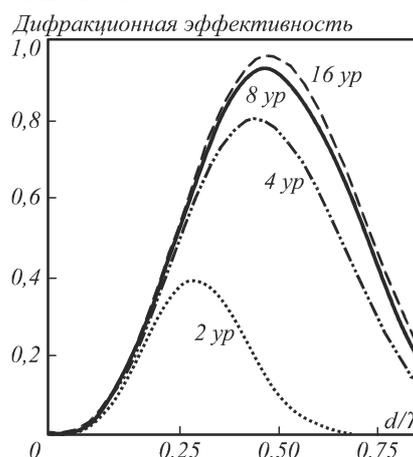


Рис. 3. Зависимость дифракционной эффективности ДР с 2-, 4-, 8- и 16-уровневым профилем микрорельефа от глубины микрорельефа

Технологически изготовить в стекле решётку с 8 и более уровнями дискретизации достаточно сложно, по-

этому остановимся на четырёх уровнях. При этом теоретически можно получить дифракционную эффективность в два раза выше, чем в случае бинарного рельефа.

Одним из способов реализации спектрального фильтра на основе работ [20, 21] является четырёхслойный плазмонный фильтр, состоящий из стеклянной подложки, слоя фоторезиста с меандровой решёткой, покрытой слоем серебра и  $\text{SiO}_2$ .

Меандровую структуру удобнее получить в слое резиста или на стекле с помощью технологии электронно-лучевой литографии и ионно-плазменного травления, соответственно именно для такой структуры ниже будут исследованы основные параметры. В дальнейшем данную структуру можно получать методом гальванического копирования и тиражирования на тонких плёнках.

Исходя из зависимостей, полученных на рис. 4 и рис. 5, можно сделать вывод, что оптимальными параметрами спектрального фильтра, входящего в состав комбинированного ГОЭ, являются меандровая структура с периодом 0,45 мкм на подложке из стекла с  $n = 1,51$  с высотой решётки 35 нм, металлизированная серебром слоем 40 нм. В этом случае ширина спектрального пика не превышает 40–50 нм. Изменение высоты решётки и толщины слоя серебра приводит к уменьшению коэффициента пропускания фильтра и уширению спектра проходящего излучения.

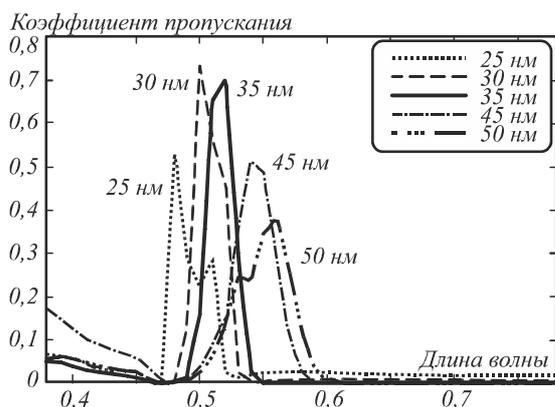


Рис. 4. Зависимость относительной интенсивности проходящего излучения от высоты меандровой решётки

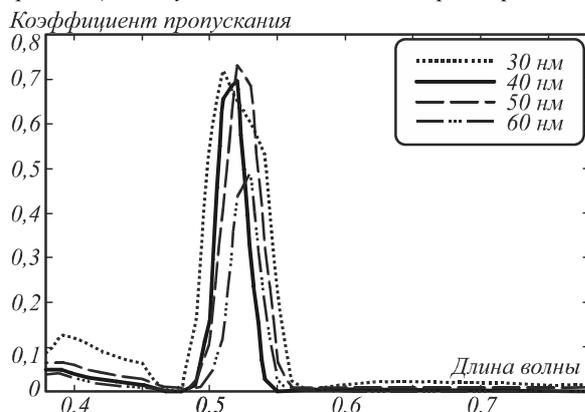


Рис. 5. Зависимость относительной интенсивности проходящего излучения от толщины слоя серебра

На рис. 6 представлены зависимости относительной интенсивности проходящего излучения в зависимости от угла падения излучения на спектральный плазмонный фильтр. Исходя из графика, наблюдается чёткое соответствие длины волны проходящего излучения и угла его падения на фильтр, что даёт возможность получения многоцветного изображения с помощью применения комбинированных ГОЭ в голографических индикаторах.

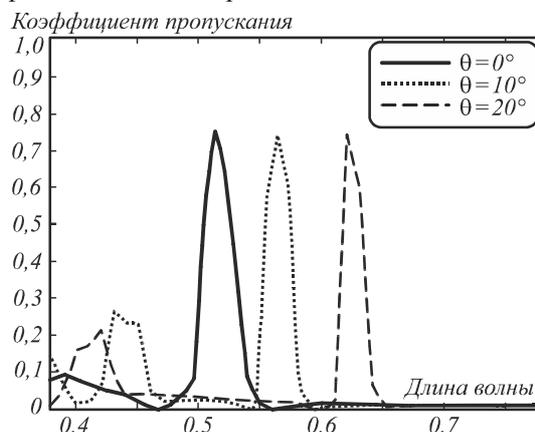


Рис. 6. Зависимость относительной интенсивности отражённого излучения угла его падения на пропускающий плазмонный фильтр

### Заключение

Соединение в комбинированных голограммных оптических элементах функций многоуровневых дифракционных оптических элементов с повышенной дифракционной эффективностью и спектральных фильтров с изменяемой полосой пропускания в зависимости от угла падения излучения является новым направлением развития для миниатюрных систем индикации и отображения информации. Для анализа таких элементов был использован метод фурье-мод для решения уравнений Максвелла, который предполагает реализацию программного обеспечения для решения прямой задачи дифракции плоской электромагнитной волны на меандровой структуре. Благодаря данной программе были определены основные параметры комбинированного элемента и выявлены зависимости между ними для четырёхуровневой дифракционной решётки, а также спектрального фильтра на основе металлизированной решётки, из которых и состоит комбинированный голограммный оптический элемент. Полученные теоретические результаты свидетельствуют о возможности применения такого типа комбинированного голограммного оптического элемента в индикаторах знако-символьной информации.

### Благодарности

Исследование выполнено в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации: соглашение №14.574.21.0066 от 27 июня 2014 года (идентификатор проекта RFMEFI57414X0066).

*Литература*

1. Методы компьютерной оптики / А.В. Волков, Д.Л. Головашкин, Л.Д. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Соيفер, В.С. Соловьев, Г.В. Успенев, С.И. Харитонов, С.Н. Хонина. – Под ред. В.А. Соифера. – Изд. 2-е, испр. – М.: Физматлит, 2003. – 688 с.
2. **Казанский, Н.Л.** Моделирование гиперспектрометра на спектральных фильтрах с линейно-изменяющимися параметрами / Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов, С.Н. Хонина, С.Г. Вологовский, Ю.С. Стрелков // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, №3. – С. 256-270. – ISSN 0134-2452.
3. **Казанский, Н.Л.** Формирование изображений дифракционной многоуровневой линзой / Н.Л. Казанский, С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов, А.А. Морозов, С.И. Харитонов, С.Г. Вологовский // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 425-434. – ISSN 0134-2452.
4. **Якимов, П.Ю.** Предварительная обработка цифровых изображений в системе локализации и распознавания дорожных знаков / П.Ю. Якимов // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 37, № 3. – С. 401-405. – ISSN 0134-2452.
5. **Aslanov, E.R.** Design of an optical element forming an axial line segment for efficient LED lighting systems / E.R. Aslanov, L.L. Doskolovich, M.A. Moiseev, E.A. Bezus, N.L. Kazanskiy // Optics Express. – 2013. – Vol. 21(23). – P. 28651-28656.
6. **Eisen, L.** Planar configuration for image projection / L. Eisen, M. Meyklyar, M. Golub, A. Friesem, I. Gurwich, V. Weiss // Applied Optics. – 2006. – Vol. 45. – P. 4005-4011.
7. **Eisen, L.** Design and experiments of planar optical light guides for virtual image displays/ L. Eisen, M. Meyklyar, A. Friesem, I. Gurwich, V. Weiss // Proceedings of SPIE. – 2003. – Vol. 5182. – P. 205-221.
8. **Cameron, A.** Optical Waveguide Technology & Its Application In Head Mounted Displays / A. Cameron // Proceedings of SPIE. – 2012. – Vol. 8383. – P. 83830E.
9. **Одиноков, С.Б.** Оптическая схема получения голографического индикатора для отображения знаково-символьной информации / С.Б. Одиноков, В.В. Маркин, Д.С. Лушников, А.С. Кузнецов, Е.А. Дроздова, А.Б. Соломашенко // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана; серия «Приборостроение». – 2012. – № 8. – С. 158-166 – ISSN 0236-3933.
10. **Swanson, G.J.** Binary Optics Technology: Theoretical Limits on the Diffraction Efficiency of Multilevel Diffractive Optical Elements Technical Report Lincoln Laboratory / G.J. Swanson. – Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1991. – 28 p.
11. **Одиноков, С.Б.** Создание ДОО для формирования точечных эталонных изображений в оптических системах / С.Б. Одиноков, Г.Р. Сагатеян, М.С. Ковалёв, А.Б. Соломашенко, Е.А. Дроздова // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 3. – С. 341-351. – ISSN 0134-2452.
12. **Волков, А.В.** Исследование технологии плазменного травления для получения многоуровневых дифракционных оптических элементов / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Е. Рыбаков // Компьютерная оптика. – 1998. – Вып. 18. – С. 127-130. – ISSN 0134-2452.
13. **Golub, M.A.** Computer generated diffractive multi-focal lens / M.A. Golub, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // Journal of Modern Optics. – 1992. – Vol. 39(6) – P. 1245-1251.
14. **Soifer, V.A.** Multifocal diffractive elements / V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // Optical Engineering. – 1994. – Vol. 33(11). – P. 3610-3615.
15. **Yoon, Y.T.** Color filter incorporating a subwavelength patterned grating in poly silicon / Y.T. Yoon, H.S. Lee, S.S. Lee, S.H. Kim, J.D. Park, K.D. Lee // Optics Express. – 2008. – Vol. 16(4). – P. 2374-2380.
16. **Cho, E.H.** Two-dimensional photonic crystal color filter development / E.H. Cho, H.S. Kim, B.H. Cheong, O. Prudnikov, W. Xianyua, J.S. Sohn, D.J. Ma, H.Y. Choi, N.C. Park, Y.P. Park // Optics Express. – 2009. – Vol. 17(10). – P. 8621-8629.
17. **Kanamori, Y.** Fabrication of Transmission Color Filters Using Silicon Subwavelength Gratings on Quartz Substrates / Y. Kanamori, M. Shimono, K. Hane // IEEE Photonics Technology Letters. – 2006. – Vol. 18(20). – P. 2126-2128.
18. **Казанский, Н.Л.** Использование волноводного резонанса для создания нанооптических спектральных пропускающих фильтров / Н.Л. Казанский, П.Г. Серафимович, С.Б. Попов, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 2. – С. 162-168. – ISSN 0134-2452.
19. **Doskolovich, L.L.** Design and investigation of color separation diffraction gratings / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, N. Heikkila, S. Siitonen, J. Turunen // Applied Optics. – 2007. – Vol. 46(15). – P. 2825-2830.
20. **Fu, L.** Optical properties of metallic meanders / L. Fu, H. Schweizer, T. Weiss, H. Giessen // Journal of the Optical Society of America B. – 2009. – Vol. 26. – P. B111-B119.
21. **Ozaki, M.** Surface-Plasmon Holography with White-Light Illumination / M. Ozaki, J. Kato, S. Kawata // Science. – 2011. – Vol. 332(6026). – P. 218-220.
22. **Ye, Y.** Color filter based on a two-dimensional submicrometer metal grating / Y. Ye, Y. Zhou, L. Chen // Applied Optics. – 2009. – Vol. 48. – P. 5035-5039.
23. **Bezus, E.A.** Design of diffractive lenses for focusing surface plasmons / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, S.I. Kharitonov // Journal of Optics. – 2010. – Vol. 12(1). – P. 015001.
24. **Bezus, E.A.** Scattering suppression in plasmonic optics using a simple two-layer dielectric structure / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // Applied Physics Letters. – 2011. – Vol. 98(22). – P. 221108.
25. **Bezus, E.A.** Low-scattering surface plasmon refraction with isotropic materials / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // Optics Express. – 2014. – Vol. 22(11). – P. 13547-13554.
26. **Moharam, M.G.** Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings / M.G. Moharam, E.B. Grann, D.A. Pommet, T.K. Gaylord // Journal of the Optical Society of America A. – 1995. – Vol. 12. – P. 1068-1076.
27. Дифракционная компьютерная оптика / Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Соифер, С.Н. Хонина. – М.: Физматлит, 2010. – 736 с.
28. **Golovashkin, D.L.** Solving diffractive optics problem using graphics processing units / D.L. Golovashkin, N.L. Kazanskiy // Optics Memory and Neural Networks (information optics). – 2011. – Vol. 20(2). – P. 85-89.
29. **Bykov, D.A.** Extraordinary magneto-optical effect of a change in the phase of diffraction orders in dielectric diffraction gratings / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, V.A. Soifer, N.L. Kazanskiy // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2010. – Vol. 111(6). – P. 967-974.
30. **Безус, Е.А.** Формирование интерференционных картин затухающих электромагнитных волн для наноразмерной литографии с помощью волноводных дифракционных решеток / Е.А. Безус, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский // Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41, № 8. – С. 759-764.
31. **Kazanskiy, N.L.** Cloud computing for nanophotonic simulations // N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich // Lecture Notes in Computer Science. – 2013. – Vol. 7715. – P. 54-67.
32. **Kazanskiy, N.L.** Cloud computing for rigorous coupled-wave analysis // N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich // Advanced in Optical Technologies. – 2012. – Vol. 2012. – 7 p.
33. **Moharam, M.G.** Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach / M.G. Moharam, E.B. Grann, D.A. Pommet, T.K. Gaylord // Journal of the Optical Society of America A. – 1995. – Vol. 12. – P. 1077-1086.
34. **Li, L.** Use of Fourier series in the analysis of discontinuous periodic structures / L. Li // Journal of the Optical Society of America A. – 1996. – Vol. 13. – P. 1870-1876.

## References

1. Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements / V.A. Soifer, V.V. Kotlyar, N.L. Kazanskiy, L.L. Doskolovich, S.I. Kharitonov, S.N. Khonina, V.S. Pavelyev, R.V. Skidanov, A.V. Volkov, D.L. Golovashkin, V.S. Solovyev, G.V. Usplenyev. – Ed. by V.A. Soifer. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002. – 765 p.
2. **Kazanskiy, N.L.** Simulation hyperspectrometer on spectral filters with linearly varying parameters / N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy, Y.S. Strelkov // *Computer Optics*. – 2014. – Vol. 38(3). – P. 256-270. – ISSN 0134-2452.
3. **Kazanskiy, N.L.** Formation of images using multilevel diffractive lens / N.L. Kazanskiy, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, A.A. Morozov, S.I. Kharitonov, S.G. Volotovskiy // *Computer Optics*. – 2014. – Vol. 38(3). – P. 425-434. – ISSN 0134-2452.
4. **Yakimov, P.Y.** Preprocessing of digital images in systems of location and recognition of road signs / P.Y. Yakimov // *Computer Optics*. – 2014. – Vol. 37(3). – P. 401-405. – ISSN 0134-2452.
5. **Aslanov, E.R.** Design of an optical element forming an axial line segment for efficient LED lighting systems / E.R. Aslanov, L.L. Doskolovich, M.A. Moiseev, E.A. Bezus, N.L. Kazanskiy // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21(23). – P. 28651-28656.
6. **Eisen, L.** Planar configuration for image projection / L. Eisen, M. Meyklyar, M. Golub, A. Friesem, I. Gurwich, V. Weiss // *Applied Optics*. – 2006. – Vol. 45. – P. 4005-4011.
7. **Eisen, L.** Design and experiments of planar optical light guides for virtual image displays/ L. Eisen, M. Meyklyar, A. Friesem, I. Gurwich, V. Weiss // *Proceedings of SPIE*. – 2003. – Vol. 5182. – P. 205-221.
8. **Cameron, A.** Optical Waveguide Technology & Its Application In Head Mounted Displays / A. Cameron // *Proceedings of SPIE*. – 2012. – Vol. 8383. – P. 83830E.
9. **Odinokov, S.B.** Optical scheme for obtaining the holographic indicator of signs and symbolic information / S.B. Odinokov, V.V. Markin, D.S. Lushnikov, A.S. Kuznetsov, E.A. Drozdova, A.B. Solomashenko // *Vestnik BMSTU, Priborostroenie*. – 2012. – Vol. 8. – P. 158-166. – ISSN 0236-3933. – (In Russian).
10. **Swanson, G.J.** Binary Optics Technology: Theoretical Limits on the Diffraction Efficiency of Multilevel Diffractive Optical Elements Technical Report Lincoln Laboratory / G.J. Swanson. – Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1991. – 28 p.
11. **Odinokov, S.B.** Creation of DOE to form the calibration dot patterns inside the optical systems / S.B. Odinokov, G.R. Sagatelyan, M.S. Kovalev, A.B. Solomashenko, E.A. Drozdova // *Computer Optics*. – 2013. – Vol. 37(3). – P. 341-351. – ISSN 0134-2452.
12. **Volkov, A.V.** Study plasma etching technology for multilevel diffractive optical elements / A.V. Volkov, N.L. Kazanskiy, O.E. Rybakov // *Computer Optics*. – 1998. – Vol. 18. – P. 27-130. – (In Russian).
13. **Golub, M.A.** Computer generated diffractive multi-focal lens / M.A. Golub, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // *Journal of Modern Optics*. – 1992. – Vol. 39(6) – P. 1245-1251.
14. **Soifer, V.A.** Multifocal diffractive elements / V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // *Optical Engineering*. – 1994. – Vol. 33(11). – P. 3610-3615.
15. **Yoon, Y.T.** Color filter incorporating a subwavelength patterned grating in poly silicon / Y.T. Yoon, H.S. Lee, S.S. Lee, S.H. Kim, J.D. Park, K.D. Lee // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16(4). – P. 2374-2380.
16. **Cho, E.H.** Two-dimensional photonic crystal color filter development / E.H. Cho, H.S. Kim, B.H. Cheong, O. Prudnikov, W. Xianyua, J.S. Sohn, D.J. Ma, H.Y. Choi, N.C. Park, Y.P. Park // *Optics Express*. – 2009. – Vol. 17(10). – P. 8621-8629.
17. **Kanamori, Y.** Fabrication of Transmission Color Filters Using Silicon Subwavelength Gratings on Quartz Substrates / Y. Kanamori, M. Shimono, K. Hane // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2006. – Vol. 18(20). – P. 2126-2128.
18. **Kazanskiy, N.L.** Using guided-mode resonance to design nano-optical spectral transmission filters / N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich, S.B. Popov, S.N. Khonina // *Computer Optics*. – 2010. – Vol. 34(2). – P. 162-168. – ISSN 0134 – 2452. – (In Russian).
19. **Doskolovich, L.L.** Design and investigation of color separation diffraction gratings / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, N. Heikkila, S. Siitonen, J. Turunen // *Applied Optics*. – 2007. – Vol. 46(15). – P. 2825-2830.
20. **Fu, L.** Optical properties of metallic meanders / L. Fu, H. Schweizer, T. Weiss, H. Giessen // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2009. – Vol. 26. – P. B111-B119.
21. **Ozaki, M.** Surface-Plasmon Holography with White-Light Illumination / M. Ozaki, J. Kato, S. Kawata // *Science*. – 2011. – Vol. 332(6026). – P. 218-220.
22. **Ye, Y.** Color filter based on a two-dimensional submicrometer metal grating / Y. Ye, Y. Zhou, L. Chen // *Applied Optics*. – 2009. – Vol. 48. – P. 5035-5039.
23. **Bezus, E.A.** Design of diffractive lenses for focusing surface plasmons / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, S.I. Kharitonov // *Journal of Optics*. – 2010. – Vol. 12(1). – P. 015001.
24. **Bezus, E.A.** Scattering suppression in plasmonic optics using a simple two-layer dielectric structure / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // *Applied Physics Letters*. – 2011. – Vol. 98(22). – P. 221108.
25. **Bezus, E.A.** Low-scattering surface plasmon refraction with isotropic materials / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22(11). – P. 13547-13554.
26. **Moharam, M.G.** Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings / M.G. Moharam, E.B. Grann, D.A. Pommet, T.K. Gaylord // *Journal of the Optical Society of America A*. – 1995. – Vol. 12. – P. 1068-1076.
27. *Diffraction computer optics* / D.L. Golovashkin, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.V. Kotlyar, V.S. Pavelyev, R.V. Skidanov, V.A. Soifer, S.N. Khonina. – Moscow: "Fizmatlit" Publisher, 2010. – 736 p. – (In Russian).
28. **Golovashkin, D.L.** Solving diffractive optics problem using graphics processing units / D.L. Golovashkin, N.L. Kazanskiy // *Optics Memory and Neural Networks (information optics)*. – 2011. – Vol. 20(2). – P. 85-89.
29. **Bykov, D.A.** Extraordinary magneto-optical effect of a change in the phase of diffraction orders in dielectric diffraction gratings / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, V.A. Soifer, N.L. Kazanskiy // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 2010. – Vol. 111(6). – P. 967-974.
30. **Bezus, E.A.** Formation of interference patterns damped electromagnetic waves for nanoscale lithography using waveguide gratings / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // *Quantum Electronics*. – 2011. – Vol. 41(8). – P. 759-764. – (In Russian).
31. **Kazanskiy, N.L.** Cloud computing for nanophotonic simulations // N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2013. – Vol. 7715. – P. 54-67.
32. **Kazanskiy, N.L.** Cloud computing for rigorous coupled-wave analysis // N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich // *Advanced in Optical Technologies*. – 2012. – Vol. 2012. – 7 p.
33. **Moharam, M.G.** Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach / M.G. Moharam, E.B. Grann, D.A. Pommet, T.K. Gaylord // *Journal of the Optical Society of America A*. – 1995. – Vol. 12. – P. 1077-1086.
34. **Li, L.** Use of Fourier series in the analysis of discontinuous periodic structures / L. Li // *Journal of the Optical Society of America A*. – 1996. – Vol. 13. – P. 1870-1876.

## COMBINED HOLOGRAPHIC OPTICAL ELEMENTS FOR CHARACTER/SYMBOL DISPLAY DEVICES

*S.B. Odinokov, A.Y. Zherdev, V.V. Kolyuchkin, A.B. Solomashenko  
Bauman Moscow State Technical University*

### Abstract

Combined holographic optical elements for optical systems of multicolor character/symbol display devices are described. This element combines the functions of four-level diffractive optical elements with high diffraction efficiency and spectral plasmon filters with a variable bandwidth depending on the incidence angle. The theoretical studies suggest the feasibility of combining the two types of elements in a single structure.

*Key words:* holographic display, diffractive optical element, multilevel diffraction grating, plasmon grating, diffraction efficiency.

### Сведения об авторах



**Одинок Сергей Борисович**, 1950 года рождения, в 1973 году окончил Московское высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана (МВТУ, ныне Московский государственный технический университет – МГТУ им. Н.Э. Баумана) по специальности «Оптико-электронные приборы». Доктор технических наук (2011 год), профессор, работает в должности профессора кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специалист в области оптико-голографических систем.

E-mail: [odinokov@bmstu.ru](mailto:odinokov@bmstu.ru).

**Sergey Borisovich Odinokov** (b. 1950) graduated (1973) from Moscow Higher Technical School (presently, Bauman named Moscow State Technical University), majoring in Optoelectronic Devices. He received his Doctor of Technical Sciences (2011) degree from Bauman Moscow State University. Occupies the position of professor of Laser and Optoelectronic Systems department of BMSTU. Current research interests include the optical holographic systems.



**Жердев Александр Юрьевич**, 1987 года рождения, окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2011 г. с присуждением квалификации инженера по специальности «Оптико-электронные приборы и системы». Аспирант кафедры лазерных и оптико-электронных систем. Область научных интересов – оптико-электронные приборы и голографические системы.

E-mail: [zherdev@bmstu.ru](mailto:zherdev@bmstu.ru).

**Alexander Yuryevich Zherdev** (b. 1987), graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2011 with qualification of engineer on Optoelectronic Devices and Systems. Post-graduate on the Laser and Optical-Electronic Systems department of Bauman MSTU. Current research interests include the optical and electronic devices and systems.



**Колочкин Василий Васильевич**, 1988 года рождения, окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2012 г. с присуждением квалификации инженера по специальности «Оптико-электронные приборы и системы». Аспирант кафедры лазерных и оптико-электронных систем. Область научных интересов – оптико-электронные приборы и системы.

E-mail: [vasilykolyuchkin@gmail.com](mailto:vasilykolyuchkin@gmail.com).

**Vasily Vasilevich Kolyuchkin** (b. 1987), graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2012 with qualification of engineer on Optoelectronic devices and systems. Post graduate on the Laser and Optical-Electronic Systems department of Bauman MSTU. Current research interests include the optical and electronic and holographic systems.



**Соломашенко Артём Борисович**, 1987 года рождения, окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2010 г. с присуждением квалификации инженера по специальности «Оптико-электронные приборы и системы». Аспирант кафедры лазерных и оптико-электронных систем. Область научных интересов – оптико-электронные приборы и голографические системы.

E-mail: [art\\_s87@mail.ru](mailto:art_s87@mail.ru).

**Artem Borisovich Solomashenko** (b. 1987), graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2010 with qualification of engineer on "Optoelectronic Devices and Systems". Post graduate on the Laser and Optical-Electronic Systems department of Bauman MSTU. Current research interests include the optical and electronic devices and holographic systems.

*Поступила в редакцию 8 сентября 2014 г.*