

**“СОЛНЕЧНО-СЛЕПОЙ” ФИЛЬТР ДЛЯ УФ ОБЛАСТИ СПЕКТРА**

© 2007 г. **Р. Г. Сафин**; **И. С. Гайнутдинов**, доктор техн. наук;  
**Р. С. Сабиров**, канд. техн. наук; **М. Х. Азаматов**

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

Расчитаны и изготовлены “солнечно-слепые” фильтры для УФ области спектра с пропусканием  $\approx 20\%$  в области спектра 265–290 нм и подавлением не хуже  $10^7$  в области 300–800 нм.

Коды OCIS: 310.6860.

Поступила в редакцию 19.06.2006.

В последние годы наблюдается повышенный интерес к разработкам оптико-электронных систем, эффективно использующих УФ область спектра. Это вызвано тем обстоятельством, что излучение Солнца короче 305 нм сильно поглощается озоновым слоем земной атмосферы, что означает отсутствие помех в зоне приема [1].

Важным элементом подобных систем является “солнечно-слепой” УФ фильтр, который должен обеспечивать максимально высокое пропускание излучения короче 290 нм и глубокое подавление фонового излучения в области спектра 300–1000 нм.

Одним из возможных решений построения такого фильтра является использование интерференционного отрезающего фильтра для формирования границы пропускания и ряда диэлектрических оптимизированных зеркал, блокирующих зону подавления фонового излучения и одновременно обеспечивающих высокое пропускание в спектральной области короче 290 нм. В качестве основы подобного фильтра и оптимизированных диэлектрических зеркал наиболее часто применяются двухкомпонентные четвертьволновые покрытия. Ширина полосы высокого отражения определяется величиной разности показателей преломления образующих диэлектрическое зеркало слоев [2] и может быть определена соотношения

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\pi}{2} \frac{\pi - 2x}{x(\pi - x)}, \quad (1)$$

где

$$x = \arccos\left(\frac{n_b - n_n}{n_b + n_n}\right),$$

здесь  $\delta\lambda$  – ширина выделяемой спектральной полосы,  $\lambda_0$  – центр этой полосы,  $n_b$  – показатель преломления слоя с высоким показателем преломления,  $n_n$  – показатель преломления слоя с низким показателем преломления.

При использовании в качестве пленкообразующих материалов оксидов гафния и кремния ширина зоны высокого отражения составляет  $0,22\lambda_0$ . Для

перекрытия всей области подавления фонового излучения от 300 до 800 нм потребовалось бы нанесение системы из 5 зеркал, а для подавления фона в области 800–1000 нм необходимо напыление дополнительного трехкомпонентного зеркала, так как обычная конструкция имеет в области высокого пропускания фильтра вторичную зону отражения.

Нанесение на одну подложку системы из двух и более зеркал сопряжено с большими трудностями по их согласованию для исключения искажений спектральной кривой в области отражения, тем более что уровень пропускания всей системы зеркал должен быть менее  $10^{-3}$ , чтобы при условии использования 3-х подложек с системой зеркал уровень фона оказался менее  $10^{-9}$ .

Более предпочтительным, с точки зрения практической реализуемости, представляется вариант фильтра, собранного из нескольких подложек, на каждую из поверхностей которых наносится по одному элементарному зеркалу вида (ВН)<sup>n</sup>. Однако при этом общее число подложек, составляющих фильтр, должно быть не менее 9. Неизбежно увеличиваются габариты фильтра, его вес, рассеяние излучения. Уменьшить число подложек, составляющих фильтр, можно используя цветные оптические стекла, обладающие хорошим пропусканием в УФ области спектра и малым пропусканием в области подавления фона. Для целей создания УФ “солнечно-слепого” фильтра наиболее подходит стекло марки УФС2, которое, обладая сильным поглощением в диапазонах 400–680 нм и 800–1000 нм, позволяет не заботиться о подавлении фонового излучения в этих спектральных зонах. Однако его пропускание в рабочей зоне фильтра также мало, что делает необходимым при разработке и практической реализации интерференционных отрезающих фильтров и диэлектрических оптимизированных зеркал добиваться максимально высоких значений пропускания в области 265–285 нм. Данная задача решается путем варьирования толщин слоев, составляющих зеркало. Различных методов оптимизации разработано достаточно много, на их основе созда-

ны компьютерные программы, которые позволяют находить конструкции многослойных покрытий, в той или иной степени удовлетворяющие заданным условиям. В основе большинства этих методов лежит расчет спектральных характеристик покрытия с помощью вычисления матрицы интерференции

$$\begin{pmatrix} M_{11} & iM_{12} \\ iM_{21} & M_{22} \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^N \begin{pmatrix} \cos g_j \varphi & \frac{i}{n_j} \sin g_j \varphi \\ in_j \sin g_j \varphi & \cos g_j \varphi \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $N$  – число слоев в многослойной пленке,  $n_j$  – комплексный показатель преломления  $j$ -го слоя,  $\varphi = \pi \lambda_0 / 2\lambda$ ,  $g_j$  – оптическая толщина  $j$ -го слоя в долях  $\lambda/4$ .

Далее вычисляются спектральные коэффициенты отражения и пропускания

$$r = \frac{n_0 M_{11} - n_D M_{22} - i(M_{21} - n_0 n_D M_{12})}{n_0 M_{11} + n_D M_{22} + i(M_{21} + n_0 n_D M_{12})}, \quad (3)$$

$$d = \frac{2\sqrt{n_0 n_D}}{n_0 M_{11} + n_D M_{22} + i(M_{21} + n_0 n_D M_{12})}, \quad (4)$$

а также и целевая функция, или, по-другому, функция качества, которая, как показано в [3], чаще всего представлена в виде

$$\Phi(X) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v(\lambda) [f(\lambda) - \bar{f}(\lambda)]^2 d\lambda. \quad (5)$$

С помощью различных методов оптимизации, например, градиентного [4] и релаксационного [5] спуска, призванных существенно уменьшить число циклов вычислений спектральных характеристик, добиваются минимизации функции качества. Однако в тех случаях, когда требования к виду спектральной кривой оказываются особенно жесткими, найти удовлетворительное, в смысле реализуемости, решение не всегда удается.

Именно такой задачей представляется синтез отрезающего фильтра и оптимизированных блокирующих зеркал для “солнечно-слепого” фильтра.

Для решения данной задачи нами была разработана компьютерная программа, которая, на наш взгляд, позволяет получить более технологичные решения задачи синтеза. В ее основе лежит тот же матричный метод (2) и вычисление спектральных коэффициентов отражения и пропускания по формулам (3) и (4). Первоначальная конструкция покрытия задается в виде таблицы показателей преломления и оптических толщин слоев, составляющих покрытие. Соответствующая спектральная кривая

отображается на мониторе компьютера. При изменении параметров многослойной системы (оптической толщины слоя и его показателя преломления) спектральная кривая немедленно перерисовывается (с эффектом анимации) в соответствии с новыми значениями. В программе реализована возможность непрерывного изменения любого из параметров, определяющих спектральную характеристику покрытия. При этом непрерывно изменяется соответствующая спектральная кривая. Оценка соответствия полученной спектральной характеристики требуемой происходит визуально, без использования каких-либо функций качества. Естественно, большое значение при данном способе формирования оптимальной конструкции имеет опыт технолога, работающего с программой. Применение программы для расчетов отрезающего фильтра и оптимизированных диэлектрических зеркал, составляющих “солнечно-слепой” УФ фильтр, показало ее высокую эффективность. Необходимо отметить также возможности, предоставляемые программой, по наглядному отображению динамики изменений спектральных характеристик с изменением параметров слоев и, соответственно, оценке устойчивости найденной конструкции к неизбежным отклонениям реальных параметров слоев от расчетных. Указанные возможности оказываются полезными при проектировании “солнечно-слепого” УФ фильтра, так как даже незначительные отклонения коэффициентов пропускания покрытий в рабочей зоне приводят к заметному снижению общего пропускания фильтра из-за многоэлементной конструкции. Действительно, при пропускании каждого покрытия, равном 99%, и их числе, равном 16, общее пропускание составит 85%, а при пропускании 96% только 52% (без учета пропускания цветных оптических стекол).

На рис. 1 и 2 приведены спектральные характеристики пропускания отрезающего и блокирующе-

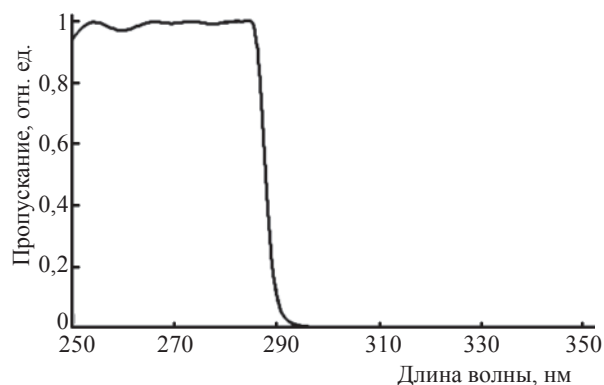
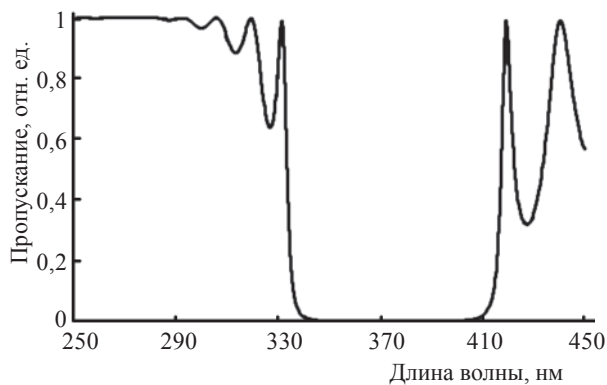
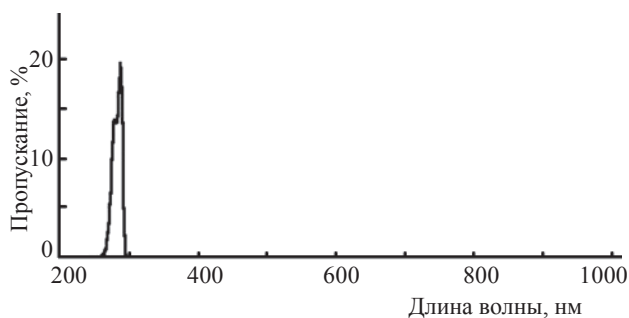


Рис. 1. Спектральная характеристика отрезающего фильтра (расчет).



**Рис. 2.** Спектральная характеристика блокирующего фильтра (расчет).



**Рис. 3.** Спектральная характеристика «солнечно-слепого» УФ фильтра (эксперимент).

го фильтров, конструкции которых найдены с помощью разработанного нами метода. На рис. 3 представлена спектральная характеристика сборного «солнечно-слепого» УФ фильтра. Все покрытия наносились методом электронно-лучевого испарения в вакууме. Контроль толщины слоев велся фотометрическим методом. Так как контрольные длины волн рассчитанных конструкций покрытий для первых двух зеркал были короче возможностей исполь-

зовавшейся фотометрической системы, напыление велось с применением маски с коэффициентом кратности, равным приблизительно 2.

Таким образом, повышение прозрачности отсекающих и блокирующих фильтров в рабочей области спектра за счет оптимизации толщин слоев покрытий позволило изготовить «солнечно-слепые» УФ фильтры с пропусканием в максимуме 20% в области спектра 265–290 нм. Технические возможности доступных спектрофотометров не позволили определить фактическое значение пропускания изготовленных фильтров в области 300–800 нм. На основании проведенных измерений можно, однако, утверждать, что пропускание фильтров в этом диапазоне менее  $10^{-7}$ . При этом расчетные значения пропускания этих фильтров составляют по порядку величины  $10^{-9}$  и менее, а непосредственные испытания фильтров в составе УФ оптико-электронной системы косвенно подтверждают это. В области спектра 800–1000 нм блокирование фонового излучения обеспечивается стеклом УФС 2 и в данном случае равно  $10^{-4}$ – $10^{-5}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов А.Д., Кароль И.Л. Атмосферный озон – сенсация и реальность. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 119 с.
2. Иванов В.А., Никитин А.С., Борисов А.Н., Несмелов Е.А., Гайнутдинов И.С., Макаров А.С. Малогабаритный полихроматор // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 7. С. 73–74.
3. Тихонравов А.В. Синтез слоистых сред. М.: Знание, 1987. 48 с.
4. Гласко В.Б., Тихонов А.Н., Тихонравов А.В. О синтезе многослойных покрытий // ЖВМ и МФ. 1974. Т. 14. № 1. С. 135–144.
5. Zycha H. Refining algorithm for the design of multilayer filters // Appl. Opt. 1973. V. 12. № 5. P. 979–984.