

07
Селективное регулирование направленного светопропускания по углам падения лучей

© Р.С. Закируллин

Оренбургский государственный университет,
 460018 Оренбург, Россия
 e-mail: rustam.zakirullin@gmail.com

(Поступило в Редакцию 22 ноября 2011 г.)

Описан новый способ регулирования светопропускания. Лучи проходят через направленно пропускающие полосы, чередующиеся с отражающими, поглощающими или рассеивающими. Взаимное расположение чередующихся полос на двух поверхностях обеспечивает селективность светопропускания по углам падения. Для оценки влияния геометрических и оптических параметров полос на характеристики регулирования предложен метод графоаналитического расчета.

Необходимость селективного регулирования направленного светопропускания в зависимости от угла падения лучей возникает при движении источника света и остекленной конструкции (окна, оптической системы и т.п.) друг относительно друга.

В последние годы идет активная разработка различных видов смарт-стекол [1,2], обеспечивающих изменение светопропускания в зависимости от условий окружающей среды (освещения — фотохромные [3] и температуры — термохромные) или за счет пропускаемого через стекло электрического тока (электрохромные, жидкокристаллические, стекла с мелкодисперсными частицами). Регулирование светопропускания в зависимости от углов падения лучей осуществляется только вследствие перераспределения коэффициентов отражения, поглощения и пропускания, что не всегда приводит к оптимальным характеристикам в тех или иных угловых диапазонах.

Для регулирования непосредственно по углам падения лучей применяются дополнительные устройства перераспределения светового потока (жалюзи, решетки и т.п.). Большинство таких устройств регулирует светопропускание только в двух режимах, их использование приводит к усложнению и удорожанию, к необходимости ручного или автоматического управления, к сложности совмещения с криволинейными остекленными конструкциями. Исследования направлены на рациональное решение перечисленных проблем без применения дополнительных устройств [4]. Основы способа регулирования описаны в международной заявке на изобретение [5].

На рис. 1 приведена схема для графоаналитического расчета направленного светопропускания плоскопараллельного стекла с чередующимися полосами на двух поверхностях. Разрезы пропускающих полос изображены тонкими линиями, рассеивающих — толстыми (возможна замена рассеивающих полос поглощающими или отражающими). Углы падения Θ_0 и преломления Θ_n изменяются по плоскости разреза.

Падающие под разными углами лучи 1 и 2 после преломления попадают на рассеивающую и пропуска-

ющую полосы выходной поверхности. Границы полос направленного пропускания при углах падения лучей 1 и 2 указаны соответственно сплошными и штриховыми линиями (через приемную поверхность независимо от углов падения проходит одинаковая часть падающих лучей). Эти границы передвигаются относительно чередующихся полос выходной поверхности при изменении углов падения, при этом изменяется соотношение проходящих и рассеянных лучей. Например, при угле падения луча 2 через стекло направленно проходит большая часть лучей по сравнению с лучом 1. Селективность светопропускания по углам падения обеспечивается взаимным расположением чередующихся полос на двух поверхностях.

Примем, что процент направленного светопропускания P_i , % без учета изменения коэффициента отражения и мощности падающего излучения, рассчитывается по формуле

$$P_i = 100S_i/S_0, \tag{1}$$

где S_i, m^2 — часть площади выходной поверхности, через которую при данном угле падения лучи проходят направленно; S_0, m^2 — площадь приемной поверхности.

На рис. 1 ширины пропускающих полос на приемной и выходной поверхностях составляют t_1 и t_3 , рассеивающих — t_2 и t_4 , м. Для равномерного регулирования по всей площади шага полос, т.е. суммы ширины двух

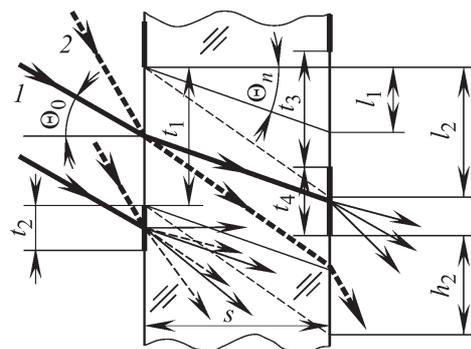


Рис. 1. Схема для расчета направленного светопропускания.

соседних полос, подбираются одинаковыми на обеих поверхностях: $t_1 + t_2 = t_3 + t_4$. Для плоскопараллельного стекла целесообразно вести расчеты в пределах одного шага полос и заменить отношение площадей в формуле (1) отношением ширин полос. Тогда

$$P_i = 100h_i / (t_1 + t_2), \quad (2)$$

где h_i, m — ширина полосы общего направленного светопропускания при данном угле падения. Значения h_i определяются путем анализа расчетной схемы (на рис. 1 для лучей 1 и 2 соответственно: $h_1 = t_1 - t_4$ и h_2). При увеличении угла падения от 0° ширина светопропускания уменьшается по формуле

$$h_i = 0.5t_1 - 0.5t_4 + l_1 - l_i, \quad (3)$$

где l_1 и l_i, m — смещения преломленных лучей на выходной поверхности относительно приемной соответственно для луча 1 (этот луч падает под характерным углом, проходя через центры чередующихся полос обеих поверхностей) и расчетного угла падения.

Угол падения, при котором самый нижний преломленный луч (на рис. 1), прошедший через пропускающую полосу приемной поверхности, касается нижней границы рассеивающей полосы на выходной является экстремальным. Смещение преломленного луча равно

$$l_i = -0.5t_1 + 0.5t_4 + l_1. \quad (4)$$

При дальнейшем увеличении угла падения ширина светопропускания не изменяется: $h_i = t_1 - t_4$. Аналогично исследуются все диапазоны углов в пределах $0-90^\circ$ с возрастающей, убывающей или постоянной шириной полосы общего направленного светопропускания и находятся формулы для ее расчета, а также для расчета смещения преломленного луча при экстремальных углах падения. Далее по формуле (2) рассчитывается процент направленного светопропускания.

Ширина светопропускания зависит от разности смещений при характерном и расчетном углах падения: $l_1 - l_i$ при убывании (формула (3)), соответственно $l_i - l_1$ при возрастании. Зависимость смещения преломленного луча от угла падения для плоскопараллельного стекла (функция смещения) при показателе преломления n и толщине стекла s, m получена из свойств тригонометрических функций и закона Снелла

$$l_i = \frac{s \sin \Theta_0}{n \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \Theta_0}{n^2}}}. \quad (5)$$

При увеличении толщины стекла пропорционально увеличиваются и значения смещений, при увеличении показателя преломления они уменьшаются. Величины экстремальных углов падения определяются путем подстановки значений смещений, полученных графоаналитическим путем по формулам, аналогичным формуле (4).

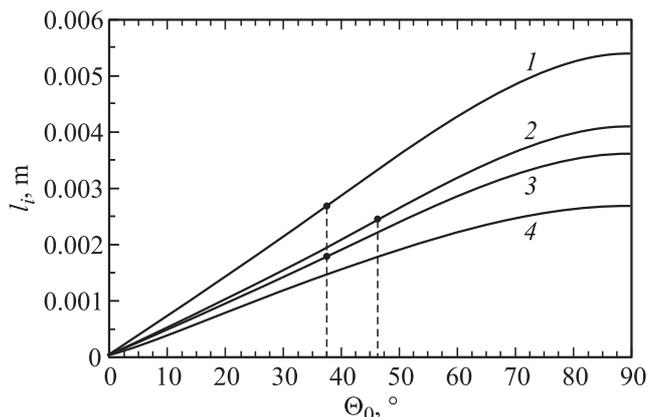


Рис. 2. Функция смещения преломленных лучей при толщине и показателе преломления стекла: 1 — $s = 0.006 m, n = 1.5$; 2 — $s = 0.004 m, n = 1.4$; 3 — $s = 0.004 m, n = 1.5$; 4 — $s = 0.004 m, n = 1.8$.

Полученная функция смещения существует и непрерывна в диапазоне углов падения $0-90^\circ$ для возможных значений показателя преломления (по данным [6] для стекла $1.47 < n < 1.76$) и является непрерывно возрастающей. На рис. 2 построены функции смещения преломленных лучей при разных показателях преломления и толщинах стекла. Найдены первая и вторая производные функции смещения

$$\frac{dl_j}{d\Theta_0} = \frac{s n^2 \cos \Theta_0}{(n^2 - \sin^2 \Theta_0)^{3/2}}, \quad (6)$$

$$\frac{d^2 l_i}{d\Theta_0^2} = \frac{s n^2 \sin \Theta_0 (-n^2 + \cos(2\Theta_0) + 2)}{(n^2 - \sin^2 \Theta_0)^{5/2}}. \quad (7)$$

Обе производные существуют и непрерывны в диапазоне углов $0-90^\circ$. По второй производной определены точки перегиба (указаны на рис. 2) функций смещения, положение которых зависит только от показателя преломления стекла, а не от его толщины. При $n = 1.8$ (4) точка перегиба отсутствует, так как в диапазоне углов падения $0-90^\circ$ вторая производная не может быть равна нулю (максимальный показатель преломления, при котором есть точка перегиба, $n = 1.73$). В диапазонах углов падения от 0° до углов при точках перегиба вторые производные положительны — функции смещения обращены вогнутостью вверх, далее до 90° вторые производные отрицательны — функции смещения обращены вогнутостью вниз.

Несмотря на то что функции смещения имеют участки вогнутости и выпуклости, в диапазоне от 0° до углов $60-70^\circ$ наблюдается практически прямая зависимость значений смещений от угла падения лучей, причем углы, при которых начинается заметное искривление линий (рис. 2), уменьшаются с увеличением показателя преломления. Это объясняется тем, что его влияние на значения смещений в формуле (5) становится относительно более значимым, чем влияние значений синусов

углов падения. При больших углах падения рост значений смещений замедляется, так как при неизменном показателе преломления на них влияют только синусы углов, которые с увеличением углов растут медленнее.

Таким образом, описанный способ позволяет селективно регулировать направленное светопропускание по углам падения лучей за счет оптически неоднородных поверхностей с чередующимися полосами. Возможность графоаналитического расчета характеристик регулирования значительно упрощает определение оптимальных геометрических и оптических параметров полос. Регулирование по диапазонам углов падения осуществляется без внешнего управления. Чередующиеся полосы могут иметь любые размеры и конфигурацию, что особенно важно для конструкций с криволинейными остекленными поверхностями, при позонном регулировании по площади конструкции и при сложном движении источника света и остекленного объекта друг относительно друга.

Список литературы

- [1] Табулицков Ю.А. // Энергосбережение. 2008. № 2. С. 16-21.
- [2] Research Frontiers Inc. // <http://www.smartglass.com/>.
- [3] Барачевский В.А., Лашков Г.И., Цехомский В.А. Фотохромизм и его применение. М.: Химия, 1977. 279 с.
- [4] Закируллин Р.С. // Вестн. Оренбургского гос. ун-та. 2011. № 6. С. 172–180.
- [5] Zakirullin R.S. // <http://www.wipo.int/pctdb/en/>. WO2011059360. 2011. 56 p.
- [6] Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.