

Закируллин Р.С.

Оренбургский государственный университет

E-mail: rustam.zakirullin@gmail.com

ОПТИЧЕСКИЙ ФИЛЬТР С УГЛОВОЙ СЕЛЕКТИВНОСТЬЮ СВЕТОПРОПУСКАНИЯ

Представлен оптический фильтр с тонкопленочными решеточными слоями на двух поверхностях стеклянной подложки. Макроскопические решетки сформированы чередующимися направленно пропускающими и поглощающими полосами. Их относительное расположение на входной и выходной поверхностях обеспечивает угловую селективность светопропускания – часть излучения, прошедшего через входную решетку, дополнительно блокируется выходной решеткой в зависимости от угла падения. Графоаналитический метод расчета определяет влияние оптических и геометрических параметров чередующихся полос на угловые характеристики светопропускания. Результаты графоаналитического расчета подтверждены экспериментально. Разработана методика расчета параметров фильтра для удовлетворения заранее заданным угловым селективным характеристикам регулирования. Наиболее перспективной областью применения является архитектурное остекление для регулирования проходящего солнечного излучения без специальных устройств перераспределения светового потока.

Ключевые слова: оптический фильтр, решетка с чередующимися полосами, графоаналитический метод расчета, угловые характеристики светопропускания, пред-адаптированное угловое селективное регулирование.

Введение

Оптические фильтры, применяемые в различных областях, предназначены для пропуска части падающего излучения в определенном диапазоне длин волн. Остальная часть излучения в дихроичных фильтрах отражается, в абсорбционных – поглощается. Тонкопленочные многослойные дихроичные фильтры [1] имеют оптически однородные в каждом слое покрытия поверхности прозрачной среды. В оптических фильтрах применяются дифракционные решетки [2] и фотонные кристаллы [3] с микро- и наноразмерными поверхностными и объемными неоднородностями.

Исследования с целью совершенствования фильтров направлены на увеличение независимости их характеристик от угла падения [4] или, напротив, на использование угловой зависимости спектра пропускания [5]. Одиночная нанощель в металлической пленке, окруженная диэлектрическими решетками, предложена для усиленного пропускания направленных световых лучей двух длин волн [6]. Представлены новые возможности для сужения полосы пропускания фильтров [7]. В некоторых случаях фильтры обладают адаптивными свойствами – в [8] описан самоадаптивный фотохромный фильтр для сглаживания краев и коррекции изображений.

Для определения коэффициентов отражения и пропускания многослойных покрытий дополнительно к известным матричным и рекур-

рентным методам расчета по формулам Френеля предложена модульная концепция [9]. В [10] проведен численный анализ направленного пропускания через одиночную щель в металлической пленке с периодическими диэлектрическими барьерами на входной и выходной поверхностях. Свойства направленного светопропускания оконных систем с жалюзи исследованы на основе функции распределения двунаправленного пропускания [11]. Регулирование светопропускания оконных конструкций требует использования дополнительных устройств перераспределения светового потока для адаптации к траектории солнца. Для изменения спектра и интенсивности проходящего в помещение солнечного излучения применяются смарт-стекла различных видов с тонкопленочными покрытиями [12], с фотохромными [13], электрохромными [14] и жидкокристаллическими [15] слоями. Эффект поляризации света используется для достижения невидимости через окно при определенных углах наблюдения [16].

Среди всего многообразия отсутствуют оптические фильтры, пропускающие только требуемую и предварительно рассчитанную часть падающего излучения в разных диапазонах углов падения. В данной работе представлен решеточный фильтр для углового селективного регулирования направленного светопропускания без дополнительных устройств перераспределения световых потоков. Оценены возможные области его применения. Угловые селективные

характеристики светопропускания фильтров с разными геометрическими параметрами рассчитаны графоаналитическим методом. Установлены основные закономерности влияния различных параметров фильтра на результаты регулирования. Предварительный подбор геометрических и оптических параметров чередующихся полос решеток дает возможность пред-адаптированного регулирования при заранее известной траектории движения источника света. Расчетные характеристики, скорректированные с учетом сопутствующих физических факторов, сравнены с экспериментальными данными. Приведен алгоритм подбора параметров фильтра для удовлетворения предварительно заданных требуемых характеристик светопропускания.

1 Конструкция фильтра, метод расчета его параметров и области применения

1.1 Конструкция решеточного оптического фильтра

Основу фильтра составляет стеклянная подложка. При необходимости изменения спектра проходящего излучения применяется окрашенное стекло, как в обычных абсорбционных фильтрах. На двух поверхностях стекла фильтра формируются чередующиеся пропускающие и поглощающие полосы миллиметровых и субмиллиметровых ширин. Образованные чередующимися полосами макроскопические решетки принципиально отличаются от дифракционных не только назначением и размерами, но и возможностью ступенчатого или градиентного изменения оптических и геометрических параметров. В макрорешетках возможно использование как тонкопленочных, так и толстопленочных, в т. ч. и многослойных покрытий, подобно интерференционным фильтрам. В зависимости от формы стеклянной подложки чередующиеся полосы м. б. параллельными или криволинейными на плоских и гнутых поверхностях, концентрическими на линзах. Таким образом, предлагаемый фильтр имеет свойства как абсорбционных, так и дихроичных частотных фильтров. Благодаря субмиллиметровым размерам неоднородностей на поверхностях, в отличие от [2, 3], оптические характеристики фильтра можно рассматривать исключительно в пределах геометрической оптики. Соответственно, упрощается и метод расчета этих характеристик по сравнению с известными методами [9–11].

На рис. 1 приведена схема светопропускания решеточного фильтра. На поверхностях плоскопараллельной подложки толщиной s чередуются пропускающие (шириной t_1 и t_3) и поглощающие (t_2 и t_4) параллельные полосы. Аналогично периоду дифракционной решетки, макрорешетка характеризуется шагом полос – суммарной шириной двух соседних полос. Для равномерного регулирования по поверхности всего фильтра шаги должны быть одинаковыми (на рис. 1: $t_1+t_2=t_3+t_4$) или кратными (кратность шагов равна отношению $(t_1+t_2)/(t_3+t_4)$). Сдвиг входной и выходной решеток фильтра друг относительно друга характеризуется углом падения луча, проходящего через центры чередующихся полос. На рис. 1 указан характеристический угол Q_{30} – при угле падения 30° луч проходит через центры пропускающей полосы входной решетки и после преломления под углом Q_n – поглощающей полосы выходной решетки. Для характеристического угла показаны смещение l_{30} преломленного луча на выходной решетке относительно непреломленного луча при нормальном угле падения и длина d_{30} пути прохождения преломленного луча через стекло фильтра.

Часть падающего излучения, равная отношению площади поглощающих полос входной решетки ко всей ее площади, блокируется этой решеткой независимо от угла падения. Выходная решетка дополнительно блокирует часть дошедшего до нее излучения уже в зависимости от угла падения (рис. 1). Общий коэффициент светопропускания фильтра равен отношению той части суммарной площади пропускающих полос выходной решетки, через которую про-

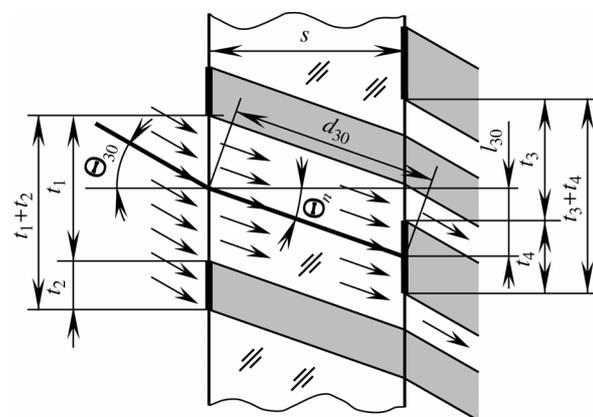


Рисунок 1. Схема светопропускания решеточного фильтра

ходит излучение при данном угле падения, ко всей площади входной решетки. Это отношение полностью зависит от предварительного выбора геометрических размеров и формы чередующихся полос обеих решеток и сдвига этих решеток друг относительно друга (характеристического угла). Поэтому при известной траектории источника света относительно фильтра можно заранее рассчитать его геометрические параметры для обеспечения требуемых значений коэффициента светопропускания при любых углах и диапазонах углов падения в пределах $0^\circ-90^\circ$. Таким образом, селективное по углам падения фильтрование можно пред-адаптировать к движению источника света. Благодаря угловому селективному фильтрованию интенсивности излучения предлагаемый фильтр отличается от нейтральных фильтров, равномерно снижающих интенсивность независимо от углов падения, а также от других типов разрабатываемых оптических фильтров [1–8].

1.2 Графоаналитический метод расчета коэффициента светопропускания фильтра

Характеристики направленного светопропускания фильтра в зависимости от углов падения световых лучей при разных оптических и геометрических параметрах чередующихся полос и взаимном расположении входной и выходной решеток определяются графоаналитическим методом [17]. На рис. 2 приведена схема для расчета светопропускания фильтра №1 с параметрами из табл. 1. Указаны преломленные лучи для углов падения $0^\circ-90^\circ$ через каждые 10° и для угла 45° . Эти лучи показывают границы направленного светопропускания через входную поверхность фильтра в пределах одного шага полос.

В простейшем случае для плоскопараллельного фильтра с параллельными чередующимися полосами при расчете коэффициента пропускания τ рассмотренные выше площади полос решеток можно заменить ширинами соответствующих полос

$$\tau = h/(t_1 + t_2) \quad (1)$$

где h – ширина светопропускания (ширина части пропускающих полос выходной решетки, через которую преломленные лучи направленно проходят в пределах одного шага полос). Определяется графоаналитическим методом через функцию смещения [17] – угловую зависимость смещения l преломленного луча на выходной поверхности от-

носительно непреломленного луча при нормальном угле падения. Зависимость получена из прямоугольного треугольника с катетами s и l (l_{30} на рис. 1) с учетом закона Снелла

$$l = \frac{s \sin \Theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \Theta}} \quad (2)$$

Из рис. 2 видно, что в диапазоне углов падения от 0° примерно до 14° ширина светопропускания уменьшается. При анализе получена расчетная формула для этого диапазона

$$h = 0,5t_1 - 0,5t_4 + l_c - l \quad (3)$$

где l_c – смещение преломленного луча для характеристического угла падения (на рис. 2 $l_c = l_{30}$).

Угол падения, при котором самый нижний луч, прошедший через пропускающую полосу входной решетки, после преломления точно попадает на нижний край поглощающей полосы выходной решетки (примерно 14°), является экстремальным. Смещение преломленного луча при этом угле рассчитывается по формуле

$$l = -0,5t_1 + 0,5t_4 + l_c \quad (4)$$

Угол падения при известном смещении выражается из формулы (2)

$$\Theta = \arcsin \left(\frac{nl}{\sqrt{s^2 + l^2}} \right) \quad (5)$$

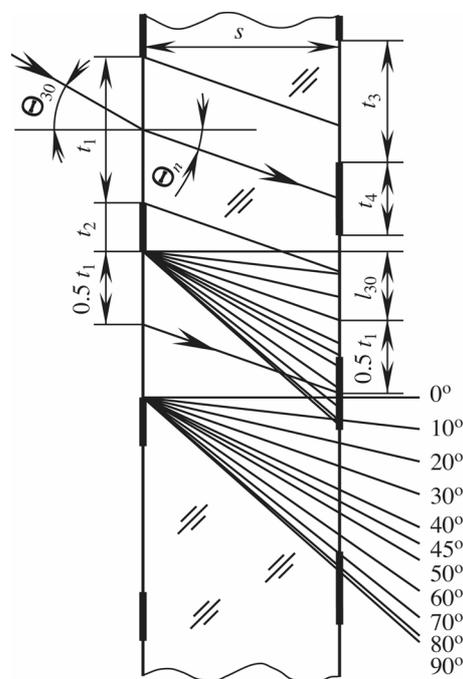


Рисунок 2. Схема для графоаналитического расчета фильтра №1

При подстановке в эту формулу вычисленного по формуле (4) смещения получено точное значение экстремального угла $14,22^\circ$.

При дальнейшем увеличении угла падения ширина светопропускания не изменяется и равна

$$h = t_1 - t_4 \quad (6)$$

Ширина неизменна до следующего экстремального угла $45,55^\circ$, определенного по формуле (5) через смещение

$$l = 0,5t_1 - 0,5t_4 + l_c \quad (7)$$

Далее ширина светопропускания возрастает в соответствии с формулой

$$h = 0,5t_1 - 0,5t_4 - l_c + l \quad (8)$$

При экстремальном угле $68,53^\circ$, определенном при условии

$$l = -0,5t_1 + t_3 + 0,5t_4 + l_c \quad (9)$$

до угла падения 90° ширина светопропускания вновь остается неизменной и равна

$$h = t_3 \quad (10)$$

Таким образом, при анализе рис. 2 выделены четыре диапазона с одинаковым характером изменения ширины светопропускания.

1.3 Анализ расчетных формул ширины светопропускания и смещений при экстремальных углах

По описанному методу на основе анализа расчетных схем для фильтров №2–20 с параметрами по табл. 1 получены соответствующие расчетные формулы. Участки убывания ширины светопропускания для всех фильтров с единичной кратностью шагов рассчитываются по формуле (3). Для фильтров №2 и №3 при $t_1 = t_4$ она упрощается до формулы $h = l_c - l$. Фильтр №3 имеет второй участок убывания, т. к. прошедшая через входную решетку полоса света после преломления переходит на соседний шаг полос выходной решетки (в отличие от рис. 1, где верхняя граница этой полосы даже при 90° еще не попадает на следующую пропускающую полосу). Поэтому расчетная формула для этого участка $h = 0,5t_1 + t_3 + 0,5t_4 + l_c - l$ идентична формуле (3) при отнятии шага полос $t_3 + t_4$. Формула для фильтра №4 $h = t_1 + l_c - l$ отличается от формулы (3) на $0,5(t_1 + t_2)$ – на половину шага полос, т. к. центральный луч проходит через центр пропускающей, а не поглощающей полосы выходной решетки (табл. 1) и эта решетка сдвинута по сравнению с фильтром №1 на половину шага полос. Подобные закономерности получены и для фильтров №15, 16 и 18 с кратными шагами полос,

однако количество угловых диапазонов с одинаковым характером изменения ширины светопропускания увеличивается в соответствии с возрастанием кратности шагов. Это связано с тем, что одна из решеток – с меньшим шагом полос – имеет несколько пар чередующихся пропускающих и поглощающих полос в пределах одного шага другой решетки.

Участки возрастания ширины светопропускания рассчитываются по формуле (8) с такими же исключениями, как для формулы (3). При изменении угла падения в обеих формулах изменяется только значение смещения l . Эти формулы отличаются друг от друга знаками перед слагаемыми смещений l_c и l . При постоянных значениях остальных слагаемых (ширин полос) изменение ширины светопропускания зависит только от разности смещений. Тогда в одном и том же диапазоне углов падения наклон характеристик регулирования (угловых зависимостей коэффициента светопропускания по формуле (1)) будет одинаковым для фильтров с разными ширинами чередующихся полос, но с равными шагами полос. При этом участки убывания и возрастания будут симметричны относительно характеристического угла. По формуле (2) смещение l синусоидально зависит от угла падения, т. е. примерно до 60° угловые зависимости ширины светопропускания, следовательно, и коэффициента светопропускания, будут близки к линейным. Кроме того, в этом диапазоне углов падения линии будут эквидистантными, т. к. наклон линий также зависит от смещения l . При дальнейшем увеличении углов падения до 90° синусоидальная зависимость все сильнее отличается от линейной и эти закономерности нарушаются.

Горизонтальные участки с минимальной шириной светопропускания для всех фильтров с единичной кратностью шагов рассчитываются по формуле (6), с максимальной – по формуле (10). Из уравнения шагов $t_1 + t_2 = t_3 + t_4$ следует, что разность между максимальной и минимальной шириной полосы светопропускания фильтра равна $t_3 - t_1 + t_4 = t_2$, т. е. ширине поглощающей полосы входной решетки. При этом по формуле (1) разность коэффициентов светопропускания равна $t_2 / (t_1 + t_2)$. Для некоторых фильтров горизонтальные участки с одним и тем же светопропусканием повторяются дважды. Для фильтров с кратными шагами полос расчетные формулы

аналогичны формулам (6) и (10), однако количество угловых диапазонов с одинаковым минимумом или максимумом светопропускания увеличивается при возрастании кратности шагов.

Фильтры №1 и №17 имеют одинаковые решетки, но входная и выходная решетки заменены местами (реверсивное падение лучей) и сдвинуты друг относительно друга для сохранения одного и того же характеристического угла 30° . При этих условиях расчетные формулы во всех угловых диапазонах регулирования идентичны и зависимости коэффициента светопропускания для двух фильтров полностью совпадают. Такая же закономерность получена для фильтров №15 и №18 с кратными шагами.

По итогам анализа всех формул для расчета ширины светопропускания для фильтров №1–20 общую расчетную формулу для фильтра с произвольными геометрическими параметрами можно представить в виде

$$h = a_1 t_1 + a_2 t_2 + a_3 t_3 + a_4 t_4 + b_1 l_c + b_2 l \quad (11)$$

где коэффициенты a_i – целые или полуцелые числа; $b_i = \{-1; 0; 1\}$.

Из формулы (11) можно исключить одну из ширин полос t_i , воспользовавшись уравнением шагов с учетом их кратности.

Формулы (4), (7) и (9) для расчета смещений преломленных лучей при экстремальных углах для фильтра №1 получаются при приравнивании формул для расчета ширин светопропускания соседних участков. Аналогично и для остальных фильтров из табл. 1.

1.4 Коррекция расчетного коэффициента светопропускания фильтра

Разработанный графоаналитический метод позволяет геометрическим путем определить светопропускание фильтра путем замены отношения интенсивностей прошедшего и падающего излучения отношением соответствую-

Таблица 1. Геометрические параметры фильтров при толщине стекла $s=4$ мм (для фильтра №19 $s=6$ мм) и относительном показателе преломления $n=1,5$ (для фильтра №20 $n=2$)

№ фильтра	Характеристический угол (град)	Ширина полосы (мм)				Шаг полос (мм)		Кратность шагов	Полосы прохождения центрального луча
		t_1	t_2	t_3	t_4	t_1+t_2	t_3+t_4		
1	30	3,00	1,00	2,50	1,50	4,0	4,0	1,0	$t_1:t_4$
2	30	3,00	1,00	1,00	3,00	4,0	4,0	1,0	$t_1:t_4$
3	30	2,00	2,00	2,00	2,00	4,0	4,0	1,0	$t_1:t_4$
4	30	3,00	1,00	3,00	1,00	4,0	4,0	1,0	$t_1:t_3$
5	30	2,00	2,00	2,00	2,00	4,0	4,0	1,0	$t_1:t_3$
6	10	3,00	1,00	2,50	1,50	4,0	4,0	1,0	$t_1:t_4$
7	45	3,00	1,00	2,50	1,50	4,0	4,0	1,0	$t_1:t_4$
8	60	3,00	1,00	2,50	1,50	4,0	4,0	1,0	$t_1:t_4$
9	80	3,00	1,00	2,50	1,50	4,0	4,0	1,0	$t_1:t_4$
10	30	2,00	1,00	1,50	1,50	3,0	3,0	1,0	$t_1:t_4$
11	30	3,00	2,00	2,50	2,50	5,0	5,0	1,0	$t_1:t_4$
12	30	6,00	2,00	5,00	3,00	8,0	8,0	1,0	$t_1:t_4$
13	60	2,00	1,00	1,50	1,50	3,0	3,0	1,0	$t_1:t_4$
14	60	3,00	2,00	2,50	2,50	5,0	5,0	1,0	$t_1:t_4$
15	30	3,00	1,00	1,25	0,75	4,0	2,0	2,0	$t_1:t_4$
16	30	3,00	1,00	0,50	0,30	4,0	0,8	5,0	$t_1:t_4$
17	30	2,50	1,50	3,00	1,00	4,0	4,0	1,0	$t_1:t_4$
18	30	1,25	0,75	3,00	1,00	2,0	4,0	0,5	$t_2:t_4$
19	30	3,00	1,00	2,50	1,50	4,0	4,0	1,0	$t_1:t_4$
20	30	3,00	1,00	2,50	1,50	4,0	4,0	1,0	$t_1:t_4$

ющих площадей (ширин полос). Результаты расчета необходимо корректировать с учетом угловой зависимости отражения от входной и выходной поверхностей по формулам Френеля и поглощения стеклом фильтра по закону Бугера-Ламберта.

По формулам Френеля коэффициенты отражения волн, поляризованных перпендикулярно и параллельно плоскости падения, соответственно составляют $\rho_s = \sin^2(\Theta - \Theta_n) / \sin^2(\Theta + \Theta_n)$ и $\rho_p = \text{tg}^2(\Theta - \Theta_n) / \text{tg}^2(\Theta + \Theta_n)$. При нормальном падении коэффициент отражения равен $\rho_0 = (n-1)^2 / (n+1)^2$, т. е. $\rho_0 = 0,04$ при $n=1,5$. Для линейно поляризованного света с азимутом колебаний падающей волны δ компоненты вектора напряженности электрического поля E равны $E_p = E \cos \delta$ и $E_s = E \sin \delta$. В частном случае при $\delta = 45^\circ$ получается $E_p = E_s$, следовательно, интенсивности перпендикулярно и параллельно поляризованных составляющих падающей волны также равны. Тогда суммарный коэффициент отражения вычисляется так же, как для естественного (неполяризованного) света: $\rho = 0,5(\rho_s + \rho_p)$.

С учетом отражения от входной и выходной поверхностей фильтра (пренебрегая многогранными внутренними отражениями), а также поглощения по закону Бугера-Ламберта, коэффициент пропускания равен

$$\tau = (1 - \rho)^2 \exp(-\alpha d), \quad (12)$$

где α – натуральный коэффициент поглощения стекла, d – длина пути прохождения преломленного луча через стекло фильтра. Вычисляется по формуле, полученной из прямоугольного треугольника с катетами s и l (на рис. 2 катеты s и l_{30}), с учетом формулы (2)

$$d = s \sqrt{1 + \sin^2 \Theta / (n^2 - \sin^2 \Theta)} \quad (13)$$

Из формул (12) и (13) получена формула для расчета коэффициента пропускания с учетом отражения и поглощения для плоскопараллельных фильтров

$$\tau = (1 - \rho)^2 \exp(-\alpha s \sqrt{1 + \sin^2 \Theta / (n^2 - \sin^2 \Theta)}) \quad (14)$$

При применении графоаналитического метода для расчета фильтров с криволинейными поверхностями формула (2), следовательно, и формулы (13) и (14), соответственно видоизменяются. При расчете светопропускания фильтров с отражающими и рассеивающими полосами учитывается увеличение отраженного и появление проходящего рассеянного излучения.

1.5 Перспективы применения фильтра

Применение рассмотренного способа имеет перспективы для создания семейства фильтров разного назначения. Особенно такой способ фильтрования был бы полезен при архитектурном остеклении для регулирования проходящего в помещение светового потока в зависимости от угла падения лучей без использования дополнительных устройств перераспределения световых потоков. Имеется возможность нанесения на поверхности оконного остекления наклонных чередующихся полос, адаптированных к траектории солнца по отношению к заданному азимуту окна, например, для наиболее жаркого сезона года. По сравнению с жалюзи и другими солнцезащитными устройствами фильтр не требует ручного или автоматического управления, прост для использования в окнах с криволинейными и наклонными поверхностями, позволяет разделять площадь окна на зоны с разными характеристиками пропускания.

В оконных конструкциях при двойном или тройном остеклении решетки фильтра можно располагать на любых из четырех или шести поверхностей стекла. Для рациональной защиты от солнца на входной решетке целесообразно применять отражающие полосы, на выходной – рассеивающие, т. к. главной задачей является ограничение прохождения прямых (направленных) лучей. При использовании активных тонких слоев смарт-стекло [12–15] не на всей поверхности стекла, а в виде чередующихся полос решеток фильтра, добавится функция селективного углового регулирования светопропускания. Кроме расчета солнцезащиты при известной широте местности для конкретного окна с заданными азимутом и параметрами окружающей застройки, возможен комплексный расчет для обеспечения невидимости из окон противостоящих зданий, а также уменьшения тепловых потерь длинноволнового излучения от отопительных приборов. Для такого двустороннего регулирования свето- и теплопропускания можно применить более двух решеток с чередующимися полосами с разными оптическими и геометрическими параметрами.

При необходимости селективного углового регулирования светопропускания возможно использование фильтра и в других областях – при остеклении транспортных средств, в производстве оптических систем, светотехнической аппаратуры и очков.

2 Угловые селективные характеристики регулирования направленного светопропускания

2.1 Расчетные характеристики регулирования светопропускания

Параметры фильтров №1–20 в табл. 1 подобраны для демонстрации широких возможностей пред-адаптированного углового селективного регулирования светопропускания при заранее известных условиях взаимного движения источника и остекленного объекта (фильтра). Коэффициенты светопропускания фильтров рассчитываются по формуле (1) с подстановкой значений ширин светопропускания, вычисленных по формулам (3), (6), (8), (10) и их аналогам. На рис. 3, а–д приведены расчетные угловые характеристики регулирования для фильтра №1 (линия 1) и для остальных 19 фильтров (линии 2–20), объединенные в пять групп с общими свойствами для сравнения с фильтром №1.

Характеристики регулирования подтверждают общие закономерности, выявленные при анализе расчетных формул (1)–(10). Из рис. 3, а–д видно, что для всех фильтров с одинаковым шагом полос наклоны линий в угловых диапазонах совпадают, в т. ч. и при разных кратностях шагов. При уменьшении шага полос линии 10 и 13 на рис. 3, с по сравнению с линией 1 показывают более интенсивное регулирование, при увеличении шага (линии 11 и 14) регулирование, напротив, ослабевает. Линия 12 показывает, что уже при двухкратном превышении значения шага полос над толщиной стекла фильтра угловое регулирование прекращается, т. е. шаг полос д. б. сравнимым с толщиной. Эквидистантность линий регулирования при одинаковых шагах полос наблюдается (рис. 3, б–д) до углов падения примерно до 60° , при больших углах нарушается. То же касается симметричности участков возрастания и убывания относительно характеристических углов фильтров (рис. 3, а–д). Линейная зависимость характеристик регулирования также нарушается при увеличении углов падения (в [17] показано, что и при углах до 60° зависимость незначительно отличается от линейной и линии имеют точки перегиба). При больших углах регулирование светопропускания ослабляется (линии становятся более пологими), т. к. в формулах (3) и (8) абсолютные значения ширин полос становятся более значимыми, чем значения смещения.

Выбор ширин чередующихся полос влияет как на значения коэффициента светопропускания и ширины интервалов его изменения, так и на ширины угловых диапазонов регулирования. Из рис. 3, а видно, что при равенстве ширин пропускающих и поглощающих полос на разных решетках горизонтальные участки отсутствуют (линии 2–5), при замене местами пропускающих и поглощающих полос на выходной решетке линии осесимметричны относительно горизонтали (линии 2 и 3 по отношению к линиям 4 и 5). При изменении характеристических углов фильтров линии эквидистантно сдвигаются вдоль угловой оси (рис. 3, б). При увеличении кратности шагов возрастает количество угловых диапазонов регулирования, причем количество периодов линий, напоминающих «синусоиды», примерно равно кратности шагов (рис. 3, г). При реверсивном падении лучей на фильтры и сохранении их характеристических углов линии полностью совпадают (на рис. 3, г линии 1 и 17 при одинаковой кратности шагов, 15 и 18 при разной кратности). Степень углового регулирования ослабляется при уменьшении толщины стекла фильтра и увеличении показателя преломления стекла (рис. 3, д).

2.2 Экспериментальные характеристики регулирования светопропускания

Для проверки результатов графоаналитического расчета угловых характеристик фильтров №1, 3, 5, 7, 11, 15 и 16 изготовлены их экспериментальные образцы. Основой фильтров являются листы из стекла марки М1 по ГОСТ 111-2001 с показателем преломления $n=1,5$ и толщиной 4 мм. На обе поверхности наклеены полиэфирные пленки с напечатанными на лазерном принтере чередующимися черными (поглощающими) полосами. Ширины полос и остальные геометрические параметры соответствуют приведенным в табл. 1. Для дополнительной сравнительной оценки светопропускания для каждого фильтра изготовлены по два образца с наклеенными только с одной стороны пленками со входными и выходными решетками, а также образцы с чистым стеклом и со стеклами с наклеенными по разным вариантам чистыми (без печати) и полностью черными пленками.

Экспериментальная установка (рис. 4) состоит из лазера с длиной волны 532 нм, двухлинзового расширителя пучка и поворотной кассе-

ты со сменным образцом фильтра и датчиком люксметра. Азимут плоскости поляризации лазера равен $d=45^\circ$, угол расхождения расширенного пучка $0,01$ рад. Диаметр падающего на каскету пучка больше диаметра входной апертуры. Коэффициент направленного пропускания света определяется на основе ГОСТ 26302-93 как отношение освещенности от прошедшего через фильтр излучения к падающей освещенности, измеряемой при снятом фильтре. При принятой схеме измерения уменьшение интенсивности падающего излучения при увеличении угла падения (при повороте кассеты) по закону косинусов Ламберта не учитывается. Т. к. при расчетах это также не учитывается, то отношение измеренных освещенностей должно соответствовать отношению расчетных ширин полос по формуле (1), скорректированному с учетом формулы (14). Измерения освещенности проводятся через каждые 5° в диапазоне углов падения $0^\circ-60^\circ$, в кото-

ром практическое применение рассматриваемого способа регулирования является наиболее востребованным.

На рис. 5 приведены угловые характеристики светопропускания фильтра №1 и дополнительных образцов. Линия 1 построена по результатам графоаналитического расчета по формуле (1), проведенного через каждые 5° (для тех же углов, как и при экспериментах), а не через $0,5^\circ$, как при построении линии 1 для этого же фильтра на рис. 3. Линия 2 является результатом корректировки линии 1 с учетом потерь на отражение и поглощение по формуле (14). Значение коэффициента поглощения для образцов из оконного стекла принято $a=10\text{ м}^{-1}$ при $l=532\text{ нм}$ [18]. Суммарный коэффициент отражения вычислен с учетом азимута $d=45^\circ$. Линия 3 построена по результатам экспериментов для фильтра №1. Среднее отклонение экспериментальной линии 3 от скорректированной расчетной линии 2 в

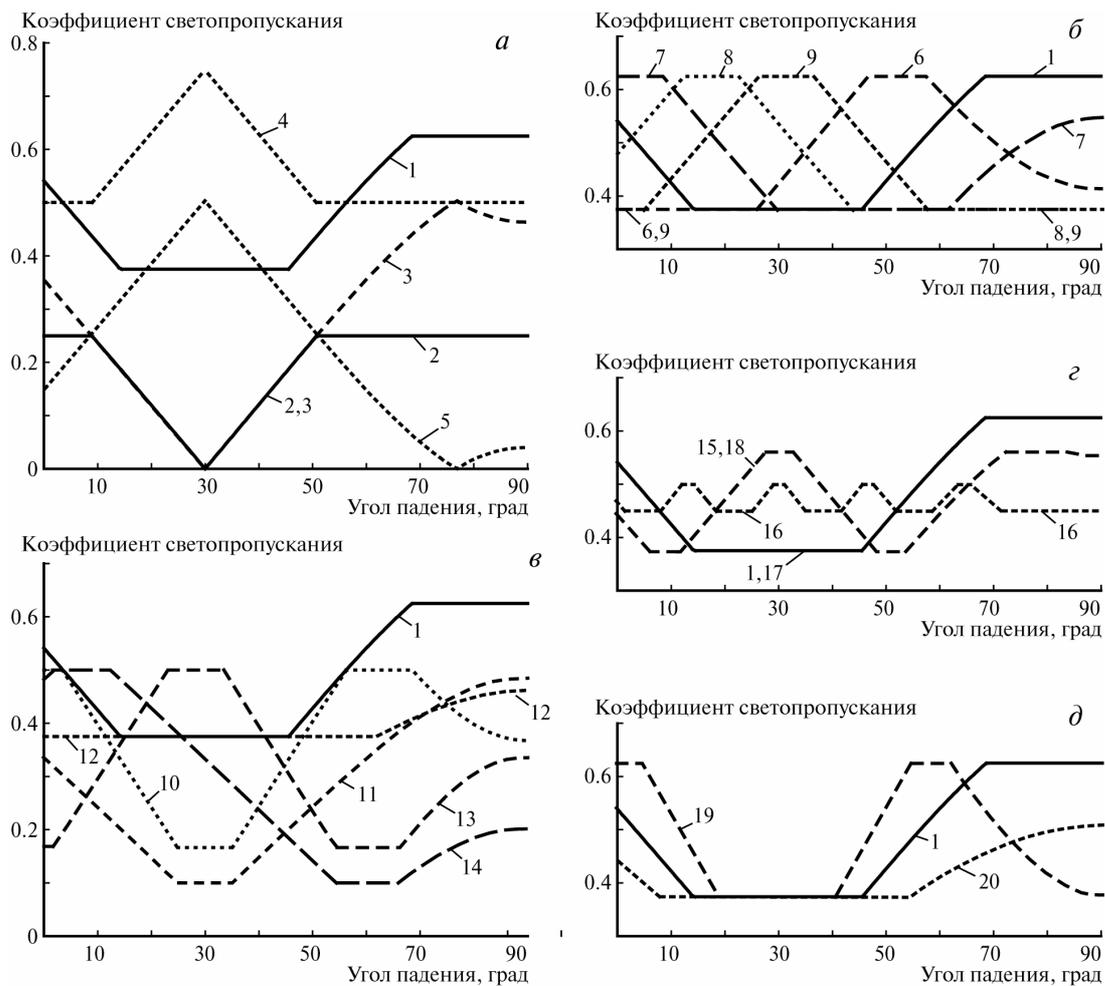


Рисунок 3, а–д. Расчетные угловые характеристики регулирования фильтров №1–20

диапазоне углов 0° – 60° составляет $-2,3\%$ (значения коэффициента пропускания t по экспериментальным данным меньше расчетных в среднем на $0,023$). Максимальные отклонения в меньшую и большую стороны: $-4,3\%$ при угле падения 10° и $+2,3\%$ при 60° .

Линиями 4 и 5 представлены результаты экспериментов для образцов фильтра №1 со входной и выходной решетками соответственно (обратные поверхности чистые, без пленок). Линии 4 и 5 практически эквидистантны, коэффициент пропускания выходной решетки меньше, чем у входной, в среднем на $12,85\%$. Это близко к расчетному значению – $12,5\%$, полученному по соот-

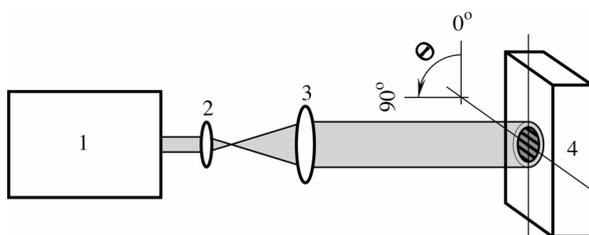


Рисунок 4. Схема измерения светопропускания фильтра при разных углах падения. 1 – лазер, 2 и 3 – линзы, 4 – поворотная кассета с фильтром и датчиком люксметра

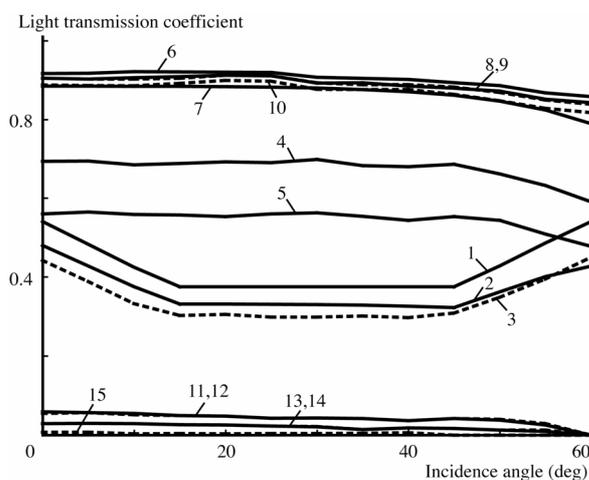


Рисунок 5. Угловые характеристики светопропускания фильтра №1 (линии 1–5) и дополнительных образцов стекла (линии 6–15). 1 – результаты графоаналитического расчета; 2 – скорректированные результаты расчета; 3, 4 и 5 – экспериментальные данные для фильтра и его входной и выходной решеток соответственно; 6 и 7 – экспериментальные и расчетные данные для чистого стекла; 8, 9 и 10 – стекла с чистой пленкой на входной, выходной и обеих поверхностях соответственно; 11 и 12 – стекла с черной пленкой на входной и выходной поверхностях соответственно; 13 и 14 – стекла с черной пленкой на входной и чистой пленкой на выходной поверхностях и наоборот; 15 – стекло с черной пленкой на обеих поверхностях

ношениям ширины полос (при одинаковых шагах полос 4 мм входная решетка пропускает 75% падающего излучения при ширине пропускающей полосы 3 мм, выходная решетка – $62,5\%$ при $2,5$ мм). С учетом потерь на отражение и поглощение по формуле (14) разность между средними значениями расчетных коэффициентов пропускания входной ($64,97\%$) и выходной ($54,14\%$) решеток в диапазоне углов 0° – 60° составляет $10,83\%$.

Линия 6 построена по результатам экспериментов для образца из чистого стекла (без наклеенных пленок), линия 7 – по расчетам коэффициента пропускания по формуле (5) для такого же стекла. Экспериментальные данные превышают расчетные в среднем на $4,2\%$, при этом линии 6 и 7 эквидистантны (за исключением углов, приближающихся к 60°). Практически совпадающие линии 8 и 9 (отличие в среднем на $0,14\%$) показывают, что светопропускание образца из чистого стекла с одной наклеенной прозрачной пленкой уменьшается в среднем на $1,69\%$ (по сравнению с линией 6). Линия 10 для образца с двумя такими пленками показывает уменьшение в среднем на $3,59\%$. У образца стекла с черной пленкой на входной или выходной поверхности (совпадающие линии 11 и 12) коэффициент пропускания равен в среднем $0,0417$ ($4,17\%$). Если при этом на обратную поверхность дополнительно наклеена чистая пленка (совпадающие линии 13 и 14), то коэффициент пропускания равен в среднем $0,0201$ ($2,01\%$). Для образца с двумя черными пленками (линия 15) средний коэффициент пропускания составляет $0,0035$ ($0,35\%$).

Экспериментальные линии 4 и 5 для входной и выходной решеток фильтра №1, 6 для чистого стекла и 8–15 для дополнительных образцов эквидистантны расчетной линии 7. Во всех этих случаях наблюдается самопроизвольное изменение светопропускания в зависимости от угла падения из-за воздействия объективных физических факторов, прежде всего отражения, и в меньшей степени поглощения (формула (12)). Как известно, эти факторы начинают интенсивно влиять на светопропускание только при больших углах падения (до 30° все линии практически горизонтальны, сильное искривление начинается при углах 50° – 60°). Таким образом, применение двух решеток обеспечивает дополнительное к самопроизвольному изменению светопропускания его принудительное

селективное регулирование по углам падения. На рис. 6, а–е приведены угловые характеристики светопропускания фильтров №3, 5, 7, 11, 15 и 16, построенные аналогично линиям 1–5 для фильтра №1.

В табл. 2 приведены результаты обработки экспериментальных данных для 7 фильтров в виде средних отклонений кривых 3 от кривых 2 (рис. 5 и 6) для каждого фильтра в диапазоне углов падения 0° – 60° , а также максимальных отклонений в меньшую и большую стороны с указанием соответствующих углов.

В общем для всех 7 фильтров, как видно из табл. 2 и рис. 5 и 6, экспериментальные значения коэффициентов светопропускания меньше расчетных (наибольшее среднее отклонение – 4,0% у фильтра №16). Светопропускание экспериментальных образцов по сравнению с расчетными данными уменьшается из-за наклеенных пленок (кривые 6 и 10 на рис. 5), прозрачные части которых являются пропускающими полосами обеих решеток. Максимальные отклонения в меньшую и большую стороны не превышают 5,6%. Результаты проведенных экспериментов полностью подтверждают полученные графоаналитическим методом угловые ха-

рактеристики регулирования светопропускания фильтров.

2.3 Алгоритм расчета геометрических параметров фильтра по заданным характеристикам регулирования

Полученные выше закономерности позволяют определить геометрические параметры фильтра, удовлетворяющие требуемой и заранее заданной характеристике регулирования направленного светопропускания. Расчет параметров плоскопараллельного фильтра с толщиной стекла s и показателем преломления n производится по следующему алгоритму.

1. Заданный закон регулирования в виде угловой зависимости коэффициента направленного светопропускания приведен на рис. 7 точечной линией. При приближении углов падения к 90° требуемые значения коэффициента светопропускания стремятся к нулю вследствие возрастания коэффициента отражения. Заданная зависимость корректируется с учетом отражения по формулам Френеля и поглощения по закону Бугера-Ламберта. Скорректированная зависимость представлена штриховой линией.

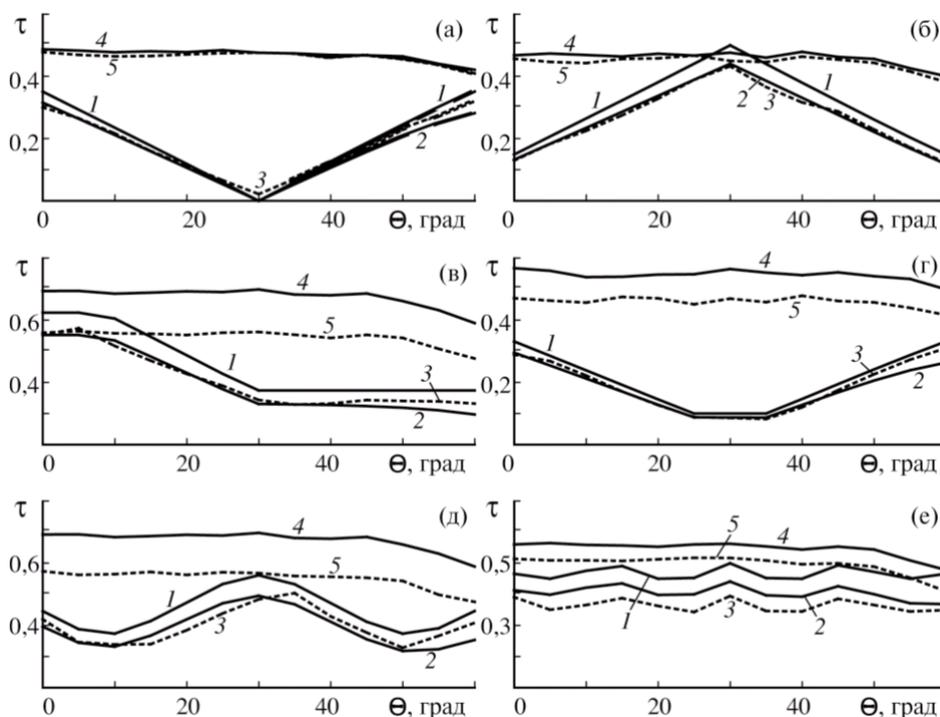


Рисунок 6, а–е. Угловые характеристики светопропускания фильтров №3 (а), 5 (б), 7 (в), 11 (г), 15 (д) и 16 (е). 1 – результаты графоаналитического расчета; 2 – скорректированные результаты расчета; 3, 4 и 5 – экспериментальные данные для фильтра и его входной и выходной решеток соответственно

2. Скорректированная линия аппроксимируется ломаной с учетом закономерностей, полученных при графоаналитических расчетах. Результат показан на рис. 7 сплошной линией.

3. Определяется значение характеристического угла фильтра Θ_c по вертикальной оси симметрии между участками убывания и возрастания ломаной линии.

4. Для определения значений ширин всех чередующихся полос и шагов полос на входной и выходной решетках фильтра на наклонном участке ломаной линии регулирования выбираются две точки (1 и 2 на рис. 7) и определяются соответствующие углы Θ_1 и Θ_2 , коэффициенты t_1 и t_2 . Из формул (1)–(3) для участка убывания ширины полосы светопропускания

$$\tau = \frac{0,5\tau_1 - 0,5\tau_4 + \frac{s\sin\Theta_c}{\sqrt{n^2 - \sin^2\Theta_c}} - \frac{s\sin\Theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2\Theta}}}{t_1 + t_2} \quad (15)$$

Для нахождения четырех неизвестных значений ширин полос t_i формула (15) применяется дважды с подстановкой t_1 и Θ_1 , t_2 и Θ_2 . Третье уравнение составляется для одного из горизонтальных участков линии регулирования. Например, при минимальном светопропускании из формул (1) и (6)

$$\tau = (t_1 - t_4)/(t_1 + t_2) \quad (16)$$

Для расчета по формуле (16) используется значение t_3 , определенное по рис. 7. В качестве четвертого уравнения для нахождения всех неизвестных берется уравнение шагов $t_1 + t_2 = t_3 + t_4$. Таким образом, определены все геометрические параметры требуемого фильтра.

Выводы

В статье представлены конструкция и принцип действия нового многослойного решетчатого оптического фильтра для углового селективного регулирования светопропускания, графоаналитический метод расчета его параметров и исследование его расчетных и экспериментальных оптических угловых характеристик. Благодаря макрорешеткам с чередующимися полосами, образованным на обеих поверхностях стеклянной подложки, и их взаимному расположению, достигается угловая селективность светопропускания. Предварительный

Таблица 2. Отклонения экспериментальных значений коэффициентов светопропускания от расчетных для фильтров №1, 3, 5, 7, 11, 15 и 16

№ фильтра	Среднее отклонение (%)	Максимальное отклонение при угле падения			
		%	град	%	град
1	-2,3	-4,3	10	+2,3	60
3	+1,5	-1,0	0	+4,3	60
5	-0,4	-2,1	35	+1,1	45
7	+1,1	-1,7	10	+3,7	60
11	+1,0	-0,6	40	+5,0	60
15	+0,9	-3,4	20	+5,6	60
16	-4,0	-5,6	25	-	-

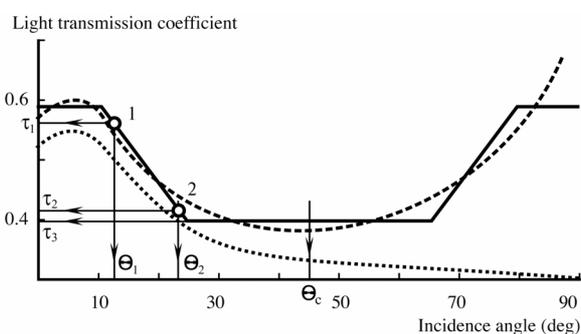


Рисунок 7. Аппроксимация заданного закона регулирования

подбор параметров фильтра в результате графоаналитического расчета дает возможность пред-адаптации к изменению углов падения световых лучей при известной траектории источника света. Установлена степень влияния различных параметров фильтра на характеристики регулирования.

Экспериментальные данные в диапазоне углов 0°–60° находятся в хорошем согласии с расчетными. Разработан алгоритм расчета геометрических параметров фильтра для удовлетворения предварительно заданных требуемых характеристик светопропускания. Данный подход к угловому селективному регулированию светопропускания открывает перспективы для создания новой семьи фильтров с широкими возможностями применения в разных областях. Наибольший практический интерес представляет применение в архитектурном остеклении.

20.06.2013

Список литературы:

1. Macleod, H.A. Thin-Film Optical Filters, 3rd ed. (Institute of Physics, Philadelphia, Pa., 2001).
2. Fehrembach, A.-L., Maystre, D. and Sentenac, A., «Phenomenological theory of filtering by resonant dielectric gratings,» J. Opt. Soc. Am. A. 19, 1136-1144 (2002).
3. Shaoji Jiang, Jianrong Li, Jijia Tang and Hezhou Wang, «Multi-channel and sharp angular spatial filters based on one-dimensional photonic crystals,» Chin. Opt. Lett. 4, 605-607 (2006).
4. Sentenac, A. and Fehrembach, A.-L., «Angular tolerant resonant grating filters under oblique incidence,» J. Opt. Soc. Am. A. 22, 475-480 (2005).
5. Li Chen, Zexuan Qiang, Hongjun Yang, Huiqing Pang, Zhenqiang Ma and Weidong Zhou, «Polarization and angular dependent transmissions on transferred nanomembrane Fano filters,» Opt. Express 17, 8396-8406 (2009).
6. Jian Zhang and Guo Ping Wang, «Simultaneous realization of transmission enhancement and directional beaming of dual-wavelength light by a metal nanoslit,» Opt. Express 17, 9543-9548 (2009).
7. Shaoji Jiang, Yan Liu and Hezhou Wang, «Narrow frequency and sharp angular one-dimensional photonic crystals inserted with heterogeneous defects,» Proc. SPIE 6020, 60202Y (2005).
8. Ferrari, J.A., Flores, J.L., Perciante, C.D. and Frins, E., «Edge enhancement and image equalization by unsharp masking using self-adaptive photochromic filters,» Appl. Opt. 48, 3570-3579 (2009).
9. Mazilu, M., Miller, A. and Donchev, V.T., «Modular Method for Calculation of Transmission and Reflection in Multilayered Structures,» Appl. Opt. 40, 6670-6676 (2001).
10. Zu-Bin Li, Jian-Guo Tian, Wen-Yuan Zhou, Wei-Ping Zang and Chunping Zhang, «Periodic dielectric bars assisted enhanced transmission and directional light emission from a single subwavelength slit,» Opt. Express 14, 8037-8042 (2006).
11. Andersen, M., Rubin, M., Powles R. and Scartezini, J.-L., «Bi-directional transmission properties of Venetian blinds: experimental assessment compared to ray-tracing calculations,» Solar Energy 78(2), 187-198 (2005).
12. Horowitz, F., Pereira, M. B. and de Azambuja G.B., «Glass window coatings for sunlight heat reflection and co-utilization,» Appl. Opt. 50, C250-C252 (2011).
13. Барачевский, В.А., Лашков, Г.И., Цехомский, В.А. Фотохромизм и его применение. М.: Химия, 1977. 279 с.
14. Andersson, A.M., Granqvist, C.G. and Stevens, J.R., «Electrochromic Li_xWO_3 /polymer laminate/ $\text{Li}_y\text{V}_2\text{O}_5$ device: toward an all-solid-state smart window,» Appl. Opt. 28, 3295-3302 (1989).
15. Sueda, K., Tsubakimoto, K., Miyanaga, N. and Nakatsuka, M., «Control of spatial polarization by use of a liquid crystal with an optically treated alignment layer and its application to beam apodization,» Appl. Opt. 44, 3752-3758 (2005).
16. Schechner, Y.Y., Shamir, J. and Kiryati, N., «Polarization and statistical analysis of scenes containing a semireflector,» J. Opt. Soc. Am. A. 17, 276-284 (2000).
17. Закируллин, Р.С. Селективное регулирование направленного светопропускания по углам падения лучей // ЖТФ. – 2012. – Т. 82. – №10. – С. 134–136.
18. Nicolau, V.P. and Maluf, F.P., «Determination of radiative properties of commercial glass,» PLEA (2001).

Сведения об авторе:

Закируллин Рустам Сабирович, доцент кафедры теплогазоснабжения, вентиляции и гидромеханики Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук
460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, ауд. 3015, тел. (3532) 37 24 26, e-mail: rustam.zakirullin@gmail.com