

А. С. САУШИН, А. М. ЛЕЩЁВ, Г. М. МИХЕЕВ

## РАСЧЕТ НЕОСЛЕПЛЯЮЩЕГО СВЕТОДИОДНОГО СВЕТИЛЬНИКА

Предложена конструкция неослепляющего светодиодного светильника. Устранение ослепляющего эффекта достигается за счет установки пластин-отражателей, равномерно распределяющих излучение светодиодов по поверхности светильника. Произведен оптический расчет и определены геометрические параметры светильника из прозрачного стекла с показателем преломления 1,5.

**Ключевые слова:** светотехника, светодиоды, энергосберегающие технологии, осветительные устройства.

Одной из актуальных проблем, связанных с разработкой современных энергосберегающих технологий, является использование энергосберегающих ламп вместо ламп накаливания. Однако применение содержащих ртуть энергосберегающих ламп порождает другие проблемы, к которым относится, например, необходимость сбора и утилизации ламп, вышедших из строя, а также опасность отравления людей ртутью.

С другой стороны, появление в последние годы мощных светодиодов (например, Cree XLamp XM-L, Cree MX-3 и др.) позволило создавать компактные осветительные приборы с высокой яркостью и малым количеством потребляемой энергии. Срок службы светодиодных светильников составляет более 50—100 тыс. ч, что на порядок превышает срок службы энергосберегающих ламп. Существенным недостатком таких светодиодных осветительных приборов является их ослепляющее действие, вызванное мощностью светового потока, падающего на сетчатку глаза. Уменьшить световой поток и соответственно яркость источника света можно, увеличив площадь излучающей поверхности, что позволит избежать ослепляющего действия.

Конструкции светильников со сниженным ослепляющим эффектом известны [1—3], однако они имеют определенные недостатки. В частности, в конструкции светильника, предложенного в работе [2], предусмотрено использование защитного стекла с локальными и регулярными изменениями кривизны и толщины или оптических свойств. Такая конструкция светодиодного светильника ввиду сложности изготовления неоптимальна.

В настоящей статье рассматривается разработанная конструкция светодиодного светильника, не имеющего ослепляющего эффекта; в ее состав входят блок питания 1, корпус 2, крышка-рассеиватель 3, пластины-отражатели 4-1 — 4-7, плата 5, светодиоды 6, торцевая 7 и лицевая 8 отражающие пластины с высоким коэффициентом отражения света (рис. 1, а). Плата 5 установлена перпендикулярно плоскости корпуса; лицевая пластина 8 находится между пластинами-отражателями и корпусом, а торцевая пластина 7 устанавливается под углом  $45^\circ$  к корпусу. Функция уменьшения ослепляющего эффекта обеспечивается пластинами-отражателями, которые представляют собой частично отражающие пластины, разделенные друг от друга воздушным зазором. Пластины-отражатели установлены перпендикулярно к секущей плоскости (проходящей, в свою очередь, перпендикулярно через плату и плоскость корпуса) и наклонно к корпусу под различными углами  $\gamma$  в пространстве между корпусом и крышкой-рассеивателем.

Излучение светодиодов проходит через все пластины-отражатели, частично отражаясь на крышку-рассеиватель. Затем остаточное излучение отражается к крышке-рассеивателю от торцевой пластины 7. Таким образом, мощность излучения светодиодов распределяется по крышке-рассеивателю, что способствует устранению ослепляющего эффекта.

Для максимально равномерного распределения мощности излучения по крышке-рассеивателю необходимо, чтобы каждая пластина 4-1 — 4-7 отражала часть излучения определенной мощности и располагалась на определенном расстоянии от светодиодов. По этой же причине каждая пластина-отражатель должна иметь определенный коэффициент отражения, рассчитываемый по формуле

$$R_i = p_i / P_i,$$

где  $i=1, 2, 3 \dots$  — номер пластины в порядке удаления от светодиодов;  $p_i$  — мощность излучения, которое отражается от  $i$ -й пластины;  $P_i = P_{i-1} - p_i$  — мощность излучения, падающего на  $i$ -ю пластину.

В дальнейшем примем, что относительная изначальная мощность  $P_1=1$ .

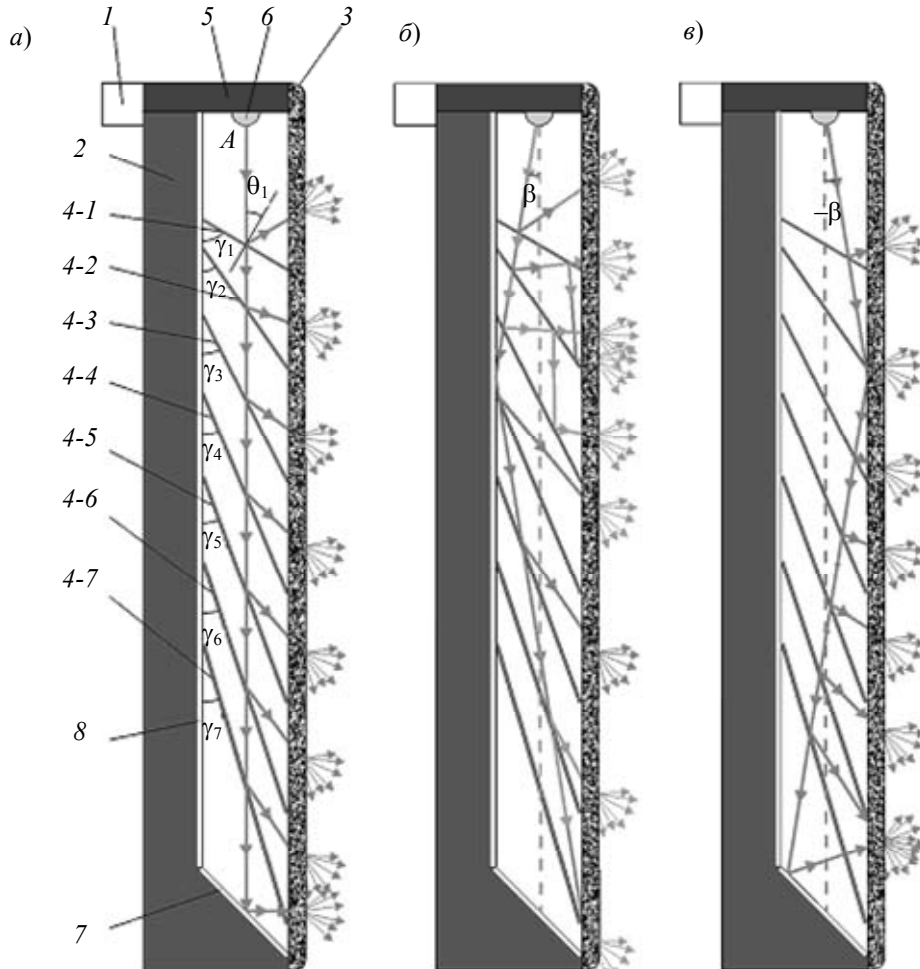


Рис. 1

Изготовить пластины с рассчитанными коэффициентами отражения можно нанесением просветляющих и отражающих покрытий, но этот способ является сложным и дорогостоящим. Поэтому предлагается задавать коэффициенты отражения пластин изменением угла падения на них излучения светодиодов.

Распределение мощности излучения каждого светодиода в пространстве определяется его диаграммой направленности. Обычно наибольшая интенсивность излучения светодиода приходится на центр его диаграммы направленности, следовательно, целесообразно рассчитывать коэффициенты отражения именно для центрального луча.

Как правило, излучение светодиодов неполяризовано, его можно рассматривать как совокупность излучения с  $s$ - и  $p$ -поляризацией. Коэффициент отражения для каждого типа поляризации определяется формулами Френеля и зависит от угла падения излучения на пластину-отражатель, а также от показателя преломления материала пластин.

Согласно работе [4] коэффициенты отражения для  $s$ -поляризации и для  $p$ -поляризации определяются как

$$r_s = \frac{\sin^2(\theta_i - \vartheta_i)}{\sin^2(\theta_i + \vartheta_i)}; \quad r_p = \frac{\operatorname{tg}^2(\theta_i - \vartheta_i)}{\operatorname{tg}^2(\theta_i + \vartheta_i)},$$

где  $\theta_i$  — угол падения излучения на  $i$ -ю пластину-отражатель,  $\vartheta_i$  — угол преломления падающего излучения, определяемый по закону Снеллиуса:

$$\vartheta_i = \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right),$$

здесь  $n$  — показатель преломления воздуха,  $n_i$  — показатель преломления материала пластин-отражателей.

Следует, однако, учитывать, что пластины-отражатели имеют две границы раздела сред, а следовательно, две отражающие поверхности. С учетом этого суммарные коэффициенты отражения пластин-отражателей определяются выражениями

$$R_s = r_s + \sum_{i=0}^{\infty} r_s^{2i+1} (1-r_s)^2, \quad R_p = r_p + \sum_{i=0}^{\infty} r_p^{2i+1} (1-r_p)^2.$$

Так как свет с взаимно-перпендикулярной поляризацией не интерферирует между собой, то интенсивность излучения — есть сумма интенсивностей  $s$ - и  $p$ -поляризаций. Таким образом, коэффициент отражения естественного света

$$R = \frac{R_s + R_p}{2}, \tag{1}$$

где

$$R_s(\theta_i) = \frac{\operatorname{tg}^2\left[\theta_i - \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]}{\operatorname{tg}^2\left[\theta_i + \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]} + \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\operatorname{tg}^2\left[\theta_i - \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]^{2i+1}}{\operatorname{tg}^2\left[\theta_i + \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]} \times$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{\operatorname{tg}^2\left[\theta_i - \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]}{\operatorname{tg}^2\left[\theta_i + \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]} \right\}^2, \tag{2}$$

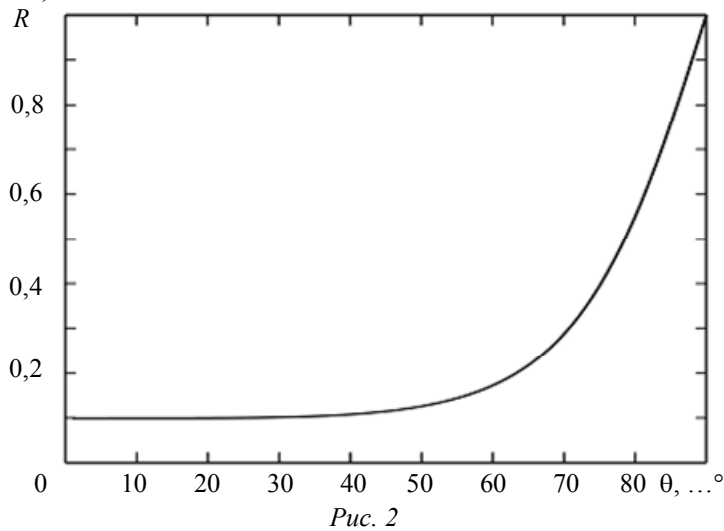
$$R_p(\theta_i) = \frac{\sin^2\left[\theta_i - \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]}{\sin^2\left[\theta_i + \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]} + \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\sin^2\left[\theta_i - \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]^{2i+1}}{\sin^2\left[\theta_i + \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]} \times$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{\sin^2\left[\theta_i - \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]}{\sin^2\left[\theta_i + \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]} \right\}^2. \tag{3}$$

Таким образом, суммарный коэффициент отражения пластин-отражателей определяется только показателем преломления их материала и углом падения излучения светодиодов.

Следовательно, для получения коэффициента отражения пластины требуется лишь выбрать угол  $\theta$ . С другой стороны, по формулам (2) и (3) при известном коэффициенте отражения  $R$  можно определить угол  $\theta$ . Однако найти простое аналитическое выражение зависимости  $\theta$  от  $R$  не представляется возможным, поэтому целесообразно воспользоваться численными методами.

Зависимость суммарного коэффициента отражения естественного света от угла падения излучения представляет собой монотонную возрастающую функцию (рис. 2 — зависимость  $R(\theta)$  при показателе преломления стекла 1,59). Следовательно, для расчета угла падения излучения можно применить метод дихотомии [5] (последовательное деление на две части, не связанные между собой).



В данном случае предварительно необходимо выбрать марку стекла и задать требуемый суммарный коэффициент отражения  $R$ , который не может быть меньше чем  $R(\theta=0)$ . Затем методом дихотомии подбирается угол, соответствующий заданному коэффициенту отражения первой пластины. Далее следует рассчитать мощность излучения, прошедшего через первую пластину. Здесь следует учитывать, что коэффициенты отражения для  $s$ - и  $p$ -поляризаций различны, поэтому мощность излучения для обеих поляризаций также будет различна:

$$P_{si} = P_{si-1} - R_{si-1}; \quad P_{pi} = P_{pi-1} - R_{pi-1},$$

где  $P_{si}$  и  $P_{pi}$  — мощность излучения, прошедшего через пластину  $i-1$  для  $s$ - и  $p$ -поляризаций соответственно;  $P_{si-1}$  и  $P_{pi-1}$  — мощность излучения, падающего на пластину  $i-1$  для  $s$ - и  $p$ -поляризаций соответственно,  $R_{si-1}$  и  $R_{pi-1}$  — коэффициенты отражения пластины  $i-1$  для  $s$ - и  $p$ -поляризаций соответственно, для удобства расчетов  $P_{s1}=1$  и  $P_{p1}=1$ .

Коэффициенты отражения следующей пластины необходимо рассчитывать с учетом мощности падающего на нее излучения, т.е. задавать такое значение коэффициента  $R$ , чтобы  $P_i R_i = P_{i-1} R_{i-1}$ . Таким образом, суммарные коэффициенты отражения для  $s$ - и  $p$ -поляризаций будут определяться как

$$R_{si} = \left( r_{si} + \sum_{i=0}^{\infty} r_{si}^{2i+1} (1-r_{si})^2 \right) P_{si-1}, \quad R_{pi} = \left( r_{pi} + \sum_{i=0}^{\infty} r_{pi}^{2i+1} (1-r_{pi})^2 \right) P_{pi-1}.$$

При этом искомый угол  $\theta_i$  определяется из того же условия (1) методом дихотомии. Расчет следует производить до тех пор, пока мощность отраженного пластиной излучения не превысит мощность излучения, прошедшего через пластину. Таким образом, можно определить углы падения излучения для всех пластин-отражателей.

Для равномерного распределения мощности излучения по крышке-рассеивателю необходимо расположить пластины-отражатели так, чтобы расстояния  $d$  между местами падения

центрального луча  $A$  светодиодов, отраженного от каждой пластины, на крышку-рассеиватель были одинаковыми. Расстояние  $d$  будет определяться как

$$d = L_0 / N,$$

где  $L_0$  — длина крышки-рассеивателя,  $N$  — количество пластин-отражателей включая торцевую отражающую пластину.

Расстояние от светодиодов до каждой пластины-отражателя рассчитывается по формуле

$$D_i = di - \frac{L_2}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \theta_i\right)} - \frac{L_1 - L_2}{\cos\left(2\theta_i - \frac{\pi}{2}\right)} \sin\left(2\theta_i - \frac{\pi}{2}\right),$$

где  $L_1$  — расстояние от корпуса до крышки-рассеивателя,  $L_2$  — расстояние от корпуса до центра светодиодов (рис. 3).

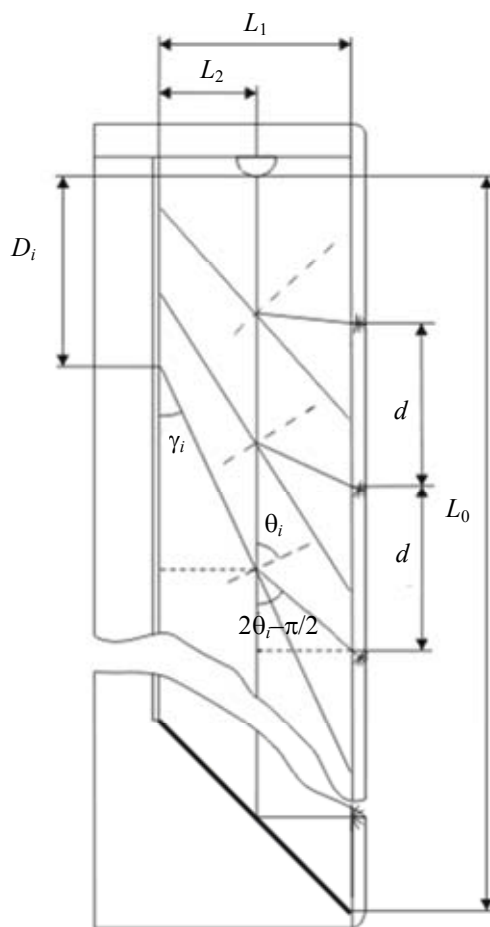


Рис. 3

Следует отметить, что нецентральные лучи, расходящиеся из светодиодов, например лежащие под углом  $\beta$  к центральному, тоже будут проходить через пластины-отражатели, частично отражаясь к крышке-рассеивателю. Лучи, лежащие под большими углами к центральному лучу, будут отражаться от лицевой пластины  $\delta$  (см. рис. 1, б) и могут частично отражаться от крышки-рассеивателя (см. рис. 1, в), что также будет способствовать уменьшению ослепляющего эффекта.

В соответствии с изложенным способом были рассчитаны параметры светодиодного светильника размером  $30 \times 75 \times 150$  мм, состоящего из одного ряда восьми светодиодов МХЗАУТ-А1-0000-000СЕЗ (производства компании “Cree”, США). Излучающая поверхность каждого светодиода — круг диаметром 4,2 мм при угловой ширине пучка, равной  $120^\circ$ . Частично отражающие пластины (7 шт.), выполненные из прозрачного оптического стекла

толщиной 0,5 мм с показателем преломления 1,5, расположены по отношению к корпусу под углами  $\gamma_1 = 36^\circ$ ,  $\gamma_2 = 29^\circ$ ,  $\gamma_3 = 24^\circ$ ,  $\gamma_4 = 19^\circ$ ,  $\gamma_5 = 16^\circ$ ,  $\gamma_6 = 13^\circ$ ,  $\gamma_7 = 10^\circ$ . При условии, что расстояние  $L_1=20$  мм, расстояние  $L_2=10$  мм. Расстояния от светодиодов до каждой пластины-отражателя соответственно равны:  $D_1=0$ ,  $D_2=10,6$  мм,  $D_3=20$  мм,  $D_4=28,1$  мм,  $D_5=34,8$  мм,  $D_6=38,7$  мм,  $D_7=31,6$  мм. Торцевая и лицевая отражательные пластины выполнены из алюминиевой фольги, а крышка-рассеиватель изготовлена из поликарбоната с матовой поверхностью. При номинальном токе питания светодиодов 350 мА данный светодиодный светильник обеспечивает равномерное освещение, при этом ослепляющий эффект отсутствует.

Таким образом, применяя предложенную относительно простую конструкцию, можно создавать светильники без ослепляющего эффекта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 102749U1 РФ. Светильник / А. Г. Младенец, А. Г. Балабанов, Р. Р. Шаймухаметов. 20.04.2010.
2. Пат. 110816U1 РФ. Светильник светодиодный / А. Г. Младенец, А. Г. Балабанов. 24.06.2011.
3. Пат. 2401395C1 РФ. Светильник с отражателями / Е. В. Смолин. 06.03.2009.
4. Ландсберг Г. С. Оптика: Учеб. пособие. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 848 с.
5. Калиткин Н. Н. Численные методы: Учеб. пособие. М.: Наука, 1978. 512 с.

#### *Сведения об авторах*

- Александр Сергеевич Саушин** — аспирант; Институт механики УрО РАН, лаборатория лазерных методов исследований, Ижевск; E-mail: 56-i@mail.ru
- Алексей Михайлович Лещёв** — ООО „Айрин Лайт“, Воткинск; директор; E-mail: alexei555@gmail.com
- Геннадий Михайлович Михеев** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Институт механики УрО РАН, лаборатория лазерных методов исследований, Ижевск; E-mail: mikheev@udman.ru

Рекомендована  
Институтом механики УрО РАН

Поступила в редакцию  
04.12.12 г.