

УДК 535.31, 681.7.06

СПОСОБ УГЛОВОГО СЕЛЕКТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРАВЛЕННОГО СВЕТОПРОПУСКАНИЯ

Р.С. Закируллин

Представлен способ углового селективного регулирования направленного светопропускания при движении источника света относительно остекленного объекта. Оптический фильтр с решеточными слоями на двух поверхностях стеклянной подложки обеспечивает угловое регулирование за счет относительного расположения решеток. Обе решетки состоят из поглощающих, рассеивающих или отражающих полос, чередующихся с полосами необработанной поверхности стекла фильтра. Приведен графоаналитический метод расчета угловых характеристик светопропускания фильтра плоскопараллельной формы. При заранее известной траектории источника света характеристики светопропускания можно предварительно адаптировать к изменению углов падения лучей. Результаты графоаналитического расчета подтверждены экспериментально. Рассмотрены возможности применения способа регулирования в архитектурном остеклении, оптических и светотехнических устройствах.

Ключевые слова: направленное светопропускание, оптический фильтр, решетка с чередующимися полосами, графоаналитический расчет, угловое селективное регулирование.

Введение

Регулирование направленного светопропускания в зависимости от угла падения лучей имеет практическое значение в случаях, когда источник света и (или) остекленный объект движутся друг относительно друга. При изменении угла падения солнечных лучей на окно проходящее в помещение излучение контролируется для достижения оптимальных условий освещения и инсоляции. Угловая зависимость светопропускания учитывается при производстве оптических устройств разного назначения. При увеличении угла падения коэффициенты отражения и поглощения возрастают в соответствии с формулами Френеля и законом Бугера–Ламберта, и светопропускание самопроизвольно уменьшается. Дополнительное регулирование необходимо для получения оптимального светопропускания в тех или иных угловых диапазонах.

В оконных конструкциях со смарт-стеклами регулирование осуществляется дискретно в двух режимах – при пропускании электрического тока через электрохромные [1], жидкокристаллические [2] слои или слои с мелкодисперсными частицами стекло пропускает направленное излучение, при выключении тока проходящее излучение рассеивается. Для регулирования непосредственно по углам падения лучей применяются жалюзи и другие устройства перераспределения светового потока [3].

Определение направления (угла падения) излучения по максимуму интенсивности используется как способ ориентировки оптической системы [4]. Существует много методов исправления различных видов геометрической и хроматической аберрации в оптических устройствах [5]. В светотехнических и оптических приборах для распределения мощности световых потоков по разным направлениям распространены ступенчатые френелевские линзы [6]. Для коррекции зрения применяются очки с многофокальными линзами и позонным распределением показателя преломления. Солнцезащитные очковые лин-

зы с «градиентным окрашиванием» имеют переменные характеристики светопропускания вследствие постепенного изменения цвета и (или) насыщенности окраски поверхности.

Настоящая работа посвящена дальнейшему развитию способа углового селективного регулирования направленного светопропускания, описанного в материалах заявок на изобретение, поданных в США [7] и в Российской Федерации [8]. Исследуется оптический фильтр нового типа, предназначенный для регулирования светопропускания без дополнительных устройств перераспределения световых потоков. Поставлена задача определения взаимосвязи между оптическими и геометрическими параметрами фильтра и угловыми характеристиками его светопропускания. Задача решается расчетным и экспериментальными путями. Обсуждаются перспективы и пути применения способа в архитектурном остеклении, в оптических и светотехнических устройствах.

Оптический фильтр и метод расчета характеристик светопропускания

Фильтр состоит из плоскопараллельной стеклянной подложки, на обеих поверхностях которой формируются тонкослойные решетчатые слои с чередующимися полосами. На поверхность стекла через определенное расстояние наносятся поглощающие, отражающие или рассеивающие полосы, остальные полосы чистой поверхности стекла пропускают излучение направленно. Угловая селективность регулирования обеспечивается за счет взаимного расположения пропускающих полос на входной и выходной поверхностях – при изменении углов падения меняется доля излучения, проходящего через обе решетки фильтра.

На рис. 1 приведена схема для графоаналитического расчета плоскопараллельного решетчатого фильтра с чередующимися пропускающими и поглощающими полосами (изображены тонкими и толстыми линиями соответственно). Указаны границы направленного светопропускания через входную решетку фильтра при падении пучков 1 и 2. Пучок 1 падает под характеристическим углом фильтра – углом падения Θ луча, проходящего через центры пропускающей полосы входной решетки и поглощающей полосы выходной решетки. Этот угол определяет сдвиг решеток фильтра друг относительно друга. Для расчета приняты следующие геометрические и оптические параметры: ширины пропускающих и поглощающих полос $t_1 = 3$ мм и $t_2 = 1$ мм на входной решетке, $t_3 = 2,5$ мм и $t_4 = 1,5$ мм на выходной решетке, показатель преломления $n = 1,5$ и толщина стекла $s = 4$ мм. Шаги полос (суммарные ширины двух соседних чередующихся полос) на входной и выходной решетках одинаковы: $t_1 + t_2 = t_3 + t_4 = 4$ мм.

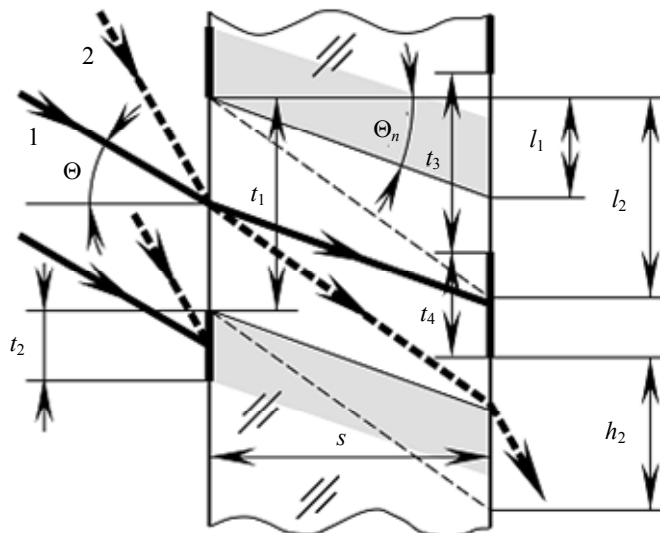


Рис. 1. Схема плоскопараллельного решетчатого фильтра

Через входную решетку при любом угле падения проходит одна и та же часть падающего излучения, равная отношению ширины пропускающей полосы к величине шага полос. Через выходную решетку излучение проходит в зависимости от угла падения, так как указанные на рисунке границы направленного светопропускания передвигаются относительно чередующихся полос выходной решетки. Таким образом, интенсивность проходящего через весь фильтр излучения имеет угловую зависимость. Графоаналитический расчет устанавливает взаимосвязь между оптическими и геометрическими параметрами фильтра и угловыми характеристиками его светопропускания.

Коэффициент светопропускания τ плоскопараллельного фильтра рассчитывается по формуле

$$\tau = \frac{h}{t_1 + t_2}, \quad (1)$$

где h – ширина светопропускания (общая ширина той части пропускающих полос выходной решетки, через которую преломленные лучи проходят направленно в пределах одного шага полос). На рис. 1 указана ширина h_2 для пучка 2. Ширина светопропускания рассчитывается на основе функции смещения l преломленного луча [9] – расстояния, на которое при данном угле падения Θ преломленный под углом Θ_n луч смещается на выходной поверхности относительно непреломленного луча при нормальном угле падения (на рис. 1 указаны смещения l_1 и l_2 для лучей 1 и 2):

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

При анализе рис. 1 для диапазона углов падения от 0° до $14,22^\circ$ получена расчетная формула ширины светопропускания $h = 0,5t_1 - 0,5t_4 + l_c - l$, где l_c – смещение преломленного луча при характеристическом угле фильтра. Ширина светопропускания уменьшается в соответствии с этой формулой до угла падения $14,22^\circ$, при котором самый нижний луч, прошедший направленно через входную поверхность, после преломления точно попадает на нижний край поглощающей полосы выходной поверхности. При этом экстремальном угле выполняется равенство $l = -0,5t_1 + 0,5t_4 + l_c$. Точное значение $14,22^\circ$ экстремального угла падения определено путем подстановки вычисленного значения смещения в формулу, полученную из формулы (2):

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

При дальнейшем анализе рис. 1 выделены еще три диапазона с одинаковым характером изменения ширины светопропускания (диапазоны разделены экстремальными углами, для которых указаны равенства для точного определения их значений):

- от $14,22^\circ$ до $45,55^\circ$ ($l = 0,5t_1 - 0,5t_4 + l_c$) ширина светопропускания постоянна, $h = t_1 - t_4$;
- от $45,55^\circ$ до $68,53^\circ$ ($l = -0,5t_1 + t_3 + 0,5t_4 + l_c$) ширина светопропускания увеличивается, $h = 0,5t_1 - 0,5t_4 - l_c + l$;
- от $68,53^\circ$ до 90° ширина светопропускания постоянна, $h = t_3$.

По формуле (1) рассчитаны коэффициенты светопропускания для углов падения от 0° до 90° с подстановкой значений ширины светопропускания, полученных по расчетным формулам для каждого из четырех диапазонов регулирования. По результатам графоаналитического расчета на рис. 2 построена линия зависимости коэффициента светопропускания от угла падения (угловая характеристика светопропускания) для данного фильтра.

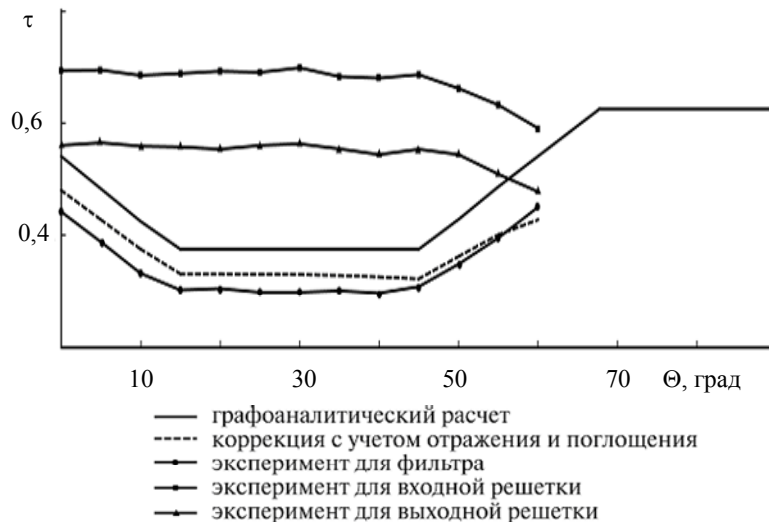


Рис. 2. Угловые характеристики светопропускания решеточного фильтра

На рис. 2 представлена также расчетная характеристика светопропускания, скорректированная с учетом угловой зависимости отражения и поглощения для наиболее интересного с практической точки зрения диапазона углов падения от 0° до 60° . Формула для коррекции коэффициента пропускания для фильтра плоскопараллельной формы получена из формул Френеля и закона Бугера–Ламберта:

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

где ρ – суммарный амплитудный коэффициент отражения с учетом перпендикулярно и параллельно поляризованных составляющих падающей световой волны, α – натуральный коэффициент поглощения стекла.

Эксперименты для фильтра с принятыми оптическими и геометрическими параметрами проведены с использованием расширенного коллимированного пучка лазерного излучения с длиной волны 532 нм. Скорректированная и экспериментальная характеристики фильтра имеют хорошую согласованность – среднее отклонение составляет 2,3%. Приведены также характеристики пропускания дополнительных образцов фильтра с входной и выходной решетками. Эти линии горизонтальны, что подтверждает независимость светопропускания от угла падения при применении только одной решетки. При приближении к 60° светопропускание этих образцов начинает падать из-за увеличения коэффициента отражения.

Графоаналитический расчет позволяет найти необходимые параметры решеток фильтра для получения требуемых в конкретном случае угловых характеристик светопропускания. При регулировании проходящего через окно солнечного излучения данный способ обеспечит оптимальные характеристики при любом азимуте ориентации окна по сторонам света, так как, в отличие от жалюзи с горизонтальными или вертикальными ламелями, чередующиеся полосы решеток фильтра можно располагать под любым углом.

Особенности применения способа регулирования светопропускания

На рис. 3 изображена линза со сферическими поверхностями с центрами в точках O_1 и O_2 и радиусами R_1 и R_2 , на поверхности которой нанесены чередующиеся поглощающие слои в форме колец (выделены толстыми линиями). Размеры и расположение колец на обеих поверхностях подобраны для обеспечения максимального пропускания параллельно падающих лучей при их соосном с осью линзы падении. При любом другом угле падения (штриховые линии) светопропускание уменьшается из-за попадания части преломленных лучей на поглощающие кольцевые полосы второй (выходной) решетки линзы-фильтра. По максимуму светопропускания можно определить угол падения лучей и ориентировать ось оптической системы по направлению к источнику света. Возможно использование криволинейных полос на поверхностях солнцезащитных очковых линз для ограничения попадания на сетчатку глаза лучей вредного, например, ультрафиолетового диапазона при определенных диапазонах углов падения лучей.

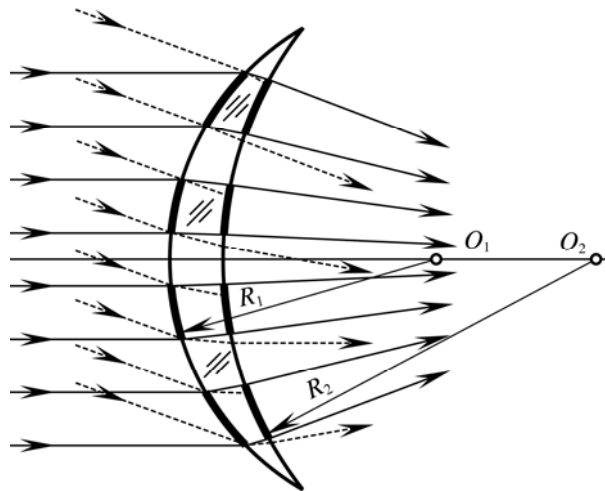


Рис. 3. Схема светопропускания сферической линзы с чередующимися кольцами

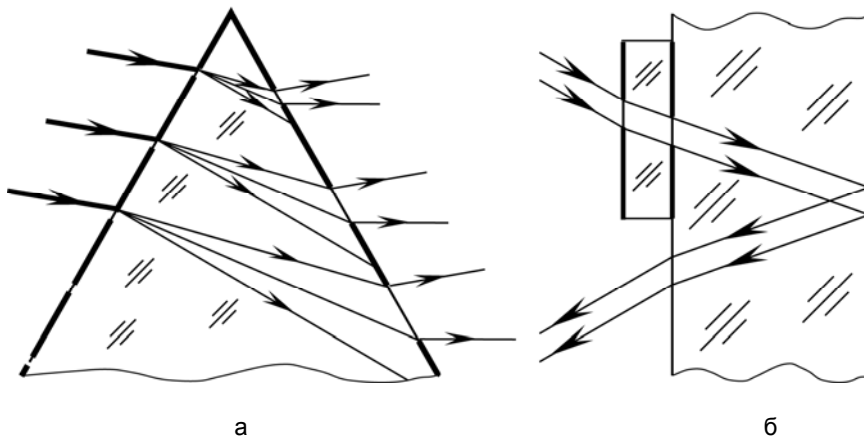


Рис. 4. Схема прохождения лучей через призму с чередующимися полосами (а); схема отражения лучей под заранее заданным углом (б)

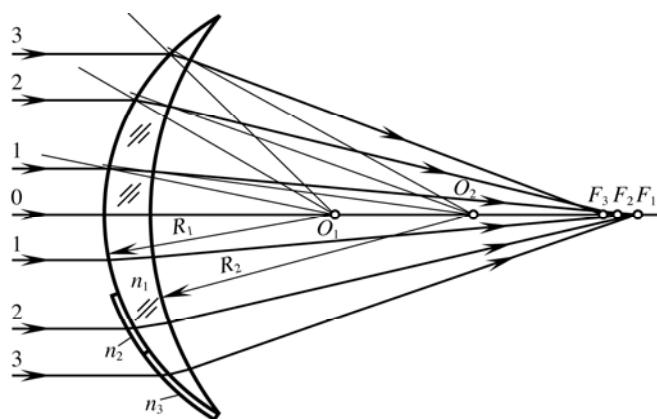


Рис. 5. Схема исправления сферической аберрации

На рис. 4 приведены примеры получения различных цветоцветовых эффектов. При падении параллельного пучка белого света на призму с чередующимися полосами за счет дисперсии достигается выборочное пропускание лучей определенного диапазона по длине волны (рис. 4, а). По схеме, представленной на рис. 4, б, обеспечивается видимость рисунка или надписи, нанесенных на зеркальную полосу внутренней поверхности остекленного объекта, под определенным и заранее заданным углом наблюдения. На внешнюю поверхность прикрепляется прозрачная пластина с чередующимися полосами, пропускающая падающий свет только под определенным углом (диапазоном углов). Для различения отраженного изображения от наблюдаемого напрямую пластина окрашивается, т.е. является светофильтром. Возможно применение данной схемы для защиты от подделок.

Для перераспределения направлений лучей, проходящих через остекленный объект, используются толстослойные чередующиеся полосы с разными показателями преломления. На рис. 5 изображена схема исправления сферической аберрации линзы с кольцевыми чередующимися полосами и уменьшающимися к краям линзы показателями преломления ($n_3 < n_2$). Показатель преломления стекла линзы n_1 ($n_2 < n_1$). На верхней половине разреза линзы показано прохождение лучей 1, 2 и 3 без участия полос. С удалением падающих лучей от оси аберрация усиливается – точка F_3 более отдалена от точки F_2 фокусирования параксиальных лучей 1 по сравнению с точкой F_2 (луч 0 проходит по оси линзы). Показатели преломления n_2 и n_3 и толщины полос подбираются так, чтобы лучи 2 и 3 также собирались в точке F_1 фокусировки параксиальных лучей (показано на нижней половине линзы). Подобную схему можно применить в очках при коррекции зрения для позонного распределения показателя преломления (вместо многофокальных линз), в светораспределителях осветительных приборов для изменения направлений световых потоков (вместо френелевских линз).

Рассмотренный способ обеспечивает селективное регулирование интенсивности и направления проходящего излучения в зависимости от углов падения с предварительной адаптацией к их изменению при известной траектории источника света или его расположении относительно остекленного объекта. Возможность ступенчатого распределения оптических и геометрических параметров чередующихся полос решеток позволяет достичь позонного регулирования светопропускания, в том числе с изменением спектра излучения.

Заключение

Графоаналитическим методом рассчитана зависимость коэффициента светопропускания от угла падения для плоскопараллельного фильтра. Установлена связь между оптическими и геометрическими параметрами чередующихся полос решеток фильтра и угловыми характеристиками его светопропускания. Расчетные и экспериментальные данные в диапазоне углов падения от 0° до 60° отличаются в среднем на 2,3%.

Рассмотрены особенности применения способа регулирования в архитектурном остеклении, в оптических и светотехнических устройствах. Дальнейшие исследования направлены на разработку технологии для обеспечения углового регулирования светопропускания окон без дополнительных средств перераспределения световых потоков.

Литература

1. Andersson A.M., Granqvist C.G., 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.* – 1989. – V. 28. – P. 3295–3302.
2. Sueda K., Tsubakimoto K., Miyana N., 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.* – 2005. – V. 44. – P. 3752–3758.

3. Andersen M., Rubin M., Powles R., Scartezzini J.-L. Bi-directional transmission properties of Venetian blinds: experimental assessment compared to ray-tracing calculations // *Solar Energy*. – 2005. – V. 78. – № 2. – P. 187–198.
4. Антонов И.Н., Закируллин Р.С., Малков А.И., Пожар М.С., Руссов В.М., Чакак А.А. Устройство для измерения распределения плотности энергии лазерного излучения. Авт. свид. СССР, кл. G01J 5/02.1988.
5. Гуриков В.А. Эрнст Аббе. – М.: Наука, 1985. – 228 с.
6. Трембач В.В. Световые приборы: Учеб. для вузов по спец. «Светотехника и источники света». – М.: Высшая школа, 1990. – 463 с.
7. Zakirullin R.S. Expedient of regulation of the directional gear transmission of light. Заявка США, кл. G02B 5/22.2011 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.wipo.int/patentscope/search/en/search.jsf>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 04.03.2013).
8. Закируллин Р.С. Способ регулирования направленного светопропускания. Заявка РФ, кл. G02B 5/20.2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet, свободный. Яз. рус. (дата обращения 04.03.2013).
9. Закируллин Р.С. Селективное регулирование направленного светопропускания по углам падения лучей // *ЖТФ*. – 2012. – Т. 82. – № 10. – С. 134–136.

Закируллин Рустам Сабирович

– Оренбургский государственный университет, кандидат технических наук, доцент, rustam.zakirullin@gmail.com