

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-01-101-107

УДК 535.417

Коррекция спектральной характеристики при изготовлении полосовых многослойных диэлектрических фильтров

Вадим Николаевич Прокашев

Научно-производственное предприятие «Риэлта», Санкт-Петербург, Россия

vnprokashev@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0005-8135-5739>

Аннотация

Предмет исследования. Оптические многослойные диэлектрические полосовые фильтры. **Цель работы.** Разработка методики коррекции искажений спектральной характеристики, вызванных случайными отклонениями толщины слоев при напылении фильтра. **Метод.** Рассмотрена достаточно простая методика коррекции случайных отклонений толщины предыдущих слоев намеренным изменением толщины последующих в структурах сложных составных полосовых фильтров. **Основные результаты.** На примере практической реализации двух составных полосовых фильтров показаны применение данной методики и возможность почти полной коррекции искажений спектральной характеристики. **Практическая значимость.** Предложенная методика последовательной коррекции искажений спектральной характеристики многослойного диэлектрического полосового фильтра позволяет эффективней достигать желаемого результата и значительно снижать количество брака при изготовлении таких фильтров, особенно их больших партий.

Ключевые слова: многослойные интерференционные покрытия, вакуумное напыление, синтез полосовых фильтров

Ссылка для цитирования: Прокашев В.Н. Коррекция спектральной характеристики при изготовлении полосовых многослойных диэлектрических фильтров // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 1. С. 101–107. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-01-101-107>

Коды OCIS: 310.4165, 310.1620

Correction of spectral characteristics in the manufacture of bandpass multilayer dielectric filters

VADIM N. PROKASHEV

Research and Production Enterprise "Rielta", St. Petersburg, Russia

vnprokashev@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0005-8135-5739>

Abstract

Subject of study. Optical multilayer dielectric bandpass filters. **Aim of the work.** Development of a technique for correcting distortions in the spectral characteristics caused by random deviations in layer thicknesses during filter deposition. **Method.** For the structures of complex composite bandpass filters, a fairly simple technique for correcting random deviations in the thicknesses of previous layers by deliberately changing the thickness of subsequent layers is considered.

Main results. Using the example of the practical implementation of two composite bandpass filters, the application of this technique and the possibility of almost complete correction of distortions of the spectral characteristic are shown. **Practical significance.** The proposed method of sequential correction of distortions in the spectral characteristics of the multilayer dielectric bandpass filter makes it possible to more effectively achieve the desired result and significantly reduce the amount of defects in the manufacture of such filters, especially large batches of filters.

Keywords: multilayer interference coatings, vacuum deposition, synthesis of bandpass filters

For citation: Prokashev V.N. Correction of spectral characteristics in the manufacture of bandpass multilayer dielectric filters [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 1. P. 101–107. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-01-101-107>

OCIS codes: 310.4165, 310.1620

ВВЕДЕНИЕ

Оптические многослойные диэлектрические полосовые фильтры [1–4] в современной оптико-электронной технике имеют множество применений. Но при их изготовлении, т.е. нанесении многослойного покрытия в вакууме, возникают некоторые трудности, главной из которых является точность совпадения спектральной характеристики изготовленного фильтра с предварительно рассчитанным спектром. При корректном численном расчете и правильно выбранных дисперсионных характеристиках используемых веществ [5–7] искажение спектральной характеристики пропускания происходит из-за отклонений оптической толщины наносимых слоев. Небольшие отклонения толщины слоев, возникающие при изготовлении, вызванные различными причинами, могут сильно искажать спектральную характеристику фильтра. Если в случае простого полосового фильтра с одним резонансным слоем малые отклонения толщины вызывают в основном смещение длины волны максимума пропускания фильтра, то в случае более сложных конструкций спектральная характеристика искажается очень сильно. Не касаясь технических и аналитических разработок и усовершенствований [8–12], повышающих точность нанесения слоя заданной толщины, в настоящей работе представляется оригинальная методика последовательного напыления покрытия, когда погрешности нанесения в предыдущих слоях компенсируются изменением толщины последующих. Надо сказать, что предварительная оптимизация структуры фильтра с целью повышения устойчивости к случайным отклонениям, описанная, например, в публикации [13] для отрезающих

фильтров, в случае полосовых фильтров почти невозможна. В какой-то степени похожий метод коррекции, предусматривающий нанесение дополнительных слоев на готовую структуру, упоминался в работе [14], где он использовался для увеличения пропускания отрезающих фильтров. В случае сложных полосовых фильтров предлагаемый в настоящей статье способ напыления показывает очень хороший результат и значительно снижает количество брака.

Целью работы, результаты которой изложены в статье, являлась разработка методики коррекции искажений спектральной характеристики, вызванных случайными отклонениями толщины слоев при напылении фильтра.

СТРУКТУРА МНОГОСЛОЙНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА

Простой оптический интерференционный фильтр [1–4] с максимумом пропускания на длине волны λ_0 состоит из двух зеркал с прозрачным слоем оптической толщиной $\lambda_0/2$ между ними. Ширина полосы пропускания главным образом зависит от коэффициента отражения зеркал. Структура многослойного диэлектрического фильтра может быть такой: $S(HL)^n H 2LH(LH)^n$, где S — подложка, H — слой оптической толщиной $\lambda_0/4$ с высоким показателем преломления, L — слой оптической толщиной $\lambda_0/4$ с низким показателем преломления. Спектр пропускания подобного фильтра со структурой $(HLH)2L(HLH)$ приведен на рис. 1.

В расчетных данных и далее в экспериментальной реализации рассматривался полосовой фильтр с пропусканием на длине волны 7,94 мкм. При изготовлении использовались

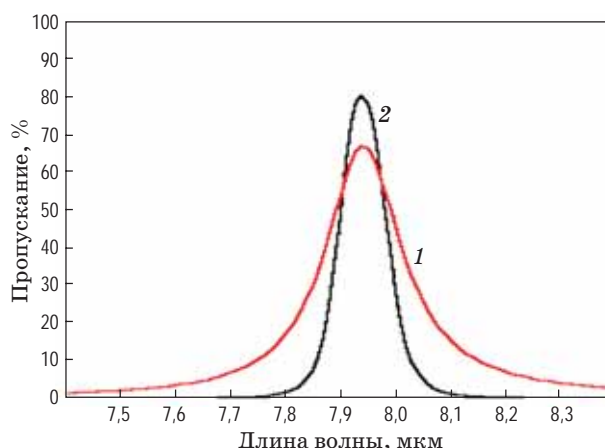


Рис. 1. Профили пропускания центрального максимума простого (1) и составного (2) фильтров
Fig. 1. Transmission profiles of the central maximum of (1) simple and (2) compound filters

следующие вещества: пленка PbTe (показатель преломления $n = 5,5$) — слой H с высоким показателем преломления, пленка ZnS ($n = 2,0$) [5–7] — слой L с низким показателем преломления — эта пара веществ часто используется для изготовления оптических покрытий на область среднего инфракрасного диапазона спектра, и Si ($n = 3,4$) — подложка S.

Основным недостатком такого простого фильтра, точнее, его оптической характеристики, является не очень большая крутизна боковых крыльев спектральной кривой максимума пропускания. С этой точки зрения привлекательнее выглядит кривая спектра пропускания более сложного составного фильтра. Спектральная кривая такого составного фильтра со структурой (HLH)2L(HLH)L(HLH)2L(HLH) также представлена на рис. 1. Спектральная характеристика подобного фильтра имеет более выраженную П-образную форму, большую крутизну боковых крыльев, меньшее пропускание в зоне подавления.

ОТКЛОНЕНИЕ ТОЛЩИНЫ СЛОЕВ И ВОЗМОЖНОСТЬ КОРРЕКЦИИ

В реальном процессе изготовления многослойного фильтра всегда имеют место отклонения толщины напыляемых слоев от заданной в рассчитанной структуре. Ошибки оператора, изменение индикатрисы испарителя

в процессе напыления, изменения режима распыления пленкообразующего вещества [15, 16] — все это может приводить к случайным отклонениям толщины наносимого слоя. В случае простого фильтра малые отклонения толщины слоев от расчетной толщины приводят в основном к смещению длины волны максимума пропускания. Но в случае составного фильтра небольшие отклонения толщины особенно в резонансных слоях (слои толщиной $\lambda_0/2$) могут привести к сильному искажению спектральной характеристики.

На рис. 2 приведены спектральная кривая пропускания исходного фильтра со структурой (HLH)2L(HLH)L(HLH)2L(HLH), а также спектральная характеристика такого же фильтра с небольшим отклонением толщины второго резонансного слоя (HLH)2L(HLH)L(HLH)1,97L(HLH). Из рисунка видно, что 1,5%-ые отклонения толщины слоя вызывают сильное искажение спектральной характеристики.

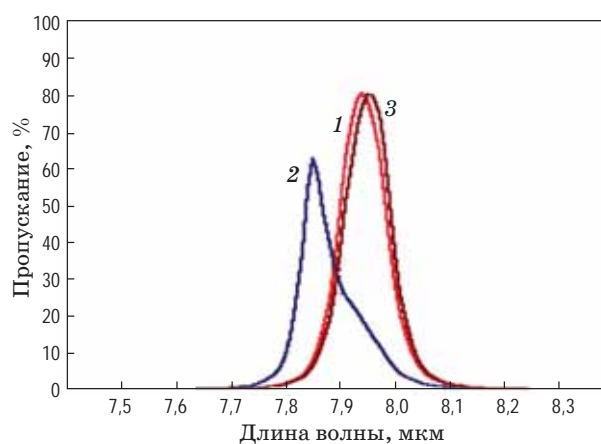


Рис. 2. Изменение кривой пропускания полосового фильтра при изменении толщины некоторых слоев. 1 — исходный фильтр (HLH)2L(HLH)L(HLH)2L(HLH), 2 — фильтр с отклонением толщины в резонансном слое (HLH)2L(HLH)L(HLH)1,97L(HLH), 3 — фильтр с коррекцией отклонения толщины (HLH)2L(HLH)L(HLH)1,97L(1,1HLH)

Fig. 2. Changing the bandpass filter transmission curve when changing the thickness of some layers. (1) Source filter (HLH)2L(HLH)L(HLH)2L(HLH), (2) filter with thickness deviation in the resonant layer (HLH)2L(HLH)L(HLH)1,97L(HLH), (3) filter with thickness deviation correction (HLH)2L(HLH)L(HLH)1,97L(1,1HLH)

Такие же или похожие искажения спектральной характеристики, но в меньшей степени, вызывают и отклонения толщины слоев, прилегающих к резонансному слою. Но с другой стороны, это позволяет корректировать уже искаженную спектральную характеристику. На рис. 2 представлен спектр фильтра (кривая 3) с такой коррекцией. Рисунок показывает, что для коррекции уменьшения толщины на 1,5% второго резонансного слоя потребовалось увеличить толщину прилегающего высокопреломляющего слоя на 10%. Но при этом спектр пропускания и положение центрального максимума фильтра получились близкими к идеальной спектральной характеристике — расчетной. Отклонения толщины в последующих слоях, отстоящих дальше от резонансного слоя, изменяют спектральную характеристику еще в меньшей степени, но тоже позволяют вносить коррекцию.

Собственно в этом суть предлагаемого метода коррекции — коррекция случайных отклонений толщины предыдущих слоев намеренным изменением толщины последующих слоев. При расчетах необходимой коррекции моделирование искажений спектральной характеристики, вызванной случайными отклонениями, возможно просто с помощью небольших изменений толщины резонансных слоев. То есть при численном моделировании, изменяя толщину резонансных слоев идеального фильтра, можно приблизительно смоделировать искаженную спектральную характеристику получившейся структуры и далее рассчитать необходимые коррекции в последующие слои, чтобы получить результирующий спектр, близкий к необходимому.

Например, в случае рассматриваемого фильтра (рис. 2, кривая 1) сначала наносится структура $(\text{HLH})2\text{L}0,8\text{H}$ с неполным напылением последнего слоя. Определив спектр образца, можно сравнить его с рассчитанным спектром такой структуры, и если они не совпадают, внести необходимые изменения толщины в следующих слоях, компенсируя случайные отклонения. Этим самым скорректируется положение максимума пропускания этой части фильтра. Далее, продолжая напыление и повторяя процедуру после второго резонансного слоя, можно добиться совпадения максимумов пропускания этих двух составляющих фильтров и нужного положения максимума.

Конечно, достаточно сильные отклонения компенсировать не получится и придется все начинать сначала.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ФИЛЬТРОВ С КОРРЕКЦИЕЙ ОТКЛОНЕНИЙ

Рассмотрим применение данного метода при напылении двух составных фильтров — широкополосного и узкополосного, оба на длину волны пропускания 7,93 мкм. Как указывалось выше, фильтры наносились на Si пластины, при напылении использовалась пара пленкообразующих веществ — PbTe и ZnS .

Напыление осуществляется следующим образом. Подложки фильтров располагаются по окружности вращающегося купола. В центре помещается кассета со сменными свидетелями, по которым контролируется толщина напыляемого слоя. Используется оптическая система контроля по отражению на кратных длинах волн.

Численное моделирование покрытий и корректирующих компенсаций проводятся с помощью собственных компьютерных программ.

Для определения спектральных характеристик используется фурье-спектрометр ФСМ2201. Обратная сторона подложек чистая, т.е. на спектрах присутствует френелевское отражение от обратной стороны; у подложек из Si, как в нашем случае, оно составляет около 30%.

ПОЛОСОВОЙ ФИЛЬТР $(\text{HLH})2\text{L}(\text{HLH})\text{LH}2\text{LH}$

Для этого фильтра не потребовалось дополнительной коррекции, а вся методика свелась лишь к мониторингу процесса напыления.

1. Сначала проводилось частичное напыление фильтра со слоем после первого резонансного слоя $(\text{HLH})2\text{L}0,84\text{H}$ для более широкой возможности коррекции. Положение максимума пропускания (кривая 1 на рис. 3) — на $\lambda_{\text{max}} = 7,72$ мкм, что соответствует рассчитанному положению максимума для такой структуры. Таким образом, на данном этапе ничего корректировать не нужно, а просто нанести последний слой до 1H, т.е. нанести еще 0,16H и продолжить напыление структуры.

2. Нанесение оставшейся части 0,16H — последний слой. Продолжение напыления структуры до последнего слоя фильтра (он же

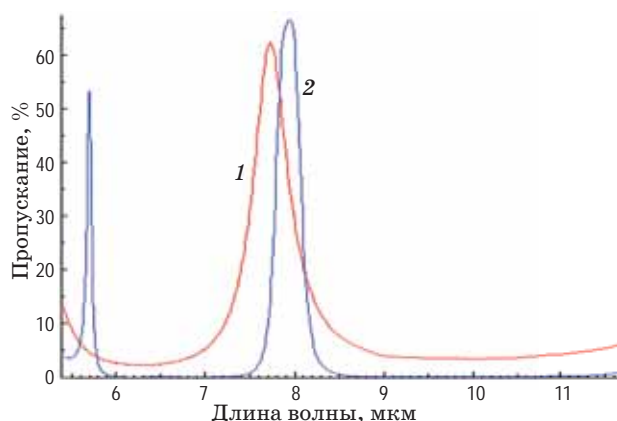


Рис. 3. Спектральные характеристики образца с последовательными этапами напыления полосового фильтра (HLH)2L(HLH)LH2LH. 1 — спектр структуры (HLH)2L0,84H, 2 — спектр полностью напыленного фильтра (HLH)2L(HLH)LH2L0,84H

Fig. 3. Spectral characteristics of a sample of successive stages of deposition of a bandpass filter (HLH)2L(HLH)LH2LH. (1) Structure spectrum (HLH)2L0,84H, (2) spectrum of the whole filter (HLH)2L(HLH)LH2L0,84H

следующий за вторым резонансным слоем), но опять не до конца — 0,84H. Спектральная характеристика получившегося образца (кривая 2 на рис. 3), несмотря на не полностью напыленный последний слой, имеет очень хорошее совпадение с расчетной характеристикой идеального фильтра: $\lambda_{\max} = 7,93$ мкм, ширина на полувысоте — 280 нм. В данном случае это произошло потому, что меньшая толщина не полностью нанесенного последнего слоя компенсировала случайные отклонения толщины предыдущих слоев. Если бы таких случайных отклонений не было, спектральная характеристика была бы искажена, и для ее коррекции пришлось бы напылять последний слой в рассчитанном предварительно количестве.

ПОЛОСОВОЙ ФИЛЬТР (HLH)2L(HLH)L(HLH)2L(HLH)

Для этого фильтра потребовалось три коррекции толщины слоев.

1. Сначала, как в первом случае, была нанесена часть фильтра со слоем после первого резонансного, (HLH)2L0,84H. Максимум пропускания (кривая 1 на рис. 4) — на $\lambda_{\max} = 7,50$ мкм. Расчетное положение макси-

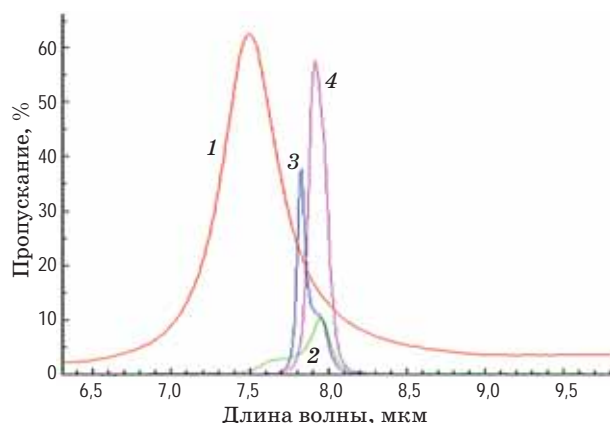


Рис. 4. Спектральные характеристики полосового фильтра (HLH)2L(HLH)L(HLH)2L(HLH) при последовательных этапах напыления. Спектры пропускания структур (HLH)2L0,84H (1), (HLH)2L(HLH)L(HLH)2L0,84H (2), (HLH)2L(HLH)L(HLH)2L(HLH) (3), (HLH)2L(HLH)L(HLH)2L(HLH) + 2H (4). Коррекция толщины предыдущих слоев не указана

Fig. 4. Spectral characteristics of the bandpass filter (HLH)2L(HLH)L(HLH)2L(HLH) at successive stages of deposition. Transmission spectra of structures (1) (HLH)2L0,84H, (2) (HLH)2L(HLH)L(HLH)2L0,84H, (3) (HLH)2L(HLH)L(HLH)2L(HLH), (4) (HLH)2L(HLH)L(HLH)2L(HLH) + 2H. Correction of previous layers is not indicated

ума данной структуры составляет 7,72 мкм. Как показал расчет, для коррекции положения необходимо увеличить толщину 6-го слоя до 1,24H. То есть нужно продолжить напыление этого слоя на 0,4H.

2. После нанесения 0,4H продолжается нанесение структуры до 13-го слоя, который наносится не до конца. Спектральная характеристика текущей структуры (HLH)2L(HLH)L(HLH)2L0,84H (здесь не указана проведенная коррекция толщины предыдущих слоев) получилась достаточно искаженной — кривая 2 на рис. 4. Но, как показал расчет, для коррекции необходимо лишь просто увеличить толщину 13-го слоя до 1H, т.е. нанести еще 0,16H.

3. После дополнительного нанесения 0,16H продолжается напыление до конца фильтра, (HLH)2L(HLH)L(HLH)2L(HLH). Получившаяся спектральная характеристика фильтра, несмотря на внесенные корректировки, все еще

искажена — кривая 3 на рис. 4. Вероятно, сказались случайные отклонения толщины слоев. По расчету для коррекции необходимо дополнительно нанести 2Н.

4. После дополнительного нанесения 2Н спектральная характеристика (кривая 4 на рис. 4) показывает почти идеальное совпадение с расчетным значением длины волны максимума пропускания 7,92 мкм. По сравнению с расчетной ширина на полувысоте немного увеличена — 150 нм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Таким образом, используя метод последовательного напыления и контролируя изменение спектральной характеристики напыляемого фильтра, возможно гораздо точнее реализовывать на практике сложные полосовые фильтры. При нанесении за один раз сразу всей структуры многослойного фильтра из-за случайных отклонений толщины отдельных слоев спектральная характеристика получившегося фильтра может быть значительно искажена, что приводит к браку. Это особенно критично при напылении партии фильтров. В данном случае, последовательно внося необходимые коррекции, можно получить спектральную характеристику, близкую к численно смоделированной.

Необходимо отметить, что внесение коррекции в толщину отдельных слоев полосовых фильтров приводит обычно к небольшому уширению полосы максимума пропускания. Это, возможно, стоит учитывать при численном моделировании фильтра.

Вероятным недостатком такого способа изготовления фильтров является многократное прерывание процесса нанесения покрытия — из вакуума в атмосферу и назад, что может приводить к ухудшению механической и климатической стойкости покрытия. Для предотвращения этого предпринимаются некоторые меры. Время прерывания процесса нанесения покрытия, необходимое для записи спектра пробного образца фильтра, не превышает 15 мин. Также во время промежуточных вакуумных откачек подложки подвергаются дополнительной недолгой очистке ионной пушкой. Следует отметить, что изготовленные таким образом фильтры с описанной выше структурой и указанными пленкообразующими веществами не показали заметного ухудшения механической и климатической стойкости по сравнению с покрытиями такой же сложности (толщина и структура), изготовленными обычным способом — за один цикл вакуумной откачки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Macleod H.A. Thin film optical filters / 4th ed. Series in Optics and Optoelectronics. CRC Press, by Taylor and Francis Group, 2010. 772 p.
2. Hawkins G.J., Hunneman R. Design and fabrication of infrared filters for remote sounding instrumentation // Proc. SPIE. 1994. V. 2210. P. 63965. <http://dx.doi.org/10.1117/12.188124>
3. Furman S.A. and Tikhonravov A.V. Basics of optics of multilayer systems. Gif-sur-Yvette: Editions Frontieres, 1992. 133 p.
4. Thelen A. Design of optical interference coatings. N.Y.: McGraw-Hill Book Company, 1988. 255 p.
5. Воронкова Е.М., Гречушников Б.Н., Дистлер Г.И., Петров И.П. Оптические материалы для инфракрасной техники / Справочное издание. М.: Наука, 1965. 335 с.
6. Ritter E. Optical film materials and their applications // Appl. Opt. 1976. V. 15. P. 2318–2327. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.15.002318>
7. Zhang K.G., Seeley J.S., Huneman R., and Hawkins G.J. Optical and semiconductor properties of lead telluride coatings // Proc. SPIE. 1989. V. 1112. P. 393–402. <http://dx.doi.org/10.1117/12.960798>
8. Ким Чжон Суп, Путилин Э.С. Формирование толщины слоев вакуумным испарением // Оптический журнал. 1998. Т. 65. № 10. С. 108–112.

REFERENCES

1. Macleod H.A. Thin film optical filters / 4th ed. Series in Optics and Optoelectronics. CRC Press, by Taylor and Francis Group, 2010. 772 p.
2. Hawkins G.J., Hunneman R. Design and fabrication of infrared filters for remote sounding instrumentation // Proc. SPIE. 1994. V. 2210. P. 63965. <http://dx.doi.org/10.1117/12.188124>
3. Furman S.A. and Tikhonravov A.V. Basics of optics of multilayer systems. Gif-sur-Yvette: Editions Frontieres, 1992. 133 p.
4. Thelen A. Design of optical interference coatings. N.Y.: McGraw-Hill Book Company, 1988. 255 p.
5. Voronkova E.M., Grechushnikov B.N., Distler G.I., Petrov I.P. Optical materials for infrared technology [in Russian] / Reference publication. Moscow: "Nauka" Publ., 1965. 335 p.
6. Ritter E. Optical film materials and their applications // Appl. Opt. 1976. V. 15. P. 2318–2327. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.15.002318>
7. Zhang K.G., Seeley J.S., Huneman R., and Hawkins G.J. Optical and semiconductor properties of lead telluride coatings // Proc. SPIE. 1989. V. 1112. P. 393–402. <http://dx.doi.org/10.1117/12.960798>
8. Kim Jong Sup, Putilin E.S. Formation of layer thickness by vacuum evaporation // J. Opt. Technol. 1998. V. 65. № 10. P. 843.

9. Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K., and Amotchkina T.V. Statistical approach to choosing a strategy of monochromatic monitoring of optical coating production // *Appl. Opt.* 2006. V. 45. P. 7863–7870. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.45.007863>
10. Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K., and Amotchkina T.V. Investigation of the effect of accumulation of thickness errors in optical coating production by broadband optical monitoring // *Appl. Opt.* 2006. V. 45. P. 7026–7034. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.45.007026>
11. Macleod H.A. and Richmond D. The effect of errors in the optical monitoring of narrow-band all-dielectric thin film optical filters // *Optica Acta.* 1974. V. 21. P. 429–443.
12. Hiraga R., Sugawara N., Ogura S., and Amano S. Measurement of spectral characteristics of optical thin film by rapid scanning spectrophotometer // *Japanese J. Appl. Phys.* 1974. P. 689–692.
13. Котликов Е.Н., Тропин А.Н. Критерий устойчивости спектральных характеристик многослойных интерференционных покрытий // *Оптический журнал.* 2009. Т. 76. № 3. С. 60–66.
14. Котликов Е.Н., Тропин А.Н. Коррекция спектральных характеристик отрезающих фильтров // *Оптический журнал.* 2009. Т. 76. № 3. С. 57–59.
15. Villa F., Pompa O. Emission pattern of real vapor sources in high vacuum: An overview // *Appl. Opt.* 1999. V. 38. P. 695–703. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.38.000695>
16. Heitmann W. The influence of various parameters on the refractive index of evaporated dielectric thin films // *Appl. Opt.* 1968. V. 7. P. 1541–1543. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.7.001541>
9. Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K., and Amotchkina T.V. Statistical approach to choosing a strategy of monochromatic monitoring of optical coating production // *Appl. Opt.* 2006. V. 45. P. 7863–7870. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.45.007863>
10. Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K., and Amotchkina T.V. Investigation of the effect of accumulation of thickness errors in optical coating production by broadband optical monitoring // *Appl. Opt.* 2006. V. 45. P. 7026–7034. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.45.007026>
11. Macleod H.A. and Richmond D. The effect of errors in the optical monitoring of narrow-band all-dielectric thin film optical filters // *Optica Acta.* 1974. V. 21. P. 429–443.
12. Hiraga R., Sugawara N., Ogura S., and Amano S. Measurement of spectral characteristics of optical thin film by rapid scanning spectrophotometer // *Japanese J. Appl. Phys.* 1974. P. 689–692.
13. Kotlikov E.N., Tropin A.N. Stability criterion of the spectral responses of multilayer interference coatings // *J. Opt. Technol.* 2009. V. 76. № 3. P. 162–166. <http://dx.doi.org/10.1364/JOT.76.000162>
14. Kotlikov E.N., Tropin A.N. Correction of spectral characteristics of cutting filters // *J. Opt. Technol.* 2009. V. 76. № 3. P. 160–161. <https://doi.org/10.1364/JOT.76.000160>
15. Villa F., Pompa O. Emission pattern of real vapor sources in high vacuum: An overview // *Appl. Opt.* 1999. V. 38. P. 695–703. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.38.000695>
16. Heitmann W. The influence of various parameters on the refractive index of evaporated dielectric thin films // *Appl. Opt.* 1968. V. 7. P. 1541–1543. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.7.001541>

АВТОР

Вадим Николаевич Прокашев — кандидат технических наук, ведущий инженер, НПП «Риэлта», Санкт-Петербург, 197046, Россия; Scopus ID: 6505853329; <https://orcid.org/0009-0005-8135-5739>; vnprokashev@mail.ru

AUTHOR

Vadim N. Prokashev — PhD (Engineering), Lead Engineer, Research and Production Enterprise "Rielta", St. Petersburg, 197046, Russia; Scopus ID: 6505853329; <https://orcid.org/0009-0005-8135-5739>; vnprokashev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27.09.2023
Одобрена после рецензирования 02.11.2023
Принята к печати 24.11.2023

The article was submitted to the editorial office 27.09.2023
Approved after review 02.11.2023
Accepted for publication 24.11.2023