

ИССЛЕДОВАНИЕ УЗКОПОЛОСНОГО ФИЛЬТРА СИНЕГО СВЕТА ДЛЯ БЕЛЫХ СВЕТОДИОДОВ

Надежда Федоровна Чайка

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотоники и приборостроения, тел. (913)911-88-72, e-mail: chayka@triwe.net

Данила Владимирович Семенов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, обучающийся кафедры фотоники и приборостроения, тел. (999)451-12-94, e-mail: priteqwa@gmail.com

В данной работе исследованы свойства разработанного оптического фильтра, который отсекает часть диапазона синего света в спектре белого светодиода, оказывающего вредное воздействие на человеческий глаз. Разработанный фильтр позволяет отразить до 30 % синего света в диапазоне от 435 до 440 нм.

Ключевые слова: опасность синего света, фильтр синего света, метод игольчатых вариаций, полоса пропускания, отсекающий фильтр, комбинация слоев фильтра.

STUDYING NARROW-BAND BLUE LIGHT FILTER FOR WHITE LEDS

Nadezhda F. Chayka

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (913)911-88-72, e-mail: chayka@triwe.net

Danila V. Semenov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Student, Photonics and Device Engineering, phone: (999)451-12-94, e-mail: priteqwa@gmail.com

In this paper, we investigated the properties of the developed optical filter, that cuts off part of the blue light range in the spectrum of a white LED, which is harmful to the human eye. The developed filter allows reflecting up to 30 % of blue light in the range from 435 to 440 nm.

Key words: blue light hazard, blue light filter, needle variation method, bandwidth, low pass filter, combination of filter layers.

Введение

Видимый свет – электромагнитное излучение, воспринимаемое человеческим глазом, – принадлежит интервалу от 380 до 760 нм. На долю синего света приходится участок приблизительно от 380 до 500 нм с центром на 460 нм [1, 2].

С появлением энергосберегающих светодиодных источников света применение ламп накаливания и люминесцентных ламп неуклонно снижается. В спектре излучения светодиодов имеются мощные высокие пики в области синего света. Светодиоды широко используются для дисплеев смартфонов и планшетов, экранов телевизоров, в результате в последние годы время воздействия синего света на глаза людей резко возросло [3].

Продолжительное воздействие синего света вызывает усталость глаз, приводит к снижению остроты зрения, синдрому сухого глаза и светобоязни [4]. Синий свет имеет наиболее короткую длину волны и, следовательно, высокую энергию фотонов. Он сильнее воздействует на зрительные клетки сетчатки глаза и в большей степени вызывает утомление глаз и фотофобию, чем длинноволновое излучение [5].

При длительном воздействии синего света в организме увеличивается количество свободных от кислорода радикалов, наносящих ущерб зрительным клеткам вследствие цитотоксичности, и запускающих некроз клеток, что способствует развитию рака, ретинопатии, катаракты и макулярной дегенерации [6].

По данным Американской медицинской ассоциации опасность видимого синего света наиболее высока в диапазоне длин волн от 435 до 440 нм [7]. В связи с этим представленная работа посвящена разработке многослойного узкополосного интерференционного фильтра, резко снижающего светопропускание коротковолнового излучения названного участка спектра как наиболее вредного для глаз человека.

Многослойный тонкопленочный фильтр на прозрачной подложке может быть спроектирован различными методами в зависимости от его назначения (поляризационный фильтр, поглощающий, отражающий) [8, 9]. Рассматриваемый узкополосный фильтр работает на отражение в узком заданном диапазоне длин волн и пропускает остальной свет в видимой части спектра. Для разработки покрытий были выбраны два материала с сильно отличающимися (высоким и низким) показателями преломления [10].

Теоретическое обоснование метода проектирования

Для потенциально опасного синего света устанавливается предел воздействия. В случае, если время экспозиции t составляет порядка 10^{-4} с, максимальная яркость синего света не должна быть выше уровня, определенного формулой [7, 11]:

$$L_B = \int_{300}^{700} L_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda \leq \frac{10^6}{t}, \quad (1)$$

где L_B – максимальная яркость, Вт/м²·срад;

L_λ – спектральное излучение, Вт/м²·срад;

$B(\lambda)$ – функция риска негативного воздействия (рис. 1);

$\Delta\lambda$ – ширина полосы излучения, нм;
 t – время, секунд.

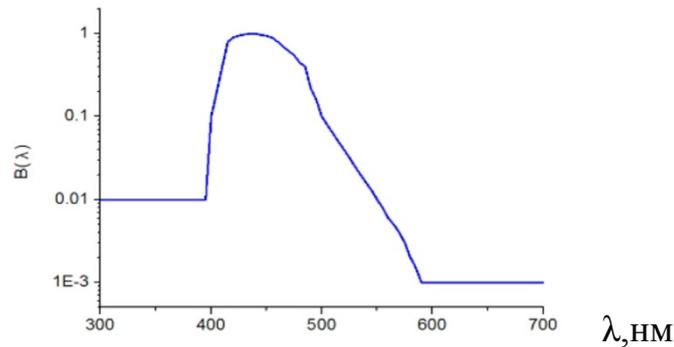


Рис. 1. Функция риска

Если время воздействия t не превышает 10^{-4} с, излучение ограничивается пределами диапазона значений:

$$L_B = \int_{300}^{700} L_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda \leq 100. \quad (2)$$

Наибольшее допустимое время воздействия t_{max} максимальной яркости L_B , превышающей $100 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{срад}$, определяется следующим образом:

$$t_{max} = \frac{10^6}{L_B}. \quad (3)$$

Рассмотрим разработку фильтра с использованием двух материалов. Для получения узкой рабочей полосы покрытия при проектировании выберем материалы с достаточно большой разницей показателей преломления. Фильтр будет образован определенной комбинацией слоев материалов, повторяющейся заданное число раз. Комбинация слоев составлена, как показано ниже [11]:

Воздух

$$\frac{p}{2} N_L q N_H \frac{p}{2} N_L, \quad (4)$$

Подложка

где m – количество комбинаций слоев;

N_H и N_L – слои, толщиной $\lambda/4$, с высоким и низким показателями преломления;

n_H и n_L – высокий и низкий показатели преломления;

p и q – четвертьволновые коэффициенты, определяемые по формуле $p+q=2$.

Общая ширина полосы отражения определяется следующим образом [11]:

$$\Delta\lambda_0 = \frac{2}{\pi} \frac{\sqrt{C^2 - 1} \cdot \sin(\pi p)}{\left[(C + 1) - (1 - 4p)^2 (C - 1) \cos(2\pi p) \right]} \lambda_0; \quad (5)$$

$$C = \frac{\frac{n_L}{n_H} + \frac{n_H}{n_L}}{2}, \quad \lambda_0 = \frac{\lambda}{2},$$

где λ_0 – середина полосы отражения;

λ – опорная длина волны, для которой выбираются показатели преломления материалов.

Из формулы (2) видно, что ширина полосы отражения зависит от отношения n_H и n_L и значения p . Если p приближается к 1, то ширина полосы стремится к нулю. Коэффициент отражения на длине волны λ_0 имеет следующий вид [12, 13]:

$$R(\lambda) = \frac{a_{11}^2 (n_a - n_{sub})^2 + a^2 (n_a n_{sub} \beta + 1) a_{12}^2}{a_{11}^2 (n_a + n_{sub})^2 + a^2 (1 - n_a n_{sub} \beta) a_{12}^2}; \quad (6)$$

$$a_{11} = 0,5 \left[(1 + \sqrt{\beta a})^{-n} + (1 - \sqrt{\beta a})^{-n} \right]; \quad (7)$$

$$a_{12} = \frac{0,5 \left[(1 - \sqrt{\beta a})^{-n} - (1 + \sqrt{\beta a})^{-n} \right]}{\sqrt{\beta a}}; \quad (8)$$

$$\beta = \frac{1}{n_L \cdot n_H}, \quad a = \pi(1 - p)(n_H - n_L), \quad (9)$$

где n_a и n_{sub} – показатели преломления воздуха и подложки (светодиода) соответственно.

Диапазон пропускания лежит в пределах от λ_1 до λ_2 , за исключением полосы отражения. λ_1 и λ_2 рассчитываются по следующим формулам [10]:

$$\lambda_1 = \frac{\lambda}{3} + \frac{\frac{2}{9} \lambda \sin^{-1} \left[\frac{(n_H - n_L)}{(n_H + n_L)} \right]}{\pi}; \quad (10)$$

$$\lambda_2 = \lambda - \frac{2\lambda \sin^{-1} \left[\frac{(n_H - n_L)}{(n_H + n_L)} \right]}{\pi}. \quad (11)$$

Разработка, оптимизация и оценка результатов

В качестве материалов для покрытий фильтра были выбраны фторид магния MgF_2 и сульфид цинка ZnS , а в качестве подложки выбрано стекло BK7. Оптические константы материалов взяты из справочных источников [14–16].

Опорная длина волны λ составляет 874 нм и образует полосу отражения с серединой на длине волны λ_0 , равной 437,5 нм. Показатели преломления ZnS и MgF_2 на опорной длине волны принимают значения 2,3036 и 1,3861 соответственно. Полоса пропускания в таком случае находится в интервале от λ_1 равному 307 нм до λ_2 равному 735 нм согласно формулам (10) и (11).

Ширина полосы отражения $\Delta\lambda_0$ была выбрана равной 5,9 нм. По формуле (5) определяется коэффициент p , равный 0,9875. Таким образом, базовая конструкция выглядит, как показано ниже:

$$\text{подложка} / (0,49375L \ 1,0125H \ 0,49375L)^m / \text{воздух}.$$

Для упрощения конструкции фильтра при изготовлении число комбинаций m выбрано равным пяти:

$$\text{подложка} / (0,49375L \ 1,0125H \ 0,49375L)^5 / \text{воздух}.$$

Расчетные толщины покрытий MgF_2 и ZnS составляют 54,004 и 110,7422 нм соответственно.

На рис. 2 представлен график коэффициента отражения такого фильтра в окне программы *Open Filters* [17]. Как видно, полученная полоса отражения заметно шире расчетной. Это объясняется тем, что при выведении расчетных формул был принят ряд допущений [10, 13].

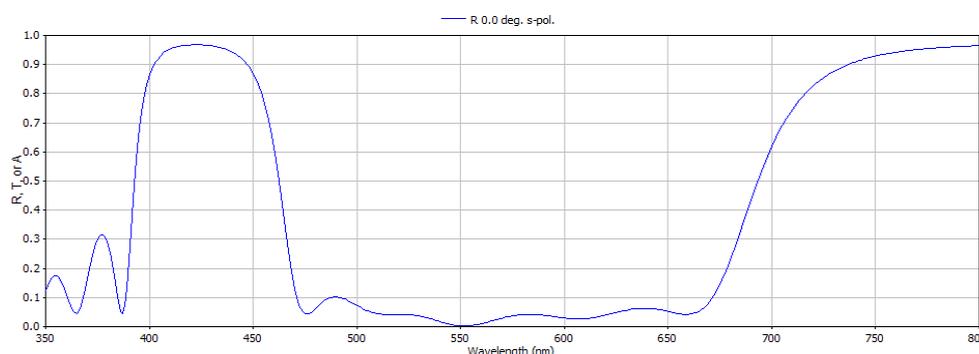


Рис. 2. График отражения структуры вида:
подложка / (0,49375L 1,0125H 0,49375L)⁵ / воздух

Полученный фильтр можно оптимизировать программными средствами для приближения к требуемому результату. Для этой цели были использованы возможности программы *Open Filters* [18], в которой, в частности, реализована оптимизация методом «игольчатых вариаций» [19, 20]. При оптимизации задается требование (*target*), в котором указываются желаемые (*ideal*) характеристики фильтра. В ходе оптимизации программа может изменять толщины слоев фильтра, их порядок и количество. Оптимизированный фильтр может содержать слои довольно малой толщины, что заметно затрудняет его изготовление, поэтому после оптимизации слишком тонкие слои удаляются из структуры фильтра. Если после этого характеристики фильтра остаются удовлетворительными, оптимизация считается успешной.

На рис. 3 представлен первый вариант оптимизации фильтра. Структура фильтра представлена на рис. 4.

Полученный фильтр состоит из четырнадцати слоев, минимальная толщина слоя – 9,45 нм, середина диапазона – на 436 нм, полоса отражения – куполообразная в диапазоне от 420 до 455 нм, максимальное отражение – 31 %.

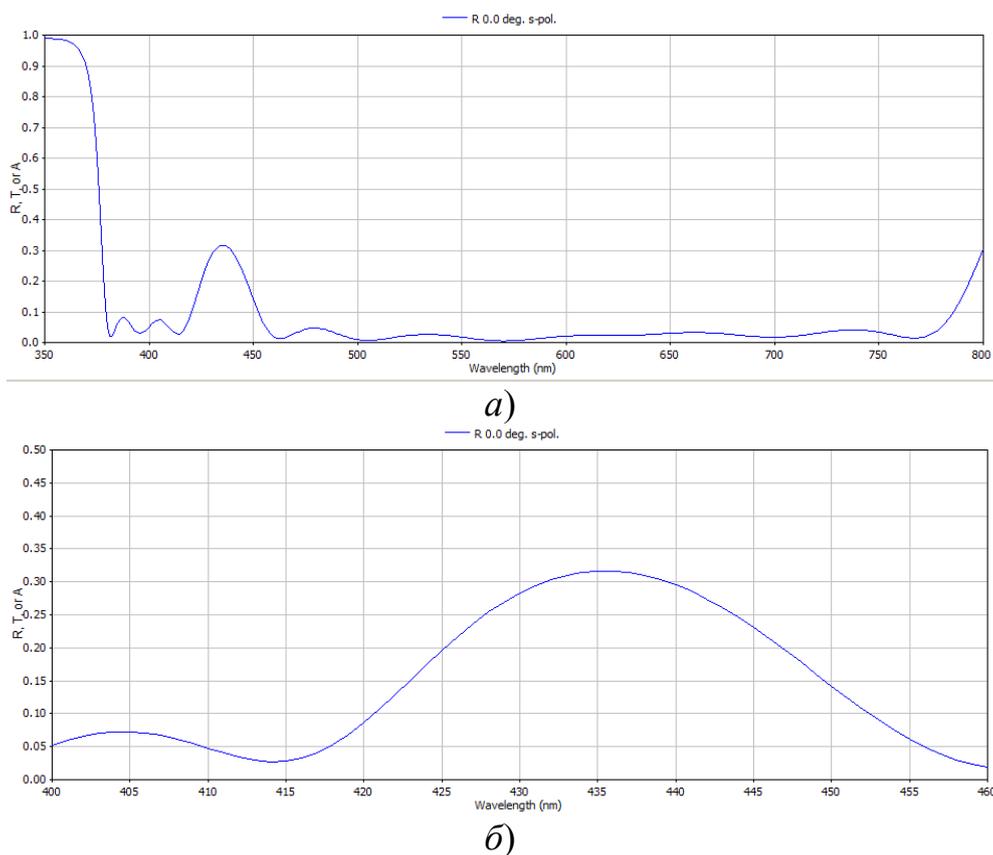


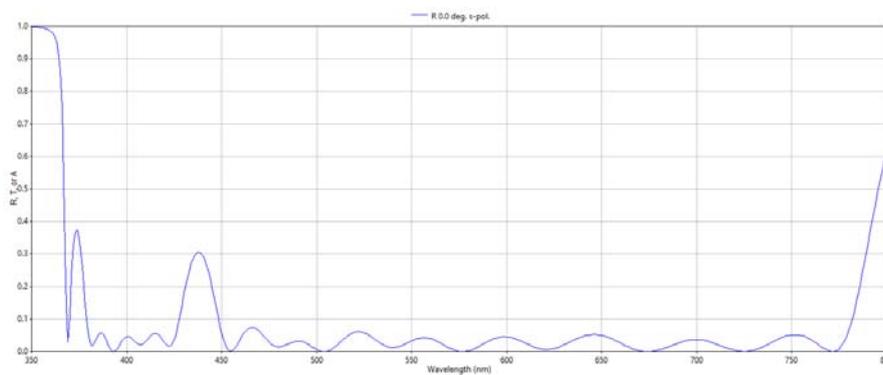
Рис. 3. График отражения оптимизированного фильтра. Первый вариант:
а) в масштабе видимого диапазона; б) в увеличенном масштабе

	Material	Thickness (nm)	Index
1	ZnS	108.366	2.3036
2	MgF2_n_e	180.858	1.3861
3	ZnS	27.877	2.3036
4	MgF2_n_e	13.433	1.3861
5	ZnS	58.697	2.3036
6	MgF2_n_e	187.878	1.3861
7	ZnS	98.993	2.3036
8	MgF2_n_e	178.449	1.3861
9	ZnS	106.532	2.3036
10	MgF2_n_e	159.186	1.3861
11	ZnS	9.446	2.3036
12	MgF2_n_e	16.912	1.3861
13	ZnS	96.282	2.3036
14	MgF2_n_e	95.040	1.3861

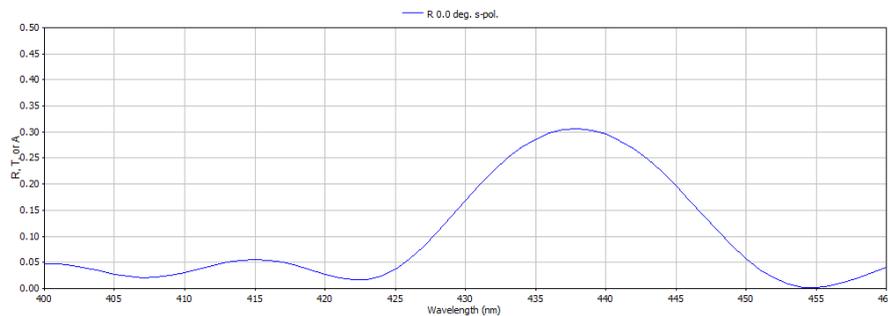
Рис. 4. Структура оптимизированного фильтра. Первый вариант

Второй вариант оптимизации уменьшает ширину полосы отражения за счет увеличения числа слоев, и в том числе слоев с довольно малой толщиной. Результат представлен на рис. 5 и 6.

В этом варианте фильтр состоит из 24 слоев, минимальная толщина слоя составляет 6,75 нм, имеется четыре слоя тоньше 10 нм, середина диапазона отражения приходится на 437,5 нм, полоса отражения куполообразная в диапазоне от 427 до 450 нм, максимальный коэффициент отражения равен 30 %.



а)



б)

Рис. 5. График отражения оптимизированного фильтра. Второй вариант:

а) в масштабе видимого диапазона; б) в увеличенном масштабе

	Material	Thickness (nm)	Index		Material	Thickness (nm)	Index
1	ZnS	105.830	2.3036	13	ZnS	104.038	2.3036
2	MgF2_n_e	30.903	1.3861	14	MgF2_n_e	174.631	1.3861
3	ZnS	7.489	2.3036	15	ZnS	18.196	2.3036
4	MgF2_n_e	119.533	1.3861	16	MgF2_n_e	9.793	1.3861
5	ZnS	10.875	2.3036	17	ZnS	89.737	2.3036
6	MgF2_n_e	17.476	1.3861	18	MgF2_n_e	39.599	1.3861
7	ZnS	90.526	2.3036	19	ZnS	17.785	2.3036
8	MgF2_n_e	178.561	1.3861	20	MgF2_n_e	86.652	1.3861
9	ZnS	97.107	2.3036	21	ZnS	6.746	2.3036
10	MgF2_n_e	176.947	1.3861	22	MgF2_n_e	250.997	1.3861
11	ZnS	100.629	2.3036	23	ZnS	6.804	2.3036
12	MgF2_n_e	167.978	1.3861	24	MgF2_n_e	131.627	1.3861

Рис. 6. Структура оптимизированного фильтра. Второй вариант

На рис. 7 представлены диаграммы цветности стекла BK7 с фильтром и без него. Координаты цветности в области с самой высокой яркостью определены при $x_r = 0,310$, $y_r = 0,327$, $x_t = 0,313$, $y_t = 0,329$ в стекле BK7 и $x_r = 0,229$, $y_r = 0,165$, $x_t = 0,318$, $y_t = 0,339$ в стекле BK7 с фильтром.

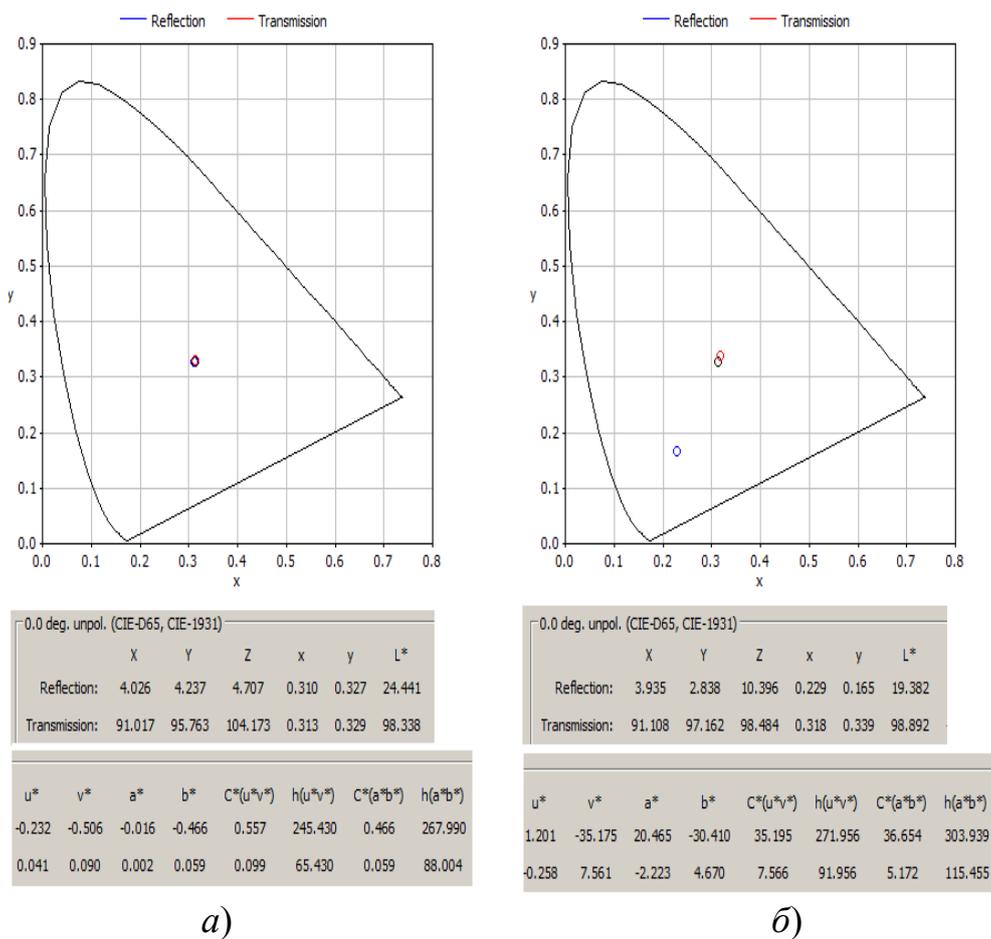


Рис. 7. Распределение цветности на диаграмме:

a) стекло BK7 без фильтра; б) стекло BK7 с фильтром синего света

Заключение

Разработанный фильтр позволяет отразить до 30 % синего света в заданном диапазоне от 435 до 440 нм. В самом простом варианте фильтр может состоять из четырнадцати слоев из двух материалов с толщиной слоя не менее 9 нм, что позволяет сделать достаточно простым технологический процесс его изготовления. Результаты исследования могут быть применены как к внутренним источникам света, так и к светодиодам, в зависимости от необходимости использования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kitchel E. The effects of blue light on ocular health // *Journal of Visual Impairment and Blindness*. – 2000. – V. 94. – P. 399–403.
2. Чайка Н. Ф., Дроздецкий Р. С. Разработка спектрофотометра для определения колориметрических характеристик поверхностей // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.)*. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 132–135.
3. Salvi S., Akhtar S., Currie Z. Ageing changes in the eye // *Postgraduate Medical Journal*. – 2006. – V. 82. – P. 581–587.
4. Хацевич Т. Н. Медицинские оптические приборы. Физиологическая оптика : учеб. пособие. – Новосибирск : СГГА, 2010. – 135 с.
5. Rozanowska M., Sarna T. Light-induced damage to the retina: Role of rhodopsin chromophore revisited // *Photochemistry and Photobiology*. – 2005. – V. 81. – P. 1305–1330.
6. Brockmann C., Schulz M., Laube T. Transmittance characteristics of ultraviolet and blue-light-filtering intraocular lenses // *Journal of Cataract and Refractive Surgery*. – 2008. – V. 34. – P. 1161–1166.
7. Marshall J.C.A., Gordon K.D., McCauley C.S., Souza Filho J.P., Burnier M.N. The effect of blue light exposure and use of intraocular lenses on human uveal melanoma cell lines // *Melanoma Research*. – 2000. – V. 16. – P. 537–541.
8. Ефремов В. С., Шлишевский В. Б. Оптические материалы и ахроматическая коррекция типовых компонентов оптических систем : учеб. пособие. – Новосибирск : СГГА, 2013. – 284 с.
9. Jones S. E., Hosein H. R., Swalm G. R., Yablonsky J. F. Occupational hygiene management guide. – USA : Lewis Publ, 1990. – P. 186–189.
10. Baumeister P. W. Optical coating technology. – USA : SPIE Optical Engineering Press, 2004. – P. 9–11.
11. Zhang J., Xie Y., Cheng X., Jiao H., Wang Z. Thin-film thickness-modulated designs for optical minus filter // *Applied Optics*. – 2013. – V. 52. – P. 5788–5793.
12. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP Guidelines on Limits of Exposure to Incoherent Visible and Infrared Radiation // *Health Physics*. – 2013. – V. 105. – P. 74–96.
13. Котликов Е. Н., Варфоломеев Г. А., Лавровская Н. П., Тропин А. Н., Хонина Е. В. Проектирование, изготовление и исследование интерференционных покрытий : учеб. пособие. – СПб. : ГУАП, 2009. – 189 с.
14. Amotchkina T. V. Analytical estimations for the reflectance wavelength reflectance and width of high-reflection zone of two-material periodic multilayers // *Applied Optics*. – 2013. – V. 52. – P. 4590–4595.
15. Palik E. D. Handbook of Optical Constants of Solids. – Academic, 1985. – 804 p.
16. Palik E. D. Handbook of Optical Constants of Solids II. – Academic. 1991. – 1096 p.

17. RefractiveIndex.INFO. Refractive index database [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.refractiveindex.info/?shelf=glass&book=BK7&page=SCHOTT> (дата обращения: 18.05.2019).
18. Functional coating and surface engineering laboratory [Electronic resource]. – Mode of access : <https://www.polymtl.ca/larfis/en/links> (дата обращения: 18.05.2019).
19. Tikhonravov A. V., Trubetskov M. K., DeBell G. W. Optical coating design approaches based on the needle optimization technique // *Applied Optics*. – 2007. – V. 46. – P. 704–710.
20. Sullivan B. T., Dobrowolski J. A. Implementation of a numerical needle method for thin-film design // *Applied Optics*. – 1996. – V. 35. – P. 5484–5492.

© Н. Ф. Чайка, Д. В. Семенов, 2019