

Закируллин Р.С., Летута С.Н.
Оренбургский государственный университет
E-mail: rustam.zakirullin@gmail.com

РЕШЕТОЧНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ФИЛЬТР С УГЛОВЫМ СЕЛЕКТИВНЫМ СВЕТОПРОПУСКАНИЕМ

Представлен оптический фильтр с тонкопленочными решеточными слоями на обеих поверхностях прозрачной листовой подложки. Относительное расположение решеток с чередующимися пропускающими и поглощающими полосами обеспечивает угловую селективность светопропускания. Графоаналитическим методом расчета установлены закономерности влияния параметров фильтров плоскопараллельной и коаксиальной цилиндрической формы на результаты регулирования направленного светопропускания.

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

Введение

Регулирование направленного светопропускания остекленной конструкции или оптической системы в зависимости от угла падения лучей имеет большое практическое значение. Особенно оно востребовано в архитектуре и строительстве – угол падения прямых солнечных лучей на окно постоянно изменяется и для достижения оптимальных условий освещения и инсоляции необходимо контролировать проходящее в помещение излучение.

В настоящее время в «интеллектуальных» окнах [1] применяются смарт-стекла различных типов с тонкопленочными покрытиями [2], с фотохромными [3], электрохромными [4] и жидкокристаллическими [5] слоями. Однако применение этих передовых технологий, обеспечивая контроль интенсивности и спектра проходящего излучения, не позволяет достичь селективного регулирования по диапазонам углов падения лучей. Самопроизвольное изменение светопропускания, происходящее из-за угловой зависимости коэффициентов отражения в соответствии с формулами Френеля и поглощения по закону Бутера-Ламберта, не всегда является оптимальным. Поэтому для регулирования светопропускания с адаптацией к траектории солнца используются дополнительные устройства перераспределения световых потоков (жалюзи и т. п.). Новый подход к расчету параметров жалюзи приведен в [6].

В статье представлен решеточный оптический фильтр для углового селективного регулирования светопропускания без дополнительных устройств. Фильтр состоит из прозрачной листовой подложки с тонкослойными решетками

на обеих поверхностях. На каждой решетке направленно пропускающие полосы чередуются с поглощающими, отражающими или рассеивающими полосами. Угловая селективность светопропускания обеспечивается за счет взаимного расположения пропускающих полос входной и выходной поверхностей – при изменении углов падения меняется доля излучения, направленно проходящего через обе решетки фильтра. На данный способ регулирования светопропускания получен Патент Российской Федерации [7]. Оптические характеристики фильтра рассчитываются графоаналитическим методом. Установлены закономерности влияния на результаты регулирования геометрических параметров фильтров плоскопараллельной и коаксиальной цилиндрической формы.

1. Графоаналитический расчет плоскопараллельного фильтра

Взаимное расположение пропускающих полос на входной и выходной поверхностях (сдвиг решеток фильтра) зависит от характеристического угла, при котором падающий луч последовательно проходит через центры чередующихся полос обеих решеток. На рис. 1 приведена схема для графоаналитического расчета плоскопараллельного решеточного фильтра при падении параллельных лучей. Указаны границы направленного светопропускания через входную решетку фильтра при падении пучков 1 и 2. Пучок 1 падает под характеристическим углом фильтра. Шаги полос (суммарные ширины двух соседних чередующихся полос) на обеих решетках равны: $t_1 + t_2 = t_3 + t_4$.

Коэффициент светопропускания фильтра рассчитывается по формуле:

$$\tau = S/S_0, \quad (1)$$

где S – площадь части выходной поверхности, через которую проходят направленные лучи, S_0 – общая площадь входной поверхности. Для плоскопараллельного фильтра отношение площадей можно заменить отношением ширин соответствующих полос:

$$\tau = h/(t_1 + t_2), \quad (2)$$

где h – ширина полосы светопропускания (ширина части пропускающих полос выходной решетки, через которую преломленные лучи направленно проходят в пределах одного шага полос). Определяется через функцию смещения [8] – угловую зависимость смещения l преломленного луча на выходной поверхности относительно непреломленного луча при нормальном угле падения:

$$l = \frac{s \sin \Theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \Theta}}, \quad (3)$$

где n – показатель преломления стекла фильтра. Из рис. 1 видно, что через входную решетку независимо угла падения проходит одинаковая доля интенсивности падающего излучения, равная отношению ширины пропускающей полосы к шагу полос. Полоса света, прошедшая через входную решетку, после преломления передвигается вдоль выходной решетки, поглощающие полосы которой дополнительно блокируют часть лучей в зависимости от угла падения.

При графоаналитическом расчете составляются уравнения, связывающие ширины чередующихся полос с шириной полосы светопропускания при данном угле падения. По результатам расчетов по формуле (2) на рис. 2 построена угловая характеристика светопропускания плоскопараллельного фильтра с параметрами $n=1,5$; $s=4$ мм; $t_1=3$ мм; $t_2=1$ мм; $t_3=2,5$ мм; $t_4=1,5$ мм.

При анализе рис. 1 получены расчетные формулы для четырех угловых диапазонов с одинаковым характером изменения ширины полосы (по формуле (2) также и коэффициента светопропускания):

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

$$h = t_1 - t_4; \quad (5)$$

$$h = 0,5t_1 - 0,5t_4 - l_c + l; \quad (6)$$

$$h = t_3, \quad (7)$$

где l_c – смещение преломленного луча при характеристическом угле (l_1 на рис. 1).

Значения экстремальных углов, при которых меняется характер регулирования, вычисляются по формуле:

$$\Theta = \arcsin\left(\frac{nl}{\sqrt{s^2 + l^2}}\right), \quad (8)$$

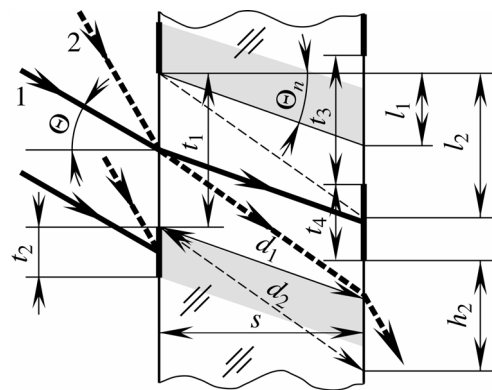
где смещения l при экстремальных углах находятся по формулам, также полученным при анализе рис. 1:

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

$$l = 0,5t_1 - 0,5t_4 + l_c; \quad (10)$$

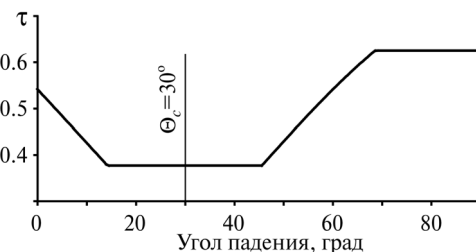
$$l = -0,5t_1 + t_3 + 0,5t_4 + l_c. \quad (11)$$

Формулы (2)–(11) справедливы для фильтров плоскопараллельной формы и при других геометрических параметрах решеток. Результаты численного моделирования и экспериментального исследования фильтров с различными



t_1 и t_2 – ширины пропускающих и поглощающих полос на входной решетке, t_3 и t_4 – то же, на выходной решетке; Q и Q_n – углы падения и преломления; s – толщина стекла; l_1 и l_2 – смещения преломленных лучей; d_1 и d_2 – длины путей прохождения преломленных лучей; h_2 – ширина полосы светопропускания для луча 2

Рисунок 1. Расчетная схема плоскопараллельного фильтра



Q_c – характеристический угол

Рисунок 2. Угловая характеристика светопропускания плоскопараллельного фильтра

ми геометрическими параметрами приведены в [9], [10]. При использовании в решетках фильтров рассеивающих или отражающих полос вместо поглощающих учитывается соответствующее перераспределение световых потоков.

2. Зависимость разности смещений преломленных лучей от характеристического угла падения

Формулы (4) и (6) для расчета участков убывания и возрастания ширины полосы светопропускания отличаются только знаками перед слагаемыми смещений преломленных лучей ($l_c - l$ и $l - l_c$). Следовательно, значение коэффициента светопропускания определяется разностью смещений при расчетном и характеристическом углах падения. На рис. 3 приведены зависимости этой разности от угла падения для характеристических углов фильтра через каждые 10° при убывании и возрастании ширины светопропускания. Разности смещений приведены в относительных единицах (отнесены к толщине стекла). Показатель преломления $n=1,5$.

Кривые эквидистантны, т. к. для одного и того же фильтра $l_c = \text{const}$. До углов падения примерно 60° линии практически линейны, что объясняется синусоидальной зависимостью функции смещения от угла падения по формуле (3) – в этом интервале синусы углов почти прямо пропорциональны значениям самих углов. Функция смещения имеет точку перегиба, положение которой зависит от показателя преломления стекла и определяется по второй производной функции смещения [8]:

$$\frac{d^2 l}{d\Theta^2} = \frac{sn^2 \sin \Theta (-n^2 + \cos(2\Theta) + 2)}{(n^2 - \sin^2 \Theta)^{\frac{5}{2}}}. \quad (12)$$

Для $n=1,5$ точки перегиба находятся при угле падения $37,75^\circ$. При убывании разности смещений кривые до точки перегиба обращены выпуклостью вверх, при возрастании – выпуклостью вниз, после точки перегиба – наоборот [8]. Следовательно, на рис. 2 оба наклонных участка линии регулирования обращены выпуклостью вверх. При углах падения более 60° синусоидальная зависимость ослабевает и кривые становятся более пологими.

При сравнении кривых для разных характеристических углов видно, что до угла 60° разности смещений через каждые 10° практически

одинаковы, что также является следствием синусоидальной зависимости функции смещения. Кроме того, при больших значениях характеристических углов слагаемые соответствующих смещений становятся более значимыми, чем слагаемые смещений при расчетных углах и разности смещений изменяются медленнее (соседние кривые расположены ближе друг к другу, особенно при характеристических углах 80° и 90°).

Из рис. 3 видно, что разность смещений всегда меньше, чем толщина стекла фильтра. Значение смещения было бы равно толщине стекла при угле преломления 45° (рис. 1), однако даже при угле падения 90° преломленный угол составляет лишь $41,81^\circ$.

3. Особенности расчета коаксиального цилиндрического фильтра

Графоаналитический метод расчета характеристик светопропускания применим не только для фильтров простейшей плоскопараллельной формы. Входная и выходная поверхности фильтра могут быть непараллельными плоскими или разного рода криволинейными. При сложном движении источника света и фильтра друг относительно друга (траектория солнца относительно окна) плоскость падения лучей постоянно изменяется, в отличие от рис. 1. В оптических системах и светотехнических устройствах возможны схемы с непараллельными падающими лучами.

На рис. 4 представлен общий случай – пучок непараллельных (расходящихся) лучей падает на фильтр с криволинейными поверхнос-

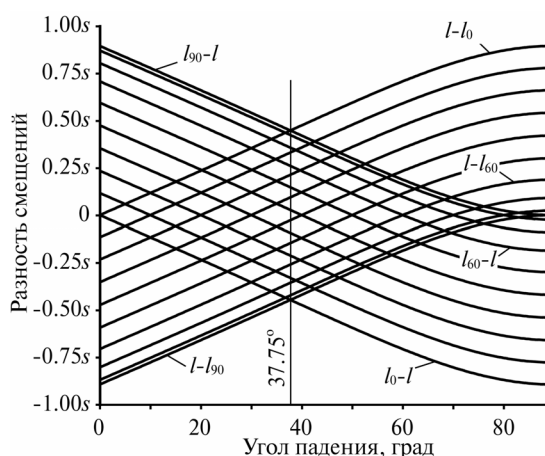


Рисунок 3. Зависимость разности смещений преломленных лучей от угла падения при разных характеристических углах фильтра

тями произвольной формы. При сложном движении источника света и/или фильтра устанавливается одно зафиксированное их взаимное положение – характеристическое, как аналог характеристического угла для плоского фильтра. Размеры и конфигурация чередующихся полос входной решетки выбираются предварительно. Определяются следы этих полос, образующиеся преломленными лучами, на выходной поверхности. Чередующиеся полосы выходной решетки (на рис. 4 точечными линиями выделены их границы) располагаются симметрично относительно этих следов при характеристическом положении источника света и фильтра. Для расчета коэффициента направленного светопропускания по формуле (1) при разных положениях источника света и фильтра определяются соответствующие площади.

На рис. 5 приведена расчетная схема фильтра с коаксиальными цилиндрическими поверхностями радиусами R_1 и R_2 (толщина стекла фильтра $s=R_2-R_1$). Пучок 1 параллельных лучей падает на входную поверхность под характеристическим углом Q_c , отсчитываемым от горизонтали. В отличие от плоскопараллельного фильтра, при одинаковых ширинах чередующихся полос (длинах дуг на рис. 5) входной решетки ширины полос выходной решетки возрастают по мере удаления от луча, проходящего через центральную ось цилиндрических поверхностей. Кроме того, возрастают также величины углов падения Q и преломления Q_n , смещений l и длин d путей прохождения преломленного луча. Фильтр с пропускающими полосами выходной решетки, совпадающими со следами пропускающих полос входной решетки (рис. 5), имеет максимум пропускания при характеристическом угле. Из рисунка видно, что при падении пучка 2 параллельных лучей под другим углом светопропускание уменьшается.

При анализе рис. 5 получена формула для расчета длины пути прохождения преломленного луча через стекло цилиндрического фильтра:

$$d = 0.5 \left[2R_2 \cos \left(\arcsin \left(\frac{\sin \Theta}{n} \right) \right) - \sqrt{\left(2R_2 \cos \left(\arcsin \left(\frac{\sin \Theta}{n} \right) \right) \right)^2 - 4(R_2^2 - R_1^2)} \right] \quad (13)$$

Смещение преломленного луча вычисляется по формуле:

$$l = \frac{d \sin \Theta}{n} \quad (14)$$

При расчете коэффициента светопропускания по формуле (1) отношение площадей в данном случае можно заменить отношением длин соответствующих дуг на входной и выходной поверхностях, а не в пределах одного шага полос, как в случае плоскопараллельного фильтра. Длина дуги L вычисляется по известной формуле:

$$L = \phi R, \quad (15)$$

где центральный угол ϕ выражен в радианах, R – радиус окружности (R_2 и R_1 на входной и выходной решетках).

Формулы (13)–(15) справедливы также для расчета параметров фильтра с концентри-

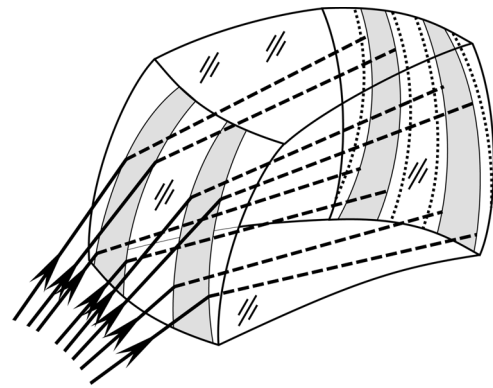
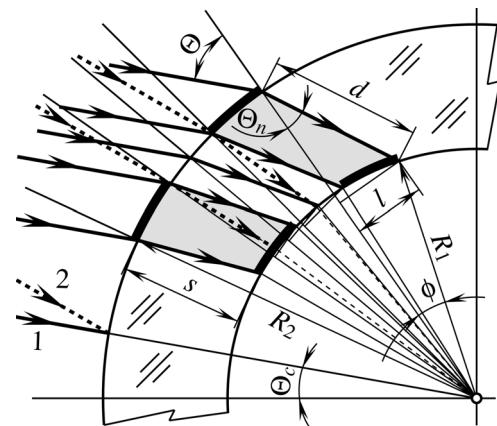


Рисунок 4. Схема определения следов чередующихся полос на выходной поверхности фильтра



Q и Q_n – углы падения и преломления; Q_c – характеристический угол; f – центральный угол; s – толщина стекла; l – смещение преломленного луча; d – длина пути прохождения преломленного луча; R_2 и R_1 – радиусы входной и выходной цилиндрических поверхностей

Рисунок 5. Схема для расчета коаксиального цилиндрического фильтра

ческими сферическими поверхностями в плоскостях падения лучей.

Заключение

Графоаналитический метод позволяет геометрическим путем определить угловую зависимость коэффициента направленного светопропускания при разных формах фильтра. Полученные закономерности необходимо учитывать при выборе геометрических параметров решеток фильтра для получения требуемых угловых селективных характеристик регулирования.

Предварительный подбор геометрических и оптических параметров чередующихся полос решеток дает возможность пред-адаптированного регулирования светопропускания фильтра при заранее известной траектории источника света. Предложенный способ лишен таких недостатков применяемых устройств перераспределения светового потока, как возможность регулирования только в двух режимах, необходимость ручного или автоматического управления, сложность совмещения с криволинейными и наклонными остекленными конструкциями.

22.09.2014

Список литературы:

1. Табунщиков, Ю.А. Окно как интеллектуальный элемент конструкции здания / Ю.А. Табунщиков // Энергосбережение. – 2008. – №2. – С.16–21.
2. Horowitz, F. Glass window coatings for sunlight heat reflection and co-utilization / F. Horowitz, M.B. Pereira, G.B. de Azambuja // Appl. Opt. – 2011. – Vol. 50. – P. 250–252.
3. Барачевский, В.А. Фотохромизм и его применение / В.А. Барачевский, Г.И. Лашков, В.А. Цехомский. – М.: Химия. – 1977. – 279 с.
4. Andersson, A.M. Electrochromic Li_xWO_3 /polymer laminate/ $\text{Li}_y\text{V}_2\text{O}_5$ device: toward an all-solid-state smart window / A.M. Andersson, C.G. Granqvist, J.R. Stevens // Appl. Opt. – 1989. – Vol. 28. – P. 3295–3302.
5. Control of spatial polarization by use of a liquid crystal with an optically treated alignment layer and its application to beam apodization / K. Sueda [et al.] // Appl. Opt. – 2005. – Vol. 44. – P. 3752–3758.
6. Bi-directional transmission properties of Venetian blinds: experimental assessment compared to ray-tracing calculations / M. Andersen [et al.] // Solar Energy. – 2005. – Vol. 78(2). – P.187–198.
7. Пат. 2509324 Российская Федерация. Способ регулирования направленного светопропускания / Закируллин Р.С. – №2012130148/28; заявл. 17.07.12; опубл. 10.03.14, Бюл. №7. – 3 с.
8. Закируллин, Р.С. Селективное регулирование направленного светопропускания по углам падения лучей / Р.С. Закируллин // ЖТФ. – 2012. – Т. 82. – №10. – С. 134–136.
9. Закируллин, Р.С. Оптический фильтр с угловой селективностью светопропускания / Р.С. Закируллин // Оптический журнал. – 2013. – Том 80. – Вып. 8. – С. 16–24.
10. Zakirullin, R.S. Grating optical filter for pre-adapted angular selective regulation of directional light transmission / R.S. Zakirullin // Proc. SPIE. – 2013. – Vol. 8785. – 87851P. – 15 p.

Сведения об авторах:

Летута Сергей Николаевич, проректор по научной работе Оренбургского государственного университета, профессор кафедры биофизики и физики конденсированного состояния, доктор физико-математических наук, профессор

460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, ауд. 171103а, e-mail: letuta@com.osu.ru

Закируллин Рустам Сабирович, доцент кафедры теплогазоснабжения, вентиляции и гидромеханики архитектурно-строительного факультета Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук

460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13, ауд. 3015, тел. (3532) 372426, e-mail: rustam.zakirullin@gmail.com