

## Пути уменьшения чувствительности узкополосных светофильтров к углу падения излучения

© Л.А. Губанова, Р.Е. Зейгман

Университет ИТМО,  
197101 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: romanbios64@gmail.com

Поступила в редакцию 21.10.2021 г.

В окончательной редакции 26.11.2021 г.

Принята к публикации 01.02.2022 г.

Рассмотрено влияние угла падения излучения на основные характеристики узкополосных интерференционных светофильтров. Показано, что наиболее чувствительными к увеличению угла падения являются фильтры, имеющие минимальную полуширину. Рассмотрен способ корректировки конструкции светофильтра, позволяющий уменьшить чувствительность светофильтра к углу падения излучения. Увеличение стабильности положения максимума пропускания в шкале длин волн достигается за счет введения в конструкцию светофильтра слоя из материала, который не используется при формировании зеркал, входящих в его состав. Увеличение показателя преломления разделительного слоя на 21% приводит к стабильности положения полосы пропускания на уровне  $0.99\lambda_{\max}$  в шкале углов на 11%; а при увеличении показателя преломления на 10% стабильность положения увеличивается на 8% у узкополосных фильтров, состоящих из 31 слоя.

**Ключевые слова:** узкополосные диэлектрические интерференционные светофильтры, угол падения излучения, полуширина, показатель преломления.

DOI: 10.21883/OS.2022.07.52732.2843-21

### Введение

В настоящее время для разделения светового потока по длинам волн часто используется приемник из набора элементов, чувствительных к той или иной длине волны. Однако, это не всегда может быть использовано из-за ряда конструктивных и технологических ограничений, поэтому и сегодня не отпадает необходимость в узкополосных диэлектрических интерференционных светофильтрах (ДУПИФ).

Разработчики оптоэлектронных систем и приборов фотоники при включении в состав рабочих схем (ДУПИФ) сталкиваются с проблемой влияния угла падения излучения на их характеристики. В ряде случаев это снижает эффективность работы разрабатываемых систем, приводит к искажению передаваемой информации и ухудшает частотно-контрастные характеристики приборов.

Принцип выделения ДУПИФ заданной длины волны аналогичен работе интерферометра Фабри–Перо. В состав диэлектрических узкополосных светофильтров входит два диэлектрических зеркала, между которыми расположена некая прослойка фиксированной толщины, изготовленная из слабо поглощающего материала. В настоящее время такие светофильтры изготавливаются из двух пленкообразующих материалов, имеющих максимальную разницу между показателями преломления материалов, из которых формируются слои, входящие в состав светофильтра, что дает возможность получения максимального коэффициента отражения зеркал, входящих в состав фильтра, при наличии в этом покрытии

минимального количества слоев. Обычно, прослойка между зеркалами изготавливается из одного из этих материалов и ее оптическая толщина кратна толщине слоя, формирующего зеркало. Это обусловлено технологическими факторами, поскольку большинство вакуумных установок, на которых изготавливаются фильтры рассматриваемого вида, оснащены двумя испарителями.

По ряду причин излучение может падать на ДУПИФ под неким углом. К таким причинам можно отнести расхождение излучения падающего пучка, неточность установки фильтра относительно оптической оси прибора и конструктивное расположение светофильтра. Величина угла, под которым на светофильтр падает излучение, лежит в интервале от нескольких минут до десятков градусов.

Как известно [1], изменение угла падения излучения на зеркала, входящие в состав светофильтра, приводит к искажению их спектральных характеристик, а, следовательно, и спектральных характеристик всего светофильтра. Это объясняется в первую очередь тем, что при падении излучения на диэлектрическую структуру, происходит разложение излучения на 2 компоненты:  $s$ - и  $p$ -поляризованные, что приводит к появлению различных значений показателей преломления материалов, из которых формируются зеркала для разных компонент [2,3]:

$$\tilde{n}_i = \begin{cases} n_i \cos a_i & p\text{-компонента,} \\ n_i^{-1} \cos a_i & s\text{-компонента,} \end{cases} \quad (1)$$

$n_i$  — показатель преломления среды при нормальном падении излучения,  $a_i$  — угол распространения излучения в среде.

Помимо этого, изменяется фазовая толщина каждого слоя, входящего в состав светофильтра:

$$\varphi_i = 2\pi n_i d_i \lambda^{-1} \cos \alpha_i. \quad (2)$$

Следовательно, для каждой компоненты будут наблюдаться различные амплитудные коэффициенты отражения [4]:

$$r = \frac{(\tilde{n}_0 \tilde{m}_{11} - \tilde{n}_m \tilde{m}_{22}) + i(\tilde{n}_0 \tilde{n}_m \tilde{n}_0 \tilde{m}_{12} - \tilde{m}_{21})}{(\tilde{n}_0 \tilde{m}_{11} + \tilde{n}_m \tilde{m}_{22}) + i(\tilde{n}_0 \tilde{n}_m \tilde{n}_0 \tilde{m}_{12} + \tilde{m}_{21})}, \quad (3)$$

коэффициенты пропускания:

$$t = \frac{\tilde{n}_0 \tilde{n}_m}{(\tilde{n}_0 \tilde{m}_{11} + \tilde{n}_m \tilde{m}_{22}) + i(\tilde{n}_0 \tilde{n}_m \tilde{n}_0 \tilde{m}_{12} + \tilde{m}_{21})}, \quad (4)$$

где  $\tilde{m}_{11}$ ,  $\tilde{m}_{12}$ ,  $\tilde{m}_{21}$ ,  $\tilde{m}_{22}$  — элементы матрицы интерференции, и соответствующие им энергетические коэффициенты отражения и пропускания:

$$R = \frac{|r_1|^2 + |r_2|^2 - 2|r_1||r_2| \cos \varphi}{1 + |r_1|^2|r_2|^2 - 2|r_1||r_2| \cos \varphi}, \quad (5)$$

$$T = \frac{n_m}{n_0} \frac{|t_1|^2|t_2|^2}{1 + |r_1|^2|r_2|^2 - 2|r_1||r_2| \cos \varphi}. \quad (6)$$

Общее пропускание светофильтра определяется выражением [5]:

$$T = \frac{T_1 T_2}{1 + R_1 + R_2 - 2(R_1 R_2)^{0.5} \cos 2\varphi}, \quad (7)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  — пропускание входящих в систему зеркал,  $R_1$  и  $R_2$  — их отражение, определяемое выражением (1)

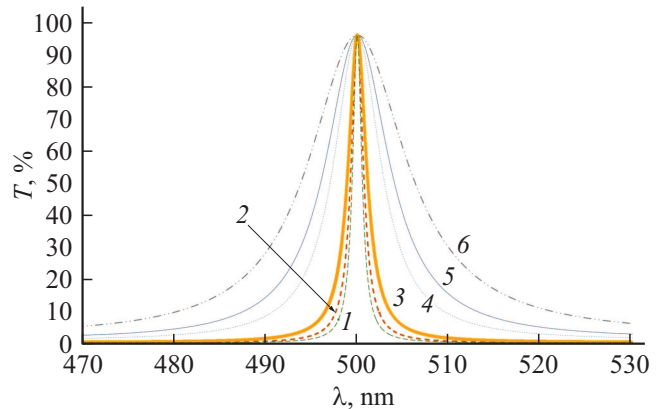
$$\varphi = 2\pi n d \lambda^{-1} \cos a + \rho_1 + \rho_2, \quad (8)$$

где  $\rho_1, \rho_2$  — разность фаз между падающей и отраженной волнами, соответственно на первом и втором зеркалах на длине волны  $\lambda$ ,  $d$  — геометрическая толщина разделительного слоя,  $\lambda$  — длина волны падающего излучения.

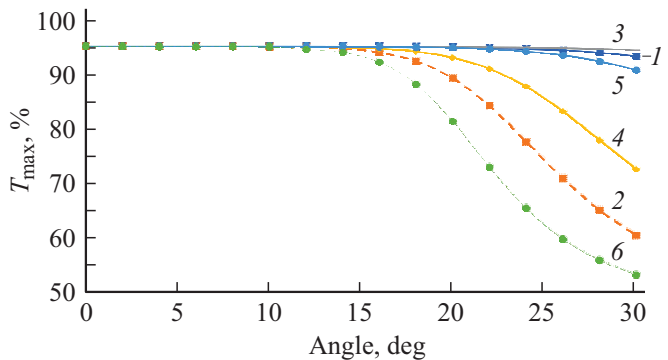
Далее будут рассмотрены спектральные характеристики интерференционных фильтров для неполяризованного излучения, для которого коэффициент пропускания определяется как  $0.5(T^p + T^s)$ .

Если рассматривать длину волны, для которой при нулевом падении наблюдается максимальное пропускание, то можно сделать заключение, что с увеличением угла падения излучения пропускание на этой длине волны будет уменьшаться. Значение изменения пропускания будет определяться конструкцией интерференционного светофильтра.

В данной работе проанализировано влияние угла падения излучения на спектральные характеристики шести светофильтров, имеющих различные конструкции: зеркала, входящие в состав светофильтра, состоят из 7 чередующихся диэлектрических слоев, изготовленных из материалов с высоким и низким показателями



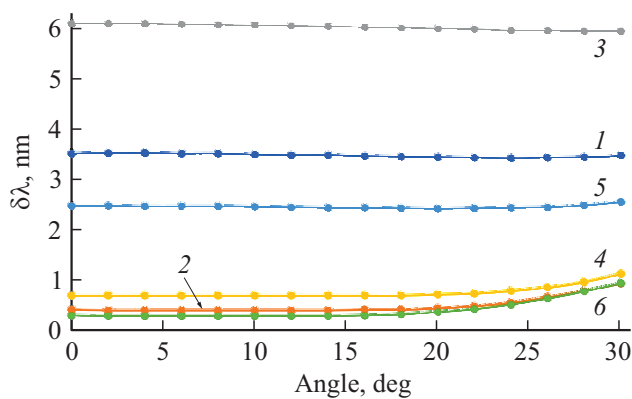
**Рис. 1.** Спектральные характеристики светофильтров: 1 — (ВН)<sup>3</sup>В2Н(ВН)<sup>3</sup>В, 2 — (ВН)<sup>5</sup>В2Н(ВН)<sup>5</sup>В, 3 — (ВН)<sup>3</sup>2В(НВ)<sup>3</sup>, 4 — (ВН)<sup>5</sup>2В(НВ)<sup>5</sup>, 5 — (ВН)<sup>3</sup>В4Н(ВН)<sup>3</sup>В, 6 — (ВН)<sup>5</sup>В4Н(ВН)<sup>5</sup>В.



**Рис. 2.** Зависимости пропускания светофильтров различных конструкций на длине волны, соответствующей максимуму пропускания, от угла падения излучения. 1 — (ВН)<sup>3</sup>В2Н(ВН)<sup>3</sup>В, 2 — (ВН)<sup>5</sup>В2Н(ВН)<sup>5</sup>В, 3 — (ВН)<sup>3</sup>2В(НВ)<sup>3</sup>, 4 — (ВН)<sup>5</sup>2В(НВ)<sup>5</sup>, 5 — (ВН)<sup>3</sup>В4Н(ВН)<sup>3</sup>В, 6 — (ВН)<sup>5</sup>В4Н(ВН)<sup>5</sup>В.

преломления, разделительный слой изготовлен из материала с низким показателем преломления и имеет оптическую толщину  $0.5\lambda_{max}$ ; схематически конструкция такого светофильтра может быть записана в виде (ВН)<sup>3</sup>В2Н(ВН)<sup>3</sup>В, где В — четвертьволновый слой, изготовленный из материала с высоким показателем преломления ( $n_h = 2.02$ ), Н — четвертьволновый слой, изготовленный из материала с низким показателем преломления ( $n_l = 1.35$ ), схематически структура остальных светофильтров может быть представлена в виде: 1 — (ВН)<sup>3</sup>В2Н(ВН)<sup>3</sup>В, 2 — (ВН)<sup>5</sup>В2Н(ВН)<sup>5</sup>В, 3 — (ВН)<sup>3</sup>2В(НВ)<sup>3</sup>, 4 — (ВН)<sup>5</sup>2В(НВ)<sup>5</sup>, 5 — (ВН)<sup>3</sup>В4Н(ВН)<sup>3</sup>В, 6 — (ВН)<sup>5</sup>В4Н(ВН)<sup>5</sup>В.

На рис. 1 представлены спектральные характеристики рассматриваемых светофильтров при нормальном падении излучения. Как видно из рис. 1, рассмотренные фильтры имеют разную полуширину и контрастность, значение пропускания в максимуме у них одинаково.



**Рис. 3.** Зависимости полуширины светофильтров различной конструкции: 1 —  $(\text{ВН})^3\text{В2Н}(\text{ВН})^3\text{В}$ , 2 —  $(\text{ВН})^5\text{В2Н}(\text{ВН})^5\text{В}$ , 3 —  $(\text{ВН})^3\text{В2Н}(\text{ВН})^3\text{В}$ , 4 —  $(\text{ВН})^5\text{В2Н}(\text{ВН})^5\text{В}$ , 5 —  $(\text{ВН})^3\text{В4Н}(\text{ВН})^3\text{В}$ , 6 —  $(\text{ВН})^5\text{В4Н}(\text{ВН})^5\text{В}$ , от угла падения излучения.

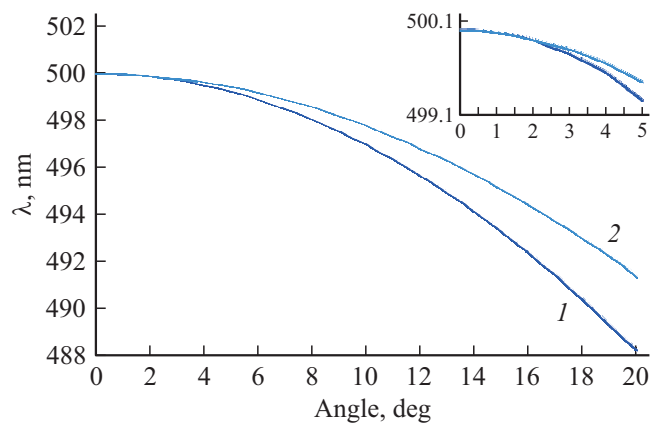
На рис. 2 представлены зависимости пропускания рассматриваемых светофильтров на длине волны, соответствующей максимуму пропускания, от угла падения излучения. Для анализа были выбраны конструкции интерференционных фильтров, в состав которых входят зеркала, обеспечивающие разное пропускание в зоне гашения излучения и разную полуширину пропускания. Под полушириной спектра [5] понимается разность длин волн, соответствующих половине максимального пропускания. Именно она определяет полосу пропускания светофильтра. Рассмотрение данных конструкций позволяет определить устойчивость различных светофильтров к углу падения излучения. Как видно из этого рисунка, наиболее чувствительным к углу падения излучения являются светофильтры с разделительным слоем, толщина которого равна выделяемой длине волны, т.е. для светофильтров, имеющих минимальную полуширину. У рассматриваемых фильтров уменьшение пропускания на данной длине волны наблюдается при углах более  $10^\circ$ , спад пропускания для каждой конструкции фильтра характеризуется своей зависимостью. Наиболее чувствительными к углу оказываются светофильтры с большим количеством слоев. Можно предположить, что с увеличением количества слоев, входящих в состав светофильтра, полуширина спектра пропускания уменьшается, а максимум пропускания наблюдается при меньших углах.

На рис. 3 представлено изменение полуширины спектров рассматриваемых фильтров в зависимости от угла падения излучения. Как видно из этого рисунка, фильтры, имеющие меньшую полуширину спектра, более чувствительны к углу падения излучения, и с увеличением угла падения излучения более  $20^\circ$  полуширина возрастает. Увеличение полуширины спектра светофильтра приводит к увеличению выделяемого участка спектра, что отрицательно сказывается на ряде характеристик оптико-электронных систем.

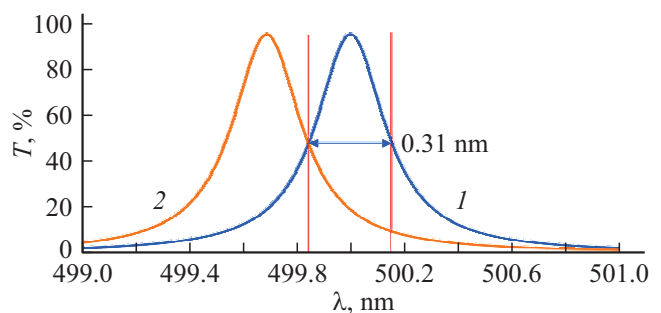
Далее были рассмотрены светофильтры следующих конструкций:  $(\text{ВН})^7\text{В2Н}(\text{ВН})^7\text{В}$ , ( $n_{\text{В}} = 2.02$ ), ( $n_{\text{Н}} = 1.35$ ) и  $(\text{ВН})^7\text{В4Н}(\text{ВН})^7\text{В}$ , ( $n_{\text{В}} = 2.02$ ), ( $n_{\text{Н}} = 1.35$ ), имеющие минимальную полуширину, которые, как было показано ранее, более чувствительные к углу падения излучения. На рис. 4 показано изменение длины волны, для которой необходимо получить максимальное пропускание, от угла падения излучения.

Фильтр  $(\text{ВН})^7\text{В2Н}(\text{ВН})^7\text{В}$  ( $n_{\text{В}} = 2.02$ ,  $n_{\text{Н}} = 1.35$ ) имеет полуширину  $0.31 \text{ nm}$ , при угле падения излучения больше, чем  $3.1^\circ$ , длина волны, которую необходимо выделить, выходит из области пропускания этого фильтра, что представлено на рис. 5.

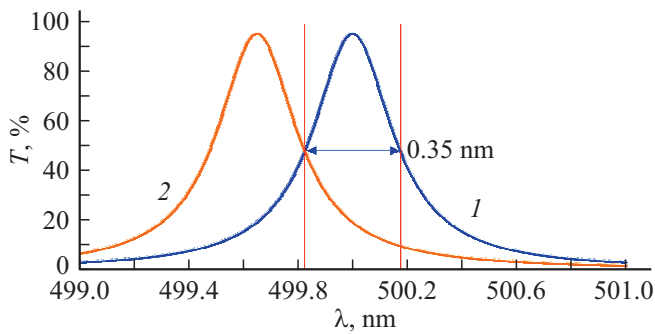
Фильтр  $(\text{ВН})^7\text{В4Н}(\text{ВН})^7\text{В}$  ( $n_{\text{В}} = 2.02$ ), ( $n_{\text{Н}} = 1.35$ ) имеет полуширину  $0.35 \text{ nm}$ , при угле падения излучения выше  $3.7^\circ$ , длина волны, которую необходимо выделить,



**Рис. 4.** Зависимость длины волны, которая соответствует максимуму пропускания от угла падения излучения для светофильтра (1), сформированного из 15-слойных зеркал и полуволнового разделительного слоя, изготовленного из материала с низким показателем преломления  $(\text{ВН})^7\text{В2Н}(\text{ВН})^7\text{В}$ , а также для светофильтра (2), сформированного из 14-слойных зеркал и полуволнового разделительного слоя  $(\text{ВН})^7\text{В4Н}(\text{ВН})^7\text{В}$ , изготовленного из материалов с высоким показателем преломления ( $n_{\text{В}} = 2.02$ ,  $n_{\text{Н}} = 1.35$ ). На врезке увеличенный участок графиков.



**Рис. 5.** Спектральные характеристики светофильтра, сформированного из 15-слойных зеркал  $(\text{ВН})^7\text{В2Н}(\text{ВН})^7\text{В}$  и полуволнового разделительного слоя, изготовленного из материала с низким показателем преломления ( $n_{\text{Н}} = 1.35$ ) для углов падения излучения  $0^\circ$  (1) и  $3.1^\circ$  (2).



**Рис. 6.** Спектральные характеристики пропускания светофильтра, сформированного из 15-слойных зеркал и полуволнового разделительного слоя  $(\text{ВН})^74\text{В}(\text{НВ})^7$ , изготовленного из материала с высоким показателем преломления ( $n_{\text{в}} = 2.02$ ) для углов падения излучения  $0$  (1) и  $3.7^\circ$  (2).

выходит из области пропускания этого фильтра, что представлено на рис. 6.

С целью минимизации чувствительности фильтров данного типа к углу падения излучения в процессе исследования была рассмотрена ситуация, когда разделительный слой изготовлен из пленкообразующего материала, имеющего отличие в показателе преломления от тех, которые используются для формирования зеркал. Были рассмотрены светофильтры, конструкция которых имеют вид  $(\text{ВН})^7\text{В}2\text{Р}(\text{ВН})^7\text{В}$  ( $n_{\text{в}} = 2.02$ ,  $n_{\text{н}} = 1.35$ ,  $n_{\text{р}} = 1.52$ ,  $1.67$  или  $1.84$ ).

Расчеты показали, что с увеличением показателя преломления разделительного слоя, полуширина незначительно увеличивается, а именно при увеличении показателя преломления на 21%, полуширина увеличивается на 6%. Следовательно, положение выделяемой длины волны в шкале длин волн становится более стабильным.

В работе рассмотрен только один способ управления устойчивости профиля пропускания интерференционных светофильтров к изменению угла падения излучения. В дальнейшем авторами планируется проанализировать конструкции интерференционных светофильтров, в состав которых входят слои, толщина которых не кратна четверти рассматриваемой длины волны, разделительный слой формируется из симметричных слоев, нарушена симметрия конструкции светофильтра и т. п.

## Выводы

В результате проведенных исследований были получены следующие результаты:

Наиболее чувствительны к увеличению угла падения излучения светофильтры, имеющие минимальную полуширину пропускания.

Рассмотрены способы корректировки конструкции светофильтров, позволяющие уменьшить чувствительность светофильтра к углу падения излучения. Повышение стабильности положения максимума пропускания в шкале длин волн достигается за счет введения в

конструкцию светофильтра слоя из материала, который не используется при формировании зеркал, входящих в его состав.

Увеличение показателя преломления разделительного слоя на 21% приводит к стабильности положения полосы пропускания на уровне  $0.99\lambda_{\text{max}}$  в шкале углов на 11%; а при увеличении показателя преломления на 10% стабильность положения увеличивается на 8% у узкополосных фильтров, состоящих из 31 слоя.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Т.Н. Крылова. *Интерференционные покрытия. Оптические свойства и методы исследования* (Машиностроение, Л., 1973), с. 224.
- [2] М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики. Теоретические основы оптико-физических исследований* (Наука, Л., 1973), с. 720.
- [3] В.А. Москалев. *Теоретические основы оптико-физических исследований* (Машиностроение, Л., 1987), с. 318.
- [4] Л.А. Губанова, Э.С. Путилин. *Оптические покрытия* (Лань, СПб., 2016), с. 224.
- [5] Ш.А. Фурман. *Тонкослойные оптические покрытия* (Машиностроение, Л., 1977), с. 264.